



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Carla Tognato de Oliveira

**Da Complexidade à Aplicação: Uma Proposta Metodológica para Seleção de Indicadores
de Economia Circular**

Florianópolis
2025

Carla Tognato de Oliveira

Da Complexidade à Aplicação: Uma Proposta Metodológica para Seleção de Indicadores de Economia Circular

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental para a obtenção do título de doutora em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.

Coorientador: Prof. Rodrigo de Almeida Mohe-
dano, Dr.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Oliveira, Carla Tognato de
Da Complexidade à Aplicação : Uma Proposta Metodológica
para Seleção de Indicadores de Economia Circular / Carla
Tognato de Oliveira ; orientador, Sebastião Roberto
Soares, coorientador, Rodrigo de Almeida Mohedano, 2025.
269 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Economia Circular. 3.
Indicadores de circularidade. 4. Estrutura Metodológica. I.
Soares, Sebastião Roberto . II. Mohedano, Rodrigo de
Almeida. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Carla Tognato de Oliveira

**Da Complexidade à Aplicação: Uma Proposta Metodológica para Seleção de Indicadores
de Economia Circular**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Dra
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Alexandra Rodrigues Finotti, Dra
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Simone Sehnem, Dra
Universidade do Oeste de Santa Catarina e Universidade do Sul de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutora em Engenharia Ambiental.

Profa. Alexandra Rodrigues Finotti, Dra
Coordenadora do Programa

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2025.

Este trabalho é dedicado aos meus amores, Lucas e Alice.

AGRADECIMENTOS

Parece que passou uma vida por esses anos de doutorado. O aprendizado foi constante, tanto no contexto profissional quanto no pessoal.

No contexto profissional, gostaria de agradecer aos meus orientadores Sebastião Roberto Soares e Rodrigo de Almeida Mohedano pela manifestação de apoio, pela compreensão por algumas dilatações, pelo aconselhamento assertivo e pelo estímulo, que contribuiu para aumentar o desafio e melhorar a clareza da investigação.

Ao PPGEA e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, seus docentes e funcionários, que me acompanham no meu percurso acadêmico que abrange minha graduação, pós-graduação e no momento em que fui professora substituta. Assim, contribuindo em todas as fases da minha vida profissional, tornando-me a profissional que sou hoje.

Também agradeço à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela Bolsa de Doutorado concedida, que possibilitou a realização deste projeto de investigação.

Nesses anos de doutorado aconteceram tantas mudanças na minha vida pessoal. Mas, mesmo com diversas mudanças, existem algumas pessoas que, não importando onde eu esteja, estarão sempre no meu coração. Sendo assim, agradeço aos meus pais, Cynthia e Carlos Augusto, e ao meu irmão, Gustavo, por me aturarem reclamando da vida de doutoranda por tanto tempo. Agradeço ao meu amado Lucas. Meu parceiro de aventuras e de vida. Ele está ao meu lado em todos os momentos, com palavras de incentivo e muita paciência, me fazendo acreditar que posso mais do que imagino. Por ter me proporcionado a oportunidade de constituir a nossa família. De ter adotado comigo, ainda na fase de mestrado, os nossos três gatos e, na fase do doutorado, ter se tornado esse paizão da nossa gatinha Alice.

À Fabi, Yuki, Ju e Paulinha, fica meu agradecimento. O aprendizado com essas mulheres é constante. Desde a faculdade, há muito amor e cumplicidade envolvidos. Os encontros são cada vez mais raros, porém o papo não tem fim!

O CICLOG me proporcionou amizades sem igual. O grupo deu um suporte incrível para eu estar aqui hoje. Foram muitas risadas, desabafos, incentivos e cafés.

Sou grata pela oportunidade de ter pessoas maravilhosas na minha vida!

RESUMO

O modelo econômico linear vigente tem gerado impactos ambientais significativos, reforçando a necessidade de transição das empresas para a Economia Circular (EC). Contudo, a ausência de métricas padronizadas dificulta a avaliação e o acompanhamento dessa transição, evidenciando a importância de indicadores apropriados para medir o desempenho circular. O objetivo geral deste estudo foi desenvolver uma proposta metodológica para apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas, fornecendo suporte à tomada de decisões estratégicas voltadas à circularidade. Especificamente, buscou-se (i) definir categorias analíticas que permitam organizar e comparar os sistemas existentes de indicadores de circularidade; (ii) analisar e classificar os indicadores identificados com base nessas categorias; e (iii) consolidar uma proposta metodológica que integre essas etapas em um processo estruturado para apoiar a seleção de indicadores em contextos empresariais. Metodologicamente, a pesquisa seguiu uma abordagem estruturada em fases: inicialmente realizou-se uma revisão sistemática da literatura conforme o método PRISMA para identificação dos sistemas de indicadores de circularidade existentes. Em seguida, foi desenvolvida uma categorização qualitativa dessas métricas, analisadas segundo contexto específico, indicadores, métodos adotados, sustentabilidade, além de elementos e estratégias da EC. O processo contou também com a aplicação do método FAHP (*Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) para definição de prioridades entre categorias e exemplificação da seleção de indicadores. Entre os resultados, observou-se a existência de múltiplos sistemas e indicadores, porém sem consenso claro sobre escopos, objetivos e abordagens. Destacou-se que muitas métricas enfatizam principalmente a reciclagem, com poucos sistemas cobrindo integralmente todos os princípios da EC e ainda menos integrando efetivamente as três dimensões da sustentabilidade (ambiental, econômica e social). Constatou-se também a necessidade de indicadores mais consistentes e padronizados para facilitar sua implementação pelas empresas. Como principal contribuição, o estudo consolidou uma proposta metodológica robusta e adaptável, integrando diferentes sistemas de indicadores de circularidade e oferecendo às empresas um guia estruturado para selecionar indicadores adequados ao seu contexto. Dessa forma, promove uma transição mais consistente para modelos de negócios circulares e possibilita integração com outras políticas empresariais. Contudo, a pesquisa destaca limitações, como a ausência de validação prática da proposta em empresas reais, o que representa uma oportunidade para estudos futuros. Além disso, a predominância de indicadores acadêmicos indica a necessidade de incluir métricas mais específicas para setores industriais.

Palavras-chave: economia circular; indicadores de circularidade; proposta metodológica.

ABSTRACT

The prevailing linear economic model has generated significant environmental impacts, reinforcing the need for companies to transition towards a Circular Economy (CE). However, the absence of standardized metrics hampers the evaluation and monitoring of this transition, highlighting the importance of appropriate indicators to measure circular performance. The general objective of this study was to develop a methodological proposal to support the selection of circularity indicators in companies, providing guidance for strategic decision-making towards circularity. Specifically, the research aimed to: (i) define analytical categories to organize and compare existing systems of circularity indicators; (ii) analyze and classify the identified indicators based on these categories; and (iii) consolidate a methodological proposal integrating these steps into a structured process to support the selection of indicators in business contexts. Methodologically, the research followed a structured multi-phase approach. First, a systematic literature review was conducted according to the PRISMA method to identify existing systems of circularity indicators. Subsequently, a qualitative categorization of these metrics was developed, analyzed according to specific context, indicator characteristics, adopted methods, sustainability dimensions, as well as circular economy elements and strategies. The process also involved the application of the FAHP (*Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) to establish priorities among categories and to exemplify the selection of indicators. The results revealed the existence of multiple systems and indicators, but without clear consensus regarding scope, objectives, and approaches. It was observed that many metrics emphasize recycling, with only a few systems covering all CE principles comprehensively, and even fewer effectively integrating the three dimensions of sustainability (environmental, economic, and social). The study also highlighted the need for more consistent and standardized indicators to facilitate their implementation by companies. As its main contribution, the study consolidated a robust and adaptable methodological proposal, integrating different systems of circularity indicators and offering companies a structured guide to select indicators aligned with their context. In doing so, it fosters a more consistent transition towards circular business models and enables integration with other corporate sustainability policies. Nevertheless, the research acknowledges limitations, such as the absence of practical validation of the proposal in real companies, which opens opportunities for future studies. Furthermore, the predominance of academically derived indicators highlights the need to incorporate more sector-specific metrics from industry practices.

Keywords: circular economy; circularity indicators; methodological proposal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura da tese	35
Figura 2 – Estrutura da fundamentação teórica	37
Figura 3 – Estágios do pensamento de ciclo de vida	41
Figura 4 – Ciclo de vida de produto e/ou serviço	42
Figura 5 – Processos dos recursos técnicos e biológicos na Economia Linear e na Circular	48
Figura 6 – Fases da pesquisa, procedimentos metodológicos e resultados esperados . .	58
Figura 7 – Procedimento de revisão de literatura de acordo com o método PRISMA. . .	59
Figura 8 – Método PRISMA para definição das categorias qualificatórias.	62
Figura 9 – Estrutura geral da proposta metodológica	73
Figura 10 – Estruturação do processo do método FAHP	74
Figura 11 – Função do número fuzzy triangular M	77
Figura 12 – Distribuição das publicações ao longo dos anos	84
Figura 13 – Publicações das revisões ao longo dos anos	96
Figura 14 – Sistema de indicadores material e setor específico	103
Figura 15 – Recorte da fonte dos sistema de indicadores	104
Figura 16 – Indústrias destacadas por mais de um sistema de indicadores	105
Figura 17 – Sistemas que apresentam informação sobre o tamanho da empresa que avaliam	106
Figura 18 – Países que os sistemas de indicadores abrangem	107
Figura 19 – Formato da medição de circularidade dos sistemas de indicadores	115
Figura 20 – Detalhamento dos sistemas de indicadores por unidades mais utilizadas . . .	116
Figura 21 – Sistemas que podem ser utilizados para Tomada de decisão, Comunicação, Informação e Abordagem participativa	117
Figura 22 – Sistemas por foco temporal	117
Figura 23 – Tipo de indicador	118
Figura 24 – Variáveis utilizadas pelos sistemas de indicadores	119
Figura 25 – Sistemas de indicadores com mais de uma abordagem de modelagem	126
Figura 26 – Sistemas de indicadores segundo definição e estratégias de EC	127
Figura 27 – Distribuição dos sistemas por pilares de sustentabilidade	132
Figura 28 – Distribuição dos sistemas de indicadores por níveis e ciclo de vida	141
Figura 29 – Distribuição dos sistemas de indicadores por princípios da economia circular	143
Figura 30 – Categorização dos sistemas por uso e fabricação de produtos mais inteligentes	149
Figura 31 – Categorização dos sistemas por estender a vida útil dos produtos e suas peças	150
Figura 32 – Categorização dos sistemas por estender a vida útil dos produtos e suas peças	151
Figura 33 – Resumo dos resultados das estratégias, princípios da EC e ODS.	182
Figura 34 – Os oito sistemas de indicadores categorizados pelas estratégias de EC. . . .	184

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3R	Reduzir, Reutilizar e Reciclar.	90
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida.	75
AECV	Avaliação Econômica do Ciclo de Vida.	120
AFM	Análise de Fluxo de Material.	93
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	54
APL	<i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i>	87
ASCV	Avaliação Social do Ciclo de Vida.	124
BCI	<i>Building Circularity Indicators</i>	87
BIM	Modelagem de Informação da Construção.	120
BPI	<i>End of Life Best Practice Indicators</i>	87
BSI	<i>British Standards Institution</i>	120
BWPE	<i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i>	87
C2C	<i>Cradle to Cradle</i>	41
CAM	<i>Circularity Assessment Model</i>	87
CBA	<i>Circular Building Assessment Prototype</i>	87
CBM-IS	<i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i>	87
CC	<i>Circularity Calculator</i>	87
CEENE	Extração cumulativa de exergia do ambiente natural.	121
CE-PCF	<i>Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms</i>	88
CEBI	<i>Circular Economy Benefit Indicators</i>	87
CEI	<i>Circular Economy Index</i>	87
CEIP	<i>Circular Economy Indicator Prototype</i>	87
CEMS	<i>Circular Economy Measurement Scale</i>	87
CET	<i>Circular Economy Toolkit</i>	87
CEV	<i>Circular Economic Value</i>	87
CG	<i>Circular Gap</i>	87
Check	<i>Circularity Check</i>	87
CI	<i>Circularity Index</i>	87
CICLOG	Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida.	75
CLC	<i>Closed Loop Calculator</i>	87
CMT	<i>Circularity Measurement Toolkit</i>	87
CP	<i>Circular Pathfinder</i>	87
CPI	<i>Circular Economy Performance Indicator</i>	87
CTI	<i>Circular Transition Indicators</i>	87

CYT	<i>Circulytics.</i>	87
DRM	<i>Design Research Methodology.</i>	57
eDIM	<i>Ease of Disassembly Metric.</i>	87
EEA	<i>European Environmental Agency.</i>	31
EEI	<i>Economic-Environmental Indicators.</i>	87
EER	<i>Economic-Environmental Remanufacturing.</i>	87
EoL	<i>End of Life.</i>	87
EoLi	<i>EoL indices.</i>	87
ESG	<i>Ambiental, Social e Governança.</i>	69
FAHP	<i>Fuzzy Analytical Hierarchy Process.</i>	74
FdV	<i>Fim de Vida.</i>	41
FPI	<i>Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators.</i>	87
GDM	<i>Grey Decision Making.</i>	123
GEE	<i>Gases de efeito estufa.</i>	71
GRI	<i>Global Report Initiative.</i>	122
GRInd	<i>Global Resource Indicator.</i>	88
IOBS	<i>Input-Output Balance Sheet.</i>	88
L&C	<i>Longevity and Circularity.</i>	88
MCDA	<i>Multiple-criteria decision analysis.</i>	53
MCEM-PLCS	<i>Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies.</i>	88
MCI	<i>Material Circularity Indicator.</i>	88
MECI	<i>Material and Energy Circularity Indicators.</i>	88
MESCS	<i>Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets.</i>	88
MFCA	<i>Contabilidade de Custos de Fluxo de Materiais.</i>	95
MI	<i>Mine site MFA Indicator.</i>	88
MIPS	<i>Material Input per Service Delivered.</i>	88
MIS	<i>Multidimensional Indicator Set.</i>	88
MOST	<i>Maynard operation sequence technique.</i>	121
MRS	<i>Material Reutilization Score.</i>	237
ODS	<i>Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.</i>	69

PCIP	<i>Product Circularity Improvement Program.</i>	88
PCM	<i>Product-Level Circularity Metric.</i>	88
PCV	Pensamento de Ciclo de Vida.	40
PME	Pequenas e Médias Empresas.	91
PRDI	<i>Product Recycling Desirability Index.</i>	88
PR-MCDT	<i>Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool.</i>	88
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses.</i>	59
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations.</i>	54
PRP	<i>PRP Circular e-Procurement Tool.</i>	88
PS	Pensamento Sistêmico.	37
QC	<i>Circularity of Material Quality.</i>	87
QUALIFLEX	<i>qualitative flexible.</i>	122
RBR	Taxa de Benefícios de Reciclabilidade.	120
RCBR	Taxa de Benefícios de Conteúdo Reciclado.	89
RDI	<i>Resource Duration Indicator.</i>	88
REAPro	<i>Resource Efficiency Assessment of Products.</i>	88
RI	<i>Recycling Indices for the Circular Economy.</i>	88
RPI	<i>Reuse Potential Indicator.</i>	88
SCI	<i>Sustainable Circular Index.</i>	88
SIAS	<i>Set of Indicators to Assess Sustainability.</i>	88
SICED	<i>Systems Indicators for Circular Economy Dashboard.</i>	88
SP	<i>Sustainability Profit.</i>	122
SPI	<i>Sustainability Performance Indicators.</i>	88
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.</i>	54
UE	União Europeia.	92
VIKOR	<i>Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje.</i>	122
WCI	<i>Improved Water Circularity Index.</i>	88
WEEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos.	93
ZWP	<i>Expended Zero Waste Practice Model.</i>	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Critério de elegibilidade da literatura	60
Quadro 3.2 – Critério de elegibilidade da segunda revisão de literatura	62
Quadro 3.3 – Divisão das categorias levantadas	64
Quadro 3.4 – Estrutura hierárquica para a proposta metodológica	75
Quadro 3.5 – Termos linguísticos e os números <i>fuzzy</i> triangulares correspondentes	76
 Quadro 4.1 – Distribuição geográfica das publicações	 85
Quadro 4.2 – Sistemas de indicadores de circularidade de níveis nano e micro	87
Quadro 4.3 – Distribuição geográfica das publicações referentes a categorias	97
Quadro 4.4 – Sistemas de indicadores apresentados pelo seu contexto	98
Quadro 4.5 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pelas suas caracte- rísticas	108
Quadro 4.6 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pela sua metodologia	120
Quadro 4.7 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pela abordagem de sustentabilidade	128
Quadro 4.8 – Sistemas de indicadores de circularidade caracterizados pelos elementos da EC	135
Quadro 4.9 – Sistemas de indicadores de circularidade caracterizados pelas estratégias da EC	145
Quadro 4.10–Peso dos conjuntos e categorias	153
Quadro 4.11–Categorias principais para consolidação da proposta metodológica	154
Quadro 4.12–Sistemas de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Contexto	155
Quadro 4.13–Sistemas de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Sustenta- bilidade	156
Quadro 4.14–Sistema de indicadores que se enquadram no ranking - conjuntos Indicador e Metodologia	157
Quadro 4.15–Sistema de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Estratégias da EC	158
Quadro 4.16–Sobreposição de indicadores	160
Quadro 4.17–Conjunto final de indicadores de circularidade	162
Quadro 4.18–Classificação dos indicadores do conjunto entre obrigatórios e optativos . .	166
Quadro 4.19–Indicadores de nível sistêmico micro	168
Quadro 4.20–Indicadores de nível sistêmico nano	169
Quadro 4.21–Indicadores que envolvem mais de um estágio de ciclo de vida	171
Quadro 4.22–Indicadores que envolvem apenas um estágio de ciclo de vida	173
Quadro 4.23–Indicadores que dependem do escopo para definição do estágio de ciclo de vida	174

Quadro D.1 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Material	247
Quadro D.2 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Econômico	247
Quadro D.3 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Social	248

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice médio de consistência aleatória	79
---	----

SUMÁRIO

	Lista de Quadros	19
	Lista de tabelas	21
1	INTRODUÇÃO	29
1.1	DESEMPENHO DAS EMPRESAS PARA A TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR	29
1.2	PROBLEMÁTICA	29
1.3	HIPÓTESE	30
1.4	OBJETIVOS	30
1.4.1	Objetivo Geral	30
1.4.2	Objetivos Específicos	31
1.5	JUSTIFICATIVA	31
1.6	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	32
1.7	ESTRUTURA DA TESE	33
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
2.1	PENSAMENTO SISTÊMICO	37
2.1.1	Competências do pensamento sistêmico e sua relação com empresas	38
2.1.2	O pensamento sistêmico e a economia circular	39
2.2	PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA	40
2.3	ECONOMIA CIRCULAR	43
2.3.1	Diferenças entre os níveis da economia circular	44
2.3.2	Diferenças entre os ciclos da economia circular	46
2.4	MÉTRICAS E SISTEMAS DE INDICADORES PARA APOIAR A SELEÇÃO DA CIRCULARIDADE EM EMPRESAS	49
2.4.1	Indicadores	49
2.4.2	Indicadores de circularidade para empresas	50
2.4.3	Critérios para definição de indicadores	52
2.4.3.1	<i>Critérios já utilizados em economia circular</i>	52
2.4.3.2	<i>Análise de decisão multicritério</i>	53
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	57
3.1	FASE I - REVISÃO DA LITERATURA PARA DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE	59
3.1.1	Etapa 1 - Identificação e Seleção	60
3.1.2	Etapa 2 - Elegibilidade e Inclusão	60
3.2	FASE II - DEFINIÇÃO DAS CATEGORIAS	61

3.2.1	Etapa 1 - Identificação	61
3.2.2	Etapa 2 - Seleção, Elegibilidade e Inclusão	62
3.2.3	Etapa 3 - Divisão das categorias por conjunto	63
3.3	FASE III - ANÁLISE DO PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES PELAS CATEGORIAS	67
3.3.1	Contexto	67
3.3.2	Indicador	67
3.3.3	Metodologia	68
3.3.4	Sustentabilidade	69
3.3.5	Elementos da Economia Circular	70
3.3.6	Estratégias da economia circular	71
3.4	FASE IV - PROPOSTA METODOLÓGICA PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE	72
3.4.1	Etapa 1 - Definição de escopo: seleção dos sistemas de indicadores	74
3.4.1.1	<i>Organização do problema</i>	74
3.4.1.2	<i>Escolha dos respondentes</i>	75
3.4.1.3	<i>Formulação do questionário</i>	76
3.4.1.4	<i>Construção das matrizes de decisão e obtenção dos autovalores e autovetores</i>	77
3.4.1.5	<i>Cálculo dos valores Eigen</i>	78
3.4.1.6	<i>Verificação de consistência</i>	78
3.4.2	Etapa 2 - Seleção dos indicadores: identificação e refinamento dos indicadores disponíveis	79
3.4.3	Etapa 3 - Consolidação do conjunto de indicadores de circularidade	80
3.4.3.1	<i>Priorização e organização final dos indicadores selecionados</i>	80
3.4.3.2	<i>Classificação entre indicadores obrigatórios e optativos</i>	81
4	RESULTADOS	83
4.1	PORTFÓLIO DOS SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE	83
4.1.1	Resultados bibliométricos dos sistemas de indicadores	83
4.1.2	Descrição dos sistemas de indicadores	86
4.2	RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS DAS CATEGORIAS	95
4.3	ANÁLISE DO PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES POR CONJUNTO DE CATEGORIAS	97
4.3.1	Contexto	97
4.3.1.1	<i>Transversalidade</i>	103
4.3.1.2	<i>Fonte</i>	104
4.3.1.3	<i>Validação</i>	104
4.3.1.4	<i>Categoria de indústria</i>	105
4.3.1.5	<i>Produto ou Material</i>	105
4.3.1.6	<i>Tamanho da empresa</i>	106

4.3.1.7	<i>Localização geográfica</i>	106
4.3.2	Indicador	107
4.3.2.1	<i>Mensurabilidade</i>	114
4.3.2.2	<i>Dimensão</i>	114
4.3.2.3	<i>Formato</i>	114
4.3.2.4	<i>Unidades mais utilizadas</i>	115
4.3.2.5	<i>Utilização</i>	116
4.3.2.6	<i>Foco temporal</i>	117
4.3.2.7	<i>Tipo de indicador</i>	118
4.3.2.8	<i>Variáveis</i>	118
4.3.3	Metodologia	119
4.3.3.1	<i>Metodologia baseada em índices</i>	125
4.3.3.2	<i>Metodologia de avaliação</i>	125
4.3.3.3	<i>Abordagem de modelagem</i>	125
4.3.3.4	<i>Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC</i>	126
4.3.4	Sustentabilidade	127
4.3.4.1	<i>Pilar da sustentabilidade</i>	132
4.3.4.2	<i>Estendido a ESG - Governança</i>	133
4.3.4.3	<i>ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC</i>	133
4.3.5	Elementos da EC	134
4.3.5.1	<i>Nível sistêmico</i>	140
4.3.5.2	<i>Estágio de ciclo de vida</i>	140
4.3.5.3	<i>Tipo de ciclo</i>	142
4.3.5.4	<i>Desempenho</i>	142
4.3.5.5	<i>Múltiplos ciclos de vida</i>	143
4.3.5.6	<i>Princípios</i>	143
4.3.6	Estratégias da EC	144
4.3.6.1	<i>Uso e fabricação de produtos mais inteligentes</i>	149
4.3.6.2	<i>Estender a vida útil dos produtos e suas peças</i>	150
4.3.6.3	<i>Aplicação útil de materiais</i>	150
4.3.6.4	<i>Modelo de negócios</i>	151
4.3.6.5	<i>Reinventar o paradigma</i>	151
4.3.6.6	<i>Ciclo cruzado e colaboração entre setores</i>	152
4.4	CONSOLIDAÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA	152
4.4.1	Pesos dos conjuntos e das categorias	152
4.4.2	Sistemas de indicadores selecionados	154
4.4.3	Composição do conjunto de indicadores de circularidade	159
4.4.3.1	<i>Sobreposição dos indicadores</i>	159
4.4.3.2	<i>Uso modular ou integral dos sistemas</i>	161
4.4.3.3	<i>Conjunto final de indicadores</i>	161

4.4.3.4	<i>Classificação dos indicadores pela obrigatoriedade de seu uso</i>	165
4.4.3.5	<i>Classificação dos indicadores pelo nível sistêmico</i>	166
4.4.3.6	<i>Classificação dos indicadores pelos estágios do ciclo de vida</i>	170
5	DISCUSSÕES	175
5.1	O PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE	175
5.1.1	A importância da separação dos níveis micro e nano	175
5.1.2	Estágios de ciclo de vida e os níveis sistêmicos	176
5.1.3	Os três pilares da sustentabilidade pelo viés de sistemas de indicadores de circularidade	178
5.1.3.1	<i>Pilar ambiental</i>	179
5.1.3.2	<i>Pilar econômico</i>	180
5.1.3.3	<i>Pilar social</i>	180
5.1.4	Avaliações de circularidade baseadas nos três pilares da sustentabilidade	181
5.1.5	Os sistemas de indicadores de circularidade têm objetivos diferentes . .	182
5.1.6	Pesos diferentes para estratégias de EC	183
5.1.7	Os oito sistemas de indicadores e a relação com os ODS	186
5.1.8	Os três pilares da sustentabilidade podem ser avaliados por meio de sistemas de indicadores de circularidade?	188
5.2	ORIENTAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA EM EMPRESAS	189
5.2.1	Definição do contexto organizacional, objetivos e escopo da avaliação . .	189
5.2.2	Etapas da proposta metodológica e sua aplicação	190
5.2.3	Apoio à seleção dos indicadores relevantes	192
5.2.4	Considerações sobre os níveis sistêmicos dos indicadores	194
5.2.5	Ajustes e evolução da aplicação metodológica	195
6	CONCLUSÕES	197
6.1	RESPOSTAS ÀS PERGUNTAS DE PESQUISA	197
6.2	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS	198
6.3	CONTRIBUIÇÕES	200
6.3.1	Contribuição Acadêmica	200
6.3.2	Contribuições Gerenciais e Práticas	200
6.3.3	Outras contribuições	201
6.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	202
6.5	TRABALHOS FUTUROS	202
	REFERÊNCIAS	205

	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DETALHADAS DO PORTFÓLIO DE ARTIGOS DOS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS	223
	APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS ARTIGOS DE CATEGORIZAÇÃO PARA OS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS	227
	APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS FORMULÁRIOS DA FASE IV	229
	APÊNDICE D – INDICADORES DOS SISTEMAS DE INDICADORES BASE PARA O <i>FRAMEWORK</i>	237
D.1	<i>APL - ASSESSMENT OF CIRCULAR ECONOMY STRATEGIES AT THE PRODUCT LEVEL</i>	237
D.1.1	Indicadores baseados na Circularidade de Materiais	237
D.1.2	Indicadores baseados no Ciclo de Vida	238
D.2	<i>BCI - BUILDING CIRCULARITY INDICATORS</i>	238
D.3	<i>BWPE - BIM-BASED WHOLE-LIFE PERFORMANCE ESTIMATOR</i>	241
D.3.1	Integração do Modelo com BIM	242
D.4	<i>C2C INDICATORS - CRADLE TO CRADLE INDICATORS</i>	243
D.4.1	Saúde do Material	244
D.4.2	Reutilização de Materiais	244
D.4.3	Energia Renovável e Gestão de Carbono	244
D.4.4	Gestão da Água	245
D.4.5	Justiça Social	245
D.4.6	Melhoria Contínua	245
D.5	<i>CBM – IS - CIRCULAR BUSINESS MODEL SET OF INDICATORS BASED ON SUSTAINABILITY</i>	245
D.6	<i>CHECK - CIRCULARITY CHECK</i>	248
D.6.1	Questões gerais	248
D.6.2	Indicador 1: Circularidade do Design, aquisição e produção (incluindo embalagens)	248
D.6.3	Indicador 2: Entrega	250
D.6.4	Indicador 3: Uso	250
D.6.5	Indicador 4: Recuperação	251
D.6.6	Indicador 5: Sustentabilidade	252
D.6.7	Questões finais	252
D.7	<i>CMT - CIRCULARITY MEASUREMENT TOOLKIT</i>	253
D.7.1	Seção A: Uso de Recursos	254
D.7.2	Seção B: Conscientização Interna	257

D.7.3	Seção D: Conscientização Externa	258
D.7.4	Seção E: Suporte na Cadeia de Valor	258
D.7.5	Seção F: Longevidade	259
D.7.6	Seção G: Desenvolvimento do Mercado Verde	261
D.7.7	Seção H: Desenvolvimento Tecnológico	262
D.7.8	Seção I: Desenvolvimento de Legislação	262
D.8	MIS - <i>MULTIDIMENSIONAL INDICATOR SET</i>	263
D.8.1	Weight Recovery of Target Material(s) (IW)	263
D.8.2	Recovery of Scarce Materials (IS)	263
D.8.3	Closure of Material Cycles (IC)	264
D.8.4	Avoided Environmental Burdens (IE)	264
D.8.5	Agregação dos Indicadores em um Índice Único de Reciclagem (RI)	264
D.9	SPI - <i>SUSTAINABILITY PERFORMANCE INDICATORS</i>	265
D.9.1	Indicadores de desempenho de sustentabilidade	265
D.9.2	Indicadores de desempenho funcional	266
D.10	WCI - <i>IMPROVED WATER CIRCULARITY INDEX</i>	266

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESEMPENHO DAS EMPRESAS PARA A TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR

A transição do modelo de desenvolvimento econômico linear para a economia circular (EC) é amplamente discutida na literatura acadêmica, na governança pública e no setor corporativo (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). A EC propõe a dissociação entre crescimento econômico e o consumo de recursos, o que demanda um novo paradigma para as empresas (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Diante do crescimento da EC, torna-se essencial que as empresas estejam preparadas para essa transição, apoiando-se em informações claras sobre seu desempenho circular, bem como nos riscos e oportunidades associados (WBCSD, 2018). Para tanto, é fundamental que as empresas disponham de uma maneira universal e consistente de medir sua circularidade.

O principal objetivo de medir a circularidade nas empresas é aprimorar o desempenho e apoiar a formulação de estratégias eficazes. No entanto, além das estratégias, as empresas também precisam considerar fatores como viabilidade de mercado e custo-benefício das mudanças necessárias (FRANCO; ALMEIDA; CALILI, 2021). De acordo com Teece (2010), embora o modelo de negócios seja mais abrangente que a estratégia de negócios, a análise estratégica é crucial para o desenvolvimento de um modelo competitivo e sustentável.

Nesse contexto, a EC é vista pelas empresas como uma oportunidade financeira, permitindo a reavaliação de seus modelos de negócios. No entanto, o foco nas oportunidades financeiras frequentemente se sobrepõe aos aspectos ambientais e sociais (PAULIUK, 2018). Dado que nem todas as soluções circulares geram impactos líquidos positivos, é crucial que as estruturas circulares adotadas não comprometam o capital natural, social ou humano (MORAGA et al., 2019).

Adicionalmente, as empresas utilizam métricas de circularidade para se comunicar com *stakeholders*, o que gera a necessidade de relatar de forma consistente as iniciativas circulares (WBCSD, 2018). Ainda assim, a EC permanece um conceito relativamente vago e amorfo (CORONA et al., 2019), e as empresas ajustam o conceito conforme sua relevância para o *core business*. Esse contexto resulta em um número crescente de definições e estruturas distintas, o que desafia a criação de um consenso para medir a circularidade. Tentativas de padronização têm surgido, como a norma ISO 59020 (ABNT, 2024), que ainda é recente e precisa ser aplicada e avaliada em diferentes contextos.

1.2 PROBLEMÁTICA

Ao revisar a literatura sobre circularidade nas empresas, foram identificados vários desafios relacionados à implementação de práticas circulares eficazes, tanto do ponto de vista acadêmico quanto empresarial. Embora existam indicadores disponíveis, a medição do de-

sempenho circular ainda é complexa, devendo ser prática (FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016) e informativa (AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017). Até o momento, não há uma forma consolidada e padronizada de medir a circularidade em nível empresarial (GARZA-REYES et al., 2019), dificultando a comparação entre iniciativas de transição de uma economia linear para circular.

Diante desse cenário, esta pesquisa visa abordar três desafios principais: (i) a falta de uniformidade na forma de medir e avaliar a circularidade nas empresas; (ii) a necessidade de indicadores apropriados e uma estrutura de avaliação para monitorar a transição para a EC; e (iii) a integração de métodos e ferramentas acadêmicas que permitam medir a EC de forma simples em nível empresarial. Assim, a principal questão de pesquisa que guia esta tese é:

- De que forma é possível apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas a partir dos diversos sistemas existentes?

Essa questão se desdobra em duas subquestões:

- Quais categorias permitem organizar e comparar os sistemas de indicadores de circularidade existentes?
- Como estruturar um processo que auxilie a escolha de indicadores de circularidade de acordo com o contexto empresarial?

1.3 HIPÓTESE

A partir dos desafios identificados na literatura sobre medição e avaliação de práticas de economia circular, formulou-se a seguinte hipótese:

- Uma ferramenta estruturada de apoio à decisão facilita a identificação e escolha de indicadores de circularidade, promovendo maior alinhamento entre objetivos estratégicos e práticas de economia circular.

1.4 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma proposta metodológica para apoiar a seleção de indicadores de economia circular em empresas, fornecendo suporte à tomada de decisões estratégicas voltadas para a circularidade.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Definir categorias analíticas que permitam organizar e comparar os sistemas existentes de indicadores de circularidade.
2. Analisar e classificar os indicadores identificados com base nas categorias propostas.
3. Consolidar uma proposta metodológica, integrando as etapas anteriores em um processo estruturado que oriente a seleção de indicadores de circularidade em empresas.

1.5 JUSTIFICATIVA

Estruturas de monitoramento e ferramentas metodológicas que apoiem a seleção e o uso de indicadores são essenciais para documentar e medir o progresso rumo à economia circular (EC). Ao conduzir uma análise de indicadores apropriados para mensurar esse progresso, a *European Environmental Agency* (EEA) observou que a base de conhecimentos atual sobre a EC é bastante fragmentada. A agência declarou que informações mais estruturadas são necessárias para dar suporte à tomada de decisões e para aprimorar as escolhas circulares de investimento (EEA, 2016). Essa necessidade é reforçada por Haas et al. (2015), que consideram imperativo determinar o estado atual da circularidade para estabelecer uma referência que permita rastrear melhorias ao longo do tempo.

Dessa forma, é amplamente reconhecido que, para promover a EC, é essencial introduzir ferramentas de monitoramento e avaliação, como indicadores capazes de mensurar e quantificar esse progresso (MAYER et al., 2019; IACOVIDOU et al., 2017; ELIA; GNONI; TORNESE, 2017; GENG et al., 2012). Segundo Wisse (2016), é fundamental medir a eficácia das estratégias circulares implantadas. Consequentemente, a literatura apresenta um número crescente de tentativas de desenvolvimento de indicadores para o conceito de EC (ÅKERMAN, 2016).

Nos últimos anos, diversos indicadores de circularidade foram propostos, mas de forma inconsistente quanto a escopo, propósito e aplicação (SAIDANI et al., 2019). O campo de avaliação da EC ainda apresenta um estágio de maturidade limitado, com baixa implementação prática nas organizações (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). Nesse sentido, Linder, Sarasini e Loon (2017) destacam a necessidade urgente de revisar cuidadosamente as soluções existentes, identificar limitações e buscar complementaridades que promovam um uso mais coerente dos indicadores disponíveis.

Como resposta parcial a essas limitações, vêm sendo desenvolvidos esforços de padronização. Uma tentativa recente é a norma ISO 59020 (ABNT, 2024) que propõe diretrizes para medir o desempenho circular em diferentes níveis — incluindo empresas e produtos. Embora ainda recente, a norma busca enfrentar a fragmentação metodológica e permitir maior comparabilidade entre avaliações. Entretanto, sua aplicação prática ainda depende de processos

metodológicos que auxiliem tomadores de decisão a selecionar indicadores adequados a seus contextos organizacionais.

O relatório da EEA (2016) enfatiza que, atualmente, não há um método amplamente reconhecido para mensurar a eficácia da União Europeia, de países ou mesmo de empresas em sua transição para uma EC, nem ferramentas de monitoramento consolidadas que apoiem esse processo. Os indicadores existentes ainda carecem da capacidade de capturar a complexidade sistêmica da EC, como ciclos fechados e características de *feedback* (FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016; GENG et al., 2012).

Kristensen e Mosgaard (2020) apontam que os indicadores atuais estão mais focados em cidades, regiões ou parques industriais, sendo menos desenvolvidos para empresas, produtos e materiais. Como o objetivo é monitorar uma transição, fazem-se necessários tanto indicadores em nível macro, como de países ou cidades, quanto em nível micro, aplicáveis a empresas, onde as mudanças tendem a ocorrer com mais rapidez e visibilidade (POTTING et al., 2017).

Embora existam estudos sobre avaliação da circularidade de processos industriais específicos, como o ciclo do alumínio (GENG et al., 2012), ainda são poucos os que tratam da avaliação da circularidade de empresas como um todo, independentemente do setor (AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017). Apesar do aumento recente de indicadores de nível micro, conforme reportado por Saidani et al. (2019), sua adoção na prática empresarial continua baixa (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017; SAIDANI et al., 2019), e pesquisas adicionais sobre sua aplicabilidade permanecem relevantes.

Diante dessas observações, acadêmicos e organizações, como a Comissão Europeia e a Fundação Ellen MacArthur, estão conscientes da carência de indicadores de circularidade para empresas e vêm desenvolvendo projetos e ferramentas para preencher essas lacunas. Nesse contexto, o presente trabalho se justifica pelo crescente interesse das empresas em implementar práticas circulares, ao mesmo tempo em que se observa a falta de clareza, coesão e aplicabilidade dos indicadores atualmente disponíveis. Assim, torna-se necessário desenvolver propostas metodológicas que auxiliem a seleção de indicadores adequados a diferentes contextos empresariais, promovendo maior alinhamento entre objetivos estratégicos e práticas de circularidade.

1.6 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Nesta tese, apresentamos nossas contribuições relacionadas ao desenvolvimento de uma proposta metodológica para apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas, fundamentadas nos estudos publicados em Oliveira, Dantas e Soares (2021) e Oliveira e Oliveira (2023). Esses artigos constituem resultados de um estudo preliminar sobre sistemas de indicadores de circularidade e serviram de base para a formulação da proposta metodológica aqui consolidada.

O primeiro estudo representou o marco inicial da tese, estabelecendo as principais definições conceituais de economia circular, indicadores de circularidade e a relevância do nível nano. Nesse artigo, foi realizado o levantamento de 58 sistemas de indicadores de circularidade,

acompanhado de uma categorização inicial e de uma análise sobre seus focos principais, com ênfase no tripé da sustentabilidade e nos estágios do ciclo de vida. Esse trabalho forneceu a base conceitual e analítica que sustentou as etapas seguintes da pesquisa.

O segundo estudo consistiu em um aprofundamento da análise realizada no primeiro artigo. Identificamos uma disparidade significativa entre o que é medido e avaliado nos diferentes sistemas de indicadores, observando-se que o foco predominante está voltado para a reciclagem. Poucos sistemas abrangem de forma consistente os princípios da economia circular, e aqueles considerados sustentáveis alcançam apenas parcialmente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Essa constatação reforçou a necessidade de uma abordagem metodológica capaz de organizar e orientar a seleção de indicadores mais alinhados às estratégias empresariais.

Além desses trabalhos diretamente vinculados ao tema central da tese, destaca-se também a publicação '*Continuing Education to Food Waste Management: A System Dynamics Simulation*' (OLIVEIRA et al., 2023). Esse estudo, desenvolvido em linha de pesquisa anterior, avaliou o impacto de políticas de educação ambiental continuada e de comando e controle na gestão de resíduos alimentares, utilizando simulações de dinâmica de sistemas. Embora não diretamente relacionado à seleção de indicadores de circularidade, o artigo contribuiu para a consolidação de conhecimentos metodológicos e para a compreensão da integração entre dimensões sociais, ambientais e de governança na gestão de resíduos. Dessa forma, compõe a trajetória acadêmica que culmina na presente proposta metodológica.

Assim, as contribuições acadêmicas e científicas acumuladas ao longo do percurso convergem na presente tese, cuja principal entrega é uma proposta metodológica de apoio à seleção de indicadores, alinhada às necessidades estratégicas das empresas em transição para a economia circular.

1.7 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura desta tese é dividida em seis capítulos. O capítulo atual, capítulo 1, tem como objetivo introduzir o assunto principal deste projeto, juntamente com as questões centrais de pesquisa nas quais esta tese se propõe a trabalhar. Além da introdução, os objetivos principais e específicos deste estudo foram enunciados, bem como a justificativa desta pesquisa.

O capítulo 2 é a fundamentação teórica do trabalho. Esse capítulo apresenta os principais temas que dão suporte aos capítulos seguintes. A base teórica é dividida em cinco subseções principais, a saber: pensamento sistêmico (2.1), pensamento de ciclo de vida (2.2), economia circular (2.3) e métricas e sistemas de indicadores para apoiar a seleção da circularidade em empresas (2.4). Esse capítulo estabelece as bases para a compreensão do tema de pesquisa, conduzindo o leitor à compreensão do estado da arte sobre métricas e sistemas de indicadores de circularidade em empresas, destacando a fragmentação existente e a necessidade de métodos que apoiem sua seleção.

O capítulo 3 apresenta os métodos envolvidos para a conclusão desta pesquisa. É divi-

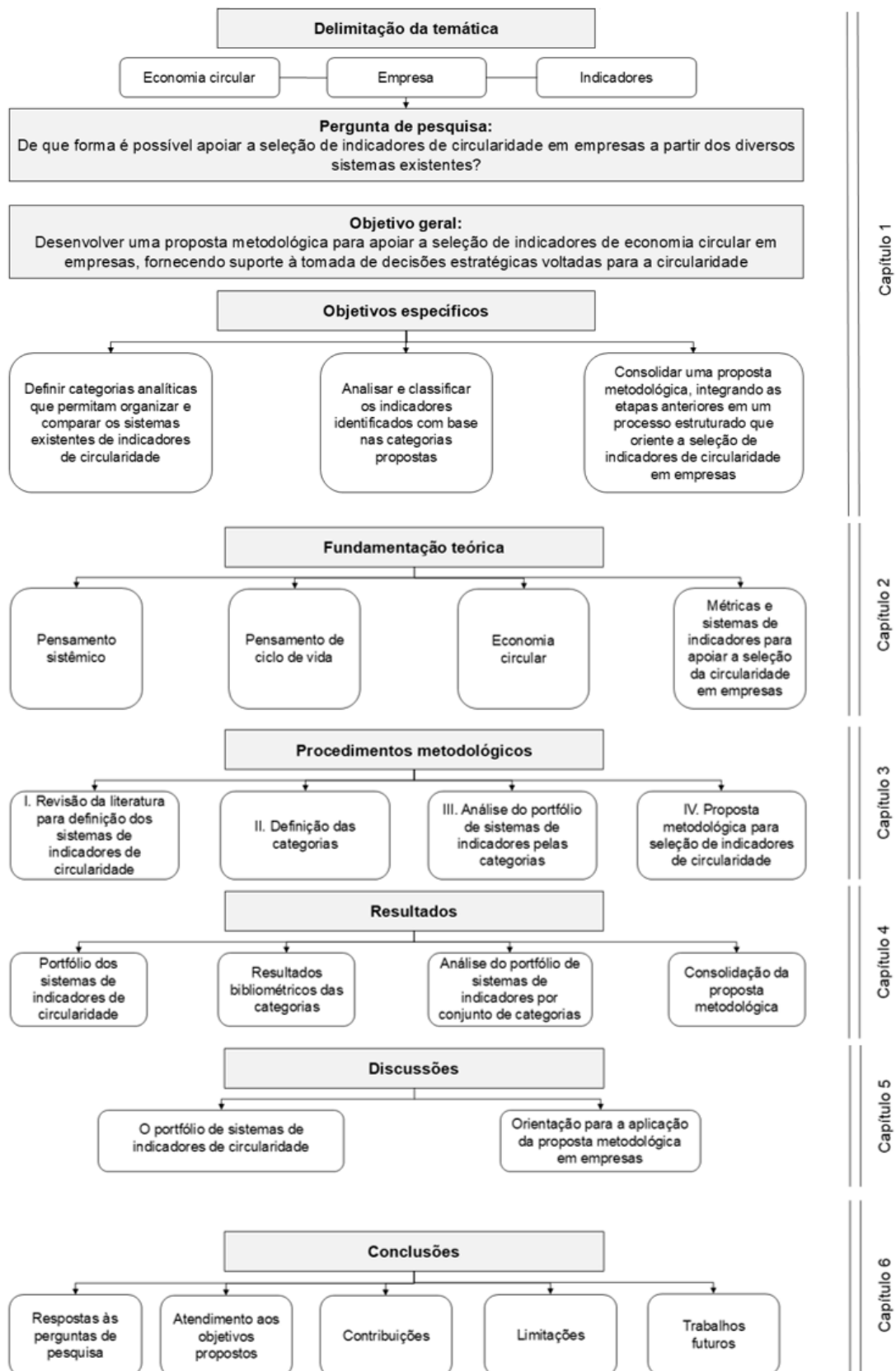
dido em quatro fases principais: revisão da literatura para definição do portfólio dos sistemas de indicadores de circularidade (3.1), definição das categorias (3.2), análise do portfólio de sistemas de indicadores pelas categorias (3.3) e proposta metodológica para seleção de indicadores de circularidade (3.4). Este capítulo traz a discussão dos métodos escolhidos e a descrição de cada fase e estágio proposto neste estudo.

O capítulo 4 apresenta os resultados. Esse capítulo apresenta os 58 sistemas referentes ao portfólio dos sistemas de indicadores de circularidade (4.1), a apresentação dos conjuntos de categorias (4.2), a análise do portfólio dos sistemas de indicadores de circularidade por conjunto de categorias (4.3) e a consolidação da proposta metodológica (4.4).

O capítulo 5 traz as discussões da tese. A discussão está dividida em duas partes: o portfólio dos sistemas de indicadores de circularidade (5.1) e a orientação para a aplicação da proposta metodológica em empresas (5.2).

As conclusões, limitações e pesquisas futuras são expostas no capítulo 6. Os capítulos desta tese estão identificados na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura da tese

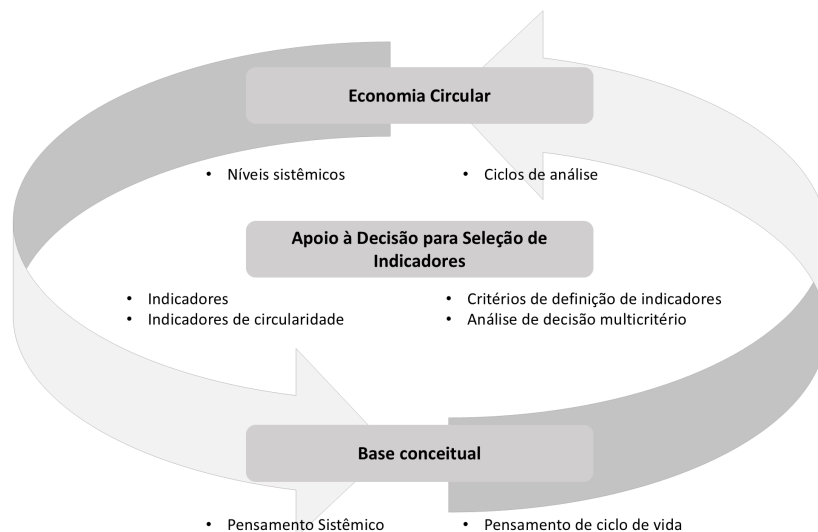


Fonte: Elaborada pela autora

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dado o contexto exposto no capítulo introdutório, a fundamentação teórica aborda, de forma não exaustiva, os seguintes temas: a) pensamento sistêmico; b) pensamento de ciclo de vida; c) economia circular (EC); e d) métricas e sistemas de indicadores de circularidade em empresas, com foco nos desafios relacionados à sua seleção e aplicabilidade, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura da fundamentação teórica



Fonte: Elaborada pela autora

O objetivo deste capítulo é estabelecer as bases conceituais que sustentam a proposta metodológica desenvolvida nesta tese.

2.1 PENSAMENTO SISTÊMICO

Para compreender a EC, é fundamental entender como funciona o pensamento sistêmico. Por outro lado, para compreender o Pensamento Sistêmico (PS), é necessário esclarecer o conceito de sistema. Um sistema é definido como um conjunto de elementos interconectados, organizados de forma coerente para alcançar um propósito (MEADOWS, 2008). Seus princípios são:

- Um sistema é mais do que a soma de suas partes;
- A maioria das interconexões em sistemas ocorre por meio do fluxo de informações;
- A estrutura de um sistema influencia seu comportamento.

Assim, o PS “oferece uma abordagem para compreender holisticamente um sistema, como um conjunto de componentes e suas várias inter-relações que orientam o comportamento

e o desempenho do sistema” (MAANI; CAVANA, 2007). O PS, portanto, pode ser entendido como a capacidade de analisar e otimizar sistemas complexos e interligados, reconhecendo como uma ação pode gerar várias mudanças ao longo do tempo (SUMMERTON et al., 2019). Ele abrange a compreensão da interdependência entre os componentes dos sistemas e facilita uma visão mais integrada e abrangente do tema.

Esse pensamento introduz um vocabulário singular e um conjunto de métodos para abordar a complexidade observada em sistemas sociais e ecológicos. Ao longo dos séculos XIX e XX, uma parte significativa do desenvolvimento científico se baseou em princípios de redução, dividindo problemas em partes menores e mais compreensíveis (NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019). No entanto, o processo de entender a interconexão entre as partes para interpretar o todo é mais complexo do que se previa (MEADOWS, 2008). Esforços para preencher essa lacuna de conhecimento abriram caminho para a teoria dos sistemas e o PS.

Enquanto algumas mudanças podem ser previstas, outras podem gerar resultados inesperados e não intuitivos. A primeira leva à compreensão dos padrões de comportamento, enquanto a segunda se relaciona com o estudo dos efeitos de rede e das consequências não intencionais (NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019). Essa combinação leva à exploração de métodos alternativos para aprimorar a compreensão dos sistemas em que as pessoas estão inseridas e orientar intervenções mais resilientes, robustas e adequadas. Como resultado, um número crescente de pesquisadores adota visões e abordagens mais holísticas dos sistemas, buscando capturar seus efeitos gerais (LU; HALOG, 2020).

2.1.1 Competências do pensamento sistêmico e sua relação com empresas

A competência em PS, segundo Wiek, Withycombe e Redman (2011), envolve a capacidade de analisar sistemas complexos em múltiplos domínios (sociedade, meio ambiente, economia, etc.) e escalas (local a global), utilizando métodos e ferramentas participativas para modelar e entender as interconexões e fluxos entre elos do sistema (SUMTER et al., 2020). Pesquisadores utilizam o PS para identificar *feedbacks* e prever consequências não intencionais de ações, pois problemas complexos tendem a formar ciclos contínuos de retroalimentação (FORD, 1999; LU; HALOG, 2020).

Para gerentes, adotar o PS é fundamental para promover sustentabilidade organizacional, pois amplia a compreensão de impactos múltiplos dentro de sistemas interdependentes (WIEK; WITHYCOMBE; REDMAN, 2011). Este posicionamento coloca as empresas como elementos de uma rede organizacional interligada, possibilitando previsões com base nas mudanças em parâmetros específicos (SENGE, 2006; SUMMERTON et al., 2019). Essa visão apoia uma coordenação sistêmica na cadeia de suprimentos e valor (BALANAY; HALOG, 2016).

Nos *workshops* de EC, o PS evidenciou-se em situações onde gestores reconheciam a complexidade do processo produtivo e a necessidade de lidar com perspectivas simultâneas e interdependentes (WHALEN et al., 2018). A aplicação do PS facilita também a mudança para

cadeias de suprimentos abertas, promovendo redes de valor que expandem os limites organizacionais para incluir as cadeias de valor dos produtos e serviços (PEREY et al., 2018).

O PS permite reavaliar o desperdício nos processos empresariais, estendendo o controle e a responsabilidade organizacional para além de seus próprios limites, evitando a externalização de problemas para o governo, outras organizações ou o ambiente (CHEN, 2020). Ainda que a percepção sistêmica nunca seja perfeita, o PS amplia a visão geral de fatores, ameaças e oportunidades para o modelo de negócios e ajuda a reconhecer os interesses de diferentes atores (COBO; DOMINGUEZ-RAMOS; IRABIEN, 2018; NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019).

2.1.2 O pensamento sistêmico e a economia circular

Os desafios de sustentabilidade e uso de recursos enfrentados pela humanidade não podem ser solucionados por meio de uma lógica reducionista, que fragmenta cada problema (LU; HALOG, 2020). O PS, sob a perspectiva da sustentabilidade, proporciona uma base conceitual na qual sistemas industriais e comerciais estão integrados a sistemas sociais e ecológicos mais amplos (PEREY et al., 2018).

Dois subcampos relevantes, sistemas sociotécnicos e socioecológicos, foram desenvolvidos para abordar interações em múltiplos níveis entre os seres humanos e o ambiente natural. Enquanto sistemas sociotécnicos focam nas interações entre humanos e tecnologia no ambiente construído (NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019), sistemas socioecológicos lidam com o contexto social, institucional e cultural das relações com o ambiente (OSTROM, 2009). A EC, então, considera os sistemas econômicos como partes integradas e inseparáveis dos sistemas sociais e naturais, sendo o sistema econômico uma componente do ecossistema (WEBSTER, 2013).

Na EC, o conceito de circularidade se reflete no *feedback* que permite que todas as conexões interdependentes operem de forma otimizada. Esse processo, chamado de otimização do sistema como um todo, é similar a um sistema vivo em que todos os fluxos – de água, energia, plantas, animais e microrganismos – colaboram para que o sistema prospere (WEBSTER, 2013).

Diversos subcampos dos sistemas sociotécnicos exploram como aplicar o PS em intervenções para transições organizacionais, possibilitando que as empresas reformulem ofertas de produtos e serviços e desenvolvam fluxos circulares de materiais em seus modelos de negócios, aumentando o valor agregado de seus produtos (PEREY et al., 2018). Esse valor está ligado ao entendimento ecológico das redes operacionais de cada organização.

Webster (2013) observa que, na EC, muitas vezes o foco está no produto, mas são as conexões e os fluxos que realmente definem a circularidade. Na EC, o sistema como um todo é valorizado, e o objetivo é otimizar esses fluxos de materiais e energia, em vez de maximizar componentes isolados. A melhoria dos modelos de negócios fundamentados no PS auxilia os formuladores de políticas a equilibrar metas de curto e longo prazo, promovendo inovações

alinhadas às tendências da EC (CHEN, 2020).

Reconhecendo que nem todas as práticas podem ter alcance global, a EC adota a visão de “pensar globalmente, agir localmente” (CHEN, 2020), com uma abordagem de ciclos interconectados que abrangem dimensões humanas e não humanas, geralmente em âmbito local (WHALEN; WHALEN, 2018). Esse trabalho local compartilha uma visão de interconectividade, rejeitando o modelo linear de produção.

Pesquisadores apontam (HAHLADAKIS; IACOVIDOU, 2018; NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019; SUMTER et al., 2020) a carência de ferramentas e métodos adequados para apoiar a transição para sistemas circulares, especialmente no que se refere à organização e seleção de indicadores que permitam orientar a tomada de decisão empresarial. Além disso, ressaltam que a definição de limites de sistema nos estudos deve incluir e excluir conscientemente certos elementos na análise (LU et al., 2017). Recentemente, a norma internacional ISO 59020 reforça o princípio do pensamento sistêmico e da definição de limites do sistema para mensuração da circularidade (ABNT, 2024). No entanto, embora represente um avanço em termos de padronização e comparabilidade, sua aplicação prática ainda demanda métodos que auxiliem a seleção de indicadores adequados a diferentes contextos empresariais.

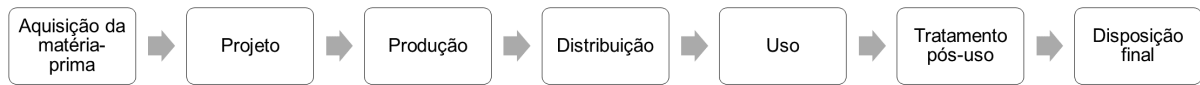
Pauliuk (2018) sublinha a importância do PS para a EC. Segundo o autor, se as estratégias de EC não forem monitoradas por uma perspectiva sistêmica, existe o risco de indicadores incoerentes e de que as empresas selecionem resultados desalinhados, reforçando apenas mensagens corporativas. Esse risco evidencia a importância de processos metodológicos que orientem a seleção de indicadores consistentes com os princípios da EC e os objetivos de sustentabilidade.

Em síntese, o PS é fundamental para o conceito de EC, pois os modelos de EC dependem de inter-relações complexas entre empresas, sociedade civil e governo, em um esforço conjunto para preservar o meio ambiente (GENG et al., 2013; BALANAY; HALOG, 2016; LU; HALOG, 2020; NOGUEIRA; ASHTON; TEIXEIRA, 2019; SUMMERTON et al., 2019; SUMTER et al., 2020).

2.2 PENSAMENTO DE CICLO DE VIDA

O Pensamento de Ciclo de Vida (PCV) representa “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto (ou serviço), desde a aquisição da matéria-prima ou sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final” (ABNT, 2015). Em geral, as empresas obtêm recursos do meio ambiente para transformá-los em produtos e serviços, que são então distribuídos aos consumidores ou outras empresas. Após o uso, esses produtos são descartados e direcionados para a disposição final, como aterros sanitários (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018). Esse processo pode ser visualizado em etapas, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Estágios do pensamento de ciclo de vida



Fonte: Elaborada pela autora

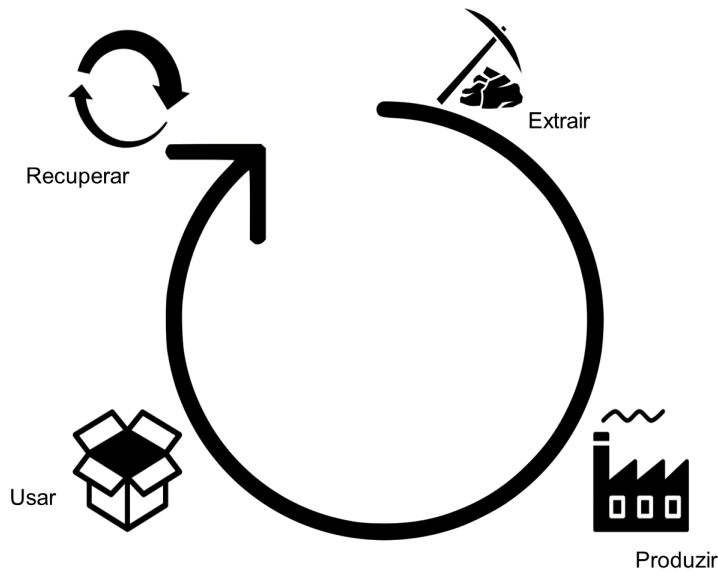
O PCV permite uma análise completa do ciclo de vida das atividades, desde a extração de matérias-primas (berço) até o retorno dos resíduos ao solo (túmulo), visando reduzir e gerenciar os impactos ambientais do sistema econômico (GARCIA-HERRERO et al., 2018; MORAGA et al., 2019). Essa abordagem atribui de forma adequada os danos ambientais e intervenções ao ator ou organização responsável em cada fase do ciclo de vida de um produto (BALANAY; HALOG, 2016). Assim, o PCV amplia o foco, anteriormente restrito aos processos da empresa, para incluir outros elementos, como o consumidor, auxiliando na identificação de aspectos e impactos ambientais em processos internos e externos.

McDonough e Braungart (2010), expoentes de uma das principais escolas de pensamento da EC, desenvolveram o princípio do berço-ao-berço (*Cradle to Cradle* (C2C)), que propõe fechar o ciclo por meio da recuperação de recursos (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018). Stahel (2016) enfatiza a importância de recuperar e valorizar materiais, tanto pela natureza quanto pelo processamento industrial, evitando o descarte e desperdício.

Do PCV, derivam-se princípios como o aumento da eficiência de recursos dentro dos processos, a criação de novos usos para tecnologias existentes e a implementação de processos avançados para melhorar a gestão de resíduos no Fim de Vida (FdV), promovendo reciclagem e práticas de C2C (GARCIA-HERRERO et al., 2018). A formulação de políticas estruturadas e medidas dinâmicas que previnam bloqueios sistêmicos é essencial para avançar a EC (KOBZA; SCHUSTER, 2016). Por isso, o PCV está no núcleo do Plano de Ação para a Economia Circular da União Europeia, que abrange produção, consumo, gestão de resíduos e produção de matérias-primas secundárias (EC, 2014).

No contexto da aplicação, especialistas sugerem que a EC deve ser compreendida em fases, o que permite identificar pontos críticos e orientar a definição e seleção de indicadores para acompanhar a transição nas empresas (EMF, 2013; STAHEL, 2016). Prieto-Sandoval et al. (2018) propõem quatro áreas principais: extrair, produzir, usar e recuperar (Figura 4).

Figura 4 – Ciclo de vida de produto e/ou serviço



Fonte: Elaborada pela autora.

Extrair se refere à obtenção de recursos e energia, com foco em práticas mais eficientes e responsáveis. As empresas na EC devem priorizar o uso de recursos biológicos e técnicos que sejam não tóxicos e possam retornar à biosfera de forma segura e sustentável (TAE LMAN et al., 2018). Isso contribui para uma gestão sustentável de recursos, reduzindo a extração de matéria-prima e promovendo o uso de recursos secundários (GENG; SARKIS; BLEISCHWITZ, 2019).

Na fase Produzir, a reconcepção de produtos e processos é fundamental, garantindo que os materiais circulem em sistemas humanos e naturais por longos períodos, mantendo o desempenho ideal com o mínimo desperdício (TAE LMAN et al., 2018).

Em Usar, a eficiência ambiental dos produtos pode ser maximizada com práticas como reparo e reutilização. As empresas podem incentivar a devolução de produtos pelos clientes após o uso, prolongando a vida útil por meio de manutenção e serviços pós-venda (KJAER et al., 2019).

Focada na eco-inovação, a fase Recuperar visa recuperar resíduos, materiais e energia contidos nos produtos ao fim de sua vida útil. A aplicação de processos otimizados de fim de vida reduz o desperdício e mantém os materiais em circulação econômica (STAHEL, 2016; TAE LMAN et al., 2018).

Os resíduos devem ser vistos como recursos biológicos ou técnicos, redirecionados à biosfera ou ao processo industrial, fechando o ciclo (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010). Estratégias de logística reversa e gestão de cadeia de suprimentos são essenciais para essa recuperação e o fechamento dos ciclos (LIEDER; RASHID, 2016).

Há um grande potencial para melhorias ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a escolha dos materiais até o design e o FdV. Compreender a eficácia das estratégias de EC exige evitar a otimização de uma fase em detrimento de outras, destacando a importância de indicadores que capturem o desempenho de forma integrada ao longo de todo o ciclo de vida

(KJAER et al., 2019). Assim, uma visão sistêmica do ciclo de vida é necessária para prevenir deslocamentos de impacto entre fases.

Além disso, a EC envolve estratégias em rede, como aponta Kobza e Schuster (2016), com uma “abordagem coletiva de indústrias” que fomenta trocas de materiais, energia, água e co-produtos (CHERTOW, 2000). Em síntese, uma transição bem-sucedida para a EC exige um pensamento baseado no ciclo de vida e na integração de sistemas interligados. Esse princípio fornece não apenas diretrizes para práticas empresariais, mas também uma base essencial para a seleção de indicadores capazes de refletir as diferentes fases e estratégias do ciclo de vida.

2.3 ECONOMIA CIRCULAR

A EC é uma área de conhecimento abrangente e pode ser interpretada de maneiras diferentes conforme o contexto (MCDOWALL et al., 2017). Assim, há uma variedade de definições para o conceito (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Contudo, para estruturar processos eficazes que apoiem a seleção de indicadores de circularidade em empresas, é fundamental analisar a definição e os princípios desse modelo (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017).

Compreender a EC exige um entendimento prévio da economia convencional, conhecida como economia linear (MYLAN; HOLMES; PADDOCK, 2016; NG; YANG; YAKOVLEVA, 2019). Na economia linear, o modelo “extrair, produzir e descartar” prevalece (INGRAO et al., 2018; LEHMANN, 2018), baseando-se na disponibilidade abundante de recursos e na disposição irrestrita de resíduos (JURGILEVICH et al., 2016). Nesse sistema, os recursos são usados de maneira rápida e sem reutilização significativa. A EC, por sua vez, propõe-se como uma alternativa sustentável a essa economia linear tradicional (MAINA; KACHRIMANIDOU; KOUTINAS, 2017; SAKAI et al., 2017; DEMICHELIS et al., 2018; DONIA; MINEO; SGROI, 2018).

Desafiar a estrutura econômica atual requer mais do que substituir modelos; envolve a criação de novos sistemas baseados em outras metáforas e estruturas (WEBSTER, 2013). Esse novo modelo representa uma mudança de uma visão de mundo mecanicista para uma em que os sistemas de fluxo não linear, com *feedbacks* constantes, predominam, em uma perspectiva mais próxima ao metabolismo de sistemas naturais, como oceanos, sistemas climáticos e organismos vivos (PAULI, 2010).

Para esta pesquisa, será adotada a definição de Economia Circular proposta por Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) como base conceitual.

Uma economia circular descreve um sistema econômico baseado em modelos de negócios que substituem o conceito de ‘fim de vida’ pela redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção/distribuição e consumo, operando assim no nível micro (produtos, empresas, consumidores), nível meso (parques ecoindustriais) e nível macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, o que implica a criação de qualidade ambiental, prospe-

ridade econômica e equidade social, para o benefício das gerações atuais e futuras. (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017)

O conceito de EC permite focar em como os recursos são utilizados e geridos no ambiente empresarial, com o objetivo principal de manter recursos e produtos em seu valor mais elevado pelo maior tempo possível, estendendo sua vida útil para garantir um desempenho prolongado (LASO et al., 2018). Diversas estratégias de uso de recursos podem ser aplicadas nesse sentido, destacando-se as estratégias dos “Rs”. As estratégias dos Rs variam em número, como no modelo dos 9Rs de Potting et al. (2017). Esses Rs são organizados em ordem de prioridade, começando pelo uso e produção mais inteligentes dos produtos, seguido pela extensão da vida útil, e, finalmente, pela aplicação útil dos materiais. Em síntese, uma EC privilegia atividades que preservam valor, evitam o uso de recursos não renováveis e conservam os renováveis. Essas estratégias também servem como base para a formulação e seleção de indicadores que reflitam os diferentes estágios da circularidade.

Ao longo de múltiplos ciclos de reutilização, torna-se necessário fechar o ciclo e reciclar. Nesse estágio, as alternativas incluem a reciclagem ou a incineração. A reciclagem deve ser priorizada para recuperar o valor dos materiais, enquanto a incineração deve ser a última opção, recuperando apenas a energia, sem possibilidade de reutilização dos componentes (POTTING et al., 2017). Embora alguns elementos de circularidade, como a reciclagem e a compostagem, já existam na economia linear, a EC exige inovações em níveis tecnológicos, organizacionais e de negócios, além de novos *designs* e transformações sociais (NG; YANG; YAKOVLEVA, 2019; RUSSO et al., 2019).

2.3.1 Diferenças entre os níveis da economia circular

A EC é comumente analisada em três níveis de escala: (1) macro, (2) meso e (3) micro. Balanay e Halog (2016) confirmaram essa classificação, associando o nível macro à sociedade, o nível meso à interação entre empresas e o nível micro a uma empresa específica. Banaité (2016) também agrupou os sistemas de avaliação da EC nesses três níveis: no nível micro, a avaliação é direcionada a uma única empresa ou consumidor; no nível meso, a associações de simbiose; e no nível macro, a cidades, províncias, regiões ou países.

O nível macro envolve o redesenho da infraestrutura econômica e social, abrangendo áreas como energia limpa, transporte, cultura e sistema social (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). A ênfase principal nesse nível está nas trocas materiais entre a economia e o meio ambiente, no comércio internacional e nas acumulações materiais nas economias nacionais. Neste contexto, indicadores são essenciais para avaliar, monitorar e aprimorar políticas (SÁNCHEZ-ORTIZ et al., 2020). A diversidade de indicadores existentes, porém, exige processos metodológicos que apoiem sua organização e seleção, de modo a garantir coerência e aplicabilidade em cada nível de análise. Os indicadores macroeconômicos apoiam decisões em áreas como integração de políticas econômicas, ambientais e comerciais, além de estratégias

para o desenvolvimento sustentável, gestão de resíduos e políticas de conservação de recursos. Por exemplo, indicadores macroeconômicos podem descrever as características de uma região ou país, especialmente nas interações com o comércio global (ALAERTS et al., 2018). O nível macro, portanto, abrange indicadores focados nos fluxos de materiais em toda a sociedade e nos impactos ambientais, econômicos e sociais de uma região ou país, incluindo os efeitos além dessas fronteiras.

No nível meso, a EC se aplica entre empresas ou setores, como nas associações de simbiose industrial (BALANAY; HALOG, 2016). Esse nível de análise conecta-se ao macro, por meio da desagregação em setores econômicos, e ao micro, por meio das interações entre empresas (ALAERTS et al., 2018). Aqui, empresas se integram em redes de matérias-primas e energia e trocam informações (CHERTOW, 2007), um avanço importante para a transição da EC, especialmente em países com setores industriais em crescimento. Indicadores no nível meso permitem uma análise mais detalhada dos fluxos de materiais, distinguindo categorias de materiais, setores de produção e categorias de consumo.

No nível micro, o objetivo é manter recursos pelo maior tempo possível em sua aplicação mais elevada, abrangendo tanto o progresso da EC para uma empresa específica quanto para um consumidor individual (FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Esse nível pode envolver a circularidade de produtos específicos e seus componentes (ALAERTS et al., 2018). Porém, devido ao escopo amplo do nível micro, os indicadores associados frequentemente não cobrem toda a complexidade da EC, o que pode levar a diferentes interpretações (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). Nesse nível, a colaboração de fornecedores e produtores é essencial para modificar os hábitos econômicos e impulsionar a transição para o modelo circular.

O valor agregado do nível micro está tanto nas intervenções políticas quanto nas práticas inovadoras que se materializam primeiro, oferecendo a oportunidade de obter *feedback* mais direto. Finalmente, os indicadores de nível micro fornecem informações detalhadas para processos de decisão específicos a nível empresarial (AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017). Esses indicadores apoiam a implementação de políticas e decisões em áreas como eficiência energética e gestão integrada de resíduos dentro de uma empresa (ALAERTS et al., 2018). Assim, cada empresa precisa selecionar e adaptar indicadores específicos de acordo com suas características, condições e problemas existentes (SÁNCHEZ-ORTIZ et al., 2020). Esse processo de escolha, ainda pouco estruturado na literatura, constitui a lacuna que esta tese busca abordar.

Saidani et al. (2017) propuseram um quarto nível, o nano, que se concentra na circularidade dos produtos, componentes e materiais dentro dos três níveis anteriores (macro, meso e micro) e ao longo de seu ciclo de vida. Esse nível permite um enfoque direto nas inovações e medidas políticas que promovem um impacto mais imediato, e onde a transição para a EC se torna mais perceptível (ALAERTS et al., 2018). O nível nano destaca o monitoramento em uma escala inicial, oferecendo maior visibilidade das fases iniciais da transição para a EC, particularmente em substâncias e produtos individuais (POTTING et al., 2017).

No nível nano, produtos e serviços estão sendo direcionados, pois estes são os casos em que a inovação e as medidas políticas estão tendo o impacto mais direto e onde a evolução para a EC será visível mais rapidamente (ALAERTS et al., 2018). Para que a transição aconteça, intervenções governamentais serão necessárias e se refletirão em medidas de política. Os efeitos de tais medidas tornar-se-ão visíveis, em primeiro lugar, no nível de substâncias específicas ou de produtos individuais.

Além disso, o desafio de monitorar as transições está nas fases iniciais, pois essas estão amplamente ocultas devido à escala muito pequena das atividades (POTTING et al., 2017). Portanto, ao incluir o nível de produto ou serviço, componente e material no monitoramento, a pequena escala inicial será detectada mais cedo. Em suma, a inclusão do nível nano oferece a possibilidade de uma resposta mais direta sobre a política de EC e uma melhor visibilidade das fases iniciais da transição.

2.3.2 Diferenças entre os ciclos da economia circular

A EC visa o gerenciamento eficiente de recursos, mantendo seu valor no sistema pelo maior tempo possível e reintegrando produtos ao sistema após o fim de sua vida útil (FAN et al., 2019; BATTISTA et al., 2020). Esse conceito abrange todos os tipos de materiais, diferenciando-os entre biológicos e técnicos.

Os materiais técnicos não devem ser reintroduzidos no meio ambiente, mas podem retornar à cadeia produtiva seguindo etapas de uso e gerenciamento: compartilhamento, manutenção/expansão de vida útil, reutilização/redistribuição, recondicionamento/remanufatura e reciclagem (TÜRKELI et al., 2018). Esse ciclo técnico de materiais foca no uso sustentável de estoques de recursos finitos (SEHNEM et al., 2019a), onde o uso substitui o consumo (SEHNEM et al., 2019b). Metais, plásticos e produtos químicos sintéticos são recuperados e restaurados dentro desse ciclo técnico, garantindo a recaptura de seu valor.

Por outro lado, o ciclo biológico engloba processos como coleta, cascata e extração de matérias-primas bioquímicas, digestão anaeróbica, geração de biogás, regeneração da biosfera e agricultura/coleta (TÜRKELI et al., 2018). Esse ciclo concentra-se em fluxos de materiais renováveis (SEHNEM et al., 2019a), onde ocorre o consumo, e a maioria dos materiais biológicos é regenerada (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010).

A reutilização refere-se ao uso de produtos para o mesmo fim, mantendo sua forma original com mínimas melhorias (EMF, 2013). Quando se trata de recursos renováveis, a reutilização também pode abranger a redistribuição organizada de alimentos para entidades de caridade (TIKKA, 2019).

O recondicionamento envolve substituir ou reparar componentes defeituosos ou desgastados de um produto (SEHNEM et al., 2019a), o que pode incluir pequenos reparos, limpeza e retoques. A remanufatura, por sua vez, implica na desmontagem e recuperação de componentes reutilizáveis para criar um novo produto (SEHNEM et al., 2019b). Ambas as práticas visam maximizar a reutilização dos materiais ao longo do ciclo de vida do produto (EMF, 2015).

Cascadeamento é o processo de uso contínuo de um recurso, com qualidade e quantidade geralmente reduzidas a cada fase (BSI, 2017). Ele promove a diversificação do uso ao longo da cadeia de valor, inspirando-se em sistemas vivos (WEBSTER, 2013), nos quais a degradação de materiais biológicos libera diferentes valores até que se tornem adequados para regeneração do solo ou outro destino biológico. Em materiais técnicos, o cascadeamento é análogo aos ciclos ou “*loops*”.

No ciclo biológico, o cascadeamento permite que os produtos sejam reutilizados em aplicações diferentes após o fim de sua vida útil original (EMF, 2013). Conforme o recurso avança pela cascata, sua ordem e valor diminuem até que o material precise ser devolvido ao ambiente como nutrientes. A conservação de trabalho e capital ocorre ao longo da cascata (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018).

A extração de bioquímicos envolve o uso de processos específicos para converter biomassa em produtos químicos de alto valor agregado (MOHAN et al., 2018). A compostagem representa a regeneração natural de materiais biológicos no solo através de microrganismos como bactérias, fungos e minhocas (ZORPAS et al., 2018). Já a digestão anaeróbica produz biogás, uma fonte de energia alternativa ao gás natural, e resíduos sólidos que podem ser compostados ou aplicados ao solo (SEHNEM et al., 2019b; CAPSON-TOJO et al., 2016).

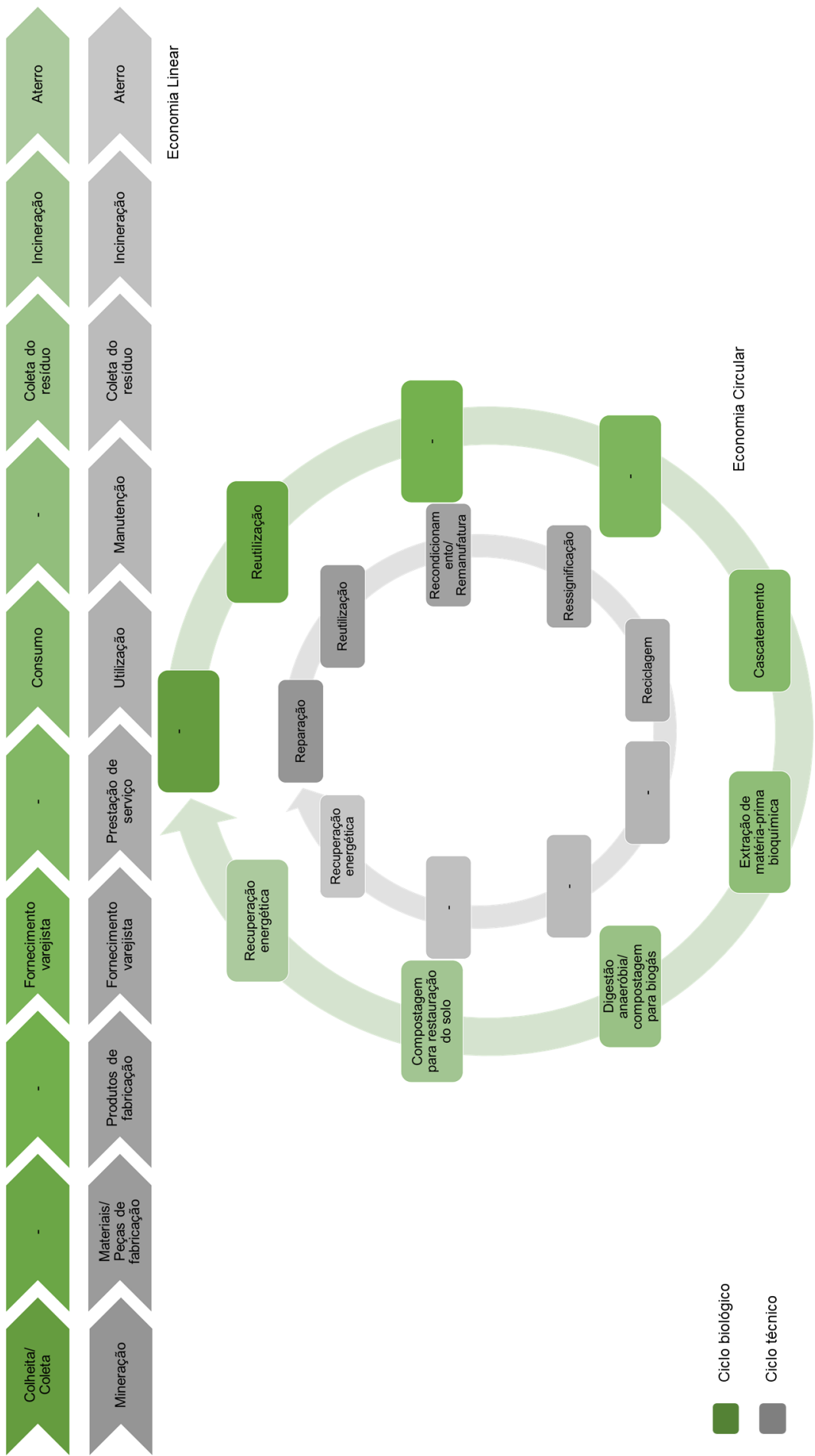
Na reciclagem, os conceitos de *downcycling* e *upcycling* têm papéis distintos. O *downcycling* converte produtos usados em materiais de menor qualidade ou funcionalidade (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018), enquanto o *upcycling* melhora a qualidade e funcionalidade dos materiais reciclados (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010).

A recuperação de energia ocorre através da conversão de resíduos e materiais não recicláveis em calor, eletricidade ou combustível por meio de combustão, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbica e recuperação de gás de aterro (HOEHN et al., 2019). Por fim, os resíduos podem ser depositados em aterros, sendo esta uma forma controlada de eliminação final.

McDonough e Braungart (2010) destacaram, em seu trabalho sobre o conceito de C2C, a importância de separar materiais técnicos e biológicos. Essa separação facilita a remanufatura e reciclagem, pois materiais não contaminados podem ser desmontados e reintroduzidos com facilidade (WEBSTER, 2013). A preferência por ciclos mais próximos do produto original, os chamados “*loops* mais estreitos”, proporciona maior valor, enquanto *loops* mais externos, embora inevitáveis em algumas situações, tendem a ter menos valor agregado (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2010).

A Figura 5 sintetiza a comparação entre a economia linear e a economia circular, destacando as atividades relacionadas aos nutrientes biológicos e técnicos. A compreensão desses ciclos fornece subsídios para a construção de indicadores de circularidade e, sobretudo, para apoiar a seleção daqueles que melhor representam as práticas empresariais em diferentes contextos.

Figura 5 – Processos dos recursos técnicos e biológicos na Economia Linear e na Circular



Fonte: Elaborada pela autora

2.4 MÉTRICAS E SISTEMAS DE INDICADORES PARA APOIAR A SELEÇÃO DA CIRCULARIDADE EM EMPRESAS

2.4.1 Indicadores

A principal característica dos indicadores é a capacidade de resumir, focar e condensar a complexidade do ambiente dinâmico a uma quantidade gerenciável de conhecimento (SINGH et al., 2009). Pode fornecer informações objetivas e confiáveis sobre o status de um sistema que é útil para que governos, sociedades e empresas esclareçam e alcancem os resultados desejados (PINTÉR, 2006). Assim, um indicador transmite uma mensagem complexa, possivelmente de inúmeras fontes, de maneira simplificada e útil (JACKSON; KURTZ; FISHER, 2000). Na literatura, podem ser observados os seguintes objetivos principais para indicadores (MEADOWS, 1998; VELEVA et al., 2001; SAIDANI et al., 2019):

- Comunicar e aumentar a conscientização do público sobre questões importantes;
- Fornecer aos tomadores de decisão uma ferramenta para medir o progresso em direção a objetivos/metastabelecidas;
- Gerar informações para apoiar a tomada de decisão.

Os indicadores também podem ser usados como instrumentos gerenciais e de processos decisórios para: relatar ou realizar atividades-piloto; definir metas, metas quantitativas e acompanhar o progresso; arbitrar trocas potenciais e transferências de impacto; informar escolhas de investimento e orientar a formulação de políticas; comunicar externamente; apoiar educação e treinamento. Além disso, os indicadores são uma ferramenta poderosa que pode ser usada de várias maneiras, como na avaliação, melhoria e monitoramento da sustentabilidade (por exemplo, econômica, ambiental e social) e no desempenho da circularidade (por exemplo, uso de recursos, perda de recursos, renovabilidade) (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017). Com a crescente atenção sobre sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, não será surpreendente que um dia uma classificação quantificável de sustentabilidade seja necessária para todos os produtos por meio de alguns regulamentos (SABAGHI et al., 2016).

Conforme apontado por Saidani et al. (2019), os indicadores são ferramentas analíticas valiosas aplicadas para simplificar as informações. Os principais objetivos do uso de indicadores estão relacionados ao rastreamento, monitoramento e medição do progresso. No entanto, diante da diversidade de indicadores disponíveis, surge o desafio de apoiar os decisores na seleção dos mais adequados para cada contexto, que é o foco desta pesquisa. Além disso, tais ferramentas podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa, e auxiliam na compreensão de fenômenos complexos.

Existem muitas definições para indicadores como “variável”, “medida”, “sub-índice” e “parâmetro” entre outros (MEADOWS, 1998; VELEVA et al., 2001). Termos como **métrica**,

índice e index são entendidos e aplicados nesta pesquisa no mesmo contexto que o termo **“sistema de indicadores”**.

2.4.2 Indicadores de circularidade para empresas

Alcançar uma EC é um processo contínuo que exige o monitoramento constante dos impactos e a introdução de ações preventivas e corretivas, sempre que necessário (UNEP; EARTHPRINT, 2011). Conforme mencionado, indicadores úteis consistem em medidas numéricas que fornecem informações cruciais sobre o desenvolvimento da EC e oferecem diretrizes para a criação de políticas eficazes (SU et al., 2013; VELEVA et al., 2001).

Para que esses indicadores cumpram adequadamente seu propósito e possam ser efetivamente utilizados, é fundamental organizá-los em uma estrutura consistente. Essa necessidade de organização e seleção estruturada constitui justamente a lacuna que esta tese busca preencher.

Os sistemas de indicadores são geralmente desenvolvidos para gerar informações cada vez mais precisas sobre as condições desejadas. Idealmente, um sistema de indicadores mede componentes distintos do sistema e também fornece informações sobre como os componentes individuais trabalham juntos para produzir o efeito geral (SHAVELSON; MCDONNELL; OAKES, 1990). Assim, governos e a academia têm desenvolvido diversos sistemas de indicadores para avaliar a EC em níveis nacional, regional e local (GENG et al., 2012; SU et al., 2013).

Os diferentes níveis de implementação da EC e as distintas características de nações, regiões e empresas exigem sistemas de indicadores personalizados (SU et al., 2013). Para acompanhar e promover a transição para uma economia mais circular, é essencial que atores e profissionais, como engenheiros e designers, disponham de métodos e ferramentas apropriados, incluindo indicadores que permitam medir e quantificar esse progresso (GENG et al., 2012; CAYZER; GRIFFITHS; BEGHETTO, 2017).

Outro ponto importante, segundo o Conselho Consultivo Europeu de Ciências das Academias (EASAC, 2016), é a necessidade de medir o desempenho da EC. Para a EASAC, indicadores são fundamentais para avaliar a EC em todos os níveis e foram categorizados em critérios como desenvolvimento sustentável, meio ambiente, análise de fluxo de materiais, comportamento social, organizacional e desempenho econômico (EASAC, 2016). No entanto, esses indicadores ainda não incluem diretamente a avaliação da circularidade de produtos.

De modo semelhante, (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016) identificaram que a maioria dos indicadores de EC revisados está nos níveis macro e meso, com poucos disponíveis no nível micro. Na Europa, o Programa de Ação sobre Resíduos e Recursos foi desenvolvido em nível macro com base na análise de fluxo de material (WRAP, 2017). Na China, o primeiro Sistema de Indicadores de Avaliação da Economia Circular oferece três sistemas distintos de indicadores: nível micro, para avaliação geral da EC; nível nacional, para orientar o planejamento futuro da EC; e nível meso, para avaliar o estado da EC em parques industriais (GENG et al., 2012).

A colaboração entre esses níveis é essencial, não apenas no desenvolvimento conjunto

de tecnologias que viabilizam a EC, mas também na compreensão das mudanças nas relações cliente-comprador-fornecedor, em que o fornecimento de matéria-prima — como resíduos orgânicos — torna-se uma mercadoria valiosa para operações como plantas de digestão anaeróbia (HOWARD; HOPKINSON; MIEMCZYK, 2019). Um exemplo é a transformação de resíduos sólidos municipais em ureia para a produção de produtos químicos, fruto da colaboração entre indústria local e governo municipal, visando melhorar a economia regional em direção a uma EC de âmbito macro (ANTONETTI et al., 2017).

No contexto da EC, indicadores de circularidade podem ser um impulso para a transição a práticas mais circulares, devido a seus múltiplos usos potenciais (LINDER; SARASINI; LOON, 2017). Esses usos incluem: indicadores-chave de desempenho (para *benchmarking* e comparação de indústrias), rótulos de produtos (para orientar escolhas de consumidores) e base para mudanças regulatórias.

Dada a complexidade do paradigma da EC e as inter-relações entre os diferentes atores ao longo da cadeia de valor, os sistemas de indicadores de circularidade podem **padronizar a comunicação** e facilitar a transição para uma economia circular (SAIDANI et al., 2017). Com essa base em vigor, regiões e empresas que adotam os princípios da EC podem cooperar e estabelecer metas que permitam medir seu progresso rumo à circularidade. É importante ressaltar que, embora a medição do desempenho circular permita compreender melhor os impactos amplos das atividades circulares, poucas empresas ainda realizam essa medição (CORONA et al., 2019; WBCSD, 2018).

Para integrar os princípios da EC à missão ou estratégia de uma empresa, esses elementos devem ser incorporados aos sistemas de gerenciamento de operações e desempenho (CORONA et al., 2019). Empresas com maior maturidade em circularidade desenvolvem políticas específicas de EC e elaboram planos de ação para alcançá-la, semelhantes ao Sistema de Gestão Ambiental (BSI, 2017). Para que unidades de negócios se envolvam com a transição para a circularidade, as métricas e metas devem ser aplicáveis a equipes e indivíduos e estimular melhorias ao longo do tempo.

Considerando que esta pesquisa examina métodos de avaliação no contexto da EC, é essencial definir a **circularidade** para entender plenamente as métricas analisadas. Avaliações de circularidade são fundamentais para monitorar e melhorar a EC em diferentes escalas. Assim, a **circularidade** pode ser definida como o alinhamento de materiais, produtos, processos ou sistemas a estratégias de EC, como *redesign*, desmontagem de produtos, reciclagem e uso de energia renovável, que atendem a princípios como *design* sem desperdício, manutenção de produtos e regeneração de sistemas naturais (EMF, 2020).

Alguns autores apresentam indicador de circularidade como uma métrica que pode representar uma estratégia mensurável ou uma combinação dessas estratégias, uma solução ou um processo (OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021; ABNT, 2024). No entanto, para uma comunicação mais clara, definiremos ferramentas analíticas que medem o grau de associação de um sistema a práticas e estratégias que promovem os princípios da EC, sendo que maior circularidade indica um sistema mais próximo dos objetivos definidos pela EC, como **sistemas**

de indicadores de circularidade.

2.4.3 Critérios para definição de indicadores

A tomada de decisão é essencialmente um processo mental e cognitivo que resulta na escolha do curso de ação mais adequado, baseado em critérios tangíveis e intangíveis, arbitrariamente escolhidos pelo decisor (SAATY; SAGIR, 2009). Definir claramente os critérios para a seleção de indicadores é um passo inicial crucial. De acordo com Gabrielsen e Bosch (2003), um bom indicador deve: comunicar de forma eficaz uma realidade simplificada, atender aos interesses do público-alvo, ser acessível e fácil de interpretar, e representar fielmente a questão ou área em consideração.

Quanto à sua funcionalidade, o indicador deve mostrar o desenvolvimento ao longo de um intervalo de tempo relevante, ter um valor de referência para comparar mudanças ao longo do tempo, ser comparável a outros indicadores em áreas, setores ou atividades similares e ter base científica sólida. Além disso, Weiland (2006) propõe que indicadores de sustentabilidade sigam critérios metodológicos, como possuir uma lógica clara, representar adequadamente um sistema complexo, ser especificados com clareza e ter replicabilidade.

Nesse contexto, a norma ISO 59020 (ABNT, 2024) introduz um referencial técnico para a medição do desempenho em circularidade. Ela estabelece diretrizes para a definição de limites do sistema, a seleção de indicadores — classificados entre obrigatórios e opcionais — e a interpretação de dados em diferentes níveis de análise, incluindo sistemas regionais, organizacionais e de produto. A proposta da norma é uniformizar procedimentos de coleta, cálculo e avaliação de indicadores, com o objetivo de permitir maior coerência e comparabilidade entre avaliações de circularidade realizadas por diferentes organizações. Apesar desse avanço, a norma não oferece um processo operacional para apoiar a seleção de indicadores em contextos empresariais específicos. Essa limitação reforça a necessidade de metodologias de apoio à decisão, como a proposta nesta tese.

No entanto, muitos dos sistemas de indicadores voltados para a EC não capturam toda a complexidade desse conceito, nem abordam todas as opções de fim de vida útil necessárias para fechar o ciclo (SAIDANI et al., 2019). Por exemplo, o sistema de indicadores de EC utilizado em empresas siderúrgicas, que inclui 13 indicadores agrupados em três categorias (índice de entrada e consumo de recursos, índice de fluxo e reciclagem de recursos, índice de produção e gerenciamento de recursos), foca principalmente na eficiência de recursos por meio da reciclagem, sem considerar outros cenários de final de vida (ZHOU; CHEN; XIAO, 2013).

2.4.3.1 Critérios já utilizados em economia circular

Huamao e Fengqi (2007) exploraram a EC sob a perspectiva da teoria de sistemas, destacando a importância dos níveis da EC. Todos os níveis são “interdependentes, interativos e mutuamente restritivos” (HUAMAO; FENGQI, 2007). Como ressaltam, “os níveis da economia

circular devem influenciar e interagir entre si, com os níveis superiores (macro e meso) tomando os inferiores como base e orientando seu desenvolvimento”. Detalhar e especificar cada nível pode, portanto, ser relevante para focar na essência da EC.

É também fundamental considerar como o setor ou a posição de uma empresa na cadeia de valor influenciam a forma como ela mede suas contribuições para a EC (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). Por exemplo, uma empresa pode querer medir não apenas a circularidade de suas operações, mas também como seus produtos promovem a circularidade na cadeia de valor. Esse motivo difere de um investidor, que pode priorizar a circularidade de um portfólio com base em métricas financeiras, ambientais e de governança.

A métrica principal pode variar conforme o setor (ROSSI et al., 2020). Assim, uma estrutura de avaliação de circularidade deve contemplar as diversas prioridades e reconhecer a importância relativa de algumas métricas sobre outras, dependendo do contexto industrial ou geográfico.

Para selecionar indicadores relacionados à eficiência de recursos, a Comissão Europeia (EC, 2014) utilizou critérios como: relevância política; cobertura das categorias e recursos essenciais; coerência e completude; transparência nas compensações e potenciais efeitos colaterais, como a transferência de carga; e aplicabilidade a diferentes níveis de atividades econômicas. Outras listas de critérios para escolha de indicadores foram propostas, principalmente por gestores ou empresas de consultoria.

A Deloitte (DELOITTE, 2015) recomendou os critérios RACER (relevantes, aceitáveis, verossímeis, fáceis e robustos) para avaliar a adequação dos indicadores. Outras siglas eficientes, como SMART (específico, mensurável, alcançável, relevante e com prazo) ou CREAM (claro, relevante, econômico, adequado e monitorável), são frequentemente usadas no meio corporativo para definir e selecionar indicadores, baseadas nas melhores práticas de gestão. Essas siglas representam critérios amplamente adotados para indicadores de desempenho, que servem como guias práticos na identificação dos indicadores mais adequados em diversos setores.

2.4.3.2 *Análise de decisão multicritério*

A *Multiple-criteria decision analysis* (MCDA) é definida como um “termo guarda-chuva” que descreve uma coleção de abordagens que levam em consideração múltiplos critérios, auxiliando indivíduos ou grupos a analisar problemas complexos ao escolher, ordenar ou classificar ações potenciais. A MCDA permite considerar fatores quantitativos e qualitativos nesse processo (GRIPPO; ROMANO; VASTOLA, 2019), utilizando métodos baseados em princípios matemáticos para resolver objetivos conflitantes (NIERO; KALBAR, 2019).

A MCDA organiza todas as informações disponíveis e avalia prós e contras de cada alternativa para ajudar a identificar o caminho ideal quando ele não é claro ((ZANGHELINI et al., 2018). Esse método auxilia o tomador de decisão a lidar com grandes quantidades de informações quantitativas e qualitativas (ALAMEREW; BRISSAUD, 2019). A MCDA pode ser utilizada para identificar uma opção preferível, classificar opções, reduzir o conjunto de opções

para avaliação posterior, ou simplesmente diferenciar entre opções aceitáveis e inaceitáveis (DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS, 2001).

Dado o grau de complexidade dos sistemas circulares, o uso da MCDA para avaliar aspectos da EC tem-se tornado cada vez mais comum na literatura (GONÇALVES; CAMPOS, 2022). Diversos estudos aplicam esses métodos para avaliar estratégias e desempenho de circularidade (ALAMEREW; BRISSAUD, 2019; ALAMEREW et al., 2020; NIERO; KALBAR, 2019; LIANG; ZHAO; HONG, 2018), utilizando indicadores em diferentes níveis de EC.

Segundo Polatidis et al. (2006), as abordagens MCDA podem ser classificadas em três métodos principais: métodos baseados em função de utilidade, métodos de *outranking* e métodos de programação. Os métodos de função de utilidade agregam o desempenho de cada alternativa em um único critério para facilitar a tomada de decisão; os métodos de *outranking* comparam alternativas com base nas preferências dos decisores; e os métodos de programação utilizam ferramentas computacionais para calcular e interagir com os decisores, reduzindo alternativas viáveis. Enquanto os dois primeiros métodos são aplicáveis a problemas discretos, o último se aplica a problemas contínuos. Exemplos de métodos do primeiro grupo incluem o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), enquanto o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) é um exemplo do segundo grupo.

Gonçalves e Campos (2022) destacam que o AHP e o TOPSIS são as análises mais utilizadas em estudos de EC, provavelmente devido à facilidade de aplicação e à confiabilidade dos resultados obtidos. Entretanto, a diversidade de abordagens reflete a complexidade da EC, permitindo que várias técnicas multicritério sejam aplicadas para medir seus aspectos.

Embora existam diversas ferramentas para tomada de decisão, o AHP é frequentemente preferido por pesquisadores, devido à sua capacidade de lidar com problemas complexos e múltiplos objetivos inter-relacionados. Ele é classificado como um método baseado em função de utilidade (SAATY, 1990), utilizando comparações em pares para dividir o processo de decisão em níveis hierárquicos, com os pesos preferenciais extraídos das matrizes de comparação de pares. O resultado final é uma classificação das alternativas (SAATY, 1990; YADAV et al., 2020).

Por sua vez, o TOPSIS utiliza funções de agregação que representam a proximidade dos valores ótimos e péssimos de referência, dependendo do objetivo de maximizar ou minimizar um critério (GOMES et al., 2020). Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade de implementação e à capacidade de considerar um número ilimitado de alternativas e critérios (GARCIA-BERNABEU et al., 2020).

Apesar da eficácia de AHP e TOPSIS na resolução de problemas multicritério, há uma incerteza associada ao julgamento humano, pois as comparações entre pares envolvem subjetividade, e os objetos de análise frequentemente não podem ser avaliados com precisão em uma escala fixa (MEHRJERDI, 2012). Assim, técnicas *fuzzy* são utilizadas em conjunto com MCDA para aumentar a confiabilidade da análise. A teoria dos conjuntos *fuzzy* permite quantificar um grau de verdade entre 0 e 1, ajudando a resolver o desafio da lógica imprecisa

(GUE et al., 2020). Incorporando o método *fuzzy* ao AHP, cria-se o FAHP, no qual os dados são processados para fortalecer o processo de decisão (CHEN; LIN; HUANG, 2006). Estudos como os de Wang et al. (2012), Awasthi, Govindan e Gold (2018) e Lee, Hu e Lim (2021) confirmam a eficácia dessa abordagem, sendo o número *fuzzy* triangular recomendado para julgamentos ambíguos de especialistas, representando o valor mínimo, mais provável e máximo (PENG et al., 2021).

É amplamente reconhecido que os indicadores são úteis e relevantes somente quando atendem às necessidades do usuário (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017). Dessa forma, o uso de critérios bem definidos e de uma estrutura adequada é essencial não apenas na definição de indicadores, mas principalmente na seleção e priorização entre os sistemas já existentes. Este é o papel central que a presente pesquisa busca desempenhar, oferecendo uma ferramenta metodológica de apoio à decisão baseada em critérios multicritério.

Assim, embora os indicadores de circularidade sejam essenciais para monitorar e comunicar o progresso rumo à EC, a diversidade de sistemas existentes torna desafiadora sua aplicação prática em empresas. Essa lacuna evidencia a necessidade de metodologias que apoiem a organização e a seleção de indicadores, objetivo central desta tese.

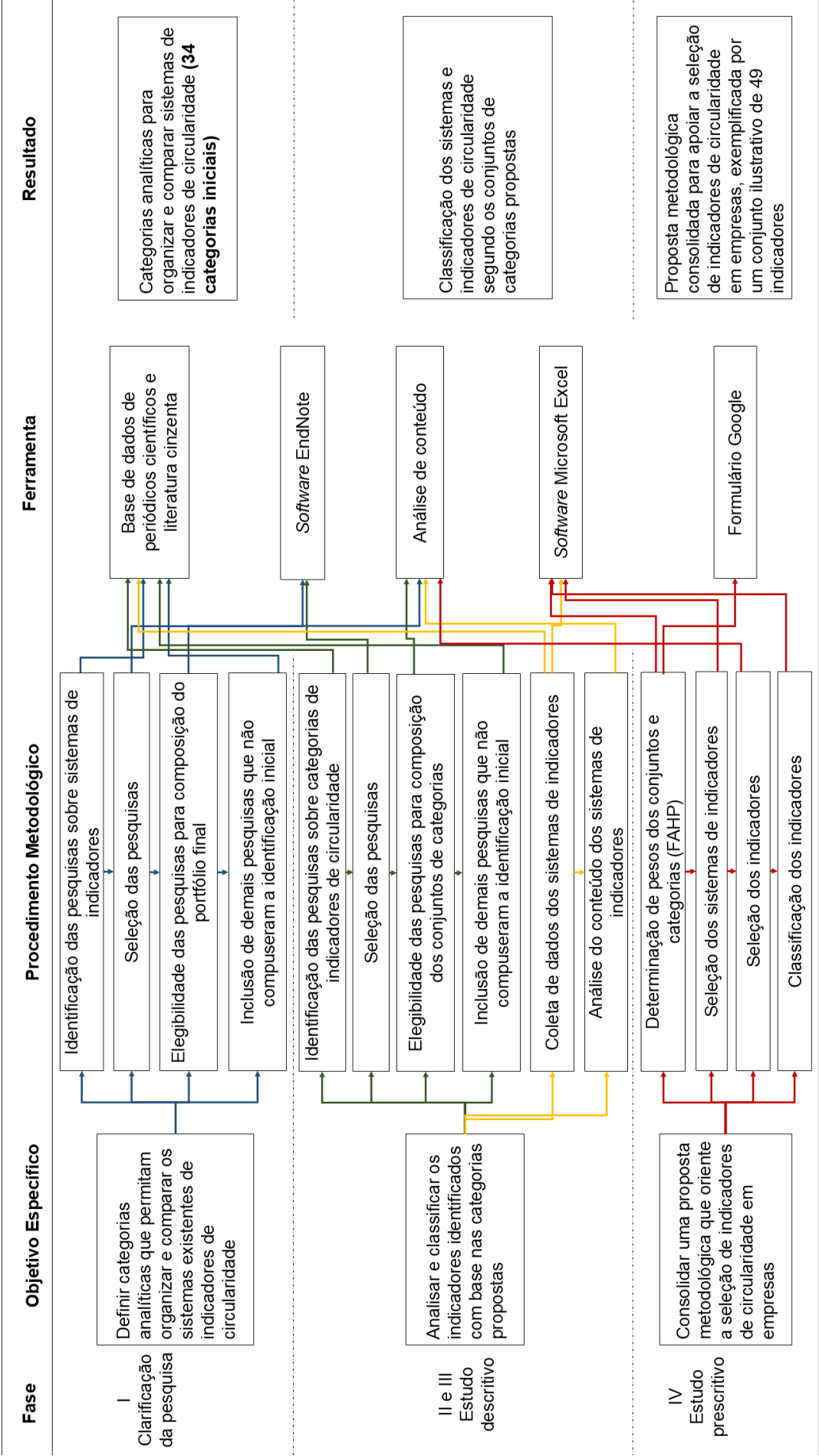
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa busca analisar os sistemas de indicadores de circularidade atualmente existentes para empresas, com foco específico nos níveis micro e nano. O objetivo não é propor novos indicadores, mas organizar e compreender as metodologias já disponíveis, identificando lacunas e desafios que dificultam sua aplicação prática. A partir desse diagnóstico, a pesquisa avança para a construção de uma proposta metodológica que apoie a seleção estruturada de indicadores de circularidade pelas empresas.

A metodologia escolhida como base para guiar as fases metodológicas desta pesquisa foi a *Design Research Methodology* (DRM) (BLESSING; CHAKRABARTI; WALLACE, 1995). Esta metodologia fornece uma abordagem estruturada e um conjunto de métodos de apoio e diretrizes para a condução de pesquisas de *design*. A abordagem DRM foi selecionada para esta pesquisa principalmente por sua capacidade de oferecer um guia para o planejamento sistemático da investigação (ROSSI et al., 2020).

Cada fase da DRM é subdividida em etapas, e cada uma delas possui procedimentos metodológicos específicos. A Figura 6 apresenta uma ilustração e resumo das fases da pesquisa, relacionando os objetivos específicos, os procedimentos metodológicos adotados e os resultados esperados.

Figura 6 – Fases da pesquisa, procedimentos metodológicos e resultados esperados



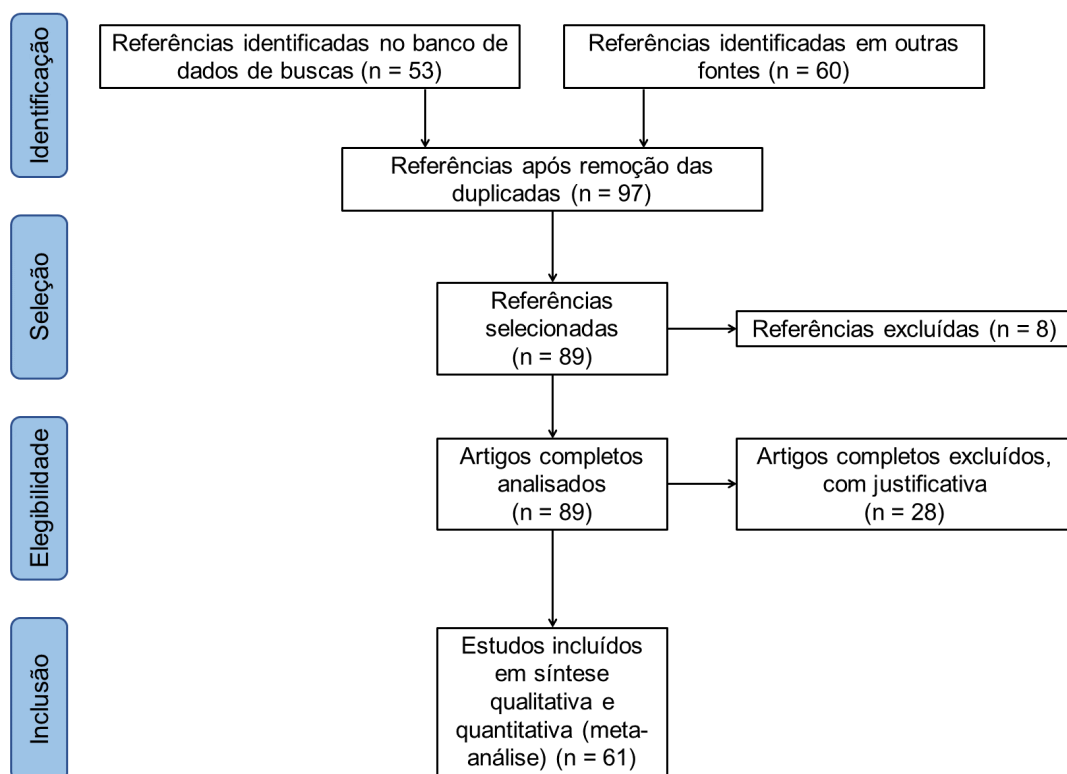
Fonte: Elaborada pela autora.

3.1 FASE I - REVISÃO DA LITERATURA PARA DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE

Segundo Blessing, Chakrabarti e Wallace (1995), esta etapa é conhecida como a fase de “clarificação da pesquisa”. A Fase I propõe uma busca detalhada dos sistemas de indicadores de circularidade focados em recursos, produtos e empresas, com o objetivo de mapear e organizar o portfólio existente como base para a proposta metodológica de seleção. Essa fase, portanto, consiste em uma busca detalhada dos sistemas de indicadores de circularidade focados em recursos, produtos e empresas, excluindo sistemas de indicadores que sejam estritamente ambientais, econômicos, sociais ou de sustentabilidade, uma vez que o foco está em métricas voltadas diretamente à circularidade em níveis micro e nano.

Na Fase I, realizou-se uma revisão sistemática da literatura com base no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (MOHER et al., 2009). O processo incluiu tanto artigos revisados por pares quanto literatura cinzenta (por exemplo, relatórios, publicações comerciais e ferramentas encontradas em sites). A revisão foi conduzida em um procedimento de quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Procedimento de revisão de literatura de acordo com o método PRISMA.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com esse objetivo, a Fase I está dividida em duas etapas, sendo elas: (i) Identificação e Seleção dos Artigos, e (ii) Elegibilidade e Inclusão de Artigos. As etapas estão descritas a seguir.

3.1.1 Etapa 1 - Identificação e Seleção

Guiado pelo primeiro objetivo específico, um conjunto de palavras-chave englobando termos relacionados a negócios e EC foi selecionado. A busca foi realizada por meio da combinação dessas palavras-chave por meio de operadores booleanos (AND / OR). A linha de pesquisa aplicada às bases de dados científicas foi:

((*"compan*"*) OR (*"business*"*) OR (*"entreprise*"*) OR (*"organi?ation*"*) OR (*"micro level"*)) AND ((*"circular indicator*"*) OR (*"circular index*"*) OR (*"circular metric*"*) OR (*"circular tool*"*) OR (*"circular economy measur*"*) OR (*"circular economy assess*"*))

A combinação de palavras-chave foi aplicada a “título, resumo e palavras-chave” na base de dados *Scopus* e a “tópico” na base de dados *Web of Science*, dois dos mais extensos repositórios na área científica relacionada.

Posteriormente, uma variação de uma abordagem de bola de neve semiestruturada (WOHLIN, 2014) foi realizada para capturar metodologias e sistemas de indicadores adicionais e emergentes apresentados em relatórios e literatura cinzenta (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). Embora a literatura cinzenta possa apresentar resultados preliminares e mesmo simplistas (COSTA; QUINTEIRO; DIAS, 2019), a inclusão de tais publicações é vital para o objetivo deste artigo, uma vez que muitas das ferramentas de avaliação de circularidade são desenvolvidas como iniciativas de organizações empresariais e instituições não acadêmicas (GEISSDOERFER et al., 2017; LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020).

A pesquisa bibliográfica e a amostragem em bola de neve foram realizadas até que não fossem encontradas novas interações (publicações apresentando métricas diferentes daquelas já presentes no portfólio). A busca levou à identificação de 53 documentos revisados por pares, e a bola de neve completou o conjunto com a inclusão de 61 publicações. As duplicatas representaram 16 publicações excluídas, restando 97 documentos. Oito artigos adicionais foram excluídos com base nas informações apresentadas em títulos, resumos e palavras-chave.

3.1.2 Etapa 2 - Elegibilidade e Inclusão

A seleção das publicações elegíveis baseou-se na leitura integral dos demais artigos e na adesão aos critérios de busca apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Critério de elegibilidade da literatura

Critério de inclusão	Critério de exclusão
Relacionado à EC	Literatura que não apresenta indicadores de circularidade
Níveis nano e/ou micro	Literatura com foco em níveis meso e macro
Literatura revisada por pares ou cinzenta (relatórios)	
Indicadores e ferramentas presentes em <i>websites</i>	

Fonte: elaborado pela autora.

Um total de 28 publicações foram descartadas na leitura do texto integral por não se enquadrarem no objetivo desse estudo. Isso leva a um portfólio inicial de 14 artigos restantes da pesquisa de banco de dados e 47 publicações da técnica de bola de neve semiestruturada (30 artigos estão presentes na literatura revisada por pares, 16 fazem parte de publicações da literatura cinzenta e 1 dissertação). Assim, o portfólio final incluiu 61 publicações que abordaram 58 sistemas de indicadores de circularidade em nível nano e/ou micro, que servirão como base para a análise comparativa e para a construção do processo metodológico de seleção proposto nesta tese. O portfólio final foi organizado através do *software* Endnote® e movido para uma planilha para análise posterior (para o portfólio final, consulte o Apêndice A).

3.2 FASE II - DEFINIÇÃO DAS CATEGORIAS

Esta fase também é conhecida como estudo descritivo (BLESSING; CHAKRABARTI; WALLACE, 1995) em que é realizado o detalhamento da descrição do portfólio do sistema de indicadores, permitindo que seja possível definir os fatores que serão abordados. Ela visa estruturar as categorias que servirão de base para o desenvolvimento do processo metodológico de seleção de indicadores, a partir dos resultados obtidos na Fase I.

Para auxiliar na estruturação da proposta metodológica de seleção de indicadores em níveis micro e nano, é necessário extrair a maior quantidade de informações sobre cada sistema de indicadores. Assim, há um maior entendimento do funcionamento de cada sistema e como eles são estruturados, permitindo discutir sua aplicabilidade e limitações no contexto empresarial. A Fase II está dividida em três etapas, sendo elas: (i) Identificação, (ii) Seleção, Elegibilidade e Inclusão, e (iii) Divisão das categorias por conjunto.

3.2.1 Etapa 1 - Identificação

Para esta etapa, foi realizada uma segunda revisão da literatura. Esta, dando enfoque a categorias analisadas em artigos já existentes de revisão da literatura. Da mesma maneira que a Fase I, realizou-se uma revisão sistemática da literatura com base no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (MOHER et al., 2009), visando artigos revisados por pares e literatura cinzenta, tendo como foco principal os relatórios técnicos.

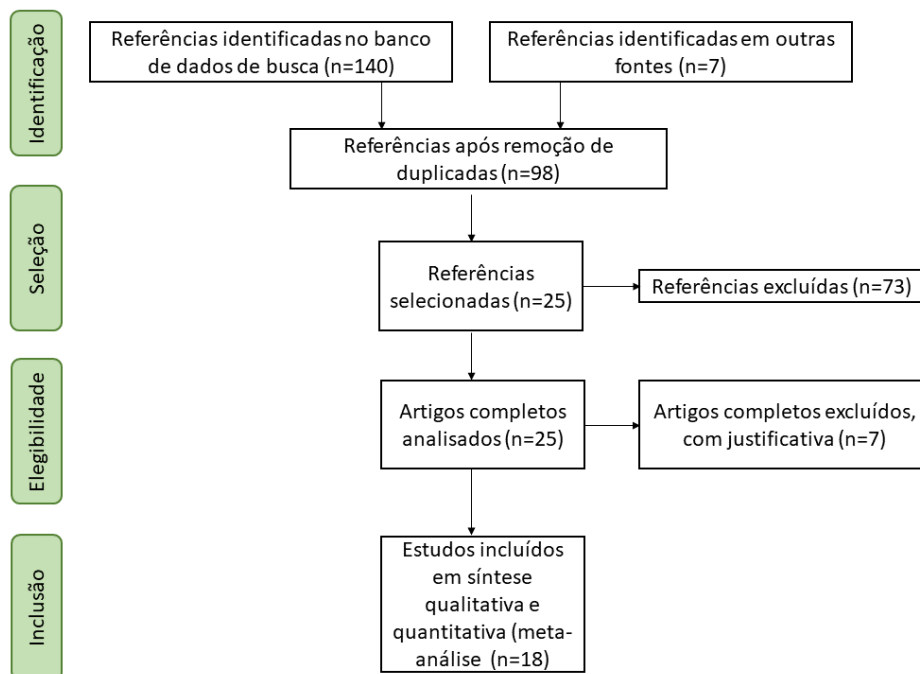
A busca foi realizada por meio da combinação dessas palavras-chave com o operador booleano AND. A linha de pesquisa aplicada às bases de dados científicas foi:

((*"circular economy"*) AND (*"literature review"*) AND (*"indicator*"*))

A combinação de palavras-chave foi aplicada a “título, resumo e palavras-chave” na base de dados *Scopus* e a “tópico” na base de dados *Web of Science*. Posteriormente, uma variação de uma abordagem de bola de neve semiestruturada (WOHLIN, 2014) foi realizada para capturar categorias adicionais apresentadas em relatórios e literatura cinzenta (LINDGREEN;

SALOMONE; REYES, 2020). A revisão da literatura para definição das categorias qualificatórias é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Método PRISMA para definição das categorias qualificatórias.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.2 Etapa 2 - Seleção, Elegibilidade e Inclusão

A seleção das publicações elegíveis baseou-se na leitura integral dos demais artigos e relatórios e na adesão aos critérios de busca apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Critério de elegibilidade da segunda revisão de literatura

Critério de inclusão	Critério de exclusão
Disponibilidade de documentos completos	Documentos incompletos e sem acesso
Literatura revisada por pares ou cinzenta (relatórios)	Literatura que não apresenta categorias voltadas a indicadores de circularidade
Categorias que abrangem todos os setores	Categorias que são específicas a um setor

Fonte: elaborado pela autora.

A pesquisa bibliográfica e a amostragem em bola de neve foram realizadas até que não fossem encontradas novas interações. A busca levou à identificação de 140 documentos revisados por pares, e a bola de neve completou o conjunto com a inclusão de 7 publicações. As duplicatas representaram 49 publicações excluídas, restando 98 documentos. Dos 73 documentos excluídos, 14 artigos foram excluídos com base nas informações apresentadas em títulos, resumos e palavras-chave, e o restante por não possuir documento completo disponível ou não

estar vinculado a indicadores de economia circular. Apenas 7 artigos foram excluídos após leitura completa do texto. Os documentos foram organizados por meio do *software* Endnote® e as 34 categorias finais foram movidas para uma planilha para análise posterior (para informações detalhadas dos artigos utilizadas nos resultados bibliométricos, consulte o Apêndice B).

3.2.3 Etapa 3 - Divisão das categorias por conjunto

Nessa subseção são apresentadas as categorias selecionadas e suas divisões, organizadas em 6 conjuntos que estruturam a análise comparativa. Essa organização é essencial para que, nas fases seguintes, seja possível integrar critérios consistentes ao processo de seleção de indicadores de circularidade. Além do mais, algumas das categorias apresentam subcategorias, como é possível verificar no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Divisão das categorias levantadas

(continua)

Conjunto	Categoria	Subcategoria	Autores
Contexto	Transversalidade	Setor específico	Saidani et al. (2019)
		Material específico	
		Genérico	
	Fonte	Academia	Saidani et al. (2019)
		Indústrias ou agências de consultoria	
		Organizações ambientais ou governamentais	
	Validação	Sim	Lindgreen et al. (2020)
		Não	
	Categoria de indústria	-	Cagno et al. (2021) Corona et al. (2019) Lindgreen et al. (2020) Panchal et al. (2021) Sassanelli et al. (2019) Vinante et al. (2021)
	Produto/Material	-	
	Tamanho da empresa	Pequena	Cagno et al. (2021)
		Média	Vinante et al. (2021)
		Grande	
		Nenhuma	
	Localização geográfica	-	Vinante et al. (2021)
Indicador	Mensurabilidade	Qualitativa	Ahmed et al. (2022) Kristensen e Mosgaard (2020) Moraga et al. (2019) Saidani et al. (2019) Vinante et al. (2021)
		Quantitativa	
	Dimensão	Indicador único	Elia et al. (2017) Moraga et al. (2019)
		Múltiplo indicador	Ahmed et al. (2022) Kristensen e Mosgaard (2020) Saidani et al. (2019)
	Formato	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Kristensen e Mosgaard (2020) Saidani et al. (2019)
		Fórmulas para calcular	
		Ferramenta computacional	
		Planilha Excel dinâmica	
		Pesquisa online	
		Ferramenta baseada na web	
		Quadro de avaliação	

(continua)

Conjunto	Categoria	Subcategoria	Autores
Indicador	Unidades mais utilizadas	Porcentagem	Kristensen e Mosgaard (2020)
		Contagem	
		Massa	
		Tempo	
		Não medido	Moraga et al. (2019)
		Valor/custo	
		Outra	
		Razão	
	Utilização	Tomada de decisão	Lindgreen et al. (2020)
		Comunicação	Saidani et al. (2019)
		Informação	Saidani et al. (2019)
		Ensino	
		Abordagem participativa	Lindgreen et al. (2020)
	Foco temporal	Retrospectivo	Harris et al. (2021)
		Prospectivo	Saidani et al. (2019)
	Tipo de indicador	Medição	Corona et al. (2017)
		Avaliação	
	Variáveis	Energia	Sassanelli et al. (2019)
		Material	
		Outras variáveis	
		Poluição	
Metodologia	Metodologia baseada em índices	Padronizada	Elia et al. (2017)
		Conjunto específico de indicadores	
	Metodologia de avaliação	ACV	Harris et al. (2021)
		AFM	
		ESMR	Lindgreen et al. (2020)
		Modelagem analítica	
		Outra	Sassanelli et al. (2019)
	Abordagem de modelagem	Contável	Harris et al. (2021)
		Comparação entre produtos ou modelos	
		Análise de cenários	
		Conecta níveis do sistema	
	Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC	Direta com estratégias específicas	Moraga et al. (2019)
		Direta sem estratégias específicas	
		Indireta	
Sustentabilidade	Pilar da sustentabilidade	Econômico	Kravchenko et al. (2019)
		Ambiental	Kristensen et al. (2020)
			Lindgreen et al. (2020)
	Social		Panchal et al. (2021)
			Sassanelli et al. (2019)
	Estendido a ESG Governança	Sim	Vinante et al. (2021)
		Não	
	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC	-	Panchal et al. (2021)

(conclusão)

Conjunto	Categoria	Subcategoria	Autores
Elementos da EC	Nível sistêmico	Nano	de Oliveira et al. (2020)
		Micro	
	Estágio de ciclo de vida	Extrair	de Oliveira et al. (2020)
		Produzir	
		Usar	
		Recuperar	
		Ciclo de vida completo	
	Tipo de ciclo	Biológico	Panchal et al. (2021)
		Técnico	
	Desempenho	Intrínseco	Saidani et al. (2019)
		Impacto	
	Múltiplos ciclos de vida	Sim	de Oliveira e Oliveira (2023)
		Não	
	Princípios	Preservar e restaurar o capital natural	de Oliveira e Oliveira (2023)
Otimizar o rendimento dos recursos			
Promover a eficácia do sistema			
Estratégias da EC	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Recusar	Cagno et al. (2021)
		Redesign	Comissão Europeia (2015)
		Reduzir	Corona et al. (2017)
	Estender a vida útil dos produtos e suas peças	Durabilidade	Elia et al. (2017)
		Atualizar	Kravchenko et al. (2017)
		Consumo	EMF (2015)
		Reusar	Kirchherr et al. (2017)
		Reparar e manutenção	Kristensen e Mosgaard (2020)
		Recondicionar	Moraga et al. (2019)
		Remanufaturar	Panchal et al. (2021)
		Reaproveitar	Parchomenko et al. (2019)
	Aplicação útil de materiais	Reciclar	Potting et al. (2017)
		Recuperar	Saidani et al. (2019)
	Modelo de negócios	Sim	Vinante et al. (2022)
		Não	Cagno et al. (2021)
	Reinventar o paradigma	Inovação e investimento	Elia et al. (2017)
		Trocar	EMF (2015)
	Ciclo cruzado e colaboração entre setores	Cooperação	Kravchenko et al. (2017)
			Potting et al. (2017)
			Vinante et al. (2022)
		Elia et al. (2017)	
		Moraga et al. (2019)	
		Vinante et al. (2022)	

Fonte: elaborado pela autora.

3.3 FASE III - ANÁLISE DO PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES PELAS CATEGORIAS

Esta fase corresponde também ao estudo descritivo. Ela aprofunda a análise dos sistemas de indicadores presentes no portfólio, com o objetivo de identificar padrões, limitações e potencialidades dos indicadores em relação às categorias estabelecidas. Aqui, os sistemas de indicadores definidos na Fase I são analisados em profundidade, estabelecendo uma relação entre cada um e as categorias qualificatórias selecionadas na fase anterior. Para classificar os sistemas de indicadores, foram definidos alguns critérios específicos para cada categoria. As subseções a seguir detalham como os sistemas de indicadores foram qualificados em cada uma dessas categorias.

3.3.1 Contexto

O conjunto de categorias denominado “Contexto” engloba as informações básicas dos sistemas de indicadores e está subdividido em sete categorias.

Na categoria **Transversalidade**, os sistemas de indicadores genéricos são aplicáveis a todos os setores e a qualquer tipo de empresa, independentemente de porte, localização, ramo ou atividade. Já os sistemas de indicadores específicos de setor se concentram em setores específicos e oferecem respostas mais operacionais (SAIDANI et al., 2019). Além disso, os sistemas de indicadores específicos de material são voltados para aplicações em materiais específicos.

A categoria **Fonte** identifica a origem dos sistemas de indicadores e seu histórico de desenvolvimento (SAIDANI et al., 2019). Em relação à **Validação**, os sistemas de indicadores devem ser respaldados por estudos de caso. As categorias **Tamanho da empresa**, **Localização geográfica** e **Produto/material** foram incluídas por representarem limitações na aplicabilidade dos sistemas de indicadores (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020). Cada artigo ou documento de base associado aos sistemas de indicadores deveria, portanto, apresentar essas informações. Para a categoria **Categoria de indústria**, foi utilizada a lista do United States Bureau of Labor Statistics (2023), que identifica o setor específico no qual o estudo de caso foi realizado.

3.3.2 Indicador

O conjunto de categorias intitulado “Indicador” refere-se às características dos sistemas de indicadores necessários para serem desenvolvidos nas empresas. Este conjunto está organizado em oito categorias distintas.

A categoria **Mensurabilidade** abrange as formas de medição dos sistemas de indicadores para o progresso da EC, considerando tanto dados quantitativos quanto qualitativos (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023). **Dimensão** verifica se os sistemas de indicadores traduzem

a circularidade em um único número ou se oferecem uma visão mais abrangente por meio de múltiplas respostas.

A categoria **Formato** foi selecionada para avaliar a complexidade dos sistemas de indicadores, examinando o formato de avaliação associado a eles para facilitar seu cálculo (SAIDANI et al., 2019). **Variáveis** identifica os tipos de variáveis mais comumente utilizadas por cada sistema de indicadores.

A categoria **Unidades mais utilizadas** analisa as unidades de medida predominantes entre os sistemas de indicadores. A categoria **Utilização** esclarece a intenção dos sistemas de indicadores, subdividida em cinco subcategorias (SAIDANI et al., 2019):

- Tomada de decisão: orienta ações e auxilia em atividades gerenciais e na formulação de estratégias;
- Comunicação: facilita a elaboração de relatórios para as partes interessadas e o público em geral;
- Informação: apoia o acompanhamento de progresso, *benchmarking* e identificação de áreas de melhoria;
- Educação: promove a conscientização dos colaboradores e consumidores sobre questões de EC;
- Abordagem participativa: incorpora o envolvimento do usuário final, consumidor ou outras partes interessadas nos indicadores.

O **Foco temporal** distingue entre circularidade real e potencial, determinando se os sistemas de indicadores avaliam as transições de EC de forma prospectiva (antes da aplicação das estratégias) e/ou retrospectiva (após a aplicação) (SAIDANI et al., 2019). Sistemas de indicadores retrospectivos frequentemente utilizam dados existentes para avaliações atuais ou passadas, enquanto os prospectivos empregam cenários ou modelagem para avaliar potenciais produtos ou sistemas futuros (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021).

A classificação dos sistemas de indicadores por **Tipo de indicador** segue a definição de Brandon e Lombardi (2010). Um sistema de indicadores de medição fornece uma resposta quantitativa ou qualitativa sobre o progresso em circularidade, determinando se um processo ou produto está mais circular em relação ao ponto de partida. Um sistema de indicadores de avaliação, por sua vez, orienta a tomada de decisões estratégicas para aplicar os princípios de EC, focando frequentemente nos impactos ambientais ou econômicos causados à sociedade pela estratégia circular, em vez da circularidade intrínseca (CORONA et al., 2019).

3.3.3 Metodologia

O conjunto de categorias denominado “Metodologia” abrange a metodologia empregada por cada sistema de indicador, dividindo-se em quatro categorias principais.

As categorias **Metodologia baseada em índices** e **Metodologia de avaliação** foram incluídas para esclarecer a usabilidade e complexidade dos métodos que os tomadores de decisão devem considerar no contexto de suas empresas (KRAVCHENKO; PIGOSSO; MCALONE, 2020). Dentro da **Metodologia baseada em índices**, a subcategoria Padronizada refere-se a uma abordagem amplamente utilizada nos setores industrial ou de serviços, reconhecida pela eficácia em medir a EC em diferentes contextos. Já a subcategoria Conjunto específico de indicadores indica que a metodologia adotada é única e não aparece em outras fontes analisadas.

A categoria **Abordagem de modelagem** define o foco de cada sistema de indicadores na ótica da EC (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). Dentro desta categoria, a subcategoria Contável quantifica as implicações de um produto ou serviço. A subcategoria Comparação entre produtos ou modelos contrapõe empresas com modelos de negócio lineares e circulares. A subcategoria Análise de cenários constrói e avalia diferentes cenários, enquanto Conecta níveis do sistema compara indicadores ou impactos nos diferentes níveis do sistema circular.

A categoria **Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC** segue a abordagem de Moraga et al. (2019). Nesta categoria, os sistemas de indicadores podem se concentrar em uma ou mais estratégias de EC. Na subcategoria Direta com estratégias específicas, os sistemas de indicadores focam explicitamente em estratégias de EC identificáveis. Na subcategoria Direta sem estratégias específicas, os sistemas de indicadores abordam mais de uma estratégia sem detalhá-las explicitamente. Na subcategoria Indireta, os sistemas de indicadores avaliam aspectos das estratégias de EC com o uso de abordagens auxiliares.

3.3.4 Sustentabilidade

O conjunto de categorias denominado “Sustentabilidade” aborda como cada sistema de indicadores considera os aspectos de sustentabilidade. Esta dimensão é dividida em duas categorias principais: (1) os três pilares da sustentabilidade — econômico, social e ambiental; e (2) os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Além dessas duas categorias, foi analisada a incorporação da governança nas empresas, ampliando a sustentabilidade para incluir a dimensão Ambiental, Social e Governança (ESG). Com isso, o conjunto está dividido em três categorias.

Para a análise de vinculação dos sistemas de indicadores ao **Pilar da sustentabilidade**, foram incluídos todos os que tratam estritamente dos fluxos de materiais e energia, abordando assim a dimensão ambiental. Para serem considerados econômicos, os sistemas de indicadores precisam demonstrar uma natureza e finalidade econômicas, como fluxos monetários e custos de materiais. Já os sistemas de indicadores sociais abordam questões sociais associadas às operações dos sistemas, como emprego e segurança.

Na categoria **Estendido a ESG - Governança**, verificou-se se cada sistema de indicadores possui alguma métrica referente à governança. Para a categoria **ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC**, foi analisado se os sistemas de indicadores incluem alguma métrica diretamente relacionada aos objetivos específicos dos ODS, resultando

na listagem dos ODS contemplados na melhoria do desempenho da EC.

3.3.5 Elementos da Economia Circular

O conjunto de categorias denominado “Elementos da EC” abrange as características de cada sistema de indicadores em relação aos elementos fundamentais da EC. Essas características envolvem, por exemplo, o nível sistêmico da EC, o tipo de ciclo da EC analisado pelo sistema de indicadores e os princípios da EC abordados por cada um. Esse conjunto está dividido em seis categorias principais.

A categorização dos sistemas de indicadores por **Nível sistêmico** foi considerada essencial, uma vez que diferentes níveis requerem estruturas de indicadores distintas (SAIDANI et al., 2019). Como o foco da pesquisa é direcionado a empresas e produtos, os níveis de análise selecionados foram nano e micro.

Na categoria **Estágio de ciclo de vida**, foram consideradas quatro fases comuns ao pensamento do ciclo de vida, com a exceção da etapa de descarte, que está fora do escopo dos sistemas de indicadores avaliados. O estágio Extrair corresponde à obtenção de recursos naturais (energia e materiais) diretamente do ambiente (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017). Os sistemas de indicadores de circularidade no estágio de Produzir abordam o processo de manufatura dentro da lógica da EC (ZHANG et al., 2020). No estágio Usar, o foco é promover a aceitação e mudança comportamental dos consumidores no contexto circular (SADHUKHAN; MARTINEZ-HERNANDEZ, 2017). Por fim, o estágio Recuperar refere-se a práticas de EC voltadas para a recuperação de resíduos, materiais e energia após o uso inicial (PRIETO-SANDOVAL et al., 2018).

A categoria **Tipo de ciclo** examina se o foco está em produtos de consumo ou serviço (PANCHAL; SINGH; DIWAN, 2021). Componentes biológicos são projetados para reentrar na biosfera, pois são biodegradáveis e devolvem valor ao meio ambiente (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023). Por outro lado, componentes técnicos, que são de natureza não renovável, não devem reentrar na biosfera. Os sistemas de indicadores foram analisados para verificar se atendem ao ciclo biológico, como em práticas de compostagem, ou ao ciclo técnico, que inclui remanufatura e reciclagem.

Em **Desempenho**, observou-se que alguns sistemas de indicadores medem a circularidade intrínseca (por exemplo, taxas de recirculação de recursos), enquanto outros avaliam as consequências dos ciclos da EC (como impactos ambientais) (SAIDANI et al., 2019).

A categoria **Múltiplos ciclos de vida** inclui sistemas de indicadores que avaliam produtos, componentes e materiais em nível nano e práticas nas empresas para uma segunda ou mais vidas úteis de seus produtos em nível micro (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023).

Por fim, a classificação por **Princípios** exigiu que o sistema de indicadores abordasse pelo menos um dos três princípios da Fundação Ellen MacArthur EMF (2015) (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023). Os sistemas de indicadores na subcategoria Preservar e restaurar o capital natural devem promover a substituição de fontes finitas por renováveis, analisar a quantidade de

material virgem, repensar materiais ou design, e incluir considerações sobre o ciclo da água e materiais perigosos (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023). Em Otimizar o rendimento dos recursos, os sistemas de indicadores avaliam estratégias de circularidade, como os 9Rs de Potting et al. (2017). A subcategoria Promover a eficácia do sistema inclui sistema de indicadores que medem a quantidade de resíduos gerados, eficiência das estratégias de circularidade, desperdício zero e emissão de Gases de efeito estufa (GEE) no processo.

3.3.6 Estratégias da economia circular

O conjunto de categorias denominado Estratégias da EC foca nas principais estratégias da economia circular, incluindo as divisões de Potting et al. (2017) e estratégias adicionais que viabilizam a aplicação da EC no modelo de negócios. Esse conjunto é dividido em seis categorias.

As três categorias **Uso e fabricação de produtos mais inteligentes**, **Estender a vida útil dos produtos e suas peças** e **Aplicação útil de materiais** foram selecionadas para analisar as estratégias de circularidade abordadas por cada sistema de indicadores, permitindo verificar se elas favorecem níveis altos ou baixos de circularidade (POTTING et al., 2017). Para tanto, o sistema de indicadores deve explicitar a avaliação ou mensuração dentro dessas categorias. Embora Potting et al. (2017) descreva dez práticas de circularidade, alguns sistema de indicadores trazem abordagens distintas, também incluídas nesta pesquisa.

Na categoria **Uso e fabricação de produtos mais inteligentes**, a subcategoria Recusar se refere a sistema de indicadores que abordam questões como regeneração do capital natural, mitigação de riscos de abastecimento e escassez de recursos, redução de toxicidade ou inserção de ciclos de materiais não tóxicos. A subcategoria *Redesign* abrange sistema de indicadores que visam reduzir e recompor o uso de matéria-prima, considerando materiais alternativos como renováveis, recicláveis ou secundários (por exemplo, materiais reciclados, Simbiose Industrial) e materiais não tóxicos ou ambientalmente benignos (LIEDER; RASHID, 2016). Na subcategoria Reduzir, o objetivo é entregar mais valor com menos recursos, destacando-se a redução de emissões (poluentes e GEE) e o menor uso de recursos escassos (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017).

A categoria **Estender a vida útil dos produtos e suas peças** está dividida em oito subcategorias. A subcategoria Durabilidade diz respeito ao prolongamento da vida útil dos produtos. A subcategoria Atualizar refere-se a aprimorar a função ou estética de um produto, agregando valor às versões anteriores. Consumo foca no uso e operação mais eficiente dos produtos, geralmente por meio de tecnologias de dados (por exemplo, sensores) e recursos para instalação e suporte ao produto (LIEDER; RASHID, 2016). Em Reusar, considera-se a reutilização do produto ou de seus componentes com pequenas adaptações. Reparar e manutenção busca prolongar o uso através de reparos e manutenção para corrigir defeitos, podendo envolver desmontagem parcial e limpeza. A subcategoria Recondicionar visa dar uma nova vida útil a peças ou produtos descartados, restabelecendo-os a uma condição satisfatória de funcionamento,

embora abaixo da especificação original (SAAVEDRA et al., 2013). Em Remanufaturar, produtos ou componentes passam por um processo industrial de desmontagem, limpeza e reparo para serem revendidos. Por fim, a subcategoria Reaproveitar busca novos usos para produtos ou componentes descartados, com mínimo monitoramento de condição, como limpeza e reemba-lagem (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018).

Na categoria **Aplicação útil de materiais**, a subcategoria Reciclar visa prolongar a vida útil dos materiais, processando-os para que possam ser aplicados em processos industriais, mantendo uma qualidade comparável ao material original (ALLWOOD et al., 2011). Recuperar, por sua vez, busca recuperar energia ou nutrientes de compostagem ou de materiais processados, como incineração de resíduos combustíveis e digestão anaeróbica (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018).

A categoria **Modelo de negócios** reconhece que esses devem sobreviver às mudanças propostas pelos sistemas de indicadores de circularidade (FRANCO; ALMEIDA; CALILI, 2021). Esse critério inclui modelos inovadores, como sistemas de produto-serviço que substituem a posse pelo uso colaborativo e canais de consumo colaborativo, permitindo maior redundância e multifuncionalidade dos produtos.

Em **Reinventar o paradigma**, são necessários inovação e investimento para promover a EC, como no design de produtos e na escolha de materiais circulares (EC, 2015). A categoria considera tecnologias e materiais circulares, além de inovação ou investimento. A categoria **Ciclo cruzado e colaboração entre setores** analisa se o sistema de indicadores mede a cooperação com a cadeia de valor ou simbiose industrial, incentivando a colaboração ao longo da nova cadeia de valor e prevenindo que subprodutos se tornem resíduos.

Após a organização de todos os sistemas de indicadores de circularidade nos níveis nano e micro com base nos critérios citados, procedeu-se à análise do conteúdo, com extração dos resultados de maneira qualitativa e quantitativa, fornecendo a base empírica para a proposta metodológica de seleção de indicadores de circularidade.

3.4 FASE IV - PROPOSTA METODOLÓGICA PARA SELEÇÃO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE

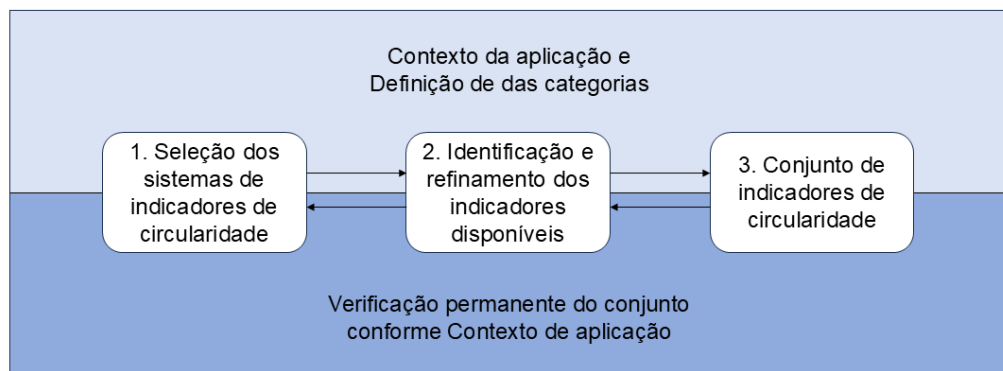
Esta fase é definida como um estudo prescritivo. Seu objetivo é apresentar a proposta metodológica obrigatória desta pesquisa, composta por etapas estruturadas que devem ser seguidas para apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas.

A proposta metodológica é concebida como um processo que integra conceitos, metodologias e ferramentas de apoio à decisão, tendo como elemento central o uso do método FAHP para priorização das categorias e critérios. Além disso, inclui o refinamento de sobreposições, a análise crítica dos sistemas de indicadores disponíveis e a consolidação de um conjunto final de indicadores-chave.

A estrutura geral da proposta metodológica está representada na Figura 9. Ela é composta por três etapas principais: (1) definição do escopo de análise; (2) identificação e refina-

mento dos indicadores disponíveis; e (3) consolidação do conjunto de indicadores de circularidade.

Figura 9 – Estrutura geral da proposta metodológica



Fonte: Adaptado de ABNT (2024)

As etapas de definição do contexto de aplicação e de eventual revisão da aplicação, conforme mudanças organizacionais ou estratégicas, são representadas na figura como elementos externos à parte central desenvolvida nesta pesquisa.

Conforme estabelece a ISO 59020:2024 (ABNT, 2024), a mensuração e avaliação da circularidade deve considerar previamente aspectos como nível de análise, metas circulares da organização, aspectos de circularidade prioritários, impactos socioambientais relevantes e a finalidade da avaliação. Adicionalmente, com base no ciclo de melhoria contínua proposto pela ABNT (2015), a proposta metodológica requer revisão e ajuste contínuos, a fim de manter sua coerência com os objetivos e condições da organização ao longo do tempo.

É importante destacar que, no capítulo seguinte, será apresentada uma exemplificação prática da aplicação desta proposta metodológica, utilizando o portfólio de sistemas de indicadores identificado na pesquisa. Essa exemplificação não restringe a aplicação da proposta a outros contextos, mas serve para demonstrar sua operacionalização.

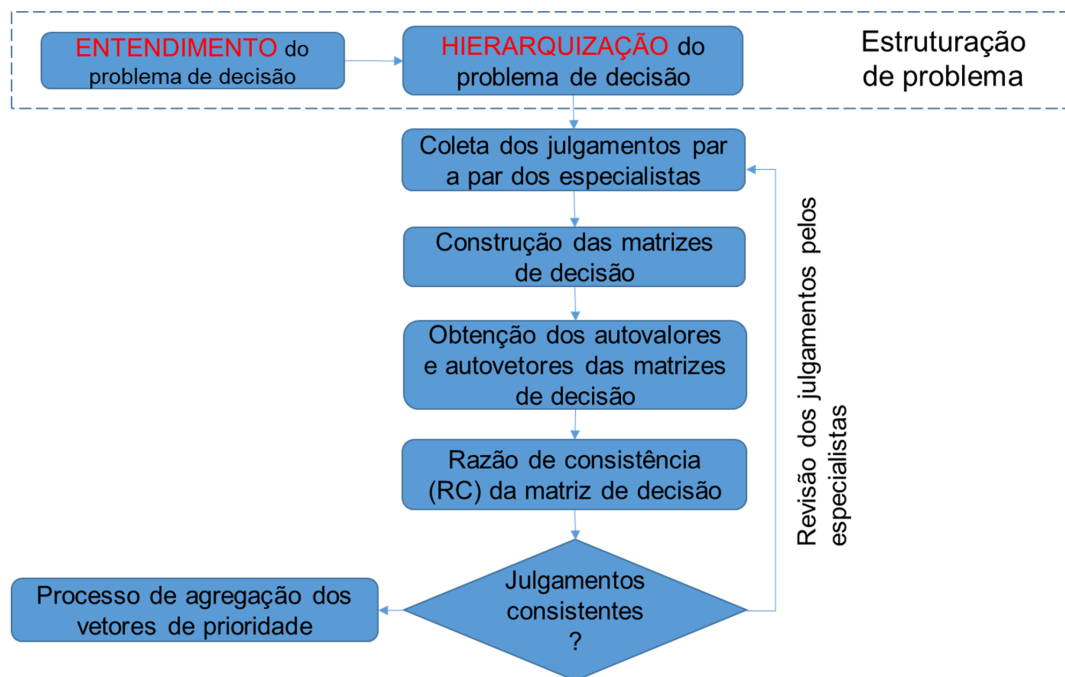
A seguir, as etapas metodológicas efetivamente desenvolvidas neste estudo são descritas.

3.4.1 Etapa 1 - Definição de escopo: seleção dos sistemas de indicadores

Para esta seleção, foram utilizadas comparações pareadas feitas por respondentes e foi verificada ainda sua consistência para garantir insumos de qualidade para o cálculo dos pesos dos conjuntos e categorias selecionadas na Fase III, seguindo o método Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) (YADAV et al., 2020; LEE; HU; LIM, 2021; PENG et al., 2021).

O método FAHP constitui uma etapa central da proposta metodológica, sendo utilizado para priorizar os conjuntos e categorias definidos nas fases anteriores. A aplicação prática pode variar quanto ao número e perfil dos especialistas, mas o uso do FAHP é parte integrante e obrigatória do processo metodológico. O procedimento detalhado para essas macro etapas (Figura 10) é explicado nas seções a seguir.

Figura 10 – Estruturação do processo do método FAHP



Fonte: Adaptado de Oliveira e Belderrain (2008)

3.4.1.1 Organização do problema

Para utilização do método FAHP, inicialmente é necessário organizar o problema numa estrutura hierárquica que reflita as relações existentes entre os critérios de decisão e as alternativas candidatas. No caso desta pesquisa, os critérios foram chamados de conjuntos e as alternativas foram apresentadas como categorias, conforme apresentado no Quadro 3.3.

Para facilitar a apresentação nos procedimentos metodológicos, os conjuntos foram identificados como C_i e as categorias como C_{ij} , como é possível ver no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Estrutura hierárquica para a proposta metodológica

Conjunto	Categorias
Contexto (C ₁)	Transversalidade (C ₁₁) Fonte (C ₁₂) Validação (C ₁₃) Categoria de indústria (C ₁₄) Produto/Material (C ₁₅) Tamanho da empresa (C ₁₆) Localização (C ₁₇)
Indicador (C ₂)	Mensurabilidade (C ₂₁) Dimensão (C ₂₂) Formato (C ₂₃) Unidades mais utilizadas (C ₂₄) Utilização (C ₂₅) Foco temporal (C ₂₆) Tipo de indicador (C ₂₇) Variáveis (C ₂₈)
Metodologia (C ₃)	Metodologia baseada em índices (C ₃₁) Metodologia de avaliação (C ₃₂) Abordagem de modelagem (C ₃₃) Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC (C ₃₄)
Sustentabilidade (C ₄)	Pilar da sustentabilidade (C ₄₁) Estendido a ESG - Governança (C ₄₂) ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC (C ₄₃)
Elementos da EC (C ₅)	Nível sistêmico (C ₅₁) Estágio de ciclo de vida (C ₅₂) Tipo de ciclo (C ₅₃) Desempenho (C ₅₄) Múltiplos ciclos de vida (C ₅₅) Princípios (C ₅₆)
Estratégias da EC (C ₆)	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes (C ₆₁) Estender a vida útil dos produtos e suas peças (C ₆₂) Aplicação útil de materiais (C ₆₃) Modelo de negócios (C ₆₄) Reinventar o paradigma (C ₆₅) Ciclo cruzado e colaboração entre setores (C ₆₆)

Fonte: elaborado pela autora.

3.4.1.2 Escolha dos respondentes

Um painel de respondentes foi formado para obter insumos para o FAHP. Seguindo os passos de Zanghelini et al. (2018), o painel foi dirigido aos especialistas da rede de pesquisadores do Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG), da Universidade Federal de Santa Catarina, para coleta do julgamento par a par tanto dos conjuntos como das categorias. O CICLOG foi escolhido, pois é um dos primeiros grupos a estudar ciclo de vida no Brasil com diversas conexões na comunidade científica (ZANGHELINI et al., 2018).

No total, foram quatro respondentes. Sendo considerado um número suficiente para esse método (GUILLÉN-MENA et al., 2023). Todos eles estudantes de doutorado, sendo que dois trabalham na linha de pesquisa de gestão ambiental em organizações, um na linha de pesquisa de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e outro em valoração ambiental. Eles passaram

por uma apresentação de 15 minutos sobre como funciona o método AHP e como foi realizada a organização do problema.

3.4.1.3 Formulação do questionário

O questionário foi desenvolvido no *Google forms* para a comparação pareada entre os elementos. Ele consta de informações base da pesquisa como as definições de economia circular, circularidade, indicador de circularidade e os níveis sistêmicos. Também foi adicionada uma figura explicando como responder às questões e um *link* direcionando para um quadro com maiores explicações sobre os conjuntos e categorias. Além da adição de um termo de consentimento de uso dos dados coletados seguindo as determinações da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD – Lei 13.709/18) (para visualização do questionário, consulte o Apêndice D).

O questionário foi dividido em quatro formulários para facilitar a compreensão dos decisores em relação à estruturação hierárquica do problema, manter o tempo de resposta entre todos os formulários parecido para que não ficasse fadigante para os respondentes e para controle na análise dos dados pós-resposta. O primeiro é referente aos conjuntos e os outros 3 formulários estão divididos pelas categorias:

- Formulário 2: comparação pareada entre as categorias dos conjuntos contexto e indicador;
- Formulário 3: comparação pareada entre as categorias dos conjuntos metodologia, sustentabilidade e elementos da EC;
- Formulário 4: comparação pareada entre as categorias do conjunto estratégias de EC.

Neste questionário, os respondentes julgaram a significância de 6 critérios, nessa pesquisa chamados de conjuntos: contexto, indicador, metodologia, sustentabilidade, elementos da EC e estratégias da EC. Esses decisores também compararam as categorias referentes a características dos sistemas de indicadores de circularidade através de termos linguísticos mostrados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Termos linguísticos e os números *fuzzy* triangulares correspondentes

Escala Saaty	Definição	Escala triangular <i>fuzzy</i> (l,m,u)
1	Igual importância	(1,1,1)
3	Fraca importância	(2,3,4)
5	Razoável importância	(4,5,6)
7	Forte importância	(6,7,8)
9	Importância absoluta	(9,9,9)
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários de dúvida	(1,2,3), (3,4,5), (5,6,7), (7,8,9)

Fonte: Adaptado de Lee, Hu e Lim (2021).

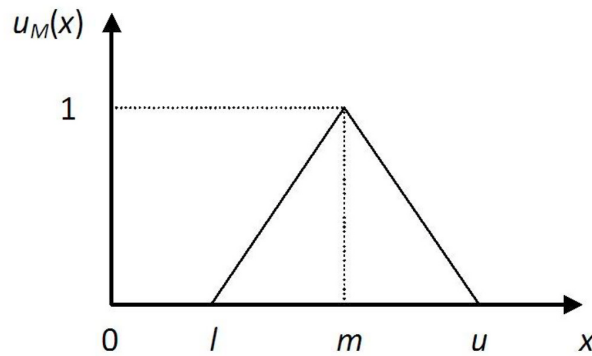
3.4.1.4 Construção das matrizes de decisão e obtenção dos autovalores e autovetores

Esta etapa utilizou a entrada de dados de comparações pareadas a partir das decisões tomadas pelos respondentes. Para todos os cálculos apresentados abaixo, foi utilizada a ferramenta Excel da Microsoft.

Números fuzzy triangulares são usados neste estudo para avaliar as preferências. Um número fuzzy triangular é definido como (l, m, u) onde $l \leq m \leq u$. Um conjunto fuzzy é definido por sua função de pertinência, conforme mostrado na Eq. 3.1 e representado na Figura 11.

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \leq x \leq m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \leq x \leq u \\ 0, & u \leq x \leq l \end{cases} \quad (3.1)$$

Figura 11 – Função do número fuzzy triangular M



Fonte: Adaptado de Lee, Hu e Lim (2021)

Os procedimentos do método FAHP apresentados por Buckley (1985) foram utilizados nesta pesquisa para determinar os pesos dos conjuntos e categorias, assim para definir os principais indicadores de circularidade. Para a defuzzificação (*de-fuzzification*), foi utilizado o método proposto por Chou e Chang (2008).

1. Todas as matrizes de comparações pareadas dos respondentes são agregadas e os julgamentos são sintetizados para produzir um conjunto de prioridades gerais, conforme mostrado na Eq. 3.2. Cada elemento $\tilde{d}_{ij}$ na matriz é a média geométrica de todos os elementos ij fornecidos pelos respondentes.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \tilde{d}_{12} & \dots & \tilde{d}_{1n} \\ \tilde{d}_{21} & \tilde{d}_{22} & \dots & \tilde{d}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{d}_{n1} & \tilde{d}_{n2} & \dots & \tilde{d}_{nn} \end{bmatrix}, \quad \tilde{d}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}), \quad \tilde{d}_{ij} = \frac{1}{\tilde{d}_{ij} = (\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}})} \quad (3.2)$$

2. Os pesos fuzzy de cada critério i são obtidos multiplicando cada valor médio geométrico fuzzy, $\tilde{r}_i$, pela potência inversa da soma vetorial, conforme mostrado na Eq. 3.3 e Eq. 3.4.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \otimes \tilde{r}_2 \otimes \cdots \otimes \tilde{r}_n)^{-1} \quad (3.3)$$

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{onde } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

3. A desfuzzificação (*de-fuzzification*) do peso fuzzy $\tilde{w}_i$ é realizada usando o método do centro de área calculando a média dos três componentes do conjunto fuzzy como mostrado na Eq. 3.5.

$$M_i = \frac{(l_i + m_i + u_i)}{3} \quad (3.5)$$

4. Posteriormente, o peso de cada critério pode ser obtido por normalização.

$$W_i = \frac{\overline{w}_i}{\sum_{j=1}^n \overline{w}_j} \quad (3.6)$$

3.4.1.5 Cálculo dos valores Eigen

Cada matriz foi então processada calculando os valores Eigen por meio de cada matriz de comparação emparelhada. É importante destacar que para cada matriz $n \times n$ existirão n valores Eigen, como mostra a Equação 3.7.

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T \quad (3.7)$$

Porém, para cálculos posteriores, foi considerado o valor máximo desses valores Eigen.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{AW_i}{nW_i} \quad (3.8)$$

Onde A é a matriz de julgamento de prioridade e W_i representa o autovetor correspondente.

3.4.1.6 Verificação de consistência

Uma vez obtidos os valores Eigen para uma matriz específica, eles foram utilizados para verificar a consistência da matriz específica.

A verificação de consistência é útil para analisar a harmonização do julgamento dos respondentes, pesquisando a relação de cada índice. Em particular, o paradoxo como A é mais importante que B , B é mais importante que C , mas C é mais importante que A pode ser evitado. Uma consistência final dos julgamentos é calculada usando o índice de consistência (CR) para garantir que nenhum erro ou classificações conflitantes sejam cometidos pelos decisores.

$$CR = \frac{IC}{IR} \quad (3.9)$$

Para que uma matriz seja consistente, seu valor CR deve ser inferior a 0,1 (SAATY, 1990). Quando $CR \geq 0,1$, a consistência da matriz de julgamento não é um intervalo aceitável e a matriz de julgamento precisa ser ajustada. Assim, ela é novamente levada à opinião dos especialistas (YADAV et al., 2020). No presente caso, três dos quatro especialistas precisaram revisar suas respostas. Após esta revisão, todas as comparações matriciais feitas pelos especialistas foram consideradas consistentes.

Já IC é o índice de consistência e pode ser representado pela equação

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.10)$$

O significado de IR é a matriz de consistência aleatória; está relacionado à ordem da matriz de julgamento. Quando a ordem da matriz de julgamento é maior, o valor numérico do IR é maior, como é possível ver pela Tabela 1.

Tabela 1 – Índice médio de consistência aleatória

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,50

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

A ferramenta Excel foi utilizada para a construção das matrizes, a obtenção dos autovalores e autovetores, o cálculo dos valores Eigen e a verificação de consistência. Os dados dos autores Kwong e Bai (2003), Lee, Hu e Lim (2021), Ahmad e Qahmash (2020) foram utilizados para validação das equações. Os dados de entrada foram utilizados na ferramenta desenvolvida nesta tese e os resultados foram os mesmos, garantindo a confiança da ferramenta.

3.4.2 Etapa 2 - Seleção dos indicadores: identificação e refinamento dos indicadores disponíveis

Para a definição do conjunto inicial de indicadores, foi realizada uma análise crítica dos sistemas de indicadores disponíveis e de seus respectivos indicadores, com o objetivo de identificar sobreposições e avaliar sua aplicabilidade. A filtragem é uma etapa obrigatória da proposta metodológica, cujo objetivo é reduzir redundâncias e assegurar a aplicabilidade prática dos indicadores. Embora os critérios de exclusão possam ser adaptados às especificidades organizacionais, a etapa de filtragem deve ser sempre realizada como parte do procedimento. A filtragem objetivou:

- Exclusão de sistemas de indicadores fechados ou que não disponibilizam todos os cálculos necessários para a obtenção dos resultados finais;
- Eliminação de indicadores redundantes ou excessivamente similares entre si;
- Desconsideração de sistemas de indicadores cuja aplicação depende do uso do conjunto completo, não sendo possível utilizar seus indicadores de forma isolada ou individuali-

zada (por exemplo, sistemas cuja lógica de avaliação é construída a partir da interação entre todos os indicadores do conjunto, inviabilizando sua aplicação parcial em contextos específicos). Por exemplo, o sistema *Building Circularity Indicators* (BCI) requer a aplicação encadeada de subindicadores, enquanto o sistema *Circularity Measurement Tool* (CMT) utiliza um questionário integrado cujos resultados não são interpretáveis se desmembrados.

A identificação de sobreposições foi realizada por meio da comparação direta entre os indicadores de diferentes sistemas, considerando nome, descrição, unidade e função. Foram mapeados indicadores com semelhanças conceituais e metodológicas, como o *Material Circularity Indicator* (MCI), que aparece, com variações, em mais de um sistema. Esse mapeamento orientou a redução do portfólio e evitou redundância na composição final.

3.4.3 Etapa 3 - Consolidação do conjunto de indicadores de circularidade

Os indicadores selecionados na etapa anterior foram organizados em categorias previamente definidas, formando a base da proposta metodológica. A composição final considerou critérios de relevância prática e equilíbrio entre abrangência e aplicabilidade.

A seleção das categorias foi orientada pelos pesos obtidos por meio da análise multicritério (FAHP), conforme descrito na Etapa 1. A partir disso, definiu-se um conjunto representativo de categorias com indicadores associados, priorizando aquelas com maior peso relativo.

Essa etapa envolveu a aplicação de subetapas de classificação, com base na experiência prévia sobre economia circular e na análise das estratégias associadas a diferentes fases do ciclo de vida. O objetivo foi selecionar gradualmente os indicadores mais adequados para cada escopo organizacional.

O resultado da aplicação da proposta metodológica é um conjunto de indicadores-chave de desempenho (KPI) ajustado ao contexto empresarial analisado (KRAVCHENKO; PI-GOSSO; MCALOONE, 2020). De acordo com a literatura, recomenda-se que esse conjunto seja composto por um número gerenciável de indicadores — entre 10 e 20 — de modo a viabilizar o monitoramento prático e orientar ações (VELEVA et al., 2001). Esse resultado não é um rol universal de indicadores, mas a saída específica do processo metodológico, que deve ser repetido ou ajustado conforme o contexto e os objetivos estratégicos da organização.

A proposta metodológica resultante é modular e adaptável, permitindo ajustes conforme o escopo e os objetivos estratégicos da organização usuária.

3.4.3.1 Priorização e organização final dos indicadores selecionados

Para estruturar os indicadores na proposta metodológica, utilizaram-se as categorias previamente definidas na Fase II. Como complemento, foi incluída a categoria Tributação e regulações, derivada da identificação de um indicador com esse foco específico.

As categorias priorizadas foram organizadas em dois grandes conjuntos:

- Conjunto “Indicador”: A categoria Variável foi utilizada para agregar indicadores relacionados a material, energia, poluição e água.
- Conjunto “Estratégias de Economia Circular”, com as seguintes categorias:
 - Estender a vida útil dos produtos (durabilidade, reusar, recondicionar, remanufaturar);
 - Aplicação útil de materiais (reciclar);
 - Modelo de negócios (empresa, envolvimento dos funcionários e mercado);
 - Ciclo cruzado e colaboração entre setores (*stakeholder*).

A estruturação por conjuntos e categorias fornece a base para tornar a proposta metodológica mais aplicável e escalável. Para isso, realizou-se uma distinção entre indicadores essenciais à avaliação da circularidade e aqueles que podem ser incorporados de forma complementar, conforme o escopo definido.

3.4.3.2 *Classificação entre indicadores obrigatórios e optativos*

A fim de tornar a proposta metodológica mais aplicável e funcional para diferentes realidades organizacionais, os indicadores selecionados foram classificados em obrigatórios e optativos.

Os indicadores obrigatórios são aqueles associados diretamente às estratégias de economia circular, conforme as categorias priorizadas na etapa de organização por conjuntos (ver item 3.4.3.1). Esses indicadores estão vinculados a ações centrais da circularidade, como durabilidade, reuso, reciclagem, remanufatura e colaboração entre setores. Por representarem os mecanismos efetivos de transição do modelo linear para o circular, sua inclusão é considerada indispensável.

Por sua vez, os indicadores relacionados a aspectos organizacionais de suporte e a dimensões ambientais, sociais, econômicas ou normativas foram classificados como optativos. Esses indicadores complementam a avaliação circular e oferecem uma visão mais ampla do desempenho organizacional, mas sua obrigatoriedade depende do escopo e dos objetivos definidos pela organização usuária. Essa distinção contribui para a aplicabilidade prática da proposta metodológica, permitindo foco nas ações circulares prioritárias e evitando sobrecarga na coleta de dados.

Além disso, os indicadores foram classificados com base em quatro atributos complementares: o nível sistêmico considerado (nano e/ou micro), o estágio do ciclo de vida abordado, o tipo de mensurabilidade (qualitativa, quantitativa ou ambos) e as estratégias de economia circular representadas por cada indicador.

Essa classificação adicional oferece suporte à construção de um conjunto prático de indicadores e permite que a proposta metodológica seja ajustada ao foco da organização. Como sugerem Arena et al. (2009), a aplicação pode iniciar com uma única dimensão (por exemplo, um estágio do ciclo de vida ou uma estratégia específica), sendo posteriormente expandida conforme a maturidade do processo de circularidade e contextos estratégicos das organizações.

Assim, a proposta metodológica apresentada nesta fase é composta por etapas obrigatórias: (i) definição do escopo de análise; (ii) aplicação do método FAHP para priorização das categorias e critérios; (iii) refinamento de sobreposições e análise dos sistemas de indicadores disponíveis; e (iv) consolidação de um conjunto final de indicadores-chave. Essas etapas são parte integrante da proposta metodológica e devem ser seguidas em qualquer aplicação.

No capítulo seguinte, apresenta-se uma exemplificação prática da aplicação desse procedimento metodológico, utilizando o portfólio de sistemas de indicadores identificado nesta pesquisa. Essa exemplificação tem como finalidade demonstrar a aplicabilidade da proposta metodológica em um caso real, sem limitar seu uso a outros contextos organizacionais.

4 RESULTADOS

Os resultados desta tese de doutorado são uma resposta aos desafios da implementação de práticas circulares em empresas, bem como da seleção e organização de indicadores de circularidade a partir de sistemas existentes, de forma a apoiar a tomada de decisão estratégica nas empresas.

Este estudo enriquece a literatura, abordando extensivamente dois novos temas complementares de pesquisa - (i) o gerenciamento da circularidade em empresas, produtos, componentes e materiais, e (ii) a sistematização e seleção de indicadores de circularidade a partir de diferentes sistemas existentes. De fato, embora (i) o gerenciamento do fim da vida útil de produtos, componentes e materiais tenha sido há muito tempo discutido do ponto de vista da pesquisa, (ii) o desempenho da circularidade é um ponto de crescente importância. Notavelmente, esta tese de doutorado fornece às empresas uma proposta metodológica que orienta a seleção de indicadores de circularidade, associada a potenciais práticas circulares em diferentes contextos organizacionais.

Assim, os resultados apresentados neste capítulo exemplificam a aplicação da proposta metodológica como ferramenta estruturada de apoio à decisão. Esse resultado reforça a hipótese central de que tal abordagem facilita a identificação e escolha de indicadores de circularidade, promovendo maior alinhamento com os objetivos estratégicos das empresas.

4.1 PORTFÓLIO DOS SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE

Os resultados bibliométricos referentes tanto aos documentos dos sistemas de indicadores como de categorias são apresentados a seguir.

4.1.1 Resultados bibliométricos dos sistemas de indicadores

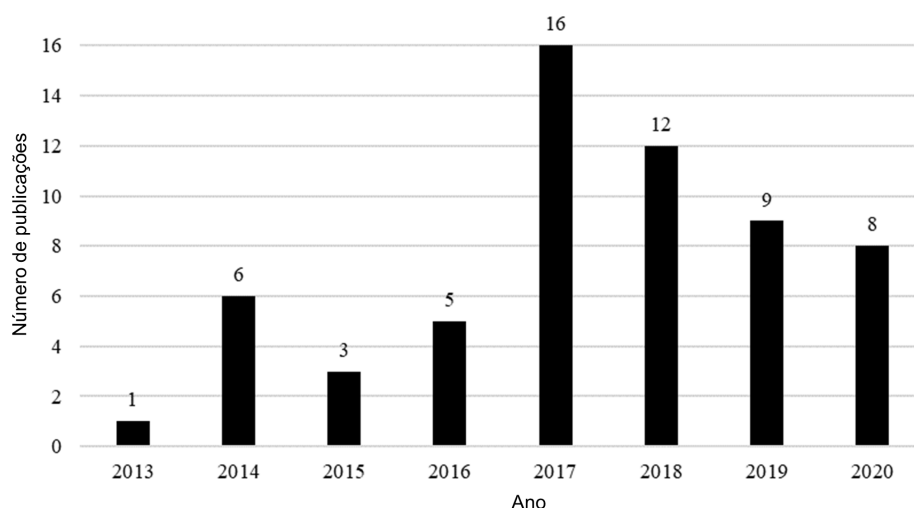
A análise bibliométrica foi realizada com base na distribuição de artigos ao longo dos anos, bem como sua distribuição geográfica (com base na afiliação do primeiro autor), tipo de publicação (periódicos revisados por pares e literatura cinzenta) e a distribuição de publicações por periódico.

A avaliação da circularidade não é apenas uma questão de interesse da academia, mas também uma preocupação profunda de empresas e governos (STAHEL, 2016). Portanto, é natural que o desenvolvimento de ferramentas de avaliação da circularidade seja realizado também por instituições não acadêmicas. Esse fato fica evidente nesta análise, pois 26% de todas as publicações avaliadas foram emitidas em relatórios, ferramentas online ou nos sites de instituições específicas (16 publicações). No entanto, a maioria dos sistemas de indicadores de nível nano e micro coletados foi publicada em artigos revisados por pares (44 publicações). Adicionalmente, foi avaliada uma dissertação (VERBERNE, 2016), representando 2% do portfólio total.

A primeira publicação avaliada data de 2002 (RITTHOFF; ROHN; LIEDTKE, 2002), anos antes da EC se tornar um *hot topic* na literatura acadêmica (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Esta publicação foi aceita pelos critérios de pesquisa deste estudo porque muitas práticas e estratégias de EC (ou seja, reciclagem, compostagem, transformação de resíduos em energia, etc.) já foram desenvolvidas e amplamente exploradas antes de serem discutidas sob a bandeira EC (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018). Em contraste, todas as outras publicações revisadas neste estudo apresentam *links* diretos para EC em seus textos.

Os três anos com melhor classificação de acordo com o número de artigos relacionados à EC publicados foram: 2017 (16 publicações), 2018 (12 publicações) e 2019 (9 publicações). Embora apenas oito artigos tenham sido lançados em 2020 até agora, espera-se que mais artigos sigam ao longo do ano, já que esta análise contabiliza apenas os artigos publicados até a data da pesquisa (agosto de 2020). Para ilustrar o desenvolvimento emergente do tema, as 61 publicações com links diretos para EC foram publicadas de acordo com a distribuição cronológica mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Distribuição das publicações ao longo dos anos



Fonte: Elaborada pela autora

A Figura 12 ilustra o esforço científico para melhor medir e compreender a circularidade, um conceito que evoluiu rapidamente na última década. Conforme mencionado por Saidani et al. (2019), o desenvolvimento de indicadores de circularidade tem sido fortemente abordado por muitos pesquisadores como uma lacuna científica a ser preenchida urgentemente, com uma infinidade de indicadores emergindo rapidamente, variando do nível nano ao macro. Conforme afirmado anteriormente, os sistemas de indicadores de circularidade em nível de produto e empresa divulgados nesse período são avaliados neste estudo e discutidos nos próximos tópicos.

Os 44 artigos revisados por pares analisados no estudo foram publicados em 15 periódicos diferentes, os mais bem classificados dos quais foram *Journal of Cleaner Production* (15 publicações), *Resources, Conservation and Recycling* (8 publicações), a revista digital *Sus-*

tainability (5 publicações), e o *Journal of Industrial Ecology* (3 publicações). O *International Journal of Production Research* e o *International Journal of Sustainable Engineering* exibiram 2 publicações cada. As nove revistas restantes representaram uma única publicação analisada por cada uma (para mais informações, consulte o Apêndice A).

Percebe-se que os artigos estão espalhados por diversos periódicos da área de engenharia e sustentabilidade. Essas descobertas mostram como os sistemas de indicadores de circularidade têm sido desenvolvidos principalmente por nichos científicos engajados na agenda de eficiência de recursos e sustentabilidade, contribuindo tanto para discussões gerais em torno da quantificação de processos relacionados à EC quanto como argumento em tópicos específicos do setor.

O Quadro 4.1 mostra a distribuição geográfica das publicações de acordo com a afiliação do primeiro autor.

Quadro 4.1 – Distribuição geográfica das publicações

País (afiliação do primeiro autor)	Numeração de publicação
Reino Unido	9
Países Baixos	7
França	6
Alemanha	6
Itália	5
Bélgica	4
Eslovênia	2
Espanha	2
Suécia	2
Estados Unidos	2
Austrália	1
Austria	1
China	1
Colômbia	1
Dinamarca	1
Equador	1
Hungria	1
Polônia	1
Portugal	1
Singapura	1
Suíça	1
Não disponível	4

Fonte: Elaborada pela autora.

Como se pode observar no Quadro 4.1, a maioria das publicações que abordam os sistemas de indicadores de circularidade de nível nano e micro pode ser atribuída a países europeus. Todas as publicações da literatura cinzenta são de origem europeia, ampliando a expressiva contribuição desta região. As cinco origens de artigos com mais alta classificação analisadas nesta revisão são Reino Unido, Holanda, Alemanha, França e Itália. Além disso, os métodos de avaliação da circularidade parecem ser um tema emergente no contexto latino-americano, representado por publicações do Brasil, Equador e Colômbia. Outras regiões (por exemplo, Ásia) são menos expressivas em termos de número de artigos avaliados.

Quatro publicações foram marcadas como “não disponível”, uma vez que representam sistemas de indicadores desenvolvidos por projetos da União Europeia e não podem ser atribuídas a um país específico. Essas descobertas mostram a preocupação e o interesse de instituições e órgãos de pesquisa (principalmente europeus) de diferentes nações em desenvolver indicadores de circularidade abrangentes para avaliar e alavancar essa mudança no modelo econômico.

Esses resultados servem como insumo direto para a proposta metodológica desenvolvida nesta tese, pois constituem a base empírica de onde os indicadores de circularidade foram identificados, comparados e posteriormente refinados.

4.1.2 Descrição dos sistemas de indicadores

Como apresentado na subseção dos Procedimentos Metodológicos 3.1.2, o trabalho tem como base 58 sistemas de indicadores. Entre eles, 42 sistemas provenientes da academia e 16 de relatórios e plataformas online. A seguir, o Quadro 4.2 apresenta os sistemas de indicadores e seus autores.

Quadro 4.2 – Sistemas de indicadores de circularidade de níveis nano e micro

(continua)

#	Sistema de indicadores	Autor
1	<i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level (APL)</i>	Niero e Kalbar (2019)
2	<i>BIM-based Whole-life Performance Estimator (BWPE)</i>	Akanbi et al. (2018)
3	<i>Building Circularity Indicators (BCI)</i>	Verberne (2016)
4	<i>C2C Indicators</i>	C2C Institute (2014)
5	<i>Circ(T)</i>	Pauliuk et al. (2017)
6	<i>Circular Building Assessment Prototype (CBA)</i>	BAMB (2020)
7	<i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability (CBM-IS)</i>	Rossi et al. (2020)
8	<i>Circular Economic Value (CEV)</i>	Fogarassy et al. (2017)
9	<i>Circular Economy Benefit Indicators (CEBI)</i>	Huysveld et al. (2019)
10	<i>Circular Economy Index (CEI)</i>	Maio e Rem (2015)
11	<i>Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)</i>	Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017)
12	<i>Circular Economy Measurement Scale (CEMS)</i>	Núñez-Cacho et al. (2018)
13	<i>Circular Economy Performance Indicator (CPI)</i>	Huysman et al. (2017)
14	<i>Circular Economy Toolkit (CET)</i>	Evans e Bocken (2013)
15	<i>Circular Gap (CG)</i>	Wit et al. (2018)
16	<i>Circular Pathfinder (CP)</i>	ResCoM (2017)
17	<i>Circularity Assessment Model (CAM)</i>	Giacomelli, Kozamernik e Lah (2018)
18	<i>Circularity Calculator (CC)</i>	ResCoM (2017)
19	<i>Circularity Check (Check)</i>	Ecopreneur (2019)
20	<i>Circularity Index (CI)</i>	Cullen (2017)
21	<i>Circularity Measurement Toolkit (CMT)</i>	Garza-Reyes et al. (2019)
22	<i>Circularity of Material Quality (QC)</i>	Steinmann, Huijbregts e Reijnders (2019)
23	<i>Circular Transition Indicators (CTI)</i>	WBCSD (2018)
24	<i>Circulytics (CYT)</i>	EMF (2020)
25	<i>Closed Loop Calculator (CLC)</i>	Kingfisher (2014)
26	<i>Ease of Disassembly Metric (eDIM)</i>	Vanegas et al. (2018)
27	<i>Economic-Environmental Indicators (EEI)</i>	Fregonara et al. (2017)
28	<i>Economic-Environmental Remanufacturing (EER)</i>	Loon e Wassenhove (2018)
29	<i>End of Life Best Practice Indicators (BPI)</i>	Jiménez-Rivero e García-Navarro (2016)
30	<i>End of Life (EoL) Index</i>	Lee, Lu e Song (2014)
31	<i>Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators (FPI)</i>	Pauer et al. (2019)
32	<i>EoL indices (EoLi)</i>	Favi et al. (2017)

#	Sistema de indicadores	Autor
33	<i>Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms (CE-PCF)</i>	Liang, Zhao e Hong (2018)
34	<i>Expended Zero Waste Practice Model (ZWP)</i>	Veleva, Bodkin e Todorova (2017)
35	<i>Global Resource Indicator (GRInd)</i>	Adibi et al. (2017)
36	<i>Improved Water Circularity Index (WCI)</i>	Sartal, Ozcelik e Rodríguez (2020)
37	<i>Input-Output Balance Sheet (IOBS)</i>	Capellini (2017)
38	<i>Longevity and Circularity (L&C)</i>	Figge et al. (2018)
39	<i>Material and Energy Circularity Indicators (MECI)</i>	Zore, Čuček e Kravanja (2018)
40	<i>Material Circularity Indicator (MCI)</i>	EMF; Granta (2015)
41	<i>Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets (MESCS)</i>	Braun et al. (2018)
42	<i>Material Input per Service Delivered (MIPS)</i>	Ritthoff, Rohn e Liedtke (2002)
43	<i>Mine site MFA Indicator (MI)</i>	Lèbre, Corder e Golev (2017)
44	<i>Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies (MCEM-PLCS)</i>	Alamerew et al. (2020)
45	<i>Multidimensional Indicator Set (MIS)</i>	Nelen et al. (2014)
46	<i>Product Circularity Improvement Program (PCIP)</i>	Circularity IQ and KPMG (2020)
47	<i>Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool (PR-MCDT)</i>	Alamerew e Brissaud (2019)
48	<i>Product Recycling Desirability Index (PRDI)</i>	Sultan, Lou e Mativenga (2017)
49	<i>Product-Level Circularity Metric (PCM)</i>	Linder, Sarasini e Loon (2017)
50	<i>PRP Circular e-Procurement Tool (PRP) e The ReNtry®-module</i>	Rendemint (2016)
51	<i>Recycling Indices for the Circular Economy (RIs)</i>	Schaik e Reuter (2016)
52	<i>Resource Duration Indicator (RDI)</i>	Franklin-Johnson, Figge e Canning (2016)
53	<i>Resource Efficiency Assessment of Products (REAPro)</i>	Ardente e Mathieux (2014)
54	<i>Reuse Potential Indicator (RPI)</i>	Park e Chertow (2014)
55	<i>Set of Indicators to Assess Sustainability (SIAS)</i>	Golinska et al. (2015)
56	<i>Sustainability Performance Indicators (SPI)</i>	Mesa, Esparragoza e Maury (2018)
57	<i>Sustainable Circular Index (SCI)</i>	Azevedo, Godina e Matias (2017)
58	<i>Systems Indicators for Circular Economy Dashboard (SI-CED)</i>	Pauliuk (2018)

O sistema de indicadores APL explora a possibilidade de combinar diferentes tipos de indicadores para abordar estratégias de EC no nível de produto, utilizando MCDA e validando a abordagem com dois casos no setor de embalagens. A análise compara quatro alternativas de embalagem para cerveja nos mercados do Reino Unido e da Índia, utilizando dois tipos de indicadores: um baseado em circularidade de materiais e outro no ciclo de vida (NIERO; KALBAR, 2019).

O sistema de indicadores BWPE avalia o potencial de recuperação de componentes estruturais de edifícios desde a fase de projeto (AKANBI et al., 2018). Ele fornece uma ferramenta objetiva para determinar a quantidade de materiais recuperáveis de um edifício que podem ser reutilizados e reciclados ao final de sua vida útil.

O modelo de avaliação BCI oferece uma metodologia para avaliar o desempenho de construções no contexto da EC, permitindo estimar o progresso de um edifício de um modelo linear para um circular (VERBERNE, 2016).

O grupo de indicadores C2C apresenta várias versões e é o único que oferece certificação para empresas, fornecendo diretrizes em cinco categorias principais ((C2C INSTITUTE, 2014):

- Saúde do material: prioriza a escolha de produtos químicos e materiais que protejam a saúde humana e o meio ambiente, promovendo um impacto positivo na qualidade dos materiais para uso futuro e reciclagem.
- Circularidade do produto: orienta o design intencional de produtos para seu uso subsequente, promovendo a sua reciclagem nas rotas planejadas.
- Ar Limpo e Proteção Climática: busca um impacto positivo na qualidade do ar, na utilização de energia renovável e no equilíbrio dos gases de efeito estufa.
- Administração de Água e Solo: trata a água e o solo como recursos valiosos e compartilhados, protegendo ecossistemas de bacias hidrográficas e promovendo a disponibilidade de água limpa e solos saudáveis para todos os organismos.
- Justiça Social: envolve o compromisso empresarial com os direitos humanos e práticas comerciais justas e equitativas.

O sistema de indicadores Circ(T) é uma proposta para medir a circularidade de uso de materiais ao longo de múltiplos ciclos de vida, calculado com base nos resultados do cenário do MaTrace Global (PAULIUK et al., 2017). Esse sistema analisa como as opções tecnológicas atuais e futuras podem afetar a distribuição do aço e reduzir as perdas para aterros e pilhas de escória, promovendo a circularidade.

A plataforma CBA fornece uma abordagem prática para a avaliação circular na construção, iniciando-se nas fases iniciais do projeto e ampliando-se conforme mais informações são incorporadas durante as etapas de entrega detalhada (BAMB, 2020). No entanto, a plataforma não especifica claramente as metodologias empregadas.

O CBM-IS é um conjunto de indicadores aplicado a modelos de negócios circulares para capturar inovações da economia circular não mensuráveis por indicadores convencionais (ROSSI et al., 2020). Essas inovações incluem pensamento sistêmico, mudança de mentalidade, diversidade, eficácia, resiliência e uma visão de longo prazo para todas as partes interessadas.

A metodologia CEV busca ilustrar os efeitos do uso de recursos renováveis na melhoria do fluxo de energia e materiais em grandes eventos, como as Olimpíadas. O CEBI, por sua vez, foca na reciclagem e uso em cascata de materiais, desenvolvendo indicadores como a Taxa de Benefícios de Reciclabilidade e a Taxa de Benefícios de Conteúdo Reciclado (RCBR) ao (i) incluir a etapa final (por exemplo, incineração) no uso em cascata do material, (ii) eliminar ambiguidade em cálculos com denominador negativo, e (iii) introduzir um novo parâmetro 'd' para considerar o tempo de vida do produto reciclado em comparação ao de material virgem (HUYSVELD et al., 2019).

O sistema de indicadores CEI representa a relação entre o valor do material produzido pelo reciclador (valor de mercado) e o valor intrínseco do material que entra na instalação de reciclagem. Esse índice considera aspectos estratégicos, econômicos e ambientais da reciclagem, com implicações importantes para a tomada de decisão (MAIO; REM, 2015). Para calcular o

CEI, é necessário dispor de informações detalhadas sobre os componentes e materiais de cada produto no fim de vida (FdV) que entra nas instalações de reciclagem e entender como eles se tornam matérias-primas recicladas.

O CEIP, desenvolvido em Excel, define quinze questões, cada uma relacionada a uma variável específica. Cada pergunta oferece múltiplas opções de resposta com ponderações estabelecidas com base em entrevistas com especialistas. As perguntas são agrupadas conforme os estágios do ciclo de vida do produto, e geram uma pontuação agregada que indica o nível de “circularidade” do produto (CAYZER; GRIFFITHS; BEGHETTO, 2017).

O CEMS, voltado para a indústria da construção, permite uma medição direta da relevância da EC para as empresas desse setor. A avaliação abrange sete dimensões ponderadas (NUÑEZ-CACHO et al., 2018): (1) Gestão de Recursos, que envolve Reduzir, Reutilizar e Reciclar (3R), bem como o uso eficiente de energia, água e materiais; (2) Impacto Ambiental, considerando emissões e resíduos gerados; e (3) Transição para a EC.

O CPI mede a relação entre o benefício ambiental real obtido pela atual opção de tratamento de resíduos e o benefício ambiental ideal, este último calculado com base na qualidade do resíduo e no tratamento ideal que requer o mínimo esforço (HUYSMAN et al., 2017). O benefício ambiental real é classificado em quatro opções, com a reciclagem em circuito fechado sendo a mais favorável e a incineração a menos recomendada. Esses benefícios são expressos em termos de consumo de recursos naturais e podem ser quantificados por meio da ACV.

O CET é uma ferramenta online para ACV de produtos e serviços, podendo ser utilizada por empresas, distribuidores, varejistas e consumidores. Ela oferece um indicador que revela áreas com potencial para oportunidades de negócios ou melhorias, considerando o *design* do produto e suas operações (EVANS; BOCKEN, 2013).

O CG fornece supervisão sobre diversas métricas e indicadores de circularidade, estabelecendo uma linha de base para o uso atual de recursos e integrando as medições à prática organizacional (WIT et al., 2018). Como se trata de uma empresa em desenvolvimento, são disponibilizadas poucas informações sobre os indicadores utilizados.

O CP é uma ferramenta inicial que visa orientar empresas interessadas em incorporar o pensamento da economia circular (RESCOM, 2017). Por meio de uma plataforma web gratuita, as empresas podem explorar e identificar caminhos circulares mais adequados para seus produtos, com base em uma pesquisa de 10 questões qualitativas sobre o produto.

O CAM tem como objetivo identificar e quantificar os aspectos circulares do modelo de negócios de uma empresa, avaliando seu potencial, capacidades e riscos em circularidade (GIACOMELLI; KOZAMERNIK; LAH, 2018). Esse *framework* foi projetado para o setor financeiro, servindo de apoio para decisões de crédito a empresas com práticas circulares. Contudo, o *framework* completo não é detalhado, havendo informações apenas sobre o processo de avaliação.

O CC avalia os fluxos potenciais de massa e valor de um produto, considerando que suas diferentes partes possam ser reutilizadas, remanufaturadas ou recicladas (RESCOM, 2017). No entanto, há significativa dificuldade de acesso à calculadora para este sistema de indicadores.

O Check é uma ferramenta gratuita e online que utiliza um questionário com cerca de 60 perguntas para calcular uma pontuação de circularidade para um produto ou serviço específico (ECOPRENEUR, 2019). O resultado obtido é uma porcentagem que representa o nível de circularidade, além de fornecer pontuações parciais em design, aquisição, fabricação, entrega, uso, recuperação e sustentabilidade.

O CI estima aproximadamente a circularidade de um material, levando em conta as perdas em quantidade e qualidade durante o reprocessamento de materiais (CULLEN, 2017). Já o CMT mede o grau de circularidade em Pequenas e Médias Empresas (PME), além de oferecer uma avaliação das práticas circulares em empresas do setor manufatureiro. O CMT também ajuda as empresas a identificar ações corretivas ou esforços futuros para a adoção de práticas de EC (GARZA-REYES et al., 2019).

O QC é um sistema de indicadores de qualidade de material, baseando-se na energia utilizada em produtos reciclados em comparação com produtos feitos apenas com insumos de materiais primários (STEINMANN; HUIJBREGTS; REIJNDERS, 2019). Esse sistema enfoca aspectos qualitativos da reciclagem, como a qualidade do material reciclado e a funcionalidade das substâncias presentes.

O CTI é um conjunto de indicadores aplicável em diversos setores e cadeias de valor, sendo complementar aos esforços de sustentabilidade de uma empresa. Ele pode ser utilizado por empresas de diferentes setores para estabelecer uma linguagem comum ao avaliar seu desempenho circular, sem diferenciação por material, setor ou tecnologia (WBCSD, 2018).

O CYT é uma ferramenta gratuita para medir o desempenho em economia circular das empresas, orientando sua tomada de decisão e estratégias de circularidade (EMF, 2020). Para utilizar a ferramenta, é necessário que os perfis do usuário e da empresa passem por uma análise.

O CLC está sendo desenvolvido pelo grupo Kingfisher para medir o quão próximo um produto está de ser considerado “ciclo fechado”. O CLC utiliza dez variáveis de produtos de malha fechada, incluindo atributos como material, possibilidade de aluguel ou reparo, e se o produto pode ser desmontado em componentes ou materiais (KINGFISHER, 2014).

O eDiM utiliza uma planilha de cálculo para estimar o tempo de desmontagem de um produto, considerando a sequência de ações e informações básicas sobre o produto. O EEI, por sua vez, é uma metodologia voltada para selecionar soluções preferenciais entre opções tecnológicas, considerando aspectos econômicos e ambientais no desempenho global (FREGONARA et al., 2017). O foco está no estágio de FdV e atenção é dada aos custos de descarte e ao valor residual, informações essenciais para orientar decisões de investimento.

O EER é uma ferramenta que permite aos fornecedores avaliar rapidamente se a remanufatura é viável e vantajosa em termos econômicos e ambientais em comparação à produção de novos componentes. O BPI, por sua vez, monitora o gesso no FdV para promover a EC. O BPI classifica suas atividades em dois processos (desconstrução e reciclagem) e quatro categorias (técnica, social, econômica e ambiental) ((JIMÉNEZ-RIVERO; GARCÍA-NAVARRO, 2016).

A metodologia de indexação EoL Index auxilia designers na avaliação e estimativa

do desempenho de produtos em FdV durante a fase de projeto, utilizando informações de FdV fornecidas pelas partes interessadas. Isso melhora o fluxo de informações ao longo do ciclo de vida do produto e oferece aos projetistas dados mais atualizados e representativos do estado da arte no estágio de FdV (LEE; LU; SONG, 2014).

A estrutura do FPI define três aspectos de sustentabilidade para embalagens de alimentos: impactos ambientais diretos da embalagem, perdas e resíduos alimentares relacionados à embalagem e a circularidade. Ela apresenta uma lista de indicadores de desempenho ambiental principais e recomenda métodos de cálculo para cada indicador (PAUER et al., 2019). A estrutura é alinhada com a iniciativa *Product Environmental Footprint* e com o Pacote de Economia Circular da União Europeia.

EoLi é uma abordagem voltada para apoiar *designers* na avaliação e na melhoria do desempenho FdV de produtos (FAVI et al., 2017). O método baseia-se em quatro índices EoL que comparam diferentes cenários de FdV para cada componente do produto, permitindo que o *designer* ajuste a estrutura do produto ou suas conexões para maximizar a reutilização e a remanufatura de componentes, bem como a reciclagem de materiais.

O índice CE-PCF é um sistema de avaliação com cinco critérios e quatorze subcritérios, elaborado para facilitar a análise de especialistas (LIANG; ZHAO; HONG, 2018). O método VIKOR-QUALIFLEX é utilizado para obter os resultados de classificação.

O modelo ZWP propõe uma prática expandida de “resíduo zero expandido”, integrando o engajamento dos funcionários e adotando medidas mais robustas para práticas empresariais circulares. Já o GRInd incorpora aspectos de avaliação de recursos, incluindo tanto a reciclabilidade quanto a criticidade dos recursos como parte de um indicador multicritério que complementa o conceito de escassez (ADIBI et al., 2017).

O índice WCI oferece uma métrica de EC aplicada ao uso de água, variando de 0 a 1, onde 1 representa um processo circular completo (ciclo 100% fechado para uso da água) (SARTAL; OZCELIK; RODRÍGUEZ, 2020).

O IOBS é uma ferramenta que auxilia empresas a medir a circularidade de seus produtos, apoiando os *designers* na fase de desenvolvimento com a escolha de materiais sustentáveis. A ferramenta ajuda também na aplicação das estratégias do Plano de Ação de Economia Circular da União Europeia (UE) e da Diretiva de Ecodesign (CAPELLINI, 2017). Entretanto, por ser uma ferramenta privada, o acesso a todas as suas informações é limitado.

O grupo de indicadores L&C concentra-se em medir circularidade e longevidade, avaliando a contribuição de organizações e usuários de recursos para a sustentabilidade no uso desses recursos (FIGGE et al., 2018). Esses indicadores capturam a circularidade dos fluxos de recursos.

O MECI atualiza o conceito de Lucro de Sustentabilidade, considerando as perspectivas de: i) empresa, ii) empresa e país (governo), e iii) empresa, país (governo) e indivíduos (funcionários) (ZORE; ČUČEK; KRAVANJA, 2018). O MECI inclui também indicadores de circularidade que medem a fração de matérias-primas e energia circuladas em relação às quantidades totais desses recursos.

O MCI mede o grau de restauração dos fluxos de materiais de um produto, podendo ser aplicado em diferentes níveis, desde o portfólio de produtos até a empresa como um todo. Essa ferramenta permite que as empresas identifiquem valor circular adicional em seus produtos e materiais, além de ajudar a mitigar riscos relacionados à volatilidade de preços e fornecimento de materiais (EMF; GRANTA, 2015). Atualmente, o MCI está passando por uma expansão metodológica para incluir materiais biológicos e abordar os desafios associados às combinações de materiais biológicos e técnicos. Também serão consideradas métricas complementares baseadas em risco para materiais biológicos.

O MESCS é usado para quantificar a eficiência global das cadeias de suprimentos, cobrindo os custos de cada etapa do processo, desde a extração de recursos primários até o processamento, entrega ao consumidor e reciclagem de resíduos e produtos usados, reintegrando-os ao ciclo econômico. A eficiência de materiais e energia é definida pela proporção de saída de material utilizável — como produtos pré, semi, intermediários, finais e auxiliares — ou energia em relação ao material ou energia de entrada (BRAUN et al., 2018).

Desenvolvido pelo Wuppertal Institute, o MIPS é uma medida ambiental preventiva que calcula o uso de recursos desde sua extração na natureza. Todos os dados são expressos em toneladas movimentadas na natureza, abarcando matérias-primas bióticas (renováveis), abióticas (não renováveis), água, ar e a movimentação da terra em atividades como agricultura e silvicultura (RITTHOFF; ROHN; LIEDTKE, 2002). O cálculo considera o consumo de materiais ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a fabricação e uso até reciclagem ou descarte.

A estrutura do MI possui duas dimensões principais (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017):

- Projeto de Mineração: O desempenho do projeto é avaliado por meio de indicadores específicos de Análise de Fluxo de Material (AFM) para a indústria de mineração.
- Ciclo de Vida da Mina: Inclui desde a descoberta inicial do minério até o fechamento final da mina, com uma análise qualitativa da transição entre diferentes projetos de mineração.

O MCEM-PLCS é um método de avaliação multicritério que apoia os tomadores de decisão na escolha de estratégias preferenciais, vinculando uma ampla gama de critérios, como ambiental, econômico, social, legislativo, técnico e de negócios. Ele também propõe indicadores relevantes considerando a perspectiva do ciclo de vida (ALAMEREW et al., 2020). Esse método permite a flexibilidade para que os tomadores de decisão ajustem critérios, subcritérios e fatores de ponderação conforme as necessidades específicas de seu caso ou produto.

O MIS é um conjunto de indicadores desenvolvido para avaliar a eficácia de sistemas de reciclagem em relação aos objetivos estratégicos de sustentabilidade para Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) na Europa, indo além da simples quantificação do peso dos insumos. É uma abordagem centrada no produto, com foco em quatro critérios de preservação para avaliar e monitorar impactos nos sistemas de reciclagem (NELEN et al., 2014):

(1) recuperação do peso do material-alvo; (2) recuperação de materiais críticos; (3) fechamento de ciclos de materiais; e (4) cargas ambientais evitadas. Esses quatro indicadores podem ser calculados a partir do momento em que são conhecidas as composições dos materiais de entrada e saída de um processo de reciclagem de WEEE, assim como a pureza, o preço de mercado e a funcionalidade das frações de saída.

O PCIP é um programa holístico, estruturado em etapas, que auxilia as empresas a obter *insights* acionáveis sobre o impacto ecológico e a circularidade de seus produtos, bem como dos produtos de seus fornecedores (CIRCULARITY IQ AND KPMG, 2020). Assim como o IOBS, essa ferramenta é privada e não foi possível acessar todas as suas informações.

O PR-MCDT é uma proposta para avaliar as estratégias de circularidade de um produto no final de sua vida útil. Essa abordagem é estruturada em seis etapas principais (ALAMEREW; BRISSAUD, 2019): (1) seleção de possíveis estratégias de fim de vida, (2) definição do escopo das estratégias, (3) seleção de indicadores relevantes, (4) avaliação das estratégias, (5) análise e avaliação detalhada, e (6) refinamento e avaliação final das estratégias.

O PRDI foi desenvolvido com base em um índice de conveniência para reciclagem, priorizando a reciclagem de produtos. A medida de complexidade na mistura de materiais foi invertida em um índice de simplicidade e ampliada por meio da modelagem do índice de segurança da mistura de materiais e do nível de prontidão tecnológica das tecnologias de reciclagem (SULTAN; LOU; MATIVENGA, 2017). Esse modelo ampliado é proposto como uma métrica integrada para avaliar a viabilidade de reciclagem de produtos no fim de sua vida útil.

O PCM usa o valor econômico como unidade de base para agregar componentes do produto em uma métrica de circularidade no nível do produto, onde a circularidade é definida pela fração do produto proveniente de materiais reutilizados (LINDER; SARASINI; LOON, 2017). Assim, o PCM é uma métrica que reflete a relação entre o valor econômico total do produto e o valor recirculado, variando entre 0 e 1 (ou de 0% a 100% de partes recirculadas).

O PRP é determinado com base em uma análise circular realizada no módulo ReNtry. Essa análise abrange toda a cadeia de valor e é fundamentada exclusivamente em dados verificáveis da própria cadeia (RENDEMINT, 2016).

O RIs, semelhante às Etiquetas Energéticas da UE, é baseado em modelos de simulação derivados do processamento mineral e metalúrgico (SCHAIK; REUTER, 2016). Ele apresenta e comunica o desempenho de reciclagem de um produto e de seus materiais de forma clara e transparente.

O RDI considera três componentes principais: vida útil inicial, vida útil adicionada por recondição e vida útil prolongada por reciclagem. Já o REAPro avalia e busca melhorar a eficiência de recursos de produtos que consomem energia, com um foco específico no fim de vida útil. Esse método permite identificar os principais aspectos do produto relacionados a critérios como: reusabilidade, reciclabilidade, recuperabilidade (em termos de massa e impacto ambiental); conteúdo reciclado (em termos de massa e impacto ambiental); e uso de substâncias perigosas (ARDENTE; MATHIEUX, 2014).

O RPI é uma ferramenta quantitativa que identifica quais materiais podem ser recupe-

rados como recursos e quais permanecem como resíduos. Apesar do aumento do interesse pela reutilização de resíduos e conservação de recursos, as constantes mudanças na composição e complexidade dos produtos deixam os tomadores de decisão sem uma orientação clara para decidir o que é tecnicamente viável recuperar dos fluxos de descarte, mesmo antes de considerar o mercado (PARK; CHERTOW, 2014).

O SIAS apoia a classificação das operações de remanufatura, ajudando a identificar e priorizar as operações da empresa que requerem melhorias. O SPI consiste em seis indicadores que abordam o fluxo de material, reutilização, reconfiguração e desempenho funcional. Esses indicadores são projetados para medir a circularidade das famílias de produtos, considerando a circularidade dos componentes entre diferentes variantes de produto (MESA; ESPARRAGOZA; MAURY, 2018).

O SCI avalia a sustentabilidade em quatro dimensões: econômica, social, ambiental e de circularidade. Cada dimensão é orientada por objetivos específicos: (1) na dimensão econômica, busca-se maximizar o valor econômico gerado e distribuído, os gastos com pesquisa e desenvolvimento e a criação de empregos; (2) na dimensão social, é desejável reduzir os acidentes de trabalho, a precarização, o absenteísmo, a rotatividade e a perda de produtividade; (3) na dimensão ambiental, objetiva-se minimizar os resíduos perigosos, o consumo de água e o uso de energia; (4) na dimensão de circularidade, é essencial maximizar o uso de insumos reciclados e reutilizados, o tempo de vida dos produtos, a intensidade do uso e a eficiência dos processos de reciclagem.

O SICED é uma compilação de indicadores quantitativos novos e consolidados, reunidos em um painel para avaliar a estratégia de economia circular nas organizações (PAULIUK, 2018). Esse painel de indicadores é fundamentado principalmente em AFM, Contabilidade de Custos de Fluxo de Materiais (MFCA) e ACV.

A descrição detalhada destes sistemas não se limita à apresentação individual, mas fundamenta diretamente a proposta metodológica desenvolvida nesta tese, servindo como base para o processo de seleção e consolidação dos indicadores de circularidade, exemplificado na aplicação apresentada.

4.2 RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS DAS CATEGORIAS

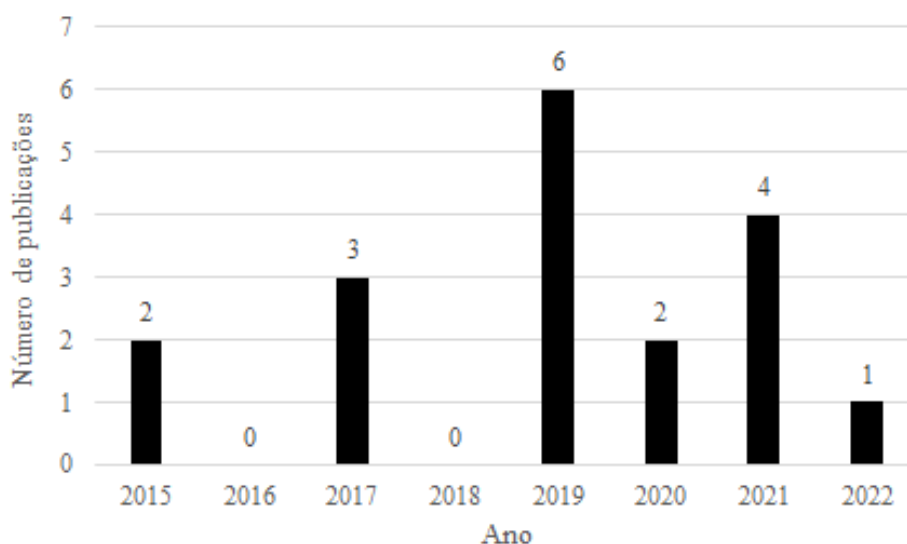
A análise bibliométrica desta pesquisa foi realizada considerando a distribuição temporal dos artigos, sua distribuição geográfica (com base na afiliação do primeiro autor), o tipo de publicação (periódicos revisados por pares e literatura cinzenta) e a distribuição dos artigos por periódico.

Sendo a EC um tema emergente e altamente discutido, a produção acadêmica é extensa. Para que os pesquisadores possam acompanhar essa evolução, são realizadas revisões de literatura focadas em categorias específicas. Esta pesquisa concentrou-se em revisões de literatura que abordassem categorias de organização e comparação de sistemas de indicadores de circularidade, base fundamental para estruturar a proposta metodológica apresentada nesta tese.

As primeiras publicações sobre o tema datam de 2015. Segundo a análise bibliométrica dos sistemas de indicadores de escala nano e micro, havia já nesse ano 10 publicações focadas em sistemas de circularidade. O pico ocorreu em 2019, com seis artigos, refletindo a intensificação das pesquisas entre 2017 e 2019, como apresentado na Figura 12. Em 2022, até a data da pesquisa (março de 2022), apenas um artigo havia sido publicado, mas espera-se um crescimento contínuo de artigos de revisão ao longo do ano, dada a relevância do tema de medição e avaliação da economia circular.

Para ilustrar o desenvolvimento desse tema emergente, as 18 publicações analisadas são apresentadas com sua distribuição cronológica na Figura 13.

Figura 13 – Publicações das revisões ao longo dos anos



Fonte: Elaborada pela autora

Essas revisões bibliométricas forneceram insumos essenciais para a definição das categorias analíticas utilizadas nesta tese, etapa indispensável da proposta metodológica de seleção de indicadores de circularidade. Os quinze artigos revisados por pares analisados no estudo foram publicados em 6 periódicos diferentes, os mais bem classificados dos quais foram *Journal of Cleaner Production* (7 publicações), *Resources, Conservation and Recycling* (3 publicações) e *Sustainable Production and Consumption* (2 publicações). A revista digital *Sustainability*, o *Journal of Environmental Management* e a revista *Applied Science* exibiram 1 publicação cada (para mais informações, consulte o Apêndice B). Da mesma forma que foi possível verificar que os sistemas de indicadores de circularidade estão sendo desenvolvidos por nichos científicos engajados na agenda de eficiência de recursos e sustentabilidade, as revisões de literatura estão sendo publicadas praticamente pelas mesmas revistas científicas.

O Quadro 4.3 mostra a distribuição geográfica das publicações de acordo com a afiliação do primeiro autor.

Quadro 4.3 – Distribuição geográfica das publicações referentes a categorias

País (afiliação do primeiro autor)	Numeração de publicação
Itália	5
Países Baixos	3
Bélgica	2
Dinamarca	2
Áustria	1
Emirados Árabes Unidos	1
França	1
Índia	1
Reino Unido	1
Suécia	1

Fonte: Elaborada pela autora.

Como se pode observar no Quadro 4.3, a maioria das publicações de revisão de literatura pode ser atribuída a países europeus. Todas as publicações da literatura cinzenta também são de origem europeia, ampliando a expressiva contribuição desta região. Itália, Países Baixos e Bélgica se destacam tanto na produção de artigos sobre indicadores nano e micro de circularidade quanto nas revisões sobre o tema, o que reforça a centralidade europeia na construção das categorias analíticas que sustentam a proposta metodológica desta pesquisa. Fora do principal eixo europeu, apenas dois países asiáticos aparecem nesta amostra, não havendo registros da América.

4.3 ANÁLISE DO PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES POR CONJUNTO DE CATEGORIAS

Um total de 58 sistemas de indicadores de circularidade de nível nano e micro foram reunidos por meio da revisão da literatura. A análise de cada um deles foi realizada por seis conjuntos de categorias, contabilizando ao todo 34 categorias. As próximas seções apresentam os resultados dessa análise, que servem de insumo para a consolidação da proposta metodológica, permitindo organizar, comparar e selecionar os indicadores mais adequados segundo o contexto empresarial.

4.3.1 Contexto

As informações básicas de cada sistema de indicadores são apresentadas no Quadro 4.4, constituindo a primeira etapa de caracterização necessária para a proposta metodológica de seleção, e detalhadas nas seções a seguir.

Quadro 4.4 – Sistemas de indicadores apresentados pelo seu contexto

(continua)

#	Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto/ Material	Tamanho da empresa	Localização geográfica
1	APL	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de produtos de bebidas e tabaco	Embalagem de bebidas	Não especificado	Reino Unido e Índia
2	BWPE	Setor específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado	Não especificado	Reino Unido
3	BCI	Setor específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado	Não especificado	Não especificado
4	C2C <i>Indicators</i>	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
5	Circ(T)	Material específico	Academia	Sim	Fabricação de produtos metálicos fabricados	Aço	Não especificado	Toda América, toda Europa, toda Oceania, toda Ásia, Oriente Médio, África do Sul
6	CBA	Setor específico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Construção civil	Não especificado	Não especificado	Europa
7	CBM-IS	Genérico	Academia	Sim	Diversas	Não especificado	Pequena e Grande	Brasil
8	CEV	Setor específico	Academia	Sim	Lazer e hospitalidade	Não especificado	Grande	Hungria
9	CEBI	Genérico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Plástico	Não especificado	Bélgica
10	CEI	Setor específico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Não especificado	Não especificado	Europa
11	CEIP	Genérico	Academia	Sim	Manufatura	Não especificado	Não especificado	Sem informação
12	CEMS	Setor específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado	Não especificado	Não especificado
13	CPI	Genérico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Embalagem	Não especificado	Bélgica
14	CET	Genérico	Academia	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
15	CG	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Não	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado

(continua)

#	Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto ou Material	Tamanho da empresa	Localização geográfica
16	CP	Genérico	Indústria ou agência de consultoria, Organização ambiental ou governamental	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Europa
17	CAM	Setor específico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Finança e seguro	Nenhum	Não especificado	Eslovênia
18	CC	Genérico	Indústria ou agência de consultoria, Organização ambiental ou governamental	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Europa
19	Check	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Europa
20	CI	Genérico	Academia	Não	Sem informação	Sem informação	Não especificado	Não especificado
21	CMT	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de máquinas para agricultura, construção e mineração	Equipamento avícola	Pequena e média	México
22	QC	Genérico	Academia	Não	Sem informação	Sem informação	Não especificado	Não especificado
23	CTI	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
24	CYT	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
25	CLC	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Não	Revendedores de materiais de construção e suprimentos	Não especificado	Grande	Não especificado
26	eDIM	Setor específico	Academia	Sim	Fabricação de computadores e eletrônicos e Tratamento e descarte de resíduos	Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	Não especificado	Não especificado
27	EEl	Setor específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado	Não especificado	Itália

(continua)

#	Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto ou Material	Tamanho da empresa	Localização geográfica
28	EER	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de veículos motorizados	Não especificado	Não especificado	Não especificado
29	BPI	Material específico	Academia	Sim	Construção civil	Gesso	Não especificado	Alemanha, Bélgica, França e Reino Unido
30	EoL <i>Index</i>	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de eletrodomésticos	Ferramenta elétrica	Não especificado	Não especificado
31	FPI	Sector específico	Academia	Não	Fabricação de produtos de bebidas e tabaco e Fabricação de alimentos	Embalagens de alimentos e bebidas	Não especificado	Não especificado
32	EoLi	Genérico	Academia	Sim	Manufatura	Não especificado	Não especificado	Não especificado
33	CE-PCF	Sector específico	Academia	Sim	Manufatura química	Fósforo	Não especificado	China
34	ZWP	Genérico	Academia	Não	Fabricação de produtos farmacêuticos e medicamentos	Não especificado	Não especificado	Não especificado
35	GRInd	Genérico	Academia	Sim	Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica	Turbinas eólicas	Não especificado	Não especificado
36	WCI	Material específico	Academia	Sim	Fabricação de alimentos	Água	Pequena e média	Espanha
37	IOBS	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Europa
38	L&C	Genérico	Academia	Não	Fabricação de equipamentos de comunicação	Ouro de celulares	Não especificado	Não especificado
39	MECI	Genérico	Academia	Sim	Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica	Biocombustíveis e outros	Grande	Europa central
40	MCI	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado

(continua)

#	Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto ou Material	Tamanho da empresa	Localização geográfica
41	MESCS	Genérico	Academia	Sim	Lojas de peças, acessórios e pneus automotivos	Não especificado	Média	Não especificado
42	MIPS	Genérico	Organização ambiental ou governamental	Não	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
43	MI	Setor específico	Academia	Sim	Mineração (exceto óleo e gás)	Não especificado	Não especificado	Austrália
44	MCEM-PLCS	Genérico	Academia	Não	Tratamento e descarte de resíduos e Lojas de móveis e artigos de decoração	Não especificado	Não especificado	Suécia
45	MIS	Setor específico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	Não especificado	Europa
46	PCIP	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Não	Diversas	Não especificado	Não especificado	Não especificado
47	PR-MCDT	Genérico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Motor automotivo	Não especificado	Não especificado
48	PRDI	Genérico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Não especificado	Não especificado	Reino Unido
49	PCM	Genérico	Academia	Não	Não especificado	Não especificado	Não especificado	Não especificado
50	PRP e <i>The ReNtry® module</i>	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sem informação
51	RIIs	Setor específico	Academia	Sim	Produtos minerais não-metálicos e Fabricação de metais primários	Não especificado	Não especificado	Não especificado
52	RDI	Genérico	Academia	Não	Fabricação de equipamentos de comunicação	Celulares	Não especificado	Não especificado
53	REAPro	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de computadores e produtos eletrônicos	Produtos eletrônicos	Não especificado	Não especificado

(conclusão)

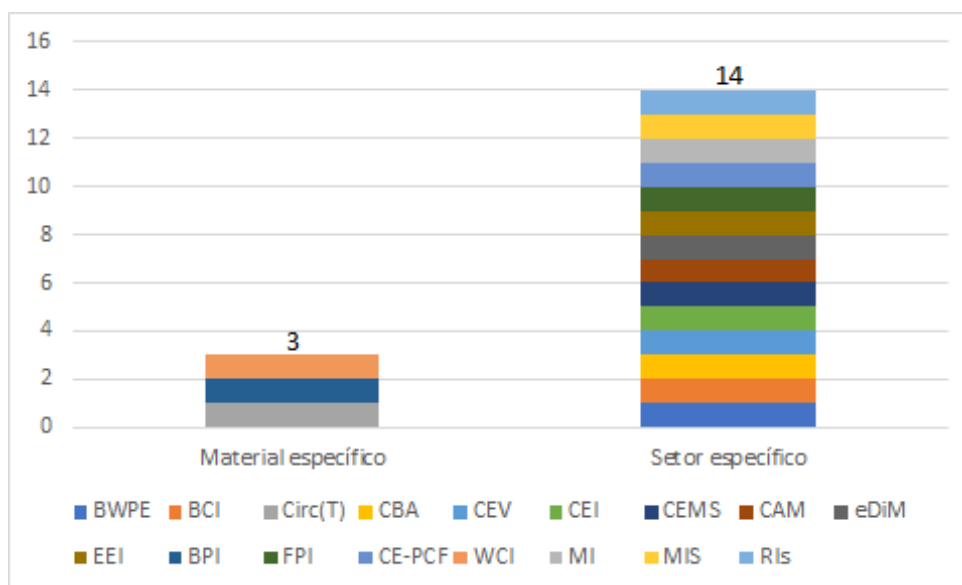
#	Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto ou Material	Tamanho da empresa	Localização geográfica
54	RPI	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de produtos de petróleo e carvão	Subprodutos da combustão do carvão	Não especificado	Estados Unidos
55	SIAS	Genérico	Academia	Não	Tratamento e descarte de resíduos	Não especificado	Não especificado	Não especificado
56	SPI	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de aparelhos ortopédicos, de ambulatórios ou protéticos	Dedos protéticos	Não especificado	Não especificado
57	SCI	Genérico	Academia	Não	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sem informação
58	SICED	Genérico	Academia	Não	Fabricação de produtos metálicos fabricados	Aço	Não especificado	Não especificado
APL: Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level								
BCI: Building Circularity Indicators								
BPI: End of Life Best Practice Indicators								
BWPE: BIM-based Whole-life Performance Estimator								
C2C Indicators: Cradle-to-Cradle Indicators								
CAM: Circularity Assessment Model								
CBA: Circular Building Assessment Prototype								
CBM-IS: Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability								
CC: Circularity Calculator								
CEBI: Circular Economy Benefit Indicators								
CEI: Circular Economy Index								
CEIP: Circular Economy Indicator Prototype								
CEMS: Circular Economy Measurement Scale								
CE-PCF: Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms								
CET: Circular Economy Toolkit								
CEV: Circular Economy Value								
CG: Circular Gap								
Check: Circularity Check								
MI: Mine site MFA Indicator								
MIPS: Material Input Per Service Delivered								
MIS: Multidimensional Indicator Set								
PCIP: Product Circularity Improvement Program								
PCM: Product-Level Circularity Metric								
PRDI: Product Recycling Destrability Index								
MCI: Material Circularity Indicator								
PRP: Circular e-Procurement Tool								
QC: Circularity of Material Quality								
RDI: Resource Duration Indicator								
REAPro: Resource Efficiency Assessment of Products								
RIS: Recycling Indices for the Circular Economy								
RPI: Reuse Potential Indicator								
SCI: Sustainable Circular Index								
SIAS: Set of Indicators to Assess Sustainability								
MECI: Material and Energy Circularity Indicators								
SPI: Sustainability Performance Indicators								
WCI: Improved Water Circularity Index								
ZWP: Expended Zero Waste Practice Model								
Circularity Strategies								

4.3.1.1 Transversalidade

Quarenta e um sistemas de indicadores, ou 71% dos sistemas, são classificados como Genéricos, isto é, podem ser utilizados para qualquer tipo de setor e material. Portanto, é possível inferir que a maior parte dos sistemas é desenvolvida para aplicações amplas, o que representa tanto uma oportunidade de adaptação quanto uma limitação quando se busca alinhamento com contextos empresariais específicos — aspecto central para a proposta metodológica desta tese.

Os sistemas que focam num setor ou material são bem reduzidos. Apenas 5% dos sistemas de indicadores trabalham diretamente com um material e 24% dos sistemas verificam setores específicos. A Figura 14 aponta os sistemas de indicadores que são material e setor específico.

Figura 14 – Sistema de indicadores material e setor específico



Fonte: Elaborada pela autora

Os desenvolvedores dos sistemas de indicadores consideram que a construção civil é uma área que deve se verificar mais de perto e em detalhes. Assim, são cinco sistemas específicos para o setor e um específico para o gesso na construção civil.

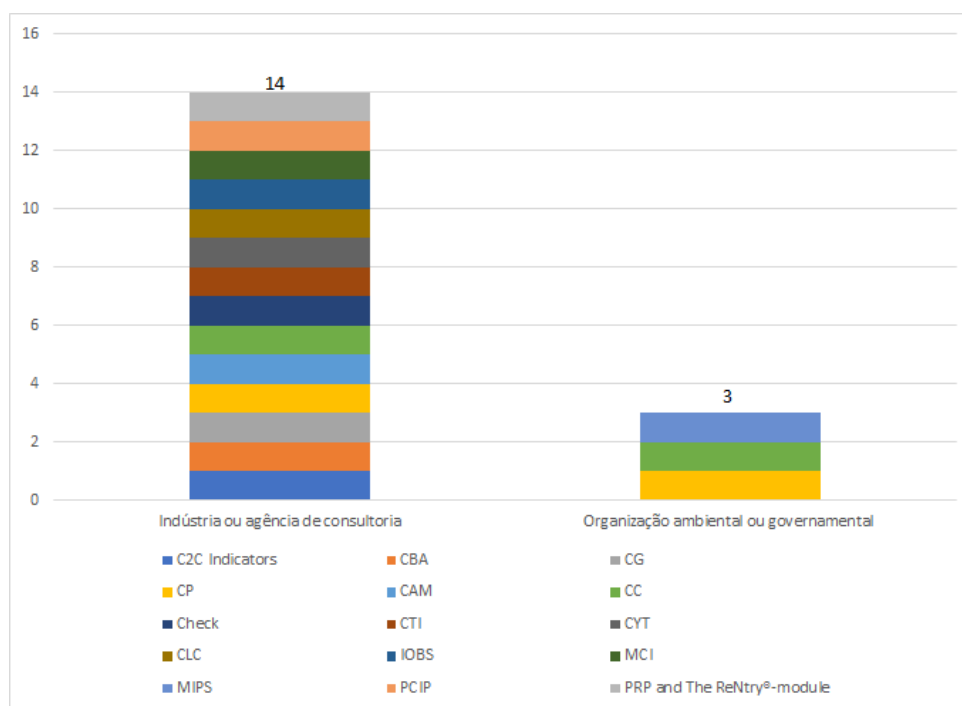
Como dito anteriormente, a construção civil é o setor que mais possui sistemas de indicadores específicos (BWPE, BCI, CBA, CEMS e EEI). O tratamento e disposição final de resíduos também possui dois sistemas de indicadores específicos (CEI e MIS).

Os três sistemas que são material específico são Circ(T), BPI e WCI. O Circ(T) é vinculado ao aço. O BPI foi desenvolvido para o gesso e o WCI para água.

4.3.1.2 Fonte

Quarenta e três sistemas de indicadores, ou 74% dos sistemas, foram desenvolvidos pela Academia. Das outras fontes, 12 sistemas de indicadores (21%) foram desenvolvidos pela indústria ou agência de consultoria e apenas 1 sistema (2%), Material Input Per Service Delivered (MIPS), foi desenvolvido por organização ambiental ou governamental. Dois sistemas de indicadores (3%), Circular Pathfinder (CP) e Circularity Calculator (CC) foram desenvolvidos em parceria pela indústria ou agência de consultoria e por organização ambiental ou governamental. A Figura 15 apresenta os sistemas de indicadores que foram desenvolvidos pela indústria ou agência de consultoria e por organização ambiental ou governamental, informação relevante para compreender a origem e confiabilidade das métricas que compõem o portfólio analisado.

Figura 15 – Recorte da fonte dos sistema de indicadores



Fonte: Elaborada pela autora

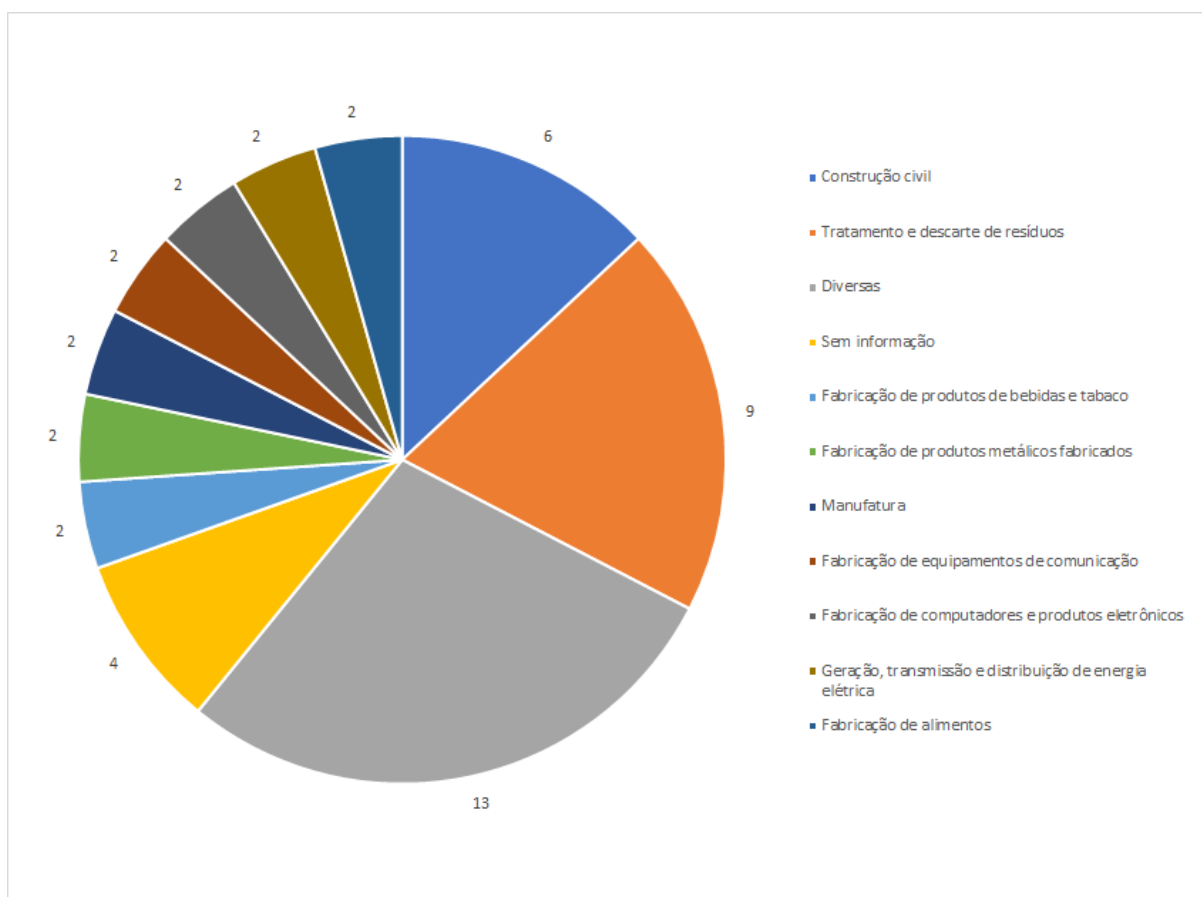
4.3.1.3 Validação

Quarenta e um sistemas de indicadores, ou 71% do portfólio, apresentam validação por meio de estudo de caso ou declaram que passaram por validação. Dezesesseis sistemas de indicadores, ou 28% do portfólio, não apresentam validação. O sistema PRP e The ReNtry®-module (2%) não apresenta informações suficientes para compreender se houve ou não validação.

4.3.1.4 Categoria de indústria

Em categoria de indústria, foram identificadas 24 tipos de indústrias focadas nos sistemas de indicadores. As principais indústrias apontadas foram: tratamento e descarte de resíduos (16% dos sistemas) e construção civil (10%), setores recorrentes na literatura e que aparecem como referências importantes na construção das categorias analíticas para a proposta metodológica desta pesquisa. A Figura 16 mostra as indústrias que foram destacadas por mais de um sistema. As 15 indústrias restantes foram destacadas por apenas um sistema cada.

Figura 16 – Indústrias destacadas por mais de um sistema de indicadores



Fonte: Elaborada pela autora

Além das 24 indústrias, apenas o sistema PCM (2% dos sistemas de indicadores) não especificou o setor industrial, e os sistemas de indicadores CI, QC, PRP e The ReNtry®-module e SCI (7% dos sistemas de indicadores) não possuem informação sobre a categoria. Já 13 sistemas (22%) apresentam uma avaliação para diversos tipos de indústrias.

4.3.1.5 Produto ou Material

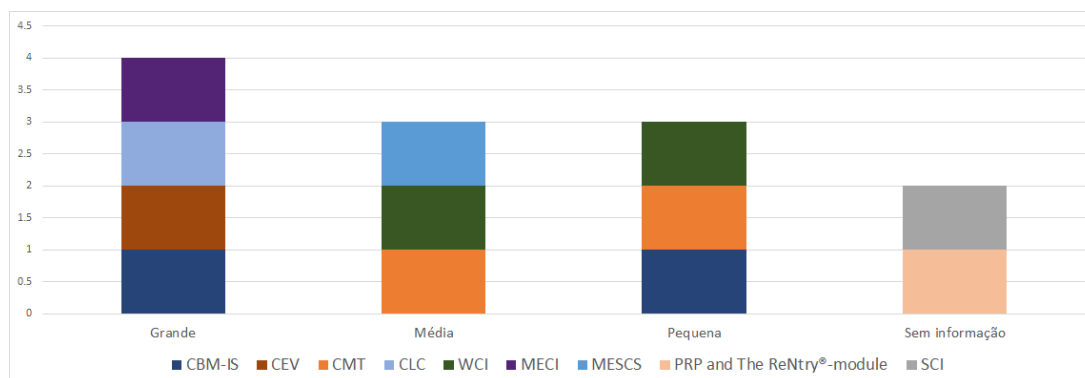
Foram identificados dezenove tipos de produtos ou materiais. A maioria dos sistemas de indicadores (32 sistemas de indicadores ou 55%) não especificaram. Não houve possibi-

dade de extrair informação dos sistemas CI, QC, PRP e The ReNtry®-module e SCI (7% dos sistemas de indicadores) e o sistema CAM (2%) não utiliza nenhum produto ou material. Os únicos produtos recorrentes entre os sistemas analisados foram aço (sistemas Circ(T) e SICED) e resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (sistemas de indicadores eDiM e MIS). Essa predominância reforça a necessidade de uma proposta metodológica capaz de adaptar a seleção de indicadores a outros materiais e produtos, evitando vieses setoriais.

4.3.1.6 Tamanho da empresa

Assim como na categoria Produto ou Material, a maioria dos sistemas de indicadores (49 ou 84% do portfólio) não especifica o porte da empresa avaliada, aspecto relevante para orientar a aplicabilidade da proposta metodológica em diferentes contextos empresariais. Os sistemas de indicadores PRP e The ReNtry®-module e SCI (3%) não possuem informação sobre a questão e 7 sistemas de indicadores (12%) apresentam essa informação, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Sistemas que apresentam informação sobre o tamanho da empresa que avaliam



Fonte: Elaborada pela autora

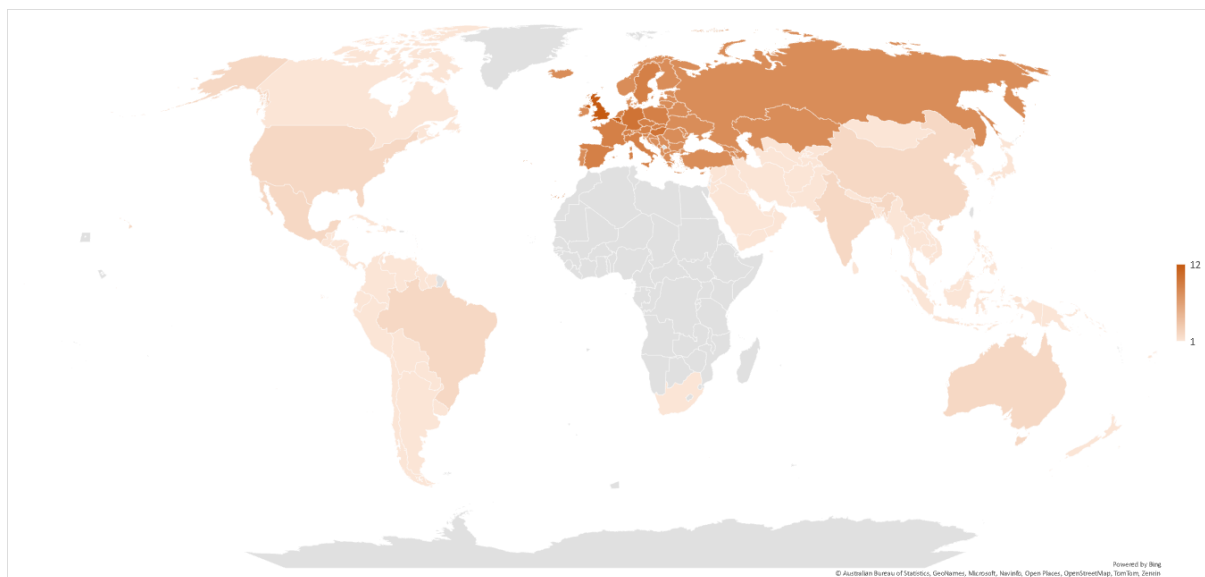
Os sistemas de indicadores CEV, CLC e MECI (5% do portfólio) avaliam apenas grandes empresas, o sistema MESCS (2%) avalia apenas médias empresas. Já os sistemas de indicadores CMT e WCI (3%) avaliam pequenas e médias empresas e o sistema CBM-IS (2%) avalia pequenas e grandes empresas.

4.3.1.7 Localização geográfica

Essa variável é relevante, pois cada região apresenta legislações e diretrizes específicas. A maioria dos sistemas de indicadores (30 ou 52%) não especifica localização e os sistemas de indicadores CEIP, PRP e The ReNtry®-module e SCI (5%) não possuem informação. A Figura 18 indica que Reino Unido e Bélgica são os países com maior influência nos sistemas de indicadores, logo em seguida Alemanha e Hungria. Observa-se que a Europa exerce maior

influência sobre os sistemas analisados, evidenciando que a proposta metodológica deve considerar a adaptação dos indicadores a realidades regulatórias e estratégicas distintas. A África do Sul é o único país citado no continente africano.

Figura 18 – Países que os sistemas de indicadores abrangem



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.2 Indicador

Os sistemas de indicadores de circularidade foram identificados como ferramentas analíticas destinadas a mensurar o grau de associação de um sistema (ou parte dele) às práticas e estratégias aplicadas para o desenvolvimento da EC, constituindo a base para a proposta metodológica de seleção de indicadores em empresas. As características de cada sistema de indicadores são apresentadas no Quadro 4.5 e detalhadas nas seções a seguir.

Quadro 4.5 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pelas suas características

(continua)

#	Sistema	Mensurabilidade	Dimensão	Formato	Unidade mais usada	Utilização	Foco temporal	Tipo de indicador	Variável
1	APL	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Material, Outras variáveis e Poluição
2	BWPE	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta computacional	Tempo	Tomada de decisão	Prospectivo	Avaliação	Material
3	BCI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Material
4	C2C Indicators	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Quadro de avaliação	Massa	Tomada de decisão, Comunicação, Informação e Abordagem participativa	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Energia, Material, Outras variáveis e Poluição
5	Circ(T)	Quantitativo	Indicador único	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Massa e Tempo	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Material
6	CBA	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Sem informação	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
7	CBM-IS	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Contagem e Não medido	Tomada de decisão, Comunicação, Informação e Abordagem participativa	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Poluição
8	CEV	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Porcentagem	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Medição	Energia e Material
9	CEBI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Medição	Energia, Material e Poluição
10	CEI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Valor	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Material
11	CEIP	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Planilha de Excel dinâmica	Porcentagem e Não medido	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis

(continua)

#	Sistema	Mensurabilidade	Dimensão	Formato	Unidade mais usada	Utilização	Foco temporal	Tipo de indicador	Variável
12	CEMS	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Pesquisa online	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Energia, Material, Outras variáveis e Poluição
13	CPI	Quantitativo	Indicador único	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos e Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Material
14	CET	Qualitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Outra	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Avaliação	Outras variáveis
15	CG	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Sem informação	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Energia, Material, Outras variáveis
16	CP	Qualitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Outra	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Outras variáveis
17	CAM	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Quadro de avaliação	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Energia, Material, Outras variáveis
18	CC	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Massa	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Medição	Material e Outras variáveis
19	Check	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Porcentagem	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Energia, Material e Outras variáveis
20	CI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Energia e Material
21	CMT	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Não medido	Tomada de decisão, Comunicação, Ensino e Abordagem participativa	Retrospectivo	Medição	Energia, Material, Outras variáveis e Poluição
22	QC	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Razão	Tomada de decisão	Retrospectivo	Medição	Energia e Material
23	CTI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web e Quadro de avaliação	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis

(continua)

#	Sistema	Mensurabilidade	Dimensão	Formato	Unidade mais usada	Utilização	Foco temporal	Tipo de indicador	Variável
24	CYT	Qualitativo e Quantitativo	Indicador único	Ferramenta baseada na web	Massa	Tomada de decisão, Comunicação, Informação e Abordagem participativa	Retrospectivo e Prospectivo	Medição	Energia, Material e Outras variáveis
25	CLC	Qualitativo e Quantitativo	Indicador único	Quadro de avaliação	Sem informação	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Sem informação
26	eDIM	Qualitativo e Quantitativo	Indicador único	Planilha de Excel dinâmica	Tempo	Tomada de decisão	Retrospectivo	Medição	Outras variáveis
27	EEI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Valor	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Poluição
28	EER	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Valor	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Medição e Avaliação	Material e Poluição
29	BPI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Porcentagem	Tomada de decisão, Informação e Abordagem participativa	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
30	EoL Index	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
31	FPI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Poluição
32	EoLi	Quantitativo	Múltiplo indicador	Planilha de Excel dinâmica	Porcentagem	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Medição	Material e Outras variáveis
33	CE-PCF	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta computacional	Outra	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Energia, Material, Outras variáveis e Poluição
34	ZWP	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Porcentagem	Tomada de decisão, Informação e Ensino	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
35	GRInd	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Material

(continua)

#	Sistema	Mensurabilidade	Dimensão	Formato	Unidade mais usada	Utilização	Foco temporal	Tipo de indicador	Variável
36	WCI	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Planilha de Excel dinâmica	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Medição	Material
37	IOBS	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Sem informação	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo	Medição	Sem informação
38	L&C	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Tempo	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Medição	Material e Outras variáveis
39	MECI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Valor	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Energia e Material
40	MCI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Planilha de Excel dinâmica	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Medição	Energia e Material
41	MESCS	Quantitativo	Indicador único	Planilha de Excel dinâmica	Razão	Tomada de decisão, e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Energia e Material
42	MIPS	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Planilha de Excel dinâmica	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
43	MI	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
44	MCEM-PLCS	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos e Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Material, Outras variáveis e Poluição
45	MIS	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Razão	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Medição e Avaliação	Material, Outras variáveis e Poluição
46	PCIP	Sem informação	Múltiplo indicador	Ferramenta baseada na web	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo	Medição e Avaliação	Material e Outras variáveis
47	PR-MCDT	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Valor	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Outras variáveis
48	PRDI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Material

(continua)

#	Sistema	Mensurabilidade	Dimensão	Formato	Unidade mais usada	Utilização	Foco temporal	Tipo de indicador	Variável
49	PCM	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Valor	Tomada de decisão, e Informação	Retrospectivo	Medição	Outras variáveis
50	PRP e <i>The ReNry® module</i>	Sem informação	Indicador único	Ferramenta baseada na web	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Material e Outras variáveis
51	RIIs	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Medição e Avaliação	Material
52	RDI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Tempo	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Outras variáveis
53	REAPro	Qualitativo e Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos e Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
54	RPI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Outra	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Prospectivo	Medição	Material
55	SIAS	Quantitativo	Múltiplo indicador	Ferramenta computacional	Porcentagem	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material, Outras variáveis e Poluição
56	SPI	Quantitativo	Múltiplo indicador	Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Material
57	SCI	Quantitativo	Indicador único	Fórmulas para calcular	Porcentagem	Tomada de decisão e Informação	Retrospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis
58	SICED	Quantitativo	Múltiplo indicador	Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos e Fórmulas para calcular	Massa	Tomada de decisão, Comunicação e Informação	Retrospectivo e Prospectivo	Avaliação	Energia, Material e Outras variáveis

(conclusão)

APL: Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level	CLC: Closed Loop Calculator	MIPS: Material Input Per Service Delivered
BCI: Building Circularity Indicators	CMT: Circularity Measurement Toolkit	MIS: Multidimensional Indicator Set
BPI: End of Life Best Practice Indicators	CP: Circular Pathfinder	PCIP: Product Circularity Improvement Program
BWPE: BIM-based Whole-life Performance Estimator	CPI: Circular Economy Performance Indicator	PCM: Product-Level Circularity Metric
C2C Indicators: Cradle-to-Cradle Indicators	CTI: Circular Transition Indicators	PRDI: Product Recycling Desirability Index
CAM: Circularity Assessment Model	CYT: Circulytics	MCI: Material Circularity Indicator
CBA: Circular Building Assessment Prototype	eDiM: Ease of Disassembly Metric	PRP: Circular e-Procurement Tool
CBM-IS: Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability	EEL: Economic-Environmental Indicators	QC: Circularity of Material Quality
CC: Circularity Calculator	EER: Economic-Environmental Remanufacturing	RDI: Resource Duration Indicator
CEBI: Circular Economy Benefit Indicators	EoLi: End of Life Indices	REAPro: Resource Efficiency Assessment of Products
CEI: Circular Economy Index	FPI: Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators	RI: Recycling Indices for the Circular Economy
CEIP: Circular Economy Indicator Prototype	GRInd: Global Resource Indicator	RPI: Reuse Potential Indicator
CEMS: Circular Economy Measurement Scale	IOBS: Input-Output Balance Sheet	SCI: Sustainable Circular Index
CE-PCF: Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms	L&C: Longevity and Circularity	SIAS: Set of Indicators to Assess Sustainability
CET: Circular Economy Toolkit	CI: Circularity Index	MECI: Material and Energy Circularity Indicators
CEV: Circular Economy Value	PR-MCDT: Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool	SPI: Sustainability Performance Indicators
CG: Circular Gap	SICED: Systems Indicators for Circular Economy Dashboard	WCI: Improved Water Circularity Index
Check: Circularity Check	MESCS: Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets	ZWP: Expended Zero Waste Practice Model
MI: Mine site MFA Indicator	MCEM-PLCS: Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies	

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2.1 *Mensurabilidade*

A maioria dos sistemas de indicadores (37 ou 64% do portfólio) mede o progresso da EC com base em dados quantitativos. Outros 17 sistemas de indicadores (29%) combinam aspectos quantitativos e qualitativos, reforçando a necessidade de uma proposta metodológica que auxilie as empresas a equilibrar diferentes dimensões de mensuração. Os sistemas de indicadores CP e CET são apenas qualitativos, enquanto os sistemas PCIP e PRP não apresentam informações suficientes para caracterizar a mensuração da circularidade, evidenciando lacunas que a proposta metodológica busca superar.

4.3.2.2 *Dimensão*

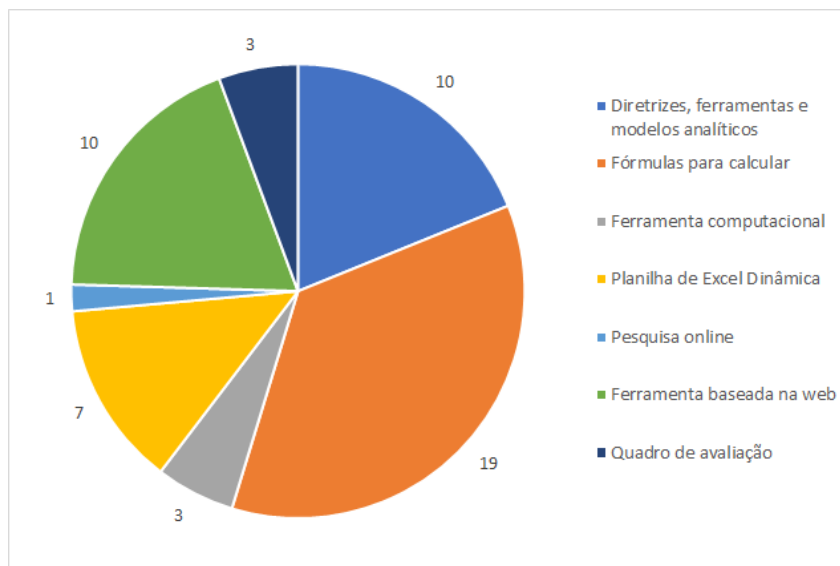
A maioria dos sistemas de indicadores avaliados neste estudo combina diferentes métricas para fornecer resultados simplificados, o que evidencia a necessidade de uma proposta metodológica capaz de orientar as empresas sobre a escolha adequada dessas combinações. Em outros termos, eles aplicam um grupo de métodos e cálculos para medir a circularidade de um sistema sob suas premissas. Dos 58 sistemas de indicadores discutidos no estudo, apenas 17 (29%) contam com um único indicador em seu procedimento. A maioria dos sistemas mostrados no Quadro 4.5 (41 sistemas de indicadores ou 71%) depende de um conjunto de ferramentas analíticas para entregar seus resultados.

4.3.2.3 *Formato*

Dos 58 sistemas de indicadores estudados, apenas 5 sistemas (9%) possuem mais de um formato de medição de circularidade, o que reforça o papel da proposta metodológica em sistematizar esses formatos para facilitar a tomada de decisão estratégica. Quatro desses sistemas de indicadores (CPI, MCEM-PLCS, ReAPro e SICED) possuem o conjunto Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos e Fórmulas para calcular. O sistema CTI foi o único a possuir Ferramenta baseada na web e Quadro de avaliação.

Os 53 sistemas de indicadores (91%) restantes possuem apenas uma forma de medição. Para esses sistemas, o formato mais utilizado é Fórmulas para calcular (33%), seguido por Diretrizes, ferramentas e modelos analíticos (17%), Ferramenta baseada na web (17%) e Planilha dinâmica em Excel (12%). Entre os formatos menos utilizados, apenas o sistema de indicadores CEMS (2%) utiliza Pesquisa online. Os 3 sistemas de indicadores BWPE, CE-PCF e SIAS (5%) utilizam Ferramenta computacional. E os sistemas C2C Indicators, CAM e CLC (5%) utilizam apenas Quadro de avaliação, como é possível ver na Figura 19.

Figura 19 – Formato da medição de circularidade dos sistemas de indicadores



Fonte: Elaborada pela autora

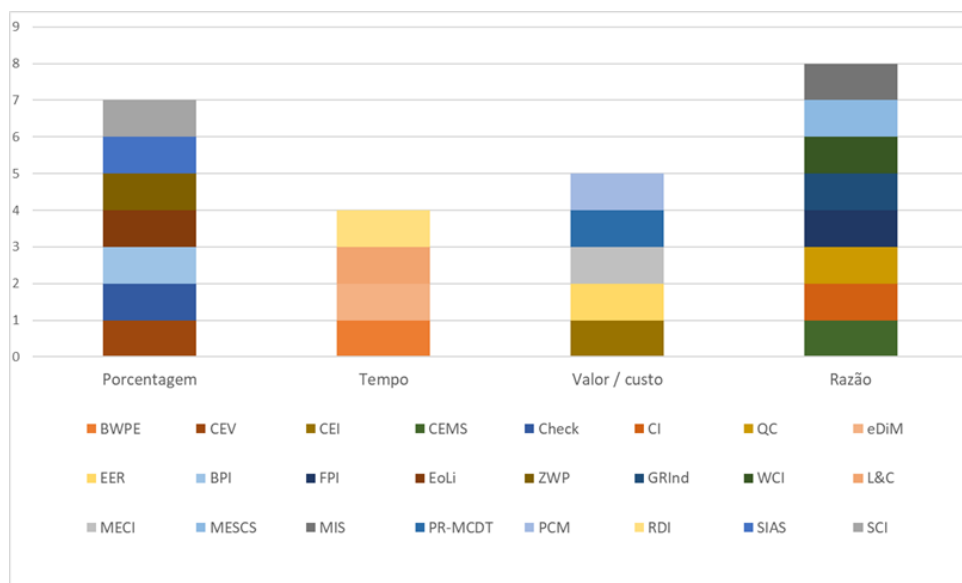
4.3.2.4 Unidades mais utilizadas

Três sistemas de indicadores (5% do portfólio), Circ(T) CBM-IS e CEIP, utilizam dois tipos de unidades sendo elas: massa e tempo, contagem e não-medido e, porcentagem e não-medido, respectivamente.

Os 4 sistemas de indicadores (7%) RPI, CE-PCF, CP e CET usam outras unidades não especificadas neste trabalho. Já os sistemas de indicadores CBA, CG, CLC e IOBS (7%) não possuem informações sobre as unidades utilizadas.

A unidade mais utilizada é a massa, presente em 22 sistemas de indicadores (38%). Esse predomínio é relevante para a proposta metodológica, que deve considerar a adequação das unidades ao contexto empresarial e às estratégias de circularidade pretendidas. Os demais sistemas se dividem na unidade Razão (8 sistemas de indicadores ou 14%) Porcentagem (7 sistemas de indicadores ou 12%), Valor/custo (6 sistemas de indicadores ou 10%) e Tempo (4 sistemas de indicadores ou 7%), como é possível observar na Figura 20.

Figura 20 – Detalhamento dos sistemas de indicadores por unidades mais utilizadas



Fonte: Elaborada pela autora

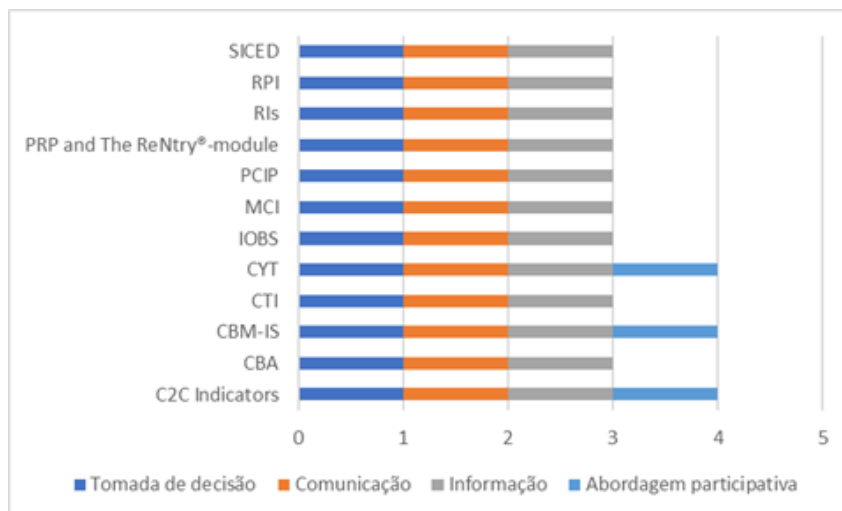
4.3.2.5 Utilização

Todos os sistemas de indicadores se identificam como um auxílio à tomada de decisão, o que está diretamente alinhado à hipótese desta pesquisa de que uma ferramenta estruturada pode promover maior alinhamento entre práticas e objetivos estratégicos. Os 3 sistemas de indicadores (5%) BWPE, QC e eDiM são definidos apenas para Tomada de decisão. O restante dos sistemas apresenta outras utilizações, além de orientação para Tomada de decisão. Sendo que 95% do portfólio (55 sistemas de indicadores) também é utilizado para Informação. Comunicação é utilizada em 14 sistemas de indicadores (24%), seguido por Abordagem participativa (5 sistemas de indicadores ou 9% do portfólio). Os sistemas de indicadores raramente apresentam resultados voltados ao Ensino, sendo que apenas 3 sistemas de indicadores (5%) fazem uso dele.

A maioria dos sistemas de indicadores (39 deles ou 67% do portfólio) é utilizada para Tomada de decisão e Informação. O sistema ZWP (2%) se apresenta para utilização em Tomada de decisão, Informação e Ensino. Já o sistema CG (2%), além das utilizações citadas acima, também pode ser utilizado para comunicação. O sistema BPI (2%) pode ser utilizado para Tomada de decisão, Informação e Abordagem participativa. Apenas o sistema de indicadores CMT (2%) pode ser utilizado em todas as formas apresentadas nesta pesquisa.

A Figura 21 apresenta o conjunto de usos mais aplicados pelos sistemas de indicadores, retirando apenas o conjunto Tomada de decisão e Informação.

Figura 21 – Sistemas que podem ser utilizados para Tomada de decisão, Comunicação, Informação e Abordagem participativa

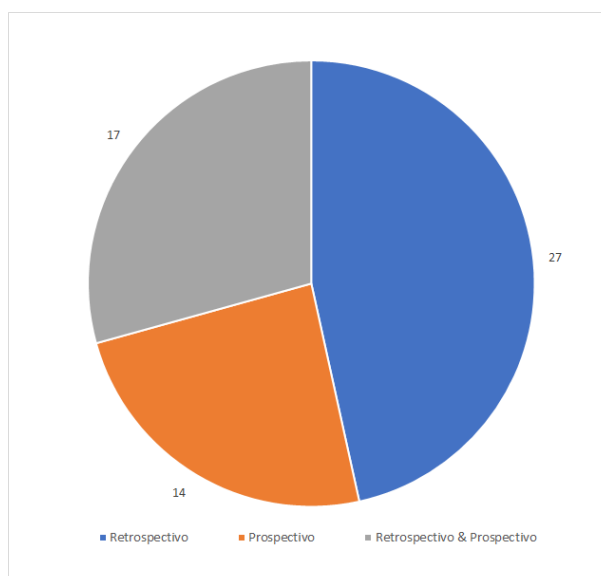


Fonte: Elaborada pela autora

4.3.2.6 Foco temporal

Os sistemas de indicadores analisados apresentam em sua maioria (47%) o foco temporal retrospectivo, ou seja, eles verificam o que já foi realizado na empresa, no produto ou no componente, 24% do portfólio tem foco temporal prospectivo e 29% se preocupa em analisar tanto sistemas futuros ou alternativos e cenários que já estão sendo desenvolvidos, como mostra a Figura 22. Esse resultado indica que a proposta metodológica precisa integrar ambas as perspectivas para apoiar tanto avaliações passadas quanto projeções de cenários futuros.

Figura 22 – Sistemas por foco temporal

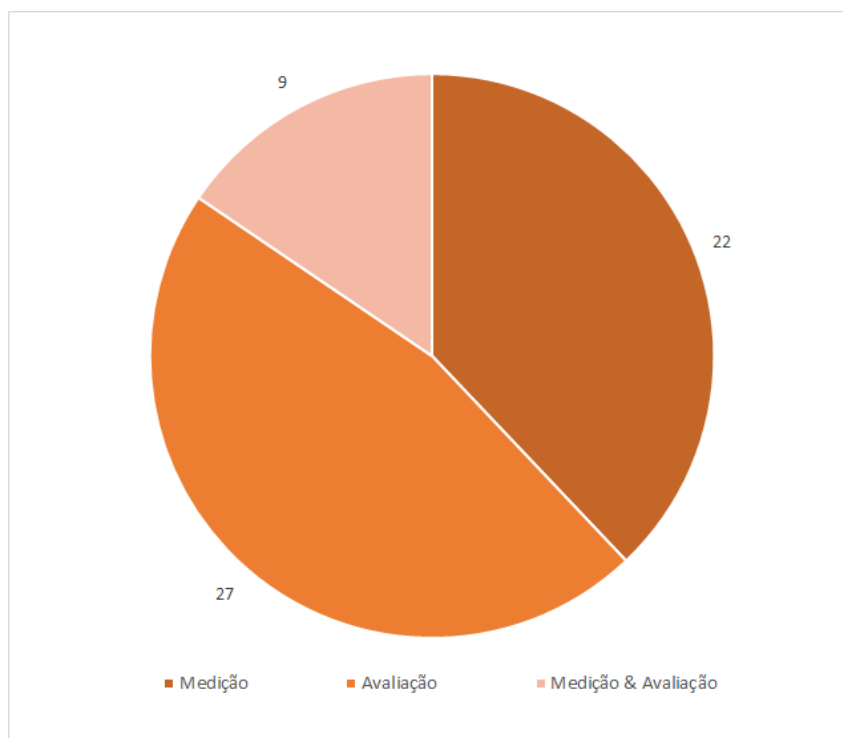


Fonte: Elaborada pela autora

4.3.2.7 Tipo de indicador

A maioria dos sistemas de indicadores se direciona ou apenas para medição (22 sistemas ou 38% do portfólio) ou apenas para avaliação (27 sistemas ou 47%). Apenas 9 sistemas de indicadores (16%) - C2C Indicators, CEIP, CEMS, CG, CTI, EER, MIS, PCIP e RIs - trabalham com medição e avaliação, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Tipo de indicador



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.2.8 Variáveis

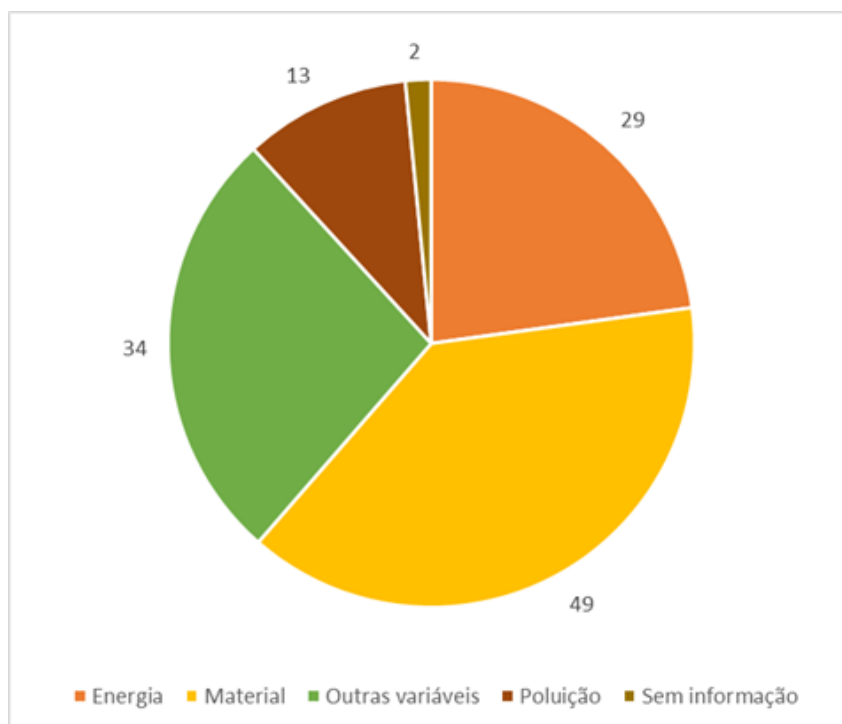
Material é a única variável que é analisada de forma unitária pelos sistemas de indicadores, sendo 11 sistemas (19%) focados nela. Da mesma forma, 7 sistemas de indicadores ou 12% do portfólio (CET, CG, CP, eDiM, PR-MCDT, PCM e RDI) utilizam outras variáveis. Já os 2 sistemas de indicadores CLC e IOBS (3%) não apresentam informação.

Considerando o conjunto de variáveis utilizadas, Energia, Material e Outras variáveis é a principal utilizada com 14 sistemas de indicadores (24%). As variáveis Energia e Material são usadas em conjunto por 6 sistemas de indicadores (10%). E os 5 sistemas C2C Indicators, CEMS, CMT, CE-PCF, SIAS (9%) utilizam todas as variáveis em destaque nesse trabalho, além de outras diversas. Para o conjunto de variáveis Material e Outras variáveis, também são 5 sistemas de indicadores (9%) que a usam. Os 4 sistemas, CBM-IS, CEBI, EEI e FPI (7% do portfólio) utilizam o conjunto de variáveis Energia, Material e Poluição. Os grupos de variáveis

que possuem menor utilização são: Material, Poluição e Outras variáveis com 3 sistemas de indicadores (5%) e Material e Poluição com apenas o sistema EER (2%).

De forma geral, a variável mais utilizada é Material (84% do portfólio). Esse resultado reforça a importância de a proposta metodológica orientar a seleção de variáveis considerando não apenas a disponibilidade de dados, mas também sua relevância estratégica para a circularidade. Outras variáveis são utilizadas por 59% do portfólio, seguida por Energia, utilizada por metade dos sistemas de indicadores. Poluição é utilizada por apenas 22% dos sistemas de indicadores, como é possível verificar na Figura 24.

Figura 24 – Variáveis utilizadas pelos sistemas de indicadores



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.3 Metodologia

A metodologia de cada sistema de indicadores é apresentada no Quadro 4.6, servindo de base para a consolidação da proposta metodológica que articula essas diferentes abordagens em um processo estruturado de seleção de indicadores, e detalhada nas seções a seguir.

Quadro 4.6 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pela sua metodologia

(continua)

#	Sistema	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem	Tipo de medição de acordo com definição e estratégias de EC
1	APL	Padronizada	ACV, Reutilização de material (C2C) e MCI	Análise de cenários - TOPSIS (MCDA)	Indireta
2	BWPE	Conjunto específico de indicadores	Outra	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
3	BCI	Padronizada	MCI	Contável	Direta sem estratégias específicas
4	C2C <i>Indicators</i>	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta sem estratégias específicas
5	Circ(T)	Conjunto específico de indicadores	MaTrace Global	Análise de cenários	Direta sem estratégias específicas
6	CBA	Padronizada	ACV, Avaliação Econômica do Ciclo de Vida (AECV) e Modelagem de Informação da Construção (BIM)	Análise de cenários	Direta sem estratégias específicas
7	CBM-IS	Conjunto específico de indicadores	BS 8001:2017	Testes empíricos e revisão da literatura, com base no <i>British Standards Institution</i> (BSI)	Direta com estratégias específicas
8	CEV	Conjunto específico de indicadores	AFM	Análise de cenários	Indireta
9	CEBI	Conjunto específico de indicadores	ACV, RCBR e Taxa de Benefícios de Reciclabilidade (RBR)	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas e Indireta
10	CEI	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
11	CEIP	Conjunto específico de indicadores	Outra	Questionário fechado, entrevistas semiestruturadas e CC	Direta sem estratégias específicas
12	CEMS	Conjunto específico de indicadores	Sem informação	Revisão de literatura e relatórios, base da escala Delphi	Direta com estratégias específicas

(continua)

#	Sistema	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem	Tipo de medição de acordo com definição e estratégias de EC
13	CPI	Conjunto específico de indicadores	ACV e Extração cumulativa de exergia do ambiente natural (CEENE)	Análise de cenários	Indireta
14	CET	Conjunto específico de indicadores	Outra	Sem informação	Direta sem estratégias específicas
15	CG	Conjunto específico de indicadores	AFM e Outra	Análise de cenários	Direta sem estratégias específicas
16	CP	Conjunto específico de indicadores	Outra	Comparação entre produtos ou modelos	Direta com estratégias específicas
17	CAM	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta sem estratégias específicas
18	CC	Conjunto específico de indicadores	AFM e Outra	Análise de cenários	Direta sem estratégias específicas
19	Check	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta sem estratégias específicas
20	CI	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
21	CMT	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
22	QC	Conjunto específico de indicadores	ACV	Contável	Indireta
23	CTI	Conjunto específico de indicadores	AFM	Contável	Direta sem estratégias específicas
24	CYT	Conjunto específico de indicadores	Sem informação	Contável	Sem informação
25	CLC	Conjunto específico de indicadores	Sem informação	Contável	Sem informação
26	eDIM	Conjunto específico de indicadores	<i>Maynard operation sequence technique (MOST)</i>	Contável	Indireta
27	EEl	Padronizada	ACV e AECV	Análise de cenários	Indireta
28	EER	Conjunto específico de indicadores	Outra	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas

(continua)

#	Sistema	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem	Tipo de medição de acordo com definição e estratégias de EC
29	BPI	Conjunto específico de indicadores	Outra	Entrevistas com especialistas, ponderação e normalização	Direta com estratégias específicas
30	EoL <i>Index</i>	Conjunto específico de indicadores	AHP	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
31	FPI	Conjunto específico de indicadores	ACV	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
32	EoLi	Conjunto específico de indicadores	3D <i>solid model</i>	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
33	CE-PCF	Conjunto específico de indicadores	<i>Qualitative flexible</i> (QUA-LIFLEX) e <i>Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje</i> (VIKOR)	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
34	ZWP	Conjunto específico de indicadores	Diretrizes do <i>Global Report Initiative</i> (GRI)	Contável	Direta com estratégias específicas
35	GRInd	Conjunto específico de indicadores	ACV	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
36	WCI	Conjunto específico de indicadores	Manufatura enxuta e MCI	Contável	Direta com estratégias específicas
37	IOBS	Conjunto específico de indicadores	Análise input-output	Contável	Sem informação
38	L&C	Conjunto específico de indicadores	RDI	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
39	MECI	Conjunto específico de indicadores	<i>Sustainability Profit</i> (SP)	Comparação entre produtos ou modelos	Direta sem estratégias específicas
40	MCI	Conjunto específico de indicadores	Dinâmica de sistemas	Contável	Direta sem estratégias específicas
41	MESCS	Conjunto específico de indicadores	Análise input-output	Conecta níveis do sistema	Direta com estratégias específicas
42	MIPS	Conjunto específico de indicadores	Análise input-output	Comparação entre produtos ou modelos	Indireta

(continua)

#	Sistema	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem	Tipo de medição de acordo com definição e estratégias de EC
43	MI	Conjunto específico de indicadores	AFM	Contável	Indireta
44	MCEM-PLCS	Padronizada	ACV, AECV e Outra	Análise de cenários	Indireta
45	MIS	Conjunto específico de indicadores	ACV	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
46	PCIP	Conjunto específico de indicadores	ACV e Análise input-output	Contável	Sem informação
47	PR-MCDT	Conjunto específico de indicadores	Outra	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
48	PRDI	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
49	PCM	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
50	PRP e <i>The ReNry® - module</i>	Conjunto específico de indicadores	Sem informação	Análise de cenários e Comparação entre produtos ou modelos	Sem informação
51	RIIs	Conjunto específico de indicadores	HSC Sim	Comparação entre produtos ou modelos	Direta com estratégias específicas
52	RDI	Conjunto específico de indicadores	AFM	Contável	Direta com estratégias específicas
53	REAPro	Conjunto específico de indicadores	ACV	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
54	RPI	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável	Direta com estratégias específicas
55	SIAS	Conjunto específico de indicadores	<i>Grey Decision Making</i> (GDM)	Contável	Direta com estratégias específicas
56	SPI	Conjunto específico de indicadores	<i>Linear Flow Index</i>	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
57	SCI	Padronizada	MCI, Diretrizes do GRI e ISO 14031	Contável	Direta com estratégias específicas

(conclusão)

#	Sistema	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem	Tipo de medição de acordo com definição e estratégias de EC
58	SICED	Padronizada	ACV, AFM, AECV, BS 8001:2017 e Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV)	Análise de cenários	Direta com estratégias específicas
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> BPI: <i>End of Life Best Practice Indicators</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> CAM: <i>Circularity Assessment Model</i> CBA: <i>Circular Building Assessment Prototype</i> CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> CC: <i>Circularity Calculator</i> CEBI: <i>Circular Economy Benefit Indicators</i> CEI: <i>Circular Economy Index</i> CEIP: <i>Circular Economy Indicator Prototype</i> CEMS: <i>Circular Economy Measurement Scale</i> CE-PCF: <i>Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms</i> CET: <i>Circular Economy Toolkit</i> CEV: <i>Circular Economy Value</i> CG: <i>Circular Gap</i> Check: <i>Circularity Check</i> MI: <i>Mine site MFA Indicator</i>					
CLC: <i>Closed Loop Calculator</i> CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i> CP: <i>Circular Pathfinder</i> CPI: <i>Circular Economy Performance Indicator</i> CTT: <i>Circular Transition Indicators</i> CYT: <i>Circulytics</i> eDiM: <i>Ease of Disassembly Metric</i> EEI: <i>Economic-Environmental Indicators</i> EER: <i>Economic-Environmental Remanufacturing</i> EoLi: <i>End of Life Indices</i> FPI: <i>Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators</i> GRInd: <i>Global Resource Indicator</i> IOBS: <i>Input-Output Balance Sheet</i> L&C: <i>Longevity and Circularity</i> CI: <i>Circularity Index</i> PR-MCDT: <i>Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool</i> SICED: <i>Systems Indicators for Circular Economy Dashboard</i> MESCS: <i>Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets</i> MCEM-PLCS: <i>Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies</i>					
MIPS: <i>Material Input Per Service Delivered</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> PCIP: <i>Product Circularity Improvement Program</i> PCM: <i>Product-Level Circularity Metric</i> PRDI: <i>Product Recycling Desirability Index</i> MCI: <i>Material Circularity Indicator</i> PRP: <i>Circular e-Procurement Tool</i> QC: <i>Circularity of Material Quality</i> RDI: <i>Resource Duration Indicator</i> REAPro: <i>Resource Efficiency Assessment of Products</i> RIs: <i>Recycling Indices for the Circular Economy</i> RPI: <i>Reuse Potential Indicator</i> SCI: <i>Sustainable Circular Index</i> SIAS: <i>Set of Indicators to Assess Sustainability</i> MECI: <i>Material and Energy Circularity Indicators</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i> ZWP: <i>Expended Zero Waste Practice Model</i>					

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.3.1 *Metodologia baseada em índices*

A metodologia baseada em índice está dividida em 2 categorias, padronizada e conjunto específico de indicadores. Sendo que, 7 sistemas de indicadores (12%) possuem a metodologia baseada por índices padronizados. O restante dos sistemas de indicadores (88%) possui um conjunto específico de indicadores.

4.3.3.2 *Metodologia de avaliação*

A conexão com uma metodologia conhecida indica se o sistema de indicadores utiliza como base alguma metodologia já estabelecida e difundida na academia e na área empresarial. A metodologia não precisa ser aplicada na sua totalidade pelo sistema de indicadores, mas deve existir alguma ligação.

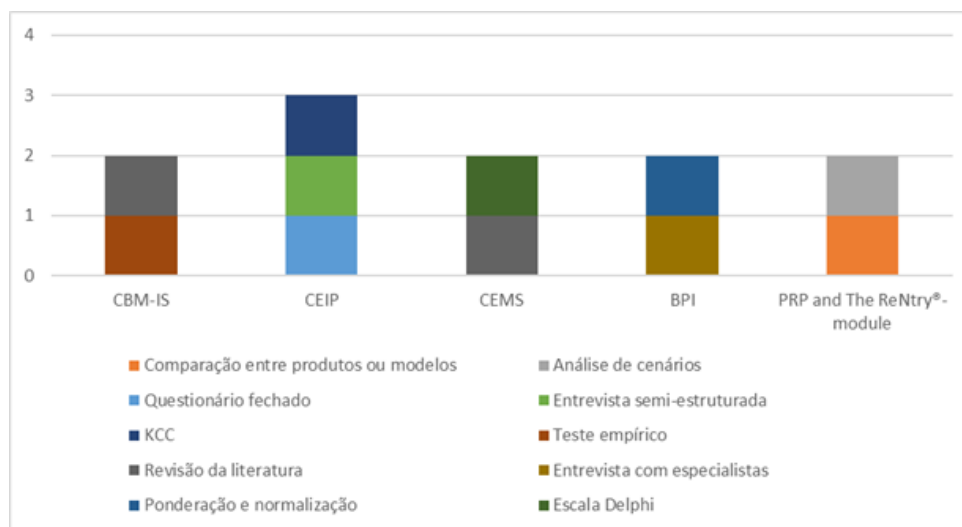
Os 4 sistemas de indicadores CEMS, CYT, CLC e PRP e The ReNtry®-module, correspondendo a 7% de todos os sistemas de indicadores, não possuem informações. Vinte e quatro sistemas de indicadores (41%) se baseiam em metodologias já difundidas. Das metodologias já conhecidas, a ACV e suas derivações (AECV e ASCV) são as mais utilizadas, usadas por 13 sistemas de indicadores (22%). Além da ACV, a AFM também é comumente utilizada, correspondendo a 12% ou 7 sistemas. Outras metodologias utilizadas por mais de um sistema de indicadores são BS 8001:2017 (CBM-IS e SICED), diretrizes do GRI (ZWP e SCI), Análise input-output (IOBS, MESCS, MIPS e PCIP). Já onze sistemas de indicadores (19%) apresentam diferentes metodologias, muitas desenvolvidas especificamente para o sistema.

É importante notar que a maioria das conexões apresentadas como outras (33%) são de sistemas de indicadores empresariais, o que evidencia a necessidade de uma proposta metodológica que equilibre a flexibilidade prática com a robustez acadêmica. No entanto, o sistema MCI é empresarial, porém foi apresentado seu processo e a academia o aceitou. Portanto, mesmo com poucos anos de existência (foi criado em 2015), está sendo consolidado e já é utilizado em outros quatro sistemas de indicadores do portfólio desta pesquisa, APL, BCI, WCI e SCI.

4.3.3.3 *Abordagem de modelagem*

Dos cinquenta e oito sistemas de indicadores, apenas cinco (9%) possuem mais de uma abordagem de modelagem (Figura 25).

Figura 25 – Sistemas de indicadores com mais de uma abordagem de modelagem



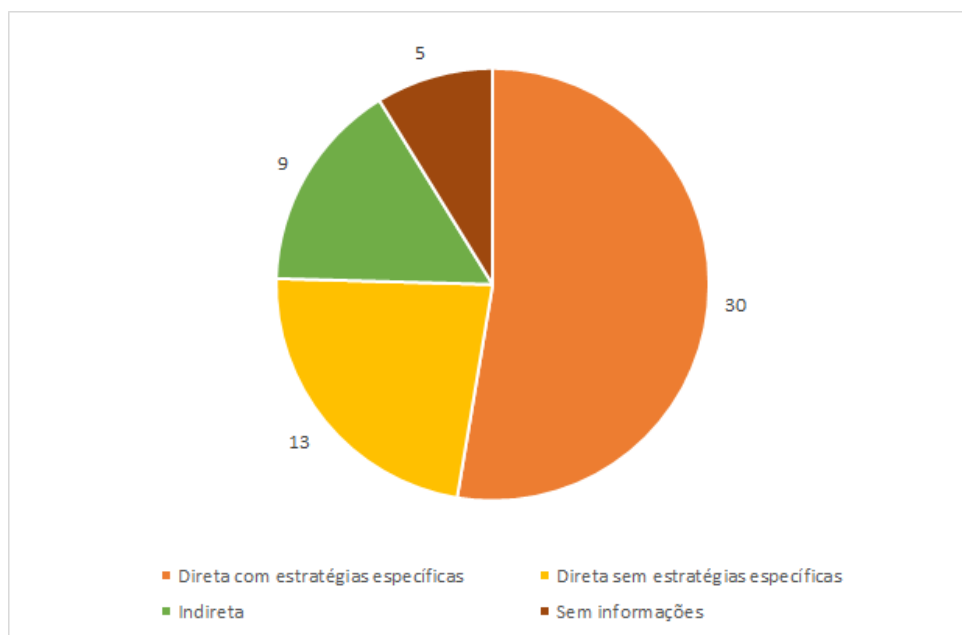
Fonte: Elaborada pela autora

Apenas um sistema (2%), MESCS, possui a abordagem de conectar níveis do sistema. Já os 4 sistemas de indicadores (7%) CP, MECI, MIPS e RIs abordam a comparação entre produtos ou modelos. Vinte e quatro sistemas de indicadores (41%) são contáveis e vinte e três sistemas de indicadores (40%) abordam análise de cenários. E o sistema CET (2%) não possui informações.

4.3.3.4 Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC

Cinco sistemas de indicadores (9%) - CYT, CLC, IOBS, PCIP e PRP e The ReNtry®-module - não apresentam informações. O sistema CEBI (2%) é o único que mede economia circular de forma indireta e direta com estratégias específicas. Retirando o sistema de indicadores CEBI, a Figura 26 mostra que 43 sistemas de indicadores (74%) medem diretamente a EC e apenas 16% dos sistemas de indicadores medem de forma indireta.

Figura 26 – Sistemas de indicadores segundo definição e estratégias de EC



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.4 Sustentabilidade

A sustentabilidade pode ser dividida em duas categorias principais, que orientam a organização dos sistemas analisados e fundamentam a proposta metodológica de seleção de indicadores: (1) os três pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental; e (2) os ODS. Além das duas categorias, foi analisada a abordagem sobre governança nas empresas, estendendo a sustentabilidade ao ESG. A abordagem em sustentabilidade de cada sistema de indicadores é apresentada no Quadro 4.7 e detalhada nas seções a seguir.

Quadro 4.7 – Sistemas de indicadores de circularidade apresentados pela abordagem de sustentabilidade

(continua)

#	Sistema	Pilar da sustentabilidade	Extensão ao ESG - Governança	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC
1	APL	Ambiental	Não	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água
2	BWPE	Ambiental e Econômico	Não	ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
3	BCI	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
4	C2C Indicators	Ambiental e Social	Sim	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água, ODS 15: Vida sobre a terra
5	Circ(T)	Ambiental	Não	ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
6	CBA	Ambiental e Econômico	Não	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
7	CBM-IS	Ambiental, Econômico e Social	Sim	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
8	CEV	Ambiental	Não	ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 12: consumo e produção responsáveis
9	CEBI	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
10	CEI	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
11	CEIP	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
12	CEMS	Ambiental	Sim	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
13	CPI	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
14	CET	Ambiental e Econômico	Não	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 12: consumo e produção responsáveis
15	CG	Ambiental e Econômico	Sim	Sem informação

(continua)

#	Sistema	Pilar da sustentabilidade	Extensão ao ESG - Governança	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC
16	CP	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 12: consumo e produção responsáveis
17	CAM	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 12: consumo e produção responsáveis
18	CC	Ambiental e Econômico	Sem informação	ODS 12: consumo e produção responsáveis
19	Check	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida abaixo d'água
20	CI	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
21	CMT	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 13: Combate às alterações climáticas, ODS 15: Vida sobre a terra, ODS 17: Parceria em prol das metas
22	QC	Ambiental	Não	Nenhum
23	CTI	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 12: consumo e produção responsáveis
24	CYT	Ambiental e Econômico	Sim	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 12: consumo e produção responsáveis
25	CLC	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
26	eDIM	Ambiental e Econômico	Não	Nenhum
27	EEl	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
28	EER	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
29	BPI	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
30	EoL Index	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
31	FPI	Ambiental	Não	ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 12: consumo e produção responsáveis
32	EoLi	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
33	CE-PCF	Ambiental	Sim	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 12: consumo e produção responsáveis
34	ZWP	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 13: Combate às alterações climáticas, ODS 15: Vida sobre a terra

(continua)

#	Sistema	Pilar da sustentabilidade	Extensão ao ESG - Governança	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC
35	GRInd	Ambiental e Social	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
36	WCI	Ambiental e Econômico	Não	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
37	IOBS	Ambiental e Econômico	Sem informação	Sem informação
38	L&C	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
39	MECI	Ambiental	Não	ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
40	MCI	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
41	MESCS	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
42	MIPS	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
43	MI	Ambiental e Econômico	Não	Nenhum
44	MCEM-PLCS	Ambiental, Econômico e Social	Sim	ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
45	MIS	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
46	PCIP	Ambiental e Econômico	Sem informação	Sem informação
47	PR-MCDT	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
48	PRDI	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
49	PCM	Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
50	PRP e <i>The ReNtry®-module</i>	Ambiental	Sem informação	Sem informação
51	RIIs	Ambiental	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
52	RDI	Ambiental	Não	ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
53	REAPro	Ambiental	Não	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água, ODS 15: Vida sobre a terra
54	RPI	Ambiental e Econômico	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis
55	SIAS	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 12: consumo e produção responsáveis

(conclusão)

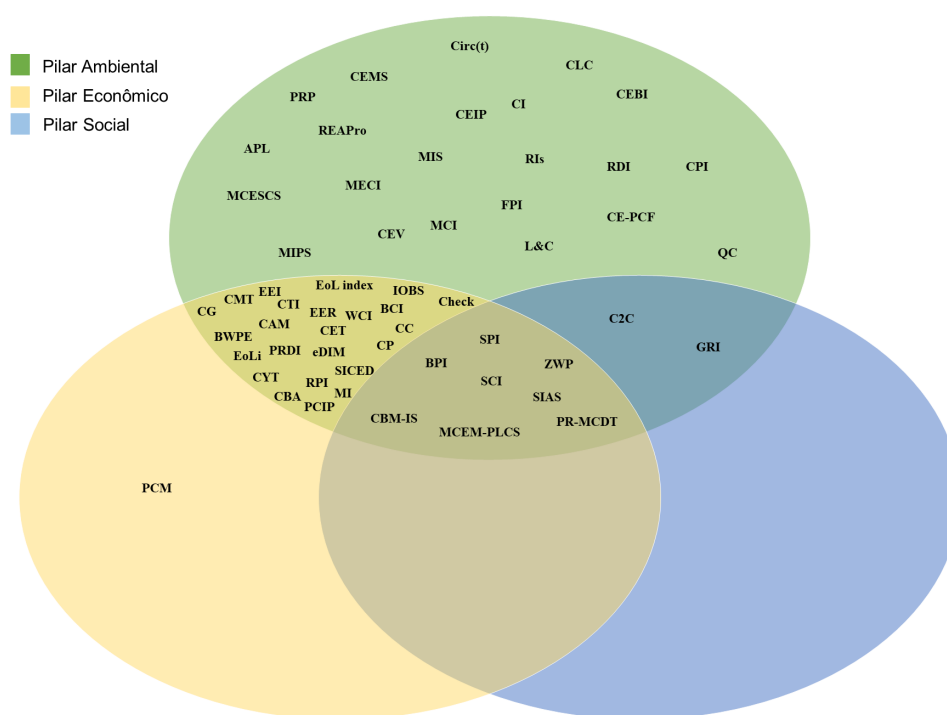
#	Sistema	Pilar da sustentabilidade	Extensão ao ESG - Governança	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC
56	SPI	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
57	SCI	Ambiental, Econômico e Social	Não	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
58	SICED	Ambiental e Econômico	Não	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
APL: Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level				
BCI: Building Circularity Indicators				
BPI: End of Life Best Practice Indicators				
Check: Circularity Check				
C2C Indicators: Cradle-to-Cradle Indicators				
CAM: Circularity Assessment Model				
CBA: Circular Building Assessment Prototype				
CLC: Closed Loop Calculator				
CC: Circularity Calculator				
CEBI: Circular Economy Benefit Indicators				
CEI: Circular Economy Index				
CEIP: Circular Economy Indicator Prototype				
CEMS: Circular Economy Measurement Scale				
MIPS: Material Input Per Service Delivered				
CET: Circular Economy Toolkit				
CEV: Circular Economy Value				
CG: Circular Gap				
MI: Mine site MFA Indicator				
MCEM-PLCS: Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies				
CBM-IS: Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability				
CMT: Circularity Measurement Toolkit				
CP: Circular Pathfinder				
CPI: Circular Economy Performance Indicator				
CTI: Circular Transition Indicators				
CYT: Circulytics				
eDiM: Ease of Disassembly Metric				
EEI: Economic-Environmental Indicators				
EER: Economic-Environmental Remanufacturing				
EoLi: End of Life Indices				
FPI: Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators				
GRInd: Global Resource Indicator				
IOBS: Input-Output Balance Sheet				
L&C: Longevity and Circularity				
CI: Circularity Index				
PR-MCDT: Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool				
SICED: Systems Indicators for Circular Economy Dashboard				
MESCS: Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets				
CE-PCF: Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms				
BWPE: BIM-based Whole-life Performance Estimator				
MIS: Multidimensional Indicator Set				
PCIP: Product Circularity Improvement Program				
PCM: Product-Level Circularity Metric				
PRDI: Product Recycling Desirability Index				
MCI: Material Circularity Indicator				
PRP: Circular e-Procurement Tool				
QC: Circularity of Material Quality				
RDI: Resource Duration Indicator				
REAPro: Resource Efficiency Assessment of Products				
RIs: Recycling Indices for the Circular Economy				
RPI: Reuse Potential Indicator				
SCI: Sustainable Circular Index				
SIAS: Set of Indicators to Assess Sustainability				
MECI: Material and Energy Circularity Indicators				
SPI: Sustainability Performance Indicators				
WCI: Improved Water Circularity Index				
ZWP: Expended Zero Waste Practice Model				

Fonte: Elaborada pela autora

4.3.4.1 Pilar da sustentabilidade

Os sistemas analisados apresentam diferentes relações com os pilares da sustentabilidade. A Figura 27 mostra como cada sistema de indicadores está conectado a pilares específicos. Aproximadamente 59% do portfólio (34 sistemas de indicadores) apresentam resultados vinculados a mais de um pilar, o que reforça a relevância de a proposta metodológica apoiar a escolha de indicadores que dialoguem com múltiplas dimensões da sustentabilidade. Os restantes 24 sistemas de indicadores (cerca de 39%) visam avaliar a circularidade à luz de uma única dimensão da sustentabilidade.

Figura 27 – Distribuição dos sistemas por pilares de sustentabilidade



Fonte: Elaborada pela autora

O maior conjunto de sistemas de indicadores avaliados, composto por 23 sistemas (40% do portfólio), fornece informações apenas sobre os aspectos ambientais dos sistemas circulares. Um sistema, que representa menos de 2% do portfólio, realizou avaliações de circularidade estritamente vinculadas ao pilar econômico. Nenhum sistema de indicadores de circularidade mostrou foco exclusivo nos impactos sociais da EC.

Um total de 24 sistemas de indicadores (41%) teve vínculo simultâneo com os pilares econômico e ambiental. Apenas dois sistemas (4%) tiveram como objetivo avaliar os aspectos ambientais e sociais ligados à circularidade ao mesmo tempo. Os oito sistemas de indicadores restantes (14%) visavam fazer uma avaliação da circularidade pautada pelo modelo de *triple bottom line* e abrangiam todos os pilares da sustentabilidade em suas metodologias.

Quando somados, o pilar ambiental é o que mais chama a atenção de acadêmicos e organizações, estando presente em 57 dos sistemas de indicadores analisados (98%). O pilar

econômico segue em segundo lugar, tendo sido avaliado por 33 sistemas de indicadores (57%). A dimensão social, embora considerada apenas em combinação com os outros pilares, é evidenciada em 10 sistemas de indicadores de circularidade (17%).

4.3.4.2 *Estendido a ESG - Governança*

Nesta subseção, apresentamos os resultados dos sistemas de indicadores com algum item relacionado com a estrutura e os processos de tomada de decisão, responsabilidade, controle e comportamento no topo de uma entidade. Quatro sistemas de indicadores (7%), CC, IOBS, PCIP e PRP e The ReNtry®-module, não possuem informação. Apenas 13 sistemas (22%) se estendem ao ESG na forma de verificar governança, evidenciando uma lacuna que deve ser considerada na proposta metodológica para garantir alinhamento entre práticas de circularidade e estruturas de governança corporativa. Os 41 sistemas de indicadores restantes (71%) não se estendem a ESG.

4.3.4.3 *ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC*

Dez dos dezessete ODSs são abordados diretamente pelos sistemas de indicadores do portfólio. O maior conjunto de sistemas de indicadores do portfólio, composto por 25 sistemas (43%), aborda o ODS 12 – Produção e consumo responsáveis. Esse predomínio sinaliza a necessidade de a proposta metodológica considerar a integração com os ODS mais recorrentes, ao mesmo tempo em que oferece suporte à inclusão de dimensões pouco exploradas, como ODS 13 e ODS 17. Apenas um sistema, CMT, o que corresponde a menos de 2% do portfólio, aborda o ODS 13 - Combate às alterações climáticas, e o ODS 17 - Parcerias em prol das metas. Esses ODS aparecem essa única vez no portfólio. Ademais, três sistemas de indicadores (5%), QC, eDiM e MI, não abordam nenhum ODS diretamente. E 4 sistemas de indicadores (7% do portfólio), CG, IOBS, PCIP e PRP e The ReNtry®-module, não possuem informações para extração desses resultados.

Se somado, o ODS 12 é o mais abordado pelos sistemas de indicadores, presente em 51 sistemas do portfólio (88%). Depois os sistemas de indicadores se dissipam entre os diversos ODSs. O ODS 6 - Água limpa e saneamento, e o ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura são abordados por 13 sistemas de indicadores (22%). O ODS 7 - Energia acessível e limpa é abordado por 12 sistemas (21%). O ODS 15 - Vida sobre a terra está vinculado a nove sistemas de indicadores do portfólio (16%). O ODS 3 - Boa saúde e bem-estar, e o ODS 8 - Emprego digno e crescimento econômico são contemplados por 7 sistemas de indicadores (12%) O ODS 14 - Vida debaixo d'água foi abordado por 4 sistemas (7%).

4.3.5 Elementos da EC

A análise de cada sistema de indicadores para os elementos da EC é apresentada no Quadro 4.8, servindo de insumo para a consolidação da proposta metodológica, que organiza os indicadores segundo esses elementos para apoiar a seleção pelas empresas.

Quadro 4.8 – Sistemas de indicadores de circularidade caracterizados pelos elementos da EC

(continua)

#	Sistema	Nível sistémico	Estágio de ciclo de vida	Tipo de ciclo	Desempenho	Múltiplos ciclos de vida	Princípios
1	APL	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
2	BWPE	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
3	BCI	Nano	Produzir, Usar e Recuperar	Técnico e Biológico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 3. Promover a eficácia do sistema
4	C2C <i>Indicators</i>	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Intrínseco e Impacto	Sim	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
5	Circ(T)	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco e Impacto	Sim	2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
6	CBA	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Intrínseco e Impacto	Sim	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
7	CBM-IS	Micro e Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
8	CEV	Nano	Produzir e Usar	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
9	CEBI	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Sim	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
10	CEI	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
11	CEIP	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
12	CEMS	Micro	Produzir e Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
13	CPI	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos

(continua)

#	Sistema	Nível sistêmico	Estágio de ciclo de vida	Tipo de ciclo	Desempenho	Múltiplos ciclos de vida	Princípios
14	CET	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Sem informação	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
15	CG	Micro e Nano	Ciclo de vida completo	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sem informação
16	CP	Micro	Produzir	Técnico e Biológico	Intrínseco	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
17	CAM	Micro	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
18	CC	Nano	Produzir e Recuperar	Sem informação	Intrínseco	Sem informação	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos e
19	Check	Micro e Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
20	CI	Nano	Produzir, Usar e Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	Nenhum
21	CMT	Micro	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
22	QC	Nano	Extraí, Produzir e Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
23	CTI	Micro	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Intrínseco e Impacto	Sem informação	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
24	CYT	Micro	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Sem informação	Sem informação	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
25	CLC	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco	Sem informação	2. Otimizar o rendimento dos recursos
26	eDIM	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
27	EEl	Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema

(continua)

#	Sistema	Nível sistêmico	Estágio de ciclo de vida	Tipo de ciclo	Desempenho	Múltiplos ciclos de vida	Princípios
42	MIPS	Micro e Nano	Ciclo de vida completo	Técnico	Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
43	MI	Micro	Ciclo de vida completo	Técnico	Impacto	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
44	MCEM-PLCS	Nano	Recuperar	Técnico	Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
45	MIS	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
46	PCIP	Nano	Produzir, Usar e Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Sem informação	1. Preservar e restaurar o capital natural
47	PR-MCDT	Nano	Recuperar	Técnico	Impacto	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
48	PRDI	Nano	Recuperar	Técnico	Impacto	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
49	PCM	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
50	PRP e <i>The ReNtry@-module</i>	Nano	Ciclo de vida completo	Sem informação	Intrínseco e Impacto	Sem informação	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
51	RIIs	Nano	Produzir e Recuperar	Técnico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
52	RDI	Nano	Usar e Recuperar	Técnico	Impacto	Sim	2. Otimizar o rendimento dos recursos
53	REAPPro	Nano	Recuperar	Técnico	Impacto e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
54	RPI	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos
55	SIAS	Micro	Recuperar	Técnico	Impacto	Não	2. Otimizar o rendimento dos recursos 3. Promover a eficácia do sistema

(conclusão)

#	Sistema	Nível sistêmico	Estágio de ciclo de vida	Tipo de ciclo	Desempenho	Múltiplos ciclos de vida	Princípios
56	SPI	Nano	Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos
57	SCI	Micro	Produzir, Usar e Recuperar	Técnico	Intrínseco	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural e 2. Otimizar o rendimento dos recursos 3. Promover a eficácia do sistema
58	SICED	Micro e Nano	Ciclo de vida completo	Técnico e Biológico	Intrínseco e Impacto	Não	1. Preservar e restaurar o capital natural, 2. Otimizar o rendimento dos recursos e 3. Promover a eficácia do sistema
APL: Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level							
BCI: Building Circularity Indicators							
BPI: End of Life Best Practice Indicators							
BWPE: BIM-based Whole-life Performance Estimator							
C2C Indicators: Cradle-to-Cradle Indicators							
CAM: Circularity Assessment Model							
CBA: Circular Building Assessment Prototype							
CBM-IS: Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability							
CC: Circularity Calculator							
CEBI: Circular Economy Benefit Indicators							
CEI: Circular Economy Index							
CEIP: Circular Economy Indicator Prototype							
CEMS: Circular Economy Measurement Scale							
CE-PCF: Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms							
CET: Circular Economy Toolkit							
CEV: Circular Economy Value							
CG: Circular Gap							
Check: Circularity Check							
MI: Mine site MEA Indicator							

MIPS: Material Input Per Service Delivered

MIS: Multidimensional Indicator Set

PCIP: Product Circularity Improvement Program

PCM: Product-Level Circularity Metric

PRDI: Product Recycling Desirability Index

MCI: Material Circularity Indicator

PRP: Circular e-Procurement Tool

QC: Circularity of Material Quality

RDI: Resource Duration Indicator

REAPro: Resource Efficiency Assessment of Products

RI: Recycling Indices for the Circular Economy

RPI: Reuse Potential Indicator

SCI: Sustainable Circular Index

SIAS: Set of Indicators to Assess Sustainability

MECI: Material and Energy Circularity Indicators

SPI: Sustainability Performance Indicators

WCI: Improved Water Circularity Index

ZWP: Expanded Zero Waste Practice Model

Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.5.1 *Nível sistêmico*

De acordo com os resultados mostrados Quadro 4.8, a maioria dos sistemas de indicadores que se enquadram nos critérios de pesquisa aplicados nesta revisão foram desenvolvidos para avaliar a circularidade no nível do produto. Dos sistemas de indicadores incluídos no portfólio, 66% são direcionados para fluxos de energia e materiais dentro do nível nano de circularidade (38 sistemas), o que mostra a predominância de análises no nível do produto e reforça a importância de a proposta metodológica orientar a escolha do nível adequado de análise segundo o contexto empresarial. Sistemas de indicadores de nível micro (ou seja, circularidade no nível da empresa) representaram 24% das métricas analisadas (14 sistemas). Um terceiro grupo constituído de sistemas de indicadores que podem ser usados para avaliar a circularidade de nível nano e micro foi estabelecido e é responsável por 5 sistemas de indicadores (10%). Para mais informações sobre os sistemas analisados e um resumo que auxilie na identificação do nível de circularidade almejado de cada sistema de indicadores deve-se consultar o Apêndice A.

4.3.5.2 *Estágio de ciclo de vida*

Os sistemas de indicadores de nível nano e micro explorados foram analisados de acordo com as etapas do ciclo de vida que cobrem. A Figura 28 mostra a distribuição dos sistemas de indicadores por estágio do ciclo de vida.

Figura 28 – Distribuição dos sistemas de indicadores por níveis e ciclo de vida

	Extrair	Produzir	Usar	Recuperar
Nano	GRI			
	BWPE			
	CBA			
	CEIP			
	C2C			
	CET			
	EEl			
	CLC			
	IOBS			
	APL			
	FPI			
	Cire(T)			
	PRP			
		PCIP		
		CI		
		BCI		
	QC			QC
		EoL Index		EoL Index
		CC		CC
		RI's		RI's
		CEV		
			L&C	
			RDI	
				PR-MCDT
				MCEM-PLCS
				REAPro
				CEI
				EoLi
				CPI
				CEBI
				BPI
				PCM
				SPI
Nano e Micro	CG			
	Check			
	MCI			
	SICED			
	MIPS			
	CBM-IS			
Micro	CYT			
	CMT			
	CAM			
	MI			
	CE-PCF			
	CTI			
		SCI		
		ZWP		
	MECI			MECI
		CEMS		CEMS
		MESCS		
		CP		
				SIAS
				WCI

Fonte: Elaborada pela autora

Dos 58 sistemas de indicadores, 25 (43%) abrangem todas as fases em seus escopos (aqui referidos como “Ciclo de vida completo”). A maioria dos sistemas de indicadores equipados para fornecer avaliações completas do ciclo de vida (13 sistemas, 22%) visa a circularidade no nível do produto. Apenas 6 sistemas (10%) enfocam empresas. Os 6 sistemas de indicadores restantes (10%) conectados a esse grupo podem ser usados para examinar os níveis nano e micro. A fase do ciclo de vida “Extrair” é a menos avaliada pelos sistemas de indicadores incluídos no portfólio investigado. Apenas dois sistemas de indicadores (3%), um de cada nível de circularidade, atendem parcialmente a essa etapa. Todos os outros sistemas de indicadores que cobrem o estágio “Extrair” são métodos mais holísticos agrupados em “Ciclo de vida completo”.

Um grupo de 12 sistemas de indicadores tem como alvo os processos de manufatura e o *design* do produto (estágio do ciclo de vida “Produzir”) junto com outros estágios do ciclo de vida (21%). Apenas 3% do portfólio total (2 sistemas de indicadores) estão exclusivamente relacionados ao estágio “Produzir” e enfocam a avaliação da circularidade no nível da empresa. Nenhum sistema de nível nano abordou exclusivamente o estágio “Produzir”.

O estágio de “Usar” é considerado diretamente em 8 sistemas de indicadores (14%), entre os quais apenas 2 são orientados para o nível micro da circularidade. Todos os outros 6 sistemas de indicadores foram desenvolvidos para avaliar o estágio de “Usar” de um produto junto com outros estágios do ciclo de vida.

A fase “Recuperar”, principal característica dos sistemas circulares relacionados com circuitos fechados e recirculação de recursos, foi a fase mais abordada pelos sistemas revistos, dos quais 17 são estritamente dedicados a estratégias de recuperação de energia ou material (15 nano, 2 micro), contabilísticos para 29% do total. Se forem considerados os sistemas de indicadores que tratam de outras fases do ciclo de vida combinadas com estratégias de recuperação, 30 sistemas de indicadores (52%) podem estar vinculados a esta fase (excluindo os sistemas do “Ciclo de vida completo”).

4.3.5.3 *Tipo de ciclo*

O ciclo técnico foi o mais abordado pelos sistemas de indicadores, sendo que 43 sistemas (74%) abordam apenas o ciclo técnico e 11 sistemas de indicadores (19%) analisam os ciclos técnico e biológico. Apenas o sistema de indicadores WCI (2%) analisa apenas o ciclo biológico. Os sistemas de indicadores CG, CC e PRP e The ReNtry®-module (5%) não possuem informação.

4.3.5.4 *Desempenho*

A análise de desempenho intrínseco é considerada em 45 sistemas de indicadores, sendo que 25 sistemas (43%) analisam apenas o desempenho intrínseco e o restante (34%) analisa o desempenho intrínseco e impacto. A verificação apenas do impacto fica restrito a 10

sistemas de indicadores (17%). Os sistemas de indicadores CET, CG, CYT (5%) não possuem informações.

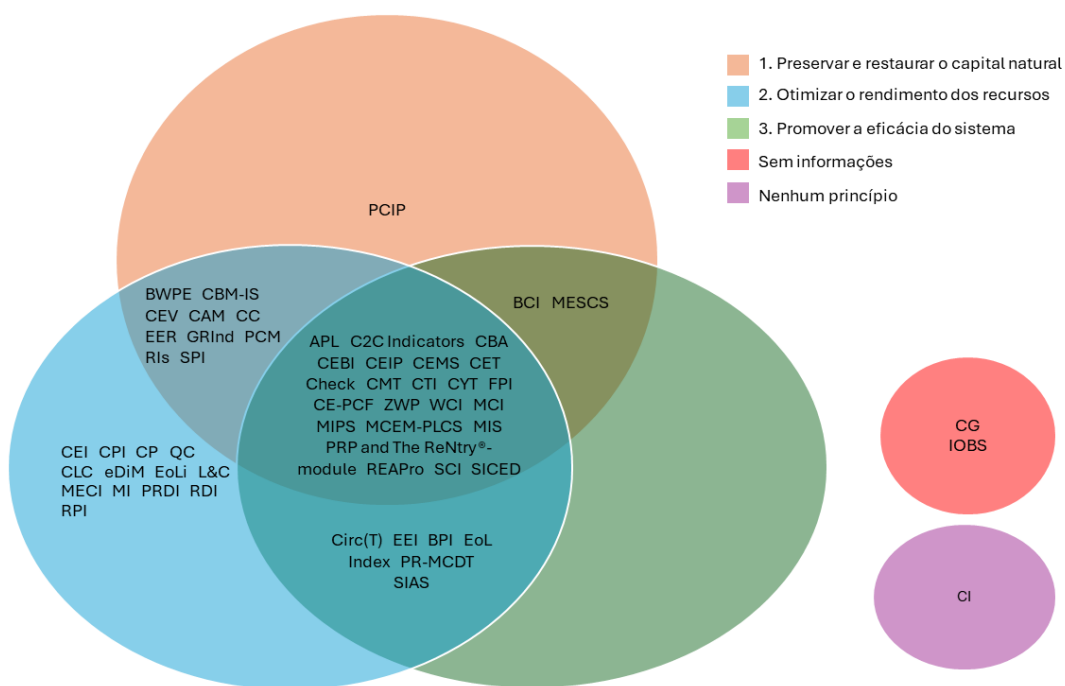
4.3.5.5 Múltiplos ciclos de vida

A questão dessa categoria é se os sistemas de indicadores consideram a segunda ou mais vidas úteis do produto. A maioria dos sistemas, 45 ou 78%, não considera múltiplos ciclos de vida. Apenas 6 sistemas de indicadores (10%) consideram mais vidas úteis e 7 sistemas (12%) não possuem informações sobre essa categoria.

4.3.5.6 Princípios

Dos três princípios da EC levantados pela pesquisa, o segundo princípio, Otimizar o rendimento dos recursos, é o mais considerado pelos sistemas de indicadores. A Figura 29 apresenta os sistemas de indicadores distribuídos por princípios analisados.

Figura 29 – Distribuição dos sistemas de indicadores por princípios da economia circular



Fonte: Elaborada pela autora

São 52 sistemas de indicadores (90%) voltados para o segundo princípio, em que 13 sistemas (22%) consideram apenas esse princípio. O primeiro princípio, Preservar e restaurar o capital natural, é analisado por 36 sistemas de indicadores (62%). Um sistema (2%) considera apenas o primeiro princípio. Nenhum sistema de indicadores analisa apenas o terceiro princípio, Promover a eficácia do sistema. Apenas CI não analisa nenhum princípio e os sistemas de indicadores CG e IOBS não possuem informações.

A maioria dos sistemas de indicadores considera mais de um princípio. São 10 sistemas de indicadores (17%) que avaliam o primeiro e segundo princípio em conjunto, 2 sistemas de indicadores (3%) que consideram o primeiro e terceiro princípio como um todo, 6 sistemas de indicadores (10%) que examinam os princípios segundo e terceiro. Pode-se considerar que 23 sistemas de indicadores (40%) analisam de forma completa a EC por meio de seus três princípios. Esse resultado fundamenta a proposta metodológica, que busca apoiar a seleção de indicadores considerando o equilíbrio entre princípios isolados e abordagens integradas.

4.3.6 Estratégias da EC

A análise de cada sistema de indicadores para as estratégias da EC é apresentada no Quadro 4.9, fornecendo subsídios para a proposta metodológica de seleção de indicadores, que considera as diferentes estratégias possíveis.

Quadro 4.9 – Sistemas de indicadores de circularidade caracterizados pelas estratégias da EC

(continua)

#	Sistema	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Estender a vida útil de produtos e suas peças	Aplicação útil de materiais	Modelo de negócios	Reinventar o paradigma	Ciclo cruzado e colaboração entre setores
1	APL	Reduzir	Durabilidade, Consumo e Reusar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
2	BWPE	Redesign	Reusar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
3	BCI	Reduzir	Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
4	C2C Indicators	Redesign e Reduzir	Durabilidade, Atualizar, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Inovação e investimento e Trocar	Cooperação
5	Circ(T)	Nenhuma	Reusar e Remanufatura	Reciclar	Sim	Trocar	Cooperação
6	CBA	Reduzir	Durabilidade, Reusar, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Trocar	Cooperação
7	CBM-IS	Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Inovação e investimento e Trocar	Cooperação
8	CEV	Reduzir	Nenhuma	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum
9	CEBI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar e Recuperar	Não	Nenhum	Nenhum
10	CEI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
11	CEIP	Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Trocar	Cooperação
12	CEMS	Redesign e Reduzir	Reusar e Reparar e manutenção	Reciclar	Sim	Trocar	Cooperação
13	CPI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar e Recuperar	Não	Nenhum	Nenhum
14	CET	Redesign e Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Cooperação
15	CG	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sim	Sem informação	Sem informação
16	CP	Nenhuma	Durabilidade, Atualizar, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar e Recuperar	Sim	Nenhum	Nenhum
17	CAM	Nenhuma	Durabilidade e Recondicionar	Reciclar	Sim	Inovação e investimento e Trocar	Nenhum

(continua)

#	Sistema	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Estender a vida útil de produtos e suas peças	Aplicação útil de materiais	Modelo de negócios	Reinventar o paradigma	Ciclo cruzado e colaboração entre setores
18	CC	Nenhuma	Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sem informação	Sem informação	Sem informação
19	Check	Reduzir	Durabilidade, Atualizar, Consumos, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Trocar	Cooperação
20	CI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
21	CMT	Redesign e Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Inovação e investimento e Trocar	Cooperação
22	QC	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
23	CTI	Nenhuma	Durabilidade, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Nenhum	Cooperação
24	CYT	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sim	Inovação e investimento	Cooperação
25	CLC	Nenhuma	Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Sem informação	Sem informação
26	eDIM	Nenhuma	Reusar, Reparar e manutenção e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
27	EEl	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum
28	EER	Nenhuma	Recondicionar e Remanufaturar	Nenhuma	Não	Nenhum	Nenhum
29	BPI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Inovação e investimento	Nenhum
30	EoL Index	Nenhuma	Remanufaturar	Reciclar	Não	Inovação e investimento	Nenhum
31	FPI	Nenhuma	Reusar	Reciclar e Recuperar	Não	Nenhum	Nenhum
32	EoLi	Nenhuma	Reusar e Remanufaturar	Reciclar e Recuperar	Não	Nenhum	Nenhum
33	CE-PCF	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Sim	Nenhum	Nenhum
34	ZWP	Redesign e Reduzir	Reusar e Remanufaturar	Reciclar e Recuperar	Sim	Trocar	Nenhum
35	GRInd	Redesign	Nenhuma	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum
36	WCI	Redesign	Reusar	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum
37	IOBS	Nenhuma	Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Sem informação	Sem informação

(continua)

#	Sistema	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Estender a vida útil de produtos e suas peças	Aplicação útil de materiais	Modelo de negócios	Reinventar o paradigma	Ciclo cruzado e colaboração entre setores
38	L&C	Nenhuma	Recondicionar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
39	MECI	Nenhuma	Reusar	Nenhuma	Não	Inovação e investimento e Trocar	Nenhum
40	MCI	Nenhuma	Durabilidade, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Sem informação	Cooperação
41	MESCS	Reduzir	Nenhuma	Nenhuma	Não	Trocar	Cooperação
42	MIPS	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Inovação e investimento	Cooperação
43	MI	Redesign	Nenhuma	Nenhuma	Não	Nenhum	Nenhum
44	MCEM-PLCS	Nenhuma	Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar, Remanufaturar e Reaproveitar	Reciclar	Sim	Trocar	Nenhum
45	MIS	Reduzir	Reusar e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
46	PCIP	Sem informação	Sem informação	Sem informação	Sim	Sem informação	Cooperação
47	PR-MCDT	Nenhuma	Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Sim	Inovação e investimento e Trocar	Nenhum
48	PRDI	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Inovação e investimento e Trocar	Nenhum
49	PCM	Nenhuma	Recondicionar e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
50	PRP e <i>The ReNtry®-module</i>	Sem informação	Reusar	Sem informação	Sem informação	Inovação e investimento e Trocar	Cooperação
51	RIIs	Nenhuma	Nenhuma	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum
52	RDI	Nenhuma	Recondicionar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
53	REAPro	Nenhuma	Reusar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
54	RPI	Nenhuma	Reusar	Nenhuma	Não	Trocar	Nenhum
55	SIAS	Nenhuma	Remanufaturar	Nenhuma	Não	Inovação e investimento	Nenhum
56	SPI	Redesign	Reusar	Reciclar	Não	Trocar	Nenhum

(conclusão)

#	Sistema	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Estender a vida útil de produtos e suas peças	Aplicação útil de materiais	Modelo de negócios	Reinventar o paradigma	Ciclo cruzado e colaboração entre setores
57	SCI	Reduzir	Durabilidade, Reusar e Reparar e manutenção	Reciclar	Não	Inovação e investimento	Nenhum
58	SICED	Reduzir	Reusar e Remanufaturar	Reciclar	Não	Nenhum	Nenhum
APL: Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level BCI: Building Circularity Indicators BPI: End of Life Best Practice Indicators BWPE: BIM-based Whole-life Performance Estimator C2C Indicators: Cradle-to-Cradle Indicators CAM: Circularity Assessment Model CBA: Circular Building Assessment Prototype CLC: Closed Loop Calculator CC: Circularity Calculator CEBI: Circular Economy Benefit Indicators CEI: Circular Economy Index CEIP: Circular Economy Indicator Prototype CEMS: Circular Economy Measurement Scale MIPS: Material Input Per Service Delivered CEF: Circular Economy Toolkit CEV: Circular Economy Value CG: Circular Gap MI: Mine site MFA Indicator MCEM-PLCS: Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies							
CBM-IS: Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability Check: Circularity Check CMT: Circularity Measurement Toolkit CP: Circular Pathfinder CPI: Circular Economy Performance Indicator CTI: Circular Transition Indicators CYT: Circulytics eDiM: Ease of Disassembly Metric BEI: Economic-Environmental Indicators EER: Economic-Environmental Remanufacturing EoLi: End of Life Indices FPI: Environmental Sustainability of Food Packaging Indicators GRInd: Global Resource Indicator IOBS: Input-Output Balance Sheet L&C: Longevity and Circularity CI: Circularity Index PR-MCDT: Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool SICED: Systems Indicators for Circular Economy Dashboard MESCS: Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets CE-PCF: Evaluation Index System of CE for Phosphorus Chemical Firms MIS: Multidimensional Indicator Set PCIP: Product Circularity Improvement Program PCM: Product-Level Circularity Metric PRDI: Product Recycling Desirability Index MCI: Material Circularity Indicator PRP: Circular e-Procurement Tool QC: Circularity of Material Quality RDI: Resource Duration Indicator REAPro: Resource Efficiency Assessment of Products RIs: Recycling Indices for the Circular Economy RPI: Reuse Potential Indicator SCI: Sustainable Circular Index SIAS: Set of Indicators to Assess Sustainability MECI: Material and Energy Circularity Indicators SPI: Sustainability Performance Indicators WCI: Improved Water Circularity Index ZWP: Expended Zero Waste Practice Model							

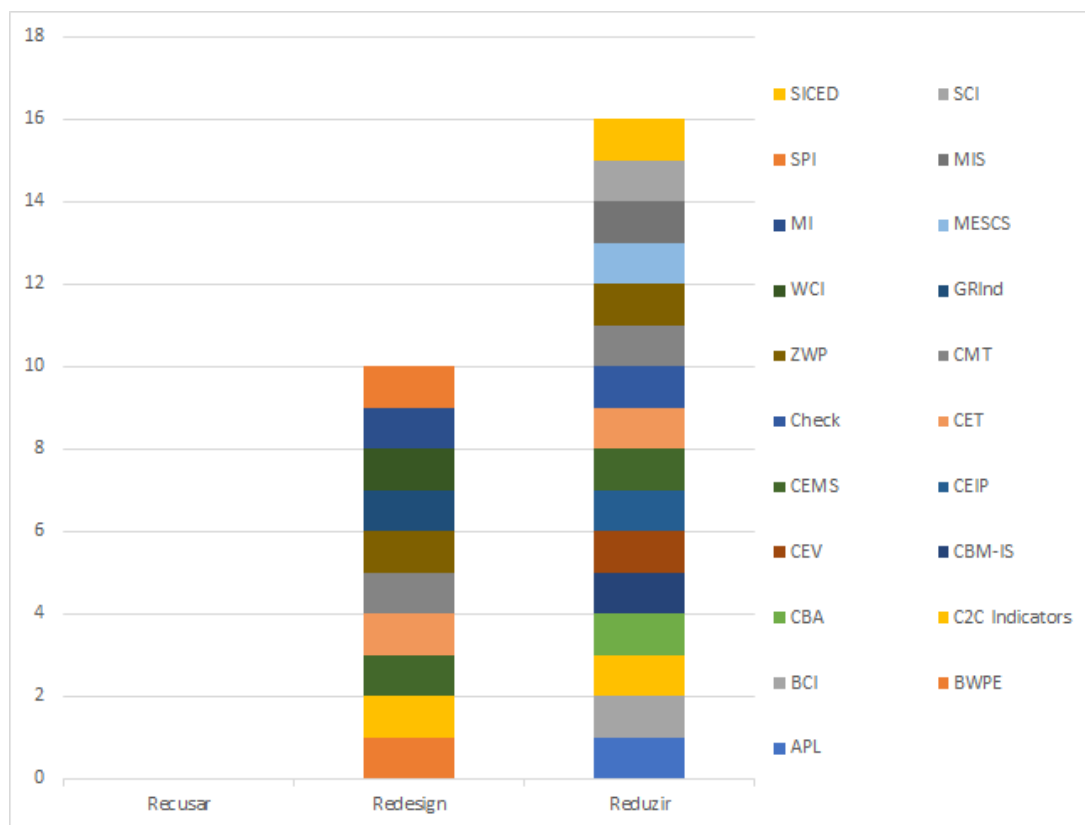
Fonte: Elaborada pela autora.

As estratégias de EC foram identificadas com base na listagem de categorias, exceto MCEM-PLCS e PR-MCDT. As estratégias podem variar com base nas escolhas dos tomadores de decisão.

4.3.6.1 *Uso e fabricação de produtos mais inteligentes*

Essa categoria demonstra que os produtos e serviços estão aumentando a circularidade. A maioria dos sistemas de indicadores (33 ou 57%) não considera nenhuma das estratégias de uso e fabricação de produtos. Esse resultado evidencia uma lacuna que a proposta metodológica busca endereçar, ao organizar os indicadores em categorias que permitam melhor comparação e seleção conforme o contexto empresarial. Por outro lado, nenhum sistema analisa a estratégia Recusar, como é possível observar na Figura 30.

Figura 30 – Categorização dos sistemas por uso e fabricação de produtos mais inteligentes



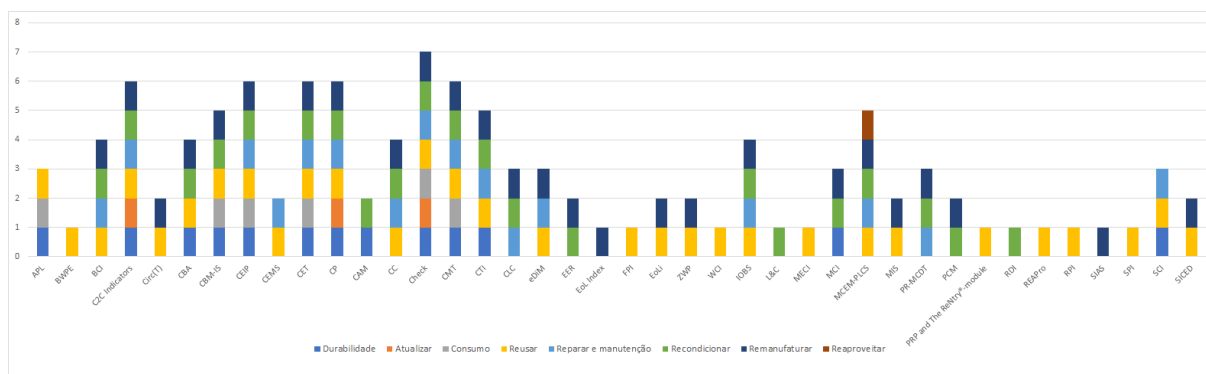
Fonte: Elaborada pela autora

A estratégia Redesign é verificada por 5 sistemas de indicadores (9%). Outros 5 sistemas de indicadores (9%) analisam conjuntamente Redesign e Reduzir. Já a estratégia Reduzir é avaliada por 11 sistemas de indicadores (19%). Os 4 sistemas (7%) CG, CYT, PCIP e PRP e The ReNtry®-module não possuem informações.

4.3.6.2 Estender a vida útil dos produtos e suas peças

Para essa categoria, quanto maior o nível de circularidade (durabilidade), menos recursos naturais são necessários para produzir novos materiais necessários para a fabricação de produtos e para seu uso subsequente. Da mesma maneira que Uso e fabricação de produtos mais inteligentes, a maioria dos sistemas de indicadores, 15 sistemas ou 26%, não contemplam estratégias relacionadas a Estender a vida útil dos produtos e suas peças. As estratégias que são vistas de forma única pelos sistemas de indicadores são Reusar (8 sistemas de indicadores ou 14% do portfólio), Recondicionar (2 sistemas de indicadores ou 3%) e Remanufaturar (2 sistemas de indicadores ou 3%). Por outro lado, apenas 1 sistema (2%), Check, que considera 7 estratégias das 8 desse grupo. Esse sistema de indicadores só não analisa Reaproveitar (Figura 31).

Figura 31 – Categorização dos sistemas por estender a vida útil dos produtos e suas peças



Fonte: Elaborada pela autora

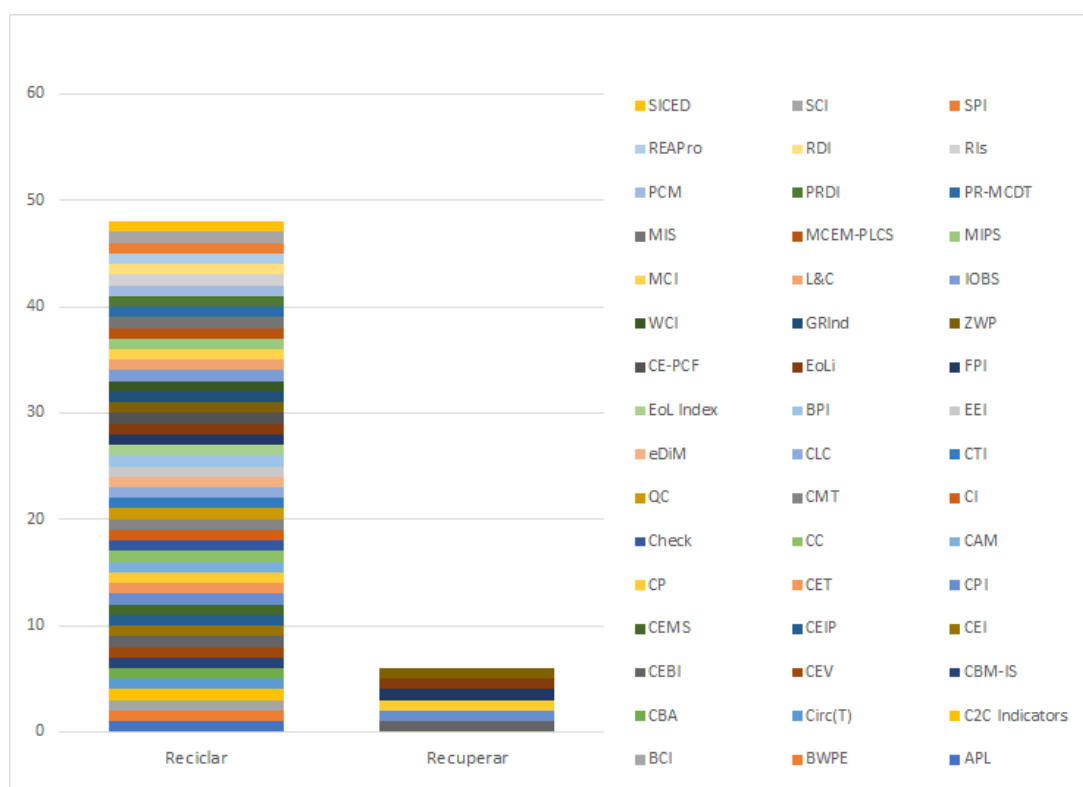
As estratégias que são mais analisadas são: Reusar (30 sistemas de indicadores), Remanufaturar (26 sistemas de indicadores), Recondicionar (21 sistemas de indicadores), Reparar e manutenção (16 sistemas de indicadores) e Durabilidade (13 sistemas de indicadores). Já as estratégias menos analisadas são: Consumo (6 sistemas de indicadores), Atualizar (3 sistemas de indicadores) e Reaproveitar (1 sistema - MCEM-PLCS). Os 3 sistemas de indicadores, CG, CYT e PCIP não possuem informações. A consolidação desses achados contribui para a proposta metodológica, ao indicar quais estratégias são mais recorrentes nos sistemas existentes e quais permanecem pouco exploradas, auxiliando o tomador de decisão a equilibrar suas escolhas.

4.3.6.3 Aplicação útil de materiais

Diferente das outras categorias de estratégias, em Aplicação útil de materiais apenas 6 sistemas de indicadores (10%) não verificam nenhuma das estratégias. Essa predominância da reciclagem como solução principal indica a permanência de práticas lineares, reforçando a necessidade de a proposta metodológica apoiar escolhas que avancem para níveis mais robustos

de circularidade. Indo pelo caminho das estratégias já consolidadas, a estratégia Reciclar é considerada de forma única por 42 sistemas de indicadores (72%) e 6 sistemas de indicadores (10%) consideram em conjunto com a estratégia Recuperar, como apresentado na Figura 32. Nenhum sistema analisa apenas a estratégia Recuperar. Os sistemas de indicadores CG, CYT, PCIP, PRP e The ReNtry®-module (7%) não apresentam informações.

Figura 32 – Categorização dos sistemas por estender a vida útil dos produtos e suas peças



Fonte: Elaborada pela autora

4.3.6.4 Modelo de negócios

Esta categoria inclui principalmente a difusão de novos modelos, já visualizando a circularidade dos produtos. A maioria dos sistemas de indicadores (36 sistemas de indicadores ou 62%) não analisa novos modelos de negócios, apesar de sua relevância para a transição circular. Esse resultado reforça o papel da proposta metodológica em evidenciar lacunas e orientar a inclusão de modelos que promovam maior alinhamento estratégico. Os 3 sistemas de indicadores (5%) CC, IOBS e PRP e The ReNtry®-module não possuem informações. Já 19 sistemas de indicadores (33%) consideram novos modelos de negócios.

4.3.6.5 Reinventar o paradigma

Do portfólio de 58 sistemas de indicadores, 23 sistemas de indicadores (40%) não possuem nenhuma análise sobre Inovação e investimento ou Trocar, categorias essenciais para

ampliar o alcance da circularidade. A proposta metodológica incorpora essa perspectiva ao estruturar o processo de seleção de indicadores, tornando-o sensível à inovação e à substituição tecnológica. A mesma quantidade de sistemas de indicadores (23 ou 40%) analisam Trocar, ou seja, analisam de alguma maneira a seleção de recursos e tecnologia para a circularidade. Sendo que 15 sistemas de indicadores (26%) verificam apenas Trocar e 8 sistemas de indicadores (14%) verificam tanto Trocar como Inovação e investimento. Além desses sistemas de indicadores, 6 outros sistemas (10%) analisam apenas Inovação e investimento que são necessários para impulsionar a EC. E 6 sistemas de indicadores (10%) não possuem informações sobre a categoria.

4.3.6.6 *Ciclo cruzado e colaboração entre setores*

Esse grupo é voltado para a visão de simbiose industrial. Para a compreensão de que a EC consegue expandir do nano e micro para o meso. A maioria dos sistemas de indicadores, 38 ou 66% do portfólio, não considera a cooperação entre os setores. Esse dado reforça a importância de a proposta metodológica oferecer caminhos para selecionar indicadores que contemplem a colaboração e a simbiose industrial, ampliando a análise do nível micro para meso e macro. Os sistemas de indicadores CG, CC, CLC e IOBS (7%) não possuem informações e os 16 sistemas de indicadores (28%) restantes analisam a Cooperação.

4.4 CONSOLIDAÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação exemplificativa da proposta metodológica consolidada nesta pesquisa.

A aplicação foi realizada utilizando o portfólio de sistemas de indicadores de circularidade identificados e classificados nas fases anteriores, seguindo obrigatoriamente as etapas da proposta metodológica: definição do escopo, aplicação do método FAHP, refinamento de sobreposições e consolidação de indicadores-chave.

Dessa forma, os resultados evidenciam a operacionalização da proposta metodológica e ilustram sua aplicabilidade em distintos contextos empresariais, demonstrando sua capacidade de apoiar a seleção de indicadores de circularidade alinhados aos objetivos estratégicos das organizações.

4.4.1 **Pesos dos conjuntos e das categorias**

Os pesos de importância para cada conjunto e categoria foram obtidos e tabulados no Quadro 4.10 seguindo os procedimentos de cálculo do FAHP na Seção 3.4. Todos os valores de CR são inferiores a 0,1, o que implica que os julgamentos são aceitáveis para os pesos (SAATY, 1990).

Quadro 4.10 – Peso dos conjuntos e categorias

Conjunto	Peso	Categoria	Peso	Peso final	Ranking
Contexto (C ₁)	28,13%	Transversalidade (C ₁₁)	21,07%	5,93%	3
		Fonte (C ₁₂)	14,69%	4,13%	7
		Validação (C ₁₃)	18,09%	5,09%	4
		Categoria de indústria (C ₁₄)	13,22%	3,72%	9
		Produto/Material (C ₁₅)	14,59%	4,11%	8
		Tamanho da empresa (C ₁₆)	8,13%	2,29%	19
		Localização (C ₁₇)	10,21%	2,87%	14
Indicador (C ₂)	16,74%	Mensurabilidade (C ₂₁)	20,41%	3,42%	12
		Dimensão (C ₂₂)	8,11%	1,36%	27
		Formato (C ₂₃)	11,67%	1,95%	23
		Unidades mais utilizadas (C ₂₄)	3,59%	0,60%	32
		Utilização (C ₂₅)	16,63%	2,78%	15
		Foco temporal (C ₂₆)	12,58%	2,10%	22
		Tipo de indicador (C ₂₇)	16,28%	2,73%	16
		Variáveis (C ₂₈)	10,73%	1,80%	24
Metodologia (C ₃)	16,74%	Metodologia baseada em índices (C ₃₁)	16,74%	6,72%	2
		Metodologia de avaliação (C ₃₂)	27,98%	4,68%	5
		Abordagem de modelagem (C ₃₃)	21,56%	3,61%	10
		Tipo de medição de acordo com a definição e estratégias de EC (C ₃₄)	10,30%	1,72%	25
Sustentabilidade (C ₄)	17,58%	Pilar da sustentabilidade (C ₄₁)	67,83%	11,92%	1
		Estendido a ESG - Governança (C ₄₂)	13,98%	2,46%	18
		ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC (C ₄₃)	18,20%	3,20%	13
Elementos da EC (C ₅)	4,91%	Nível sistêmico (C ₅₁)	15,32%	0,75%	30
		Estágio de ciclo de vida (C ₅₂)	23,67%	1,16%	28
		Tipo de ciclo (C ₅₃)	8,20%	0,40%	33
		Desempenho (C ₅₄)	13,67%	0,67%	31
		Múltiplos ciclos de vida (C ₅₅)	7,24%	0,36%	34
		Princípios (C ₅₆)	31,90%	1,57%	26
Estratégias da EC (C ₆)	15,91%	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes (C ₆₁)	29,16%	4,64%	6
		Estender a vida útil dos produtos e suas peças (C ₆₂)	22,02%	3,50%	11
		Aplicação útil de materiais (C ₆₃)	13,46%	2,14%	21
		Modelo de negócios (C ₆₄)	5,83%	0,93%	29
		Reinventar o paradigma (C ₆₅)	13,82%	2,20%	20
		Ciclo cruzado e colaboração entre setores (C ₆₆)	15,71%	2,50%	17

Fonte: Elaborada pela autora.

Para definição das principais categorias foram considerados os pesos superiores a 3%. Assim, foram selecionadas 5 categorias do conjunto C₁, 3 categorias do conjunto C₃, 2 categorias tanto para o conjunto C₄ como para o conjunto C₆ e 1 categoria do conjunto C₂, num total de treze categorias. Nenhuma categoria do conjunto C₅ alcançou o peso de 3%, como é possível verificar no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Categorias principais para consolidação da proposta metodológica

Ranking	Peso final	Categoria	Conjunto
1	11,92%	Pilar da sustentabilidade (C_{41})	Sustentabilidade (C_4)
2	6,72%	Metodologia baseada em índices (C_{31})	Metodologia (C_3)
3	5,93%	Transversalidade (C_{11})	Contexto (C_1)
4	5,09%	Validação (C_{13})	Contexto (C_1)
5	4,68%	Metodologia de avaliação (C_{32})	Metodologia (C_3)
6	4,64%	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes (C_{61})	Estratégias da EC (C_6)
7	4,13%	Fonte (C_{12})	Contexto (C_1)
8	4,11%	Produto/Material (C_{15})	Contexto (C_1)
9	3,72%	Categoria de indústria (C_{14})	Contexto (C_1)
10	3,61%	Abordagem de modelagem (C_{33})	Metodologia (C_3)
11	3,50%	Estender a vida útil dos produtos e suas peças (C_{62})	Estratégias da EC (C_6)
12	3,42%	Mensurabilidade (C_{21})	Indicador (C_2)
13	3,20%	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC (C_{43})	Sustentabilidade (C_4)

Fonte: Elaborada pela autora.

A partir dessas treze principais categorias, foram identificados os sistemas de indicadores que atendem essas categorias. Esses sistemas de indicadores são analisados na próxima seção.

4.4.2 Sistemas de indicadores selecionados

Para essa seleção, foram eliminados os sistemas de indicadores que não possuíam informações sobre as treze categorias, iniciando a seleção pela categoria com o maior peso, C_{41} , e assim por diante.

As principais eliminações dos sistemas aconteceram nas categorias C_{13} , C_{61} e C_{62} ; quarta, sexta e décima primeira posições no ranking, respectivamente; pois apenas os sistemas de indicadores com validação e estratégias de uso e fabricação e extensão da vida útil dos produtos permaneceram. Desse modo, 12 sistemas de indicadores foram selecionados.

Os sistemas são apresentados em quadros organizados pelo peso dos conjuntos. Assim, os sistemas são analisados inicialmente pelo conjunto C_1 , depois pelo conjunto C_4 , após são analisados pelos conjuntos C_2 e C_3 e por último o conjunto C_6 . O Quadro 4.12 apresenta os doze sistemas de indicadores selecionados com informações sobre as categorias selecionadas do conjunto C_1 .

Quadro 4.12 – Sistemas de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Contexto

Sistema	Transversalidade	Fonte	Validação	Categoria de indústria	Produto/Material
APL	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de produtos de bebidas e tabaco	Embalagem de bebidas
BWPE	Sector específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado
BCI	Sector específico	Academia	Sim	Construção civil	Não especificado
C2C <i>Indicators</i>	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado
CBA	Sector específico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Construção civil	Não especificado
CBM-IS	Genérico	Academia	Sim	Diversas	Não especificado
CEIP	Genérico	Academia	Sim	Manufatura	Não especificado
Check	Genérico	Indústria ou agência de consultoria	Sim	Diversas	Não especificado
CMT	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de máquinas para agricultura, construção e mineração	Equipamento avícola
WCI	Material específico	Academia	Sim	Fabricação de alimentos	Água
MIS	Sector específico	Academia	Sim	Tratamento e descarte de resíduos	Resíduos de equipamentos eletroeletrónicos
SPI	Genérico	Academia	Sim	Fabricação de aparelhos ortopédicos, de ambulatórios ou protéticos	Dedos protéticos
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> CBA: <i>Circular Building Assessment Prototype</i> CEIP: <i>Circular Economy Indicator Prototype</i> Check: <i>Circularity Check</i> CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>					

Fonte: Elaborada pela autora.

A maioria dos doze sistemas possui origem acadêmica, 75%. Podem ser usados para qualquer setor ou material, 58,33%. No entanto, 3 dos doze sistemas possuem maior foco na construção civil. Dando continuidade, o Quadro 4.13 apresenta os doze sistemas de indicadores selecionados com informações sobre as categorias selecionadas do conjunto C_4 .

Quadro 4.13 – Sistemas de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Sustentabilidade

(continua)

Sistema	Pilar da sustentabilidade	ODS abordados diretamente na melhoria do desempenho da EC
APL	Ambiental	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água
BWPE	Ambiental e Econômico	ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
BCI	Ambiental e Econômico	ODS 12: consumo e produção responsáveis
C2C <i>Indicators</i>	Ambiental e Social	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água, ODS 15: Vida sobre a terra
CBA	Ambiental e Econômico	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
CBM-IS	Ambiental, Econômico e Social	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra
CEIP	Ambiental	ODS 12: consumo e produção responsáveis
Check	Ambiental e Econômico	ODS 3: Boa saúde e bem-estar, ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 14: Vida debaixo d'água
CMT	Ambiental e Econômico	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 7: Energia acessível e limpa, ODS 8: Emprego e crescimento econômico, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 13: Combate às alterações climáticas, ODS 15: Vida sobre a terra, ODS 17: Parceria em prol das metas
WCI	Ambiental e Econômico	ODS 6: Água limpa e saneamento, ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura, ODS 12: consumo e produção responsáveis
MIS	Ambiental	ODS 12: consumo e produção responsáveis
SPI	Ambiental, Econômico e Social	ODS 12: consumo e produção responsáveis, ODS 15: Vida sobre a terra

(conclusão)

APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i>	CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i>
BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i>	Check: <i>Circularity Check</i>
BCI: <i>Building Circularity Indicators</i>	CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i>
C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i>	MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i>
CBA: <i>Circular Building Assessment Prototype</i>	SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i>
CEIP: <i>Circular Economy Indicator Prototype</i>	WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>

Fonte: Elaborada pela autora.

Referente ao pilar de sustentabilidade, apenas 2 sistemas de indicadores possuem o tripé da sustentabilidade. Já dos ODSs abordados, todos apresentam algo relacionado ao ODS 12 e sete dos sistemas de indicadores abordam o ODS 9. Já o Quadro 4.14 apresenta os doze sistemas selecionados com informações sobre as categorias selecionadas dos conjuntos C_2 e C_3 .

Quadro 4.14 – Sistema de indicadores que se enquadram no ranking - conjuntos Indicador e Metodologia

Sistema	Mensurabilidade	Metodologia baseada em índices	Metodologia de avaliação	Abordagem de modelagem
APL	Quantitativo	Padronizada	ACV, Reutilização de material (C2C) e MCI	Análise de cenários - TOPSIS (MCDA)
BWPE	Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Outra	Análise de cenários
BCI	Quantitativo	Padronizada	MCI	Contável
C2C Indicators	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável
CBA	Quantitativo	Padronizada	ACV, AECV e BIM	Análise de cenários
CBM-IS	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	BS 8001:2017	Testes empíricos e revisão da literatura, com base no BSI
CEIP	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Outra	Questionário fechado, entrevistas semiestruturadas
Check	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável
CMT	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Outra	Contável
WCI	Qualitativo e Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	Manufatura enxuta e MCI	Contável
MIS	Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	ACV	Análise de cenários
SPI	Quantitativo	Conjunto específico de indicadores	<i>Linear Flow Index</i> (LFI)	Análise de cenários
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i>		CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i>		
BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i>		Check: <i>Circularity Check</i>		
BCI: <i>Building Circularity Indicators</i>		CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i>		
C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i>		MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i>		
CBA: <i>Circular Building Assessment Prototype</i>		SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i>		
CEIP: <i>Circular Economy Indicator Prototype</i>		WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>		

Fonte: Elaborada pela autora.

Em relação ao conjunto Indicador, a metade dos sistemas de indicadores seleciona-

dos mensura questões tanto qualitativas quanto quantitativas. A outra metade apenas trabalha com questões quantitativas. Sobre o conjunto Metodologia, nove sistemas de indicadores têm conjuntos específicos de indicadores, os principais métodos de avaliação são ACV e MCI e as principais abordagens são a análise de cenários e a abordagem contábil.

O último conjunto da proposta metodológica é Estratégias de EC, com as categorias Uso e fabricação de produtos mais inteligentes (C_{61}) e Estender a vida útil de produtos e suas peças (C_{62}) O Quadro 4.15 apresenta as informações dos doze sistemas de indicadores nessas duas categorias.

Quadro 4.15 – Sistema de indicadores que se enquadram no ranking - conjunto Estratégias da EC

Sistema	Uso e fabricação de produtos mais inteligentes	Estender a vida útil de produtos e suas peças
APL	Reduzir	Durabilidade, Consumo e Reusar
BWPE	Redesign	Reusar
BCI	Reduzir	Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar
C2C Indicators	Redesign e Reduzir	Durabilidade, Atualizar, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar
CBA	Reduzir	Durabilidade, Reusar, Recondicionar e Remanufaturar
CBM-IS	Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Recondicionar e Remanufaturar
CEIP	Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar
Check	Reduzir	Durabilidade, Atualizar, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar
CMT	Redesign e Reduzir	Durabilidade, Consumo, Reusar, Reparar e manutenção, Recondicionar e Remanufaturar
WCI	Redesign	Reusar
MIS	Reduzir	Reusar e Remanufaturar
SPI	Redesign	Reusar
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> CBA: <i>Circular Building Assessment Prototype</i> CEIP: <i>Circular Economy Indicator Prototype</i>		CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> Check: <i>Circularity Check</i> CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>

Fonte: Elaborada pela autora.

Dos 12 sistemas de indicadores, apenas 2 possuem duas estratégias de uso e fabricação de produtos. Sendo que a maioria, nove sistemas de indicadores, abordam a estratégia Reduzir. Sobre a categoria Estender a vida útil, todos os sistemas de indicadores contemplam a estratégia Reusar.

4.4.3 Composição do conjunto de indicadores de circularidade

Para a composição do conjunto de indicadores de circularidade, três dos sistemas foram excluídos: CBA, Check e CEIP. O sistema CBA foi excluído por ser completamente fechado, impossibilitando a verificação dos indicadores que o compõem. O sistema CEIP apresenta-se como um questionário pontuado, mas não disponibiliza uma listagem explícita e completa de todos os indicadores de economia circular, limitando-se a 15 variáveis organizadas ao longo do ciclo de vida do produto. O sistema Check contém um questionário detalhado, mas não explicita o método para quantificar as questões qualitativas nem apresenta critérios de ponderação para chegar aos seus percentuais de circularidade por estágios de ciclo de vida. Por esse motivo, o sistema Check foi incluído no Apêndice, mas não foi utilizado na composição final do conjunto de indicadores.

Os indicadores de cada sistema de indicadores selecionados pelo método FAHP são apresentados no Apêndice D.

4.4.3.1 Sobreposição dos indicadores

Após a análise, todos os sistemas de indicadores de circularidade selecionados apresentam pelo menos uma sobreposição. Ou seja, não há sistemas de indicadores de circularidade completamente isolados dentro da avaliação de EC. Cada um compartilha pelo menos um indicador com outro sistema de medição, o que sugere a existência de interconectividade entre as abordagens analisadas. O Quadro 4.16 apresenta a sobreposição de indicadores. A identificação das sobreposições integra a proposta metodológica, ao evidenciar redundâncias e complementaridades entre sistemas, etapa necessária para consolidar o conjunto final de indicadores.

Quadro 4.16 – Sobreposição de indicadores

Sistema de indicadores	Sobreposição com outros sistema de indicadores	Indicadores em comum
APL	BCI, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS, CMT, MIS, SPI, WCI	MCI, Índice de Fluxo Linear (LFI), <i>Material Reutilization Score</i> (MRS), Pegada de carbono, Consumo de água
BWPE	BCI, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS, SPI	Saúde do material, Índice de reuso
BCI	APL, BWPE, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS, CMT, SPI, WCI	MCI, LFI, Saúde do material, Uso de energia, Pegada de carbono
C2C <i>Indicators</i>	APL, BWPE, BCI, CMT, CBM-IS, MIS, WCI	Saúde do material, MRS, Índice de energia renovável (REI) Índice de eficiência hídrica (WEI)
CBM-IS	APL, BWPE, BCI, C2C <i>Indicators</i> , CMT, MIS	Saúde do material, MRS, REI, Redução de materiais, Matérias-primas renováveis, Estrutura e Diversidade de Stakeholders, Redução de custos, Investimento circular, Criação de empregos, Caracterização do mercado, Envolvimento dos stakeholders, Mudança cultural
CMT	APL, BCI, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS, WCI	Consumo de água, Pegada de carbono, REI, WEI, Redução de materiais, Matérias-primas renováveis, Estrutura e Diversidade de Stakeholders, Redução de custos, Investimento circular, Criação de empregos, Caracterização do mercado, Envolvimento dos stakeholders, Mudança cultural
MIS	APL, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS	MRS
SPI	APL, BWPE, BCI, WCI	LFI, índice de reuso
WCI	APL, BCI, C2C <i>Indicators</i> , CMT, SPI	MCI, LFI, WEI
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C <i>Indicators</i> : <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> CMT: <i>Circularity Measurement Toolkit</i>		CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>

Fonte: Elaborada pela autora.

Os sistemas de indicadores de circularidade que possuem maior sobreposição são APL, BCI, C2C *Indicators*. Embora apresentem sobreposição de indicadores com outros sete sistemas, não há nenhum sistema que se sobreponha por completo.

Os sistemas CBM-IS e CMT têm seis e cinco sobreposições, respectivamente, com outros sistemas de indicadores. Apesar de apresentarem menos conexões com os demais sistemas, são justamente os que concentram o maior número de indicadores em comum. São também os que concentram o maior número de indicadores e têm a maior abrangência em relação a material, produto e empresa.

Os sistemas de indicadores APL, BCI e WCI utilizam como base o indicador *Material Circularity Indicator* (MCI) desenvolvido pela EMF; Granta (2015). No sistema WCI, o MCI sofre uma leve alteração para comportar material ou produto específico (verificar Apêndice D).

Uma das principais variáveis do MCI, o LFI, também é utilizada pelo sistema de indicadores SPI. Sendo assim, o indicador LFI é um dos indicadores mais utilizados pelos sistemas de indicadores (APL, BCI, SPI e WCI). Os indicadores Saúde do Material e MRS são também utilizados por quatro sistemas de indicadores. Os sistemas que possuem Saúde do Material em comum são BCI, BWPE, C2C *Indicators* e CBM-IS. Já os sistemas que compartilham MRS são APL, C2C *Indicators*, CBM-IS e MIS. Esses três indicadores com maior justaposição são dirigidos para o material. O único indicador que também é apresentado por três sistemas de indicadores e não é voltado para o material é o indicador REI, de energia renovável, e é apresentado pelos sistemas BCI, C2C *Indicators* e CBM-IS.

4.4.3.2 *Uso modular ou integral dos sistemas*

Essa estrutura garante que os sistemas de indicadores possam ser utilizados de maneira flexível ou integrada, dependendo da necessidade e disponibilidade de dados. Essa análise apoia a etapa metodológica de decisão, indicando se os sistemas podem ser aplicados parcialmente ou se exigem adoção integral.

Os sistemas de indicadores de circularidade APL, BWPE, C2C *Indicators*, CBM-IS, MIS, SPI e WCI podem ser usados de forma modular, ou seja, mesmo que algumas informações não estejam disponíveis, ainda é possível calcular e interpretar seus resultados. Em seu material base, CBM-IS aponta a utilização integral do questionário (ROSSI et al., 2020). No entanto, pela avaliação realizada, seus indicadores podem ser segregados.

Os sistemas de indicadores BCI e CMT exigem dados completos para fornecer um resultado válido, pois suas metodologias dependem da avaliação conjunta de múltiplos fatores. Para chegar ao resultado de BCI, é necessário medir SCI. SCI depende da agregação dos PCIs dos produtos do sistema que, conseqüentemente, depende da agregação dos MCIs de cada produto. Portanto, ele deve ser aplicado na íntegra. Ao mesmo tempo que o sistema de indicadores CMT possui diversos indicadores em comum com os outros sistemas de indicadores, ele é o único sistema cujas questões não podem ser dissociadas. O sistema é composto por um longo questionário que deve ser respondido na íntegra para que possa ser avaliada a circularidade da empresa. Ou seja, ele requer a soma de todos os fatores para classificar corretamente a empresa.

4.4.3.3 *Conjunto final de indicadores*

Após a análise de sobreposições e da forma de uso de cada sistema de indicadores de circularidade, chegou-se ao conjunto final de indicadores, consolidado como parte da proposta metodológica. Enquanto os sistemas representam propostas independentes de medição, o conjunto final integra e organiza seus indicadores em uma metodologia aplicável às empresas. O conjunto final é composto por 49 indicadores. Os indicadores do conjunto, organizados e consolidado como parte da proposta metodológica, são apresentados no Quadro 4.17.

Quadro 4.17 – Conjunto final de indicadores de circularidade
(continua)

Categoria	Subcategoria	Indicador	Fórmula	Sistema de indicadores
Variável	Material	LFI (<i>Linear Flow Index</i>)	$LFI = \sum_{j=1}^n \frac{V+M}{2M+W_j-W_{Cj}}$	APL, BCI, SPI, WCI
		MCI (<i>Material Circularity Indicator</i>)	$MCI = 1 - (LFI \times F(X))$	APL, BCI, WCI
		Redução de Materiais na Fabricação	Quantidade de matérias-primas reduzida na fabricação	CBM-IS
		Redução de Materiais no Produto	Quantidade de matérias-primas reduzida no produto	CBM-IS
		Matérias-primas renováveis	% de materiais renováveis	CBM-IS
		<i>Recovery of Scarce Materials (IS)</i>	$IS = \frac{\sum_{i=1}^m W_i' \times EI_i \times SR_i}{\sum_{j=1}^n W_j \times EI_j \times SR_j}$	MIS
		<i>Closure of Material Cycles (IC)</i>	$IC = \frac{\sum_{i=1}^m W_i' \times V_i'}{\sum_{j=1}^n W_j \times V_j}$	MIS
		Saúde do material	Quantidade de redução de substâncias tóxicas	BCI, BWPE, C2C Indicators, CBM-IS
		WEI (Índice de eficiência hídrica)	$WEI = \frac{W_{usada}}{W_{produzida}}$	C2C Indicators, WCI
		Consumo de água (WC)	m^3	APL
Energia renovável	Poluição	REI (Índice de energia renovável)	$REI = \frac{E_{renovavel}}{E_{total}}$	BCI, C2C Indicators, CBM-IS
		Pegada de Carbono	$CO_{2,tot} = \sum CO_{2,(X)}$	APL, BCI
		<i>Avoided Environmental Burdens (IE)</i>	$IE = \frac{\sum_{i=1}^m W_i' \times B_i'}{\sum_{j=1}^n W_j \times B_j}$	MIS
		Depleção de recursos abióticos (ARD)	$kgSb_{eq}$	APL
		Acidificação (AC)	$molH_{eq}^{+}$	APL
		Material particulado (PM)	$kgPM_{2.5eq}$	APL

(continua)

Categoria	Subcategoria	Indicador	Fórmula	Sistema de indicadores
Estender a vida útil dos produtos e suas peças	Durabilidade	Distribuição de Weibull	$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\}, \quad t \leq 0$	BWPE
		Função de recuperação de edifícios	$Y = f < S, D(t) >$	BWPE
		Longevidade	Quantidade de tempo adicionada à vida útil do produto	CBM-IS
		Índice de Reconfiguração (RI)	$RI = \frac{R \times P}{n}$	SPI
	Reusar	Índice de Variedade Funcional (FV)	$FV = \frac{C_v^2}{C_v}$	SPI
		Índice de Alcance Funcional (FR)	$FR = \frac{C_v^1}{C_v}$	SPI
		Índice de Reuso	Índice de Reuso = $\frac{\sum_{i=1}^n M_{ri} \times k_i}{M_t}$	BWPE, SPI
		Reuso no Processo de Produção	Quantidade de material reutilizado na cadeia de suprimentos	CBM-IS
		Reuso no Produto	Quantidade de material reutilizado no produto	CBM-IS
	Recondicionar	Proporção de conexões desmontáveis	$d_c = \frac{ndc}{nc}$	BWPE
		Proporção de materiais sem acabamentos secundários	$\bar{S}_f = \frac{v\bar{S}_f}{vm}$	BWPE
		Recondicionamento	Quantidade total de recuperação de partes (componentes) do produto, sem necessariamente passar por todas as etapas da remanufatura	CBM-IS
Aplicação útil dos materiais	Remanufaturar	Remanufatura	Quantidade de produtos remanufaturados	CBM-IS
	Reciclar	MRS (<i>Material Reutilization Score</i>)	$MRS = \frac{[(\%IR) + (\%RC \times 2)]}{3} \times 100$	APL, C2C Indicators, CBM-IS, MIS
		Índice Potencial de Reciclagem (IPR)	$IPR = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times F_i \times E_i}{M_t}$	SPI

(conclusão)

Categoria	Subcategoria	Indicador	Fórmula	Sistema de indicadores	
Modelo de negócios	Empresa	Redução de Custos	Custo reduzido = Custo antes – Custo atual	CBM-IS	
		Geração de Receita	% de mercado conquistado	CBM-IS	
		Lucratividade	ROA = Lucro Líquido / Ativos Totais; ROE = Lucro Líquido / Patrimônio Líquido	CBM-IS	
		Investimento Circular	Quantificar os investimentos provenientes do processo de inovação	CBM-IS	
		Mudança Cultural	N/A	CBM-IS	
	Envolvimento dos Funcionários	Justiça Social	N/A	C2C Indicators	
		Produtividade do Trabalho (LP)	$LP = \frac{\text{Vendas Líquidas (milhões de euros)}}{\text{Número total de empregados}}$	WCI	
		Criação de Empregos	Quantidade de criação de empregos a partir do modelo de negócio circular	CBM-IS	
		Renda Gerada	Valor monetário da renda gerada pela criação de empregos a partir do modelo de negócio circular	CBM-IS	
		Participação dos Funcionários	% de empregos na empresa relacionados à economia circular	CBM-IS	
Ciclo cruzado e colaboração entre setores	Mercado	Cliente	N/A	CBM-IS	
		Valor Percebido pelo Mercado	N/A	CBM-IS	
		Comunicação	N/A	CBM-IS	
	Stakeholder	Estrutura de Stakeholders	N/A	CBM-IS	
		Diversidade de Stakeholders	N/A	CBM-IS	
Tributação e regulações	-	Envolvimento de Stakeholders	N/A	CBM-IS	
		Tributação e regulações	N/A	CBM-IS	
		APL: Sustainability Performance Indicators WCI: Improved Water Circularity Index ROA: Retorno Sobre o Ativo ROE: Retorno Sobre o Capital N/A: Não Aplicável			

Fonte: Elaborada pela autora.

Os indicadores foram agregados utilizando categorias e subcategorias definidas anteriormente para classificar os sistemas de indicadores. A categoria principal, com 16 indicadores, é a Variável com material sendo sua principal subcategoria com 8 indicadores. As outras principais categorias, com 13 indicadores cada, são Estender a vida útil dos produtos e suas peças e Modelo de negócios. Reusar é a subcategoria de Estender a vida útil dos produtos com maior quantidade de indicadores, seis no total. Na categoria Modelo de negócios, as duas subcategorias empresa e envolvimento de funcionários são as principais, com 5 indicadores cada.

A categoria Ciclo cruzado e colaboração com setores apresentou a subcategoria *Stakeholder* com 3 indicadores. A categoria Aplicação útil de materiais com a subcategoria reciclar apresenta 2 indicadores e a categoria Tributação e regulações apresenta um único indicador, de mesmo nome.

4.4.3.4 *Classificação dos indicadores pela obrigatoriedade de seu uso*

Com base nos critérios metodológicos definidos na seção 3.4.3.2, procedeu-se à classificação dos indicadores selecionados no conjunto de indicadores de circularidade em duas categorias: obrigatórios e optativos. A aplicação desses critérios aos conjuntos e categorias de indicadores, como etapa da proposta metodológica, permitiu identificar quais elementos são essenciais à avaliação da circularidade e quais podem ser utilizados de forma complementar, conforme o escopo da organização. O Quadro 4.18 apresenta o resultado dessa classificação. Essa classificação constitui um passo da proposta metodológica, orientando gestores a distinguir indicadores essenciais daqueles de uso complementar, reforçando o caráter estruturado da seleção.

Quadro 4.18 – Classificação dos indicadores do conjunto entre obrigatórios e optativos

Categoria	Subcategoria	Classificação	Justificativa
Variável	Material	Obrigatório	Subcategorias consideradas a base de recursos para a visão de economia circular
	Água	Obrigatório	
	Energia renovável	Obrigatório	
	Poluição	Optativo	Relaciona-se ao desempenho ambiental
Estender a vida útil dos produtos e suas peças	Durabilidade	Obrigatório	Subcategorias diretamente associadas à circularidade
	Reusar	Obrigatório	
	Recondicionar	Obrigatório	
	Remanufaturar	Obrigatório	
Aplicação útil dos materiais	Reciclagem	Obrigatório	Subcategoria diretamente associada à circularidade
Modelo de negócios	Empresa	Optativo	Indicam transformações organizacionais, mas não necessariamente circulares
	Envolvimento dos funcionários	Optativo	
	Mercado	Optativo	
Ciclo cruzado e colaboração entre setores	<i>Stakeholders</i>	Obrigatório	Representa articulações interorganizacionais para circularidade
Tributação e regulações	-	Optativo	Dependem do contexto jurídico e fiscal da organização; não aplicáveis universalmente

Fonte: Elaborada pela autora.

A categoria Modelo de Negócios possui indicadores em sua maioria Optativos. No entanto, com o viés de desenvolver na empresa uma política voltada para a economia circular, os indicadores Mudança cultural e Criação de empregos podem ser interpretados como obrigatórios. Esses indicadores relacionam-se à transformação organizacional para práticas circulares.

Para amparar a decisão de escolha dos indicadores, em continuidade à proposta metodológica, foram utilizadas algumas outras categorias antepostas para classificação dos sistemas de indicadores de circularidade. As categorias são Nível sistêmico, Estágios de ciclo de vida em conjunto com Mensurabilidade e a classificação é apresentada nos subitens a seguir.

4.4.3.5 Classificação dos indicadores pelo nível sistêmico

Os níveis sistêmicos representam uma abordagem estruturada para avaliar a economia circular, permitindo uma visão detalhada das práticas empresariais nos níveis “Nano” e “Micro”. A classificação nesses níveis possibilita a identificação de impactos e oportunidades de circularidade em componentes específicos e processos internos das organizações. Essa pers-

pectiva é fundamental para compreender como as empresas podem otimizar recursos e reduzir resíduos dentro de suas operações diretas.

Os indicadores no nível micro focam nas operações internas das empresas, avaliando eficiência de recursos, redução de resíduos, performance financeira, bem como o engajamento de *stakeholders*, a participação dos funcionários e o posicionamento da empresa no mercado. Esses indicadores são classificados como micro porque analisam diretamente as práticas operacionais e os processos internos, oferecendo uma visão detalhada sobre a eficiência e a circularidade dentro da própria organização. O Quadro 4.19 apresenta os resultados da análise dos indicadores de circularidade organizados de acordo com o nível micro.

Quadro 4.19 – Indicadores de nível sistêmico micro

Indicador	Sistema de indicadores	Descrição
WEI (Índice de eficiência hídrica)	<i>C2C Indicators, WCI</i>	Mede a eficiência no uso da água durante a produção
REI (Índice de energia renovável)	BCI, <i>C2C Indicators</i> , CBM-IS	Avalia o uso de energia renovável no processo produtivo
Redução de Custos	CBM-IS	Mede a redução de custos na produção e uso de materiais
Geração de Receita	CBM-IS	Avalia a vantagem competitiva e novas receitas geradas pela economia circular
Lucratividade	CBM-IS	Mede a rentabilidade financeira da empresa utilizando métricas como ROA e ROE
Investimento Circular	CBM-IS	Mede o volume de investimentos realizados em práticas de economia circular
Mudança Cultural	CBM-IS	Analisa a transformação cultural na organização para adotar práticas circulares
Justiça Social	<i>C2C Indicators</i>	Avalia as condições de trabalho e práticas de justiça social na cadeia produtiva
Produtividade do Trabalho (LP)	WCI	A produtividade do trabalho é medida pelas vendas da planta por funcionário
Criação de Empregos	CBM-IS	Quantifica o número de empregos gerados por atividades de economia circular
Renda Gerada	CBM-IS	Mede a renda gerada pelos empregos criados na economia circular
Participação dos Funcionários	CBM-IS	Avalia o nível de envolvimento dos funcionários nas práticas de economia circular
Estrutura dos Stakeholders	CBM-IS	Avalia as sinergias da empresa com a cadeia de suprimentos
Diversidade de Stakeholders	CBM-IS	Mapeia os stakeholders envolvidos na cadeia de valor circular
Envolvimento dos Stakeholders	CBM-IS	Analisa a participação de stakeholders na tomada de decisões relacionadas à economia circular
Valor Percebido pelo Mercado	CBM-IS	Analisa os benefícios percebidos pelo cliente em relação aos produtos circulares
Cliente	CBM-IS	Analisa o perfil do cliente e sua aceitação de produtos circulares
Comunicação	CBM-IS	Analisa a eficácia da comunicação da empresa sobre seus esforços em economia circular
Tributação e Regulações	CBM-IS	Avalia os incentivos fiscais e marcos regulatórios que favorecem a economia circular
CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>		

Fonte: Elaborada pela autora.

Cada um desses 19 indicadores contribui para a avaliação da circularidade ao medir aspectos específicos das operações empresariais, desde a eficiência no uso de recursos até o engajamento de *stakeholders*, a participação ativa dos funcionários e a percepção do mercado. Eles permanecem no nível micro porque seu foco está na execução e na eficácia das atividades empresariais internas, influenciando diretamente os processos operacionais e a cultura organizacional voltada à economia circular.

Os indicadores no nível nano concentram-se nos componentes e materiais, avaliando a

circularidade desde o *design* e fabricação até a recuperação. Abaixo, o Quadro 4.20 apresenta os 30 indicadores do nível nano, suas relações conceituais e práticas, além da justificativa para sua classificação como indicadores nano.

Quadro 4.20 – Indicadores de nível sistêmico nano

(continua)

Indicador	Sistema de indicadores	Descrição
LFI (<i>Linear Flow Index</i>)	APL, BCI, SPI, WCI	Mede a proporção de material que flui linearmente do uso de material virgem para resíduos não recuperáveis
MCI (<i>Material Circularity Indicator</i>)	APL, BCI, WCI	Mede o quanto os materiais circulam dentro do contexto da economia circular
Redução de Materiais na Fabricação	CBM-IS	Mede a redução de materiais no processo de produção material virgem para resíduos não recuperáveis
Redução de Materiais no Produto	CBM-IS	Avalia a redução no peso do produto final
Matérias-primas renováveis	CBM-IS	Mede a quantidade de materiais renováveis usados no produto
Recovery of Scarce Materials (IS)	MIS	Avalia a recuperação de materiais críticos com base na importância econômica e no risco de fornecimento
Closure of Material Cycles (IC)	MIS	Mede o grau de fechamento do ciclo de materiais comparando o valor de mercado das frações recicladas com o valor dos materiais originais, indicando a substituição eficaz de materiais primários por reciclados
Distribuição de Weibull	BWPE	Descreve o comportamento de falha de produtos ao longo do ciclo de vida
Função de recuperação de edifícios	BWPE	Avalia a recuperação de edifícios com base nas especificações de projeto e deterioração ao longo do tempo
Longevidade	CBM-IS	Avalia o aumento da vida útil do produto
Índice de Reconfiguração (RI)	SPI	Descreve a relação entre o número de possíveis reconfigurações e a complexidade da família de produtos e a complexidade da família de produtos
Índice de Variedade Funcional (FV)	SPI	Mede a relação entre o número de funcionalidades e a complexidade da família de produtos
Índice de Alcance Funcional (FR)	SPI	Indica a relação entre o alcance operacional fornecido pela família de produtos e sua complexidade
Índice de Reuso	BWPE, SPI	Avalia o reuso de componentes e materiais
Reuso no Processo de Produção	CBM-IS	Mede a quantidade de materiais reutilizados na cadeia de suprimentos
Reuso no Produto	CBM-IS	Mede a quantidade de materiais reutilizados no produto
Remanufatura	CBM-IS	Mede a quantidade de produtos remanufaturados
Proporção de conexões desmontáveis	BWPE	Determina a proporção de conexões desmontáveis em relação ao total de conexões no edifício
Uso de montagens pré-fabricadas	BWPE	Avalia o uso de montagens pré-fabricadas no edifício
Proporção de materiais sem acabamentos secundários	BWPE	Determina a proporção de materiais sem acabamentos secundários no edifício
Recondicionamento	CBM-IS	Mede a recuperação total de partes ou componentes do produto
MRS (<i>Material Reutilization Score</i>)	APL, C2C Indicators, CBM-IS, MIS	Mede a reutilização de materiais considerando reciclabilidade intrínseca e conteúdo reciclado

(conclusão)

Indicador	Sistema de indicadores	Descrição
Índice Potencial de Reciclagem	SPI	Mede o potencial de reciclagem de componentes dentro da família de produtos
Consumo de água	APL	Mede o volume de água consumido ao longo do ciclo de vida do produto
Pegada de Carbono	APL, BCI	Monitora as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida
Saúde do Material	BCI, BWPE, C2C Indicators, CBM-IS	Avalia a toxicidade dos materiais usados no produto
Avoided Environmental Burdens (IE)	MIS	Avalia os benefícios ambientais da reciclagem, focando nas frações recicladas que substituem diretamente os materiais virgens e ajudam a evitar os impactos ambientais da extração e produção de materiais primários
Depleção de recursos abióticos (ARD)	APL	Avalia a depleção de recursos abióticos, representada em equivalente de antimônio
Acidificação (AC)	APL	Mede o potencial de acidificação do ambiente
Material particulado (PM)	APL	Avalia o impacto da emissão de partículas finas no ar
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i>		CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.3.6 Classificação dos indicadores pelos estágios do ciclo de vida

O estudo apresentou uma categorização detalhada dos indicadores, associando-os diretamente aos diferentes estágios do ciclo de vida dos produtos e processos empresariais. Essa categorização integra a proposta metodológica, ao alinhar a escolha dos indicadores ao momento do ciclo de vida mais relevante para cada empresa. Essa análise é fundamental para identificar as oportunidades e os desafios da circularidade em cada fase da cadeia produtiva.

Os indicadores avaliados incluem tanto métricas quantitativas quanto qualitativas, o que permite uma visão holística do processo. O Quadro 4.21 apresenta os indicadores classificados em mais de um estágio de ciclo de vida.

Quadro 4.21 – Indicadores que envolvem mais de um estágio de ciclo de vida

Estágios do ciclo de vida	Indicador	Sistema de indicadores	Mensurabilidade
Ciclo de vida completo	Saúde do Material	BCI, BWPE, C2C Indicators, CBM-IS	Qualitativo e Quantitativo
Ciclo de vida completo	Investimento Circular	CBM-IS	Quantitativo
Ciclo de vida completo	Mudança Cultural	CBM-IS	Qualitativo
Ciclo de vida completo	Envolvimento de Stakeholders	CBM-IS	Qualitativo
Ciclo de vida completo	Tributação e Regulações	CBM-IS	Qualitativo
Extraí, Produzir e Recuperar	MCI (<i>Material Circularity Indicator</i>)	APL, BCI, WCI	Quantitativo
Extraí, Produzir e Recuperar	LFI (<i>Linear Flow Index</i>)	APL, BCI, SPI, WCI	Quantitativo
Extraí e Produzir	Redução de Materiais na Fabricação	CBM-IS	Quantitativo
Extraí e Produzir	Redução de Materiais no Produto	CBM-IS	Quantitativo
Extraí e Produzir	Pegada de Carbono	APL, BCI	Quantitativo
Produzir e Usar	Longevidade	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Usar	Índice de Reconfiguração (RI)	SPI	Quantitativo
Produzir e Usar	Índice de Variedade Funcional (FV)	SPI	Quantitativo
Produzir e Usar	Índice de Alcance Funcional (FR)	SPI	Quantitativo
Produzir e Usar	Redução de Custos	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Closure of Material Cycles (IC)	MIS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Reuso no Processo de Produção	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Reuso no Produto	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Remanufatura	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Proporção de conexões desmontáveis	BWPE	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Recondicionamento	CBM-IS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	MRS (<i>Material Reutilization Score</i>)	APL, C2C Indicators, CBM-IS, MIS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Avoided Environmental Burdens (IE)	MIS	Quantitativo
Produzir e Recuperar	Estrutura de Stakeholders	CBM-IS	Qualitativo
Usar e Recuperar	Função de recuperação de edifícios	MIS	Quantitativo
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i> C2C Indicators: <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i>		CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>	

Fonte: Elaborada pela autora.

Os indicadores como Saúde do Material, Investimento Circular, Mudança Cultural, Envolvimento de *Stakeholders* e Tributação e Regulações cobrem todo o ciclo de vida, pois se aplicam desde a concepção do produto até o fim de sua vida útil, proporcionando uma visão sistêmica da circularidade.

Os dois indicadores na categoria Extraí, Produzir e Recuperar avaliam desde a obten-

ção de matérias-primas até o retorno dos materiais ao ciclo produtivo. A combinação dessas três fases reflete a importância da rastreabilidade e do potencial de reuso desde a origem dos materiais até o encerramento do ciclo.

Os três indicadores classificados como Extrair e Produzir medem a eficiência no uso de recursos e o impacto ambiental no início do ciclo de vida, abordando a escolha de materiais e o *design* de produtos que já consideram o fim de vida útil.

Na classificação Produzir e Usar, os cinco indicadores acompanham a eficiência e a circularidade durante a fabricação e o uso do produto. São úteis para avaliar o desempenho do produto em termos de durabilidade, manutenção e potencial de reuso.

Na categoria Produzir e Recuperar, os nove indicadores avaliam a capacidade do produto de retornar ao ciclo produtivo após o uso, priorizando métricas de reciclabilidade, recuperação de valor e redução de resíduos.

Por fim, na classificação Usar e Recuperar, o indicador é voltado para o uso eficiente e o descarte responsável, garantindo que os produtos, ao fim de sua vida útil, possam ser recuperados de maneira eficaz.

Ressaltamos o indicador Saúde do Material por ser o único considerado qualitativo e quantitativo. Pois, o sistema de indicadores BCI apresenta o indicador como qualitativo, apenas para apontar se o produto possui substâncias tóxicas com base em listagem dessas substâncias tóxicas. Já os sistemas BWPE, C2C *Indicators*, CBM-IS quantificam essas substâncias no produto.

O Quadro 4.22 apresenta os indicadores classificados em um estágio do ciclo de vida.

Quadro 4.22 – Indicadores que envolvem apenas um estágio de ciclo de vida

Estágios do ciclo de vida	Indicador	Sistema de indicadores	Mensurabilidade
Produzir	Matérias-primas renováveis	CBM-IS	Quantitativo
Produzir	Uso de montagens pré-fabricadas	BWPE	Quantitativo
Produzir	Proporção de materiais sem acabamentos secundários	BWPE	Quantitativo
Produzir	WEI (Índice de eficiência hídrica)	C2C <i>Indicators</i> , WCI	Quantitativo
Produzir	REI (Índice energia renovável)	BCI, C2C <i>Indicators</i> , CBM-IS	Quantitativo
Produzir	Lucratividade	CBM-IS	Quantitativo
Produzir	Justiça Social	C2C <i>Indicators</i>	Qualitativo
Produzir	Produtividade do Trabalho (LP)	WCI	Quantitativo
Produzir	Criação de Empregos	CBM-IS	Quantitativo
Produzir	Renda Gerada	CBM-IS	Quantitativo
Produzir	Participação dos Funcionários	CBM-IS	Qualitativo
Usar	Distribuição de Weibull	BWPE	Quantitativo
Usar	Geração de Receita	CBM-IS	Quantitativo
Usar	Cliente	CBM-IS	Qualitativo
Usar	Valor Percebido pelo Mercado	CBM-IS	Qualitativo
Usar	Comunicação	CBM-IS	Qualitativo
Recuperar	Recovery of Scarce Materials (IS)	MIS	Quantitativo
Recuperar	Índice de Reuso	BWPE, SPI	Quantitativo
Recuperar	Índice Potencial de Reciclagem	SPI	Quantitativo
CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i> BWPE: <i>BIM-based Whole-life Performance Estimator</i> BCI: <i>Building Circularity Indicators</i>		C2C <i>Indicators</i> : <i>Cradle-to-Cradle Indicators</i> MIS: <i>Multidimensional Indicator Set</i> SPI: <i>Sustainability Performance Indicators</i> WCI: <i>Improved Water Circularity Index</i>	

Fonte: Elaborada pela autora.

Os onze indicadores em Produzir são específicos para o processo de fabricação e empresa, abordando eficiência de recursos, minimização de resíduos e adoção de práticas circulares na linha de produção e na organização. Os cinco indicadores na categoria Usar avaliam o desempenho dos produtos junto ao cliente.

Na categoria Recuperar, os três indicadores estão relacionados à fase de recuperação e reciclagem, essenciais para fechar o ciclo e reintroduzir materiais no processo produtivo.

Alguns indicadores possuem aplicabilidade flexível, adaptando-se a diferentes estágios do ciclo de vida conforme o escopo do estudo ou do produto analisado. Essa flexibilidade permite que esses indicadores sejam utilizados em análises específicas ou mais amplas, conforme a necessidade da organização. Assim, o Quadro 4.23 apresenta os cinco indicadores flexíveis com o escopo selecionado.

Quadro 4.23 – Indicadores que dependem do escopo para definição do estágio de ciclo de vida

Indicador	Sistema de indicadores	Mensurabilidade
Consumo de água	APL	Quantitativo
Depleção de recursos abióticos (ARD)	APL	Quantitativo
Acidificação (AC)	APL	Quantitativo
Material particulado (PM)	APL	Quantitativo
Diversidade de Stakeholders	CBM-IS	Qualitativo
APL: <i>Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level</i>		
CBM-IS: <i>Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability</i>		

Fonte: Elaborada pela autora.

A classificação dos indicadores segundo os estágios do ciclo de vida tem como objetivo alinhar as métricas de avaliação ao contexto específico de cada fase da cadeia produtiva. Essa categorização permite uma seleção mais precisa e eficaz dos indicadores, considerando as particularidades e desafios de cada estágio.

5 DISCUSSÕES

Este capítulo é dividido em duas seções. Primeiro, discutimos o portfólio de sistemas de indicadores de circularidade, considerando seus níveis sistêmicos e os estágios do ciclo de vida. Em seguida, analisamos os vínculos entre os sistemas de indicadores de circularidade e a sustentabilidade. Por fim, aprofundamos a discussão sobre como os indicadores analisados podem exemplificar a aplicação da proposta metodológica.

5.1 O PORTFÓLIO DE SISTEMAS DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE

Nesta seção, discutimos o portfólio de sistemas de indicadores de circularidade, que serviu como base para estruturar e exemplificar a proposta metodológica, considerando seus níveis sistêmicos, os estágios de ciclo de vida e os pilares da sustentabilidade.

5.1.1 A importância da separação dos níveis micro e nano

A EC está vinculada ao uso eficiente de recursos. Nessa nova lógica, os sistemas são projetados para circular recursos o máximo e pelo maior tempo possível. Quando Saidani et al. (2017) cunharam o termo nível nano, eles declararam que os indicadores de nível micro não abrangiam a complexidade de uma EC e as possibilidades de FdV. Além disso, Rincón-Moreno et al. (2021) apontam que as definições de ferramentas e critérios para medições de circularidade em nível de produto ainda estão ausentes. Essa visão também está presente no trabalho de Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017) e Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), que observam que muitos dos sistemas de indicadores de circularidade mostrados na literatura são direcionados principalmente para empresas, parques industriais, regiões ou nações. Em contraste, os resultados ilustrados pela Figura 28 apontam para a tendência crescente em sistemas de indicadores em nível de produto. No entanto, o contexto conceitual e a visão comum de uma EC ainda não reconhecem totalmente as diferenças entre circularidade em nível de produto e em nível de empresa.

As descobertas mostradas na Seção 4.3.5.1 sugerem que as visões atuais em nível micro são preenchidas com sistemas de indicadores voltados para a análise detalhada de produtos específicos. Os sistemas de indicadores como PCIP, L&C e RDI diferem consideravelmente de CEMS, MI, SIAS em termos de insumos necessários para realizar suas avaliações. Essa discrepância é fundamentada nas distinções claras entre os escopos investigados. O primeiro grupo (nano indicadores) depende de especificidades de materiais e componentes (FIGGE et al., 2018; FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016) e fornece resultados voltados para melhorar a qualidade do produto, *design* e recuperação de recursos (MESTRE; COOPER, 2017; SULTAN; LOU; MATIVENGA, 2017; STEINMANN; HUIJBREGTS; REIJNDERS, 2019). Por outro lado, o segundo grupo (indicadores de circularidade em nível de empresa) centra-se em benefícios ambientais e geração de valor, identificando estratégias proativas e preventivas de

gestão de resíduos (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017), ao mesmo tempo que permite medições diretas da importância de uma EC para as empresas (NUÑEZ-CACHO et al., 2018). Essa diferença de escopo pode ser notada em todo o portfólio deste estudo e influencia diretamente as metas, o público-alvo e os formatos de resultados de cada sistema de indicadores.

Sob tais circunstâncias, argumentamos que a divisão adicional entre esses níveis de circularidade é crucial no ritmo atual de desenvolvimento de estudos relacionados à EC. Conforme apontado por Lindgreen, Salomone e Reyes (2020), ao revisar os sistemas de indicadores de circularidade em nível micro, agrupar todas as atividades industriais sob o mesmo guarda-chuva para avaliar sua circularidade pode ser excessivamente generalizado e extenso. Nesse sentido, uma divisão adicional do nível micro reduziria a confusão em relação a uma visão muito ampla da circularidade em nível de empresa, que, sob o conceito atual, abrange todas as atividades e resultados dos negócios. Essa abordagem não apenas retrata melhor a atenção diferenciada dada a produtos e componentes (MESTRE; COOPER, 2017; VANEGAS et al., 2018) por empresas (AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017; BLOMSMA et al., 2019), mas também permite uma análise mais detalhada de processos específicos que são partes de modelos de negócios circulares. Portanto, ao colocar a circularidade no nível do produto sob os holofotes, os tomadores de decisão podem identificar as especificidades de diferentes bens desenvolvidos pela mesma empresa, o que poderia, por exemplo, destacar os resultados de mudanças estratégicas e inovadoras no *design* do produto (CAYZER; GRIFFITHS; BEGHETTO, 2017; FAVI et al., 2017). É importante ressaltar que essas mudanças conceituais não exerceriam nenhuma mudança na circularidade de nível micro, pois os níveis baixos estão intrinsecamente presentes nos níveis de circularidade superiores (HUAMAO; FENGQI, 2007).

Por fim, essa divisão entre circularidade de nível nano e micro também ajudaria em uma questão organizacional ao fornecer uma partição mais rigorosa dos abundantes indicadores de circularidade. Embora implique um resultado mais simplista dessa abordagem, os tomadores de decisão e acadêmicos poderiam se beneficiar de uma compartimentação mais direta e intuitiva durante o processo de seleção de indicadores, às vezes obscurecido pelos equívocos sobre as diferentes abordagens voltadas para produtos e empresas circulares. Essa distinção reforça a hipótese desta pesquisa, pois evidencia a necessidade de um processo metodológico estruturado que auxilie os tomadores de decisão na escolha de indicadores de circularidade adequados ao contexto empresarial.

5.1.2 Estágios de ciclo de vida e os níveis sistêmicos

Com base em nosso portfólio, a maioria dos sistemas de indicadores destaca o estágio do ciclo de vida Recuperar, que se concentra em estratégias de FdV. Proporcionalmente, os sistemas de indicadores de nível nano se concentram mais em estratégias de FdV do que sistemas de indicadores de nível micro, pois visam facilitar um fluxo eficaz de materiais, garantindo que seu maior valor seja extraído ao longo da extensão da vida útil do produto (ALAMEREW; BRISSAUD, 2019). Nesse contexto, os sistemas de indicadores nano investigados são dire-

cionados à reciclagem, reforma, recondicionamento, reaproveitamento, reutilização e outras estratégias circulares. No entanto, seu foco principal é a recirculação de recursos, enquanto poucos sistemas de indicadores fornecem mais informações sobre os impactos e repercussões de tais estratégias. Esses resultados convergem com o trabalho de Corona et al. (2019), Linder, Sarasini e Loon (2017), que identificaram anteriormente a mesma tendência em grupos de indicadores de circularidade.

Esses resultados também confirmam que o conceito de indicadores de nano circularidade ainda não está bem definido (RINCÓN-MORENO et al., 2021). A denotação de nível nano introduzida por Saidani et al. (2017) descreve-a como “a circularidade de produtos, componentes e materiais [...] ao longo de todo o seu ciclo de vida”, sugerindo a novidade deste conceito. Argumentamos que a divisão entre sistemas de indicadores e indicadores de nível nano e micro beneficiaria mais esta área científica ao expor ainda mais diferentes tendências relacionadas a produtos e empresas. No entanto, nossa análise também mostra que a atenção dada à circularidade de nível de produto não abrange todo o ciclo de vida do produto, concentrando-se em estágios específicos do ciclo de vida.

A maioria dos sistemas de indicadores de nível micro concentra-se no estágio do ciclo de vida Produzir. Embora as empresas não trabalhem apenas na produção de bens, nossos resultados enfatizam a importância dada a esta parte das cadeias de suprimentos na criação de indicadores de circularidade. Como a avaliação da circularidade de nível micro concentra-se intrinsecamente em todos os estágios e procedimentos dos processos de produção (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020), ela também envolve fases anteriores à fabricação física dos bens. Como o *design* de um produto influencia diretamente o resto do seu ciclo de vida (CAYZER; GRIFFITHS; BEGHETTO, 2017; MESTRE; COOPER, 2017), propomos que indicadores de circularidade de nível micro podem ser usados para analisar e comparar as pontuações de circularidade de diferentes opções de *design*. Portanto, a alta frequência do estágio do ciclo de vida Produzir em nossos resultados representa uma necessidade de indicadores mais abrangentes para entender as compensações de circularidade que tais mudanças nas fases de *design* e produção podem resultar.

Para sistemas de indicadores de nível micro, estratégias de FdV (Recuperar) aparecem no mesmo número de sistemas de indicadores que o estágio do ciclo de vida Produzir. Os sistemas de indicadores incluem várias abordagens de FdV: como reutilização/revenda (por exemplo, Veleva, Bodkin e Todorova (2017), reparo (por exemplo, Nuñez-Cacho et al. (2018)), remanufatura (por exemplo, Golinska et al. (2015)) e reciclagem (por exemplo, Giacomelli, Kozamernik e Lah (2018)). Também identificamos que Recuperar é resultado da legislação de resíduos em vários países. Tais disposições legais indicam que as empresas têm responsabilidade compartilhada pelos ciclos de vida dos produtos (OLIVEIRA; LUNA; CAMPOS, 2019) ou até mesmo estenderam a responsabilidade (ALAMEREW; BRISSAUD, 2019), tornando as empresas responsáveis pelo monitoramento de seus produtos pós-consumo. Esse cenário reforça a relevância de uma proposta metodológica que permita selecionar indicadores capazes de refletir essas responsabilidades ampliadas das empresas. Também é importante ressaltar que

as diretivas de hierarquia de gerenciamento de resíduos na Europa (UNION, 2008), por exemplo, são mais antigas do que os planos de ação de EC (EC, 2015), sugerindo o uso potencial de mais indicadores no estágio do ciclo de vida Recuperar do que em Extrair e Usar.

Cada sistema de indicadores foi estabelecido para considerar aspectos específicos de sistemas circulares ou mesmo estratégias específicas, como eDiM (VANEGAS et al., 2018) e RPI (PARK; CHERTOW, 2014). Ao definir indicadores adequados e avaliar processos de fabricação, as empresas podem ter como objetivo desenvolver produtos circulares por meio de estratégias de EC (NIERO; KALBAR, 2019), redesenhar produtos para favorecer FdV e ciclos fechados (FAVI et al., 2017) ou até mesmo mudar perspectivas e buscar maneiras diferentes de resolver as necessidades do cliente, como migrar para modelos de Produto como Serviço ou digitalizar serviços (LÜDEKE-FREUND; GOLD; BOCKEN, 2019). Portanto, para sua implementação bem-sucedida, é preciso considerar as particularidades e desvantagens de cada abordagem.

Os sistemas de indicadores de nível nano são direcionados principalmente para recuperação de materiais e estratégias de ciclo de vida completo. Tais descobertas indicam o foco dado por corporações e acadêmicos a práticas que visam fechar ciclos e avaliar os impactos da fabricação de um produto por meio da perspectiva do ciclo de vida. Os sistemas de indicadores micro também mostram uma predisposição para avaliar a circularidade geral de uma empresa por meio desse mesmo ponto de vista. No entanto, os sistemas de indicadores de nível nano e micro focados nos estágios Extrair e Usar estão espalhados por outras alternativas. Por exemplo, apenas um sistema de indicadores nano (QC) foca na extração de materiais (Extrair) enquanto ainda aborda os estágios Produzir e Recuperar.

Considerando todos os 58 sistemas de indicadores do portfólio, nossas descobertas mostram que quase metade deles promove a avaliação da circularidade ao longo do ciclo de vida (Apêndice A). Esses resultados mostram a preocupação de empresas e acadêmicos em rastrear e avaliar as repercussões sistêmicas dos processos de fabricação, o que indica uma tentativa de se afastar de uma lógica direcionada à produção e focar no pensamento sistemático sobre opções de FdV e emprego de recursos. No entanto, a diversidade de abordagens confirma a dificuldade de comparabilidade entre sistemas, o que sustenta a necessidade da proposta metodológica consolidada apresentada nesta tese para apoiar a seleção de indicadores.

5.1.3 Os três pilares da sustentabilidade pelo viés de sistemas de indicadores de circularidade

Indicadores são desenvolvidos para simplificar informações e fornecer ferramentas de melhoria de desempenho (SAIDANI et al., 2019). Vários autores indicam que práticas circulares e potencial fechamento de ciclo devem ser avaliados por meio de uma abordagem multilateral para evitar compensações (GEISSDOERFER et al., 2017; INGHELS et al., 2019) e, em última análise, promover a compreensão abrangente das repercussões do sistema.

As descobertas ilustradas pela Figura 27 indicam que os sistemas de indicadores de

circularidade atuais têm uma forte relação com os aspectos ambientais, seguidos pelas avaliações econômicas e pelos traços sociais dos sistemas analisados. Tais resultados corroboram a visão de que uma EC é impulsionada por mercados e governos dispostos a fazer a transição da economia atual para um sistema menos impactante ambientalmente, mas economicamente lucrativo (GHOSH; AGAMUTHU, 2018). No entanto, o lado social de uma EC ainda recebe atenção insuficiente (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016), traduzido aqui como a baixa recorrência de sistemas de indicadores vinculados a este pilar.

Os tópicos a seguir oferecem uma análise mais profunda da interface entre os sistemas de indicadores de circularidade e cada pilar de sustentabilidade. Além disso, o último tópico fornece *insights* sobre os sistemas de indicadores equipados para fornecer resultados de acordo com todos os três pilares de sustentabilidade.

5.1.3.1 *Pilar ambiental*

O pilar ambiental foi coberto pela maioria dos sistemas de indicadores avaliados. Vale ressaltar que nossa análise foi baseada em sistemas que tratam de aspectos ambientais (por exemplo, materiais, componentes, energia, água, etc.). Portanto, sistemas de indicadores que destacam a reinserção de materiais ou componentes no sistema foram agrupados no pilar ambiental. Nessas circunstâncias, corroboramos com Corona et al. (2019) ao reafirmar que a maioria dos sistemas de indicadores de circularidade (por exemplo, REAPro, MESCS, CEI, CEV, etc.) foca na recirculação de materiais e eficiência de recursos, não sendo capaz de retratar a realidade complexa e possíveis *trade-offs* de sistemas circulares. A falta de informações sobre os processos de cálculo de certos sistemas de indicadores também é alarmante. Por exemplo, de acordo com (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020), o EOLi não demonstra como o impacto ambiental e a quantidade de emissões da reciclagem e remanufatura são considerados. Apenas alguns sistemas de indicadores são equipados para demonstrar o desempenho ambiental real de sistemas circulares (por exemplo, PR-MCDT, ZWP, APL).

Harris, Martin e Diener (2021) descrevem essa deficiência como uma busca por “circularidade pela circularidade”. Em alinhamento com os autores acima mencionados e corroborando Corona et al. (2019) e Linder, Sarasini e Loon (2017), destacamos o foco excessivo dado à recirculação de recursos em contraste com a avaliação de impactos ambientais pelos sistemas de indicadores de circularidade. Embora a reinserção de materiais e recursos possa ser insumos importantes para tomadores de decisão envolvidos em modelos de negócios circulares (MANNINEN et al., 2018), para preencher essa lacuna, apoiamos o uso de métodos robustos de contabilidade ambiental para a avaliação de sistemas circulares em paralelo com o uso de indicadores de circularidade. Tal integração é coerente com os objetivos desta pesquisa, que busca consolidar uma proposta metodológica para apoiar escolhas de indicadores que considerem os *trade-offs* ambientais. Além disso, essas limitações reforçam a hipótese desta tese, ao evidenciar que a ausência de integração entre diferentes metodologias dificulta a seleção de indicadores alinhados aos objetivos estratégicos das empresas. A proposta metodológica aqui

consolidada se apresenta, portanto, como um processo estruturado capaz de enfrentar essa lacuna. Exemplos de metodologias recomendadas são ACV (JUNIOR et al., 2020), AFM (HAAS et al., 2015) e Análise Emergética (SANTAGATA et al., 2020).

5.1.3.2 *Pilar econômico*

Embora considerado principalmente em combinação com a dimensão ambiental, o pilar econômico foi o segundo pilar de sustentabilidade mais coberto. Esses sistemas de indicadores abordaram amplamente os fluxos de recursos em termos de seu valor monetário. O único sistema estritamente relacionado às dimensões econômicas da sustentabilidade foi o PCM. Seus autores recomendam usar a relação entre o valor econômico recirculado e o valor total do produto como uma métrica de circularidade, usando os custos da cadeia de valor como estimadores (LINDER; SARASINI; LOON, 2017). Este procedimento pode inicialmente auxiliar as partes interessadas no desenvolvimento e ajuste das estratégias de novos modelos de negócios circulares (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016); no entanto, ainda carece da abrangência necessária para avaliar sistemas circulares (GEISSDOERFER et al., 2017).

A combinação comum de indicadores econômicos com abordagens ambientais e sociais sugere uma alternativa a tal limitação. Por exemplo, sistemas de indicadores como EER, eDiM, PRDI e RPI foram desenvolvidos para traduzir os ganhos econômicos da recirculação de materiais por meio de estratégias de EC, como reciclagem e remanufatura. Por outro lado, CC, EOli, MI e outros sistemas de indicadores focam no preço dos produtos ou na estratégia de EC aplicada. De qualquer forma, a avaliação econômica de sistemas circulares está no cerne da transição para uma EC, uma vez que as empresas mantêm o lucro como seu principal objetivo. Com base em nossa análise e em alinhamento com o trabalho de Lindgreen, Salomone e Reyes (2020) e Niero e Kalbar (2019), argumentamos que as análises econômicas são de importância imperativa para uma EC. No entanto, elas não cobrem o desempenho de sustentabilidade do sistema circular. Uma análise superior poderia fornecer resultados com base na integração de sistemas de indicadores e métodos de circularidade econômica capazes de abordar os traços ambientais e sociais de um sistema. Esse ponto ressalta que a proposta metodológica aqui desenvolvida pode orientar a seleção de indicadores que ampliem a análise econômica, sem perder de vista os demais pilares da sustentabilidade. Ao mesmo tempo, essa constatação reforça a hipótese desta tese, pois evidencia que um processo estruturado de apoio à decisão — como o proposto — facilita a identificação de indicadores econômicos que estejam alinhados aos objetivos estratégicos e integrados às demais dimensões da sustentabilidade.

5.1.3.3 *Pilar social*

A dimensão social é a menos abordada pelos indicadores em nosso portfólio. Conforme mostrado na Figura 27, nenhum indicador foi particularmente desenvolvido visando esse pilar. As repercussões sociais dos sistemas circulares foram abordadas apenas em combina-

ção com indicadores econômicos e ambientais. Esses resultados endossam o trabalho de Lee (2020), que destaca a escassez de sistemas de medição de desempenho social, e o estudo de Padilla-Rivera, Russo-Garrido e Merveille (2020), que afirma que ainda não há consenso sobre como analisar as questões sociais relacionadas aos sistemas circulares de forma abrangente. Além disso, nossa revisão também corrobora esses autores em relação aos aspectos sociais mais comuns analisados (ou seja, emprego, saúde e segurança, salário).

O foco claro nas características econômicas e ambientais de uma EC demonstra que os sistemas de indicadores desenvolvidos ainda não chegaram a um consenso em relação à análise social dos sistemas circulares (BLOMSMA; BRENNAN, 2017; KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020). Padilla-Rivera, Russo-Garrido e Merveille (2020) apontam para o uso da ASCV como uma forma de preencher essa lacuna. No entanto, a ASCV ainda está em fase de desenvolvimento, com muitas dificuldades metodológicas ainda a serem resolvidas por acadêmicos e profissionais (PETTI; SERRELI; CESARE, 2018). Assim, embora o consenso ainda não tenha sido encontrado, a inclusão de aspectos sociais em sistemas de indicadores de circularidade é uma abordagem bem-vinda para esse campo científico. Mesmo que o pilar social muitas vezes não seja o alvo principal, todo sistema de produto invariavelmente interage com ele (REINALES; ZAMBRANA-VASQUEZ; SAEZ-DE-GUINOA, 2020) e, portanto, também deve ser considerado em avaliações sobre mudanças sistêmicas, como as propostas por uma EC. A inclusão desse pilar na proposta metodológica é fundamental para que a seleção de indicadores não reproduza a lacuna identificada na literatura. Esse resultado também reforça a hipótese desta tese, ao mostrar que um processo metodológico estruturado é capaz de apoiar a escolha de indicadores mais completos, contemplando de forma equilibrada os três pilares da sustentabilidade.

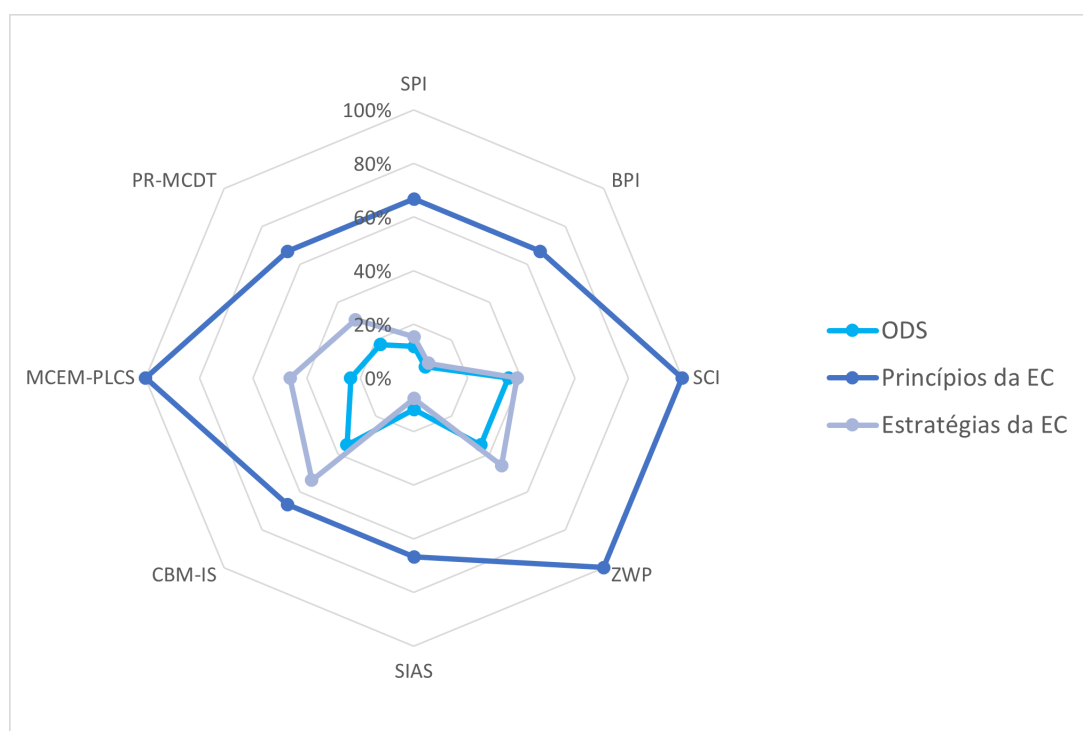
5.1.4 Avaliações de circularidade baseadas nos três pilares da sustentabilidade

Apenas oito sistemas de indicadores forneceram um procedimento construído sobre os três pilares da sustentabilidade. Apesar da similaridade inicial, as abordagens diferem consideravelmente. Dois sistemas de indicadores são desenvolvidos com base em ferramentas de ciclo de vida e decisão multicritério (PR-MCDT e MCEM-PLCS) e aplicam indicadores relacionados às categorias de impacto usadas na ACV. O SCI segue os indicadores da GRI. O SPI foca em fluxos de materiais, reutilização, reconfiguração e desempenho funcional. O BPI, o CBM-IS, o SIAS, o ZWP são formados por um grupo de indicadores propostos com base em revisões de literatura, suposições e monitoramento no local. Essas diferenças ilustram a pluralidade encontrada em sistemas de indicadores de circularidade, mesmo num grupo menor de sistemas focados em sustentabilidade, e reforçam a necessidade de um procedimento metodológico capaz de organizar tais divergências e apoiar escolhas mais consistentes.

Alguns deles foram desenvolvidos para auxiliar em setores específicos (BPI, ZWP), alguns são holísticos o suficiente para dar suporte a avaliações gerais (PR-MCDT, MCEM-PLCS) e outros, conforme apontado por Veleva, Bodkin e Todorova (2017), fornecem um ponto de par-

tida para as empresas desenvolverem suas estratégias de medição específicas do setor/empresa. A variedade de abordagens e “subindicadores” encontrados para esses sistemas de indicadores apontam para as divergências encontradas na encruzilhada entre sustentabilidade e EC (GEISS-DOERFER et al., 2017; ROSSI et al., 2020). A Figura 33 apresenta algumas dessas divergências entre os oito sistemas de indicadores de circularidade.

Figura 33 – Resumo dos resultados das estratégias, princípios da EC e ODS.



Fonte: Elaborada pela autora

5.1.5 Os sistemas de indicadores de circularidade têm objetivos diferentes

Analisando os oito sistemas de indicadores de circularidade, percebemos que alguns sistemas não são facilmente compreensíveis. Eles não esclarecem o que medem ou como realizar as medições. Assim, não fornecem procedimentos de cálculo detalhados ou exemplos, dificultando sua compreensão e aplicação. Fica claro que ao utilizar métodos e ferramentas existentes, os artigos não se aprofundam no que será medido. A dificuldade é mais significativa no MCEM-PLCS, pois incorpora o método ACV, e o indicador de impacto EoL, entre outros, sem dar detalhes de sua operação ou critérios a serem considerados por esses métodos. O MCEM-PLCS é o único conjunto de indicadores compostos a sugerir ACV. Esse método complexo é custoso e requer dados detalhados, recursos e treinamento (GOLINSKA et al., 2015). Portanto, nem todos os empreendedores podem implementar esse método.

Três dos oito sistemas de indicadores são indicadores quantitativos únicos, mas a maioria dos sistemas de indicadores de circularidade são indicadores multifocais, o que significa que

eles consideram várias estratégias de EC simultaneamente (JEROME et al., 2022). Em geral, os indicadores quantitativos únicos capturam uma parte menor do sistema de produto/produção e ignoram a estratégia de negócios, enquanto os indicadores multifocais consideram o sistema de produto/produção de forma mais abrangente. Por exemplo, todos os indicadores quantitativos únicos têm como alvo a reciclagem, enquanto a maioria das diretrizes analíticas e o conjunto de indicadores compostos abordam várias estratégias de EC. Isso significa que parte dos sistemas de indicadores mede uma parte limitada do sistema de produto e, portanto, perde mudanças que ocorrem fora de seu escopo (JEROME et al., 2022). A estratégia de EC mais comum é a Reciclagem, que é o foco dos indicadores quantitativos individuais e também é abordada por diretrizes analíticas e pelo sistema de indicadores. Esse achado é coerente com nossa hipótese de que uma ferramenta metodológica pode auxiliar as empresas a identificar estratégias e indicadores além da reciclagem, favorecendo escolhas mais alinhadas aos seus objetivos estratégicos.

A maioria dos sistemas de indicadores de circularidade foi projetada para ciclos técnicos e materiais de fontes não renováveis. No entanto, a demanda por alimentos está aumentando em todo o mundo, e a agricultura tem uso intenso de recursos (ROCCHI et al., 2021). Portanto, o ciclo biológico pode ser um campo perfeito de experimentação para uma nova maneira de medir a EC. O ciclo biológico pode ser um terreno fértil para testar e implementar ações regenerativas, de otimização e de ciclos (FASSIO; TECCO, 2019), com uma contribuição relevante para os ODS 3, 6, 7, 8, 12 e 15.

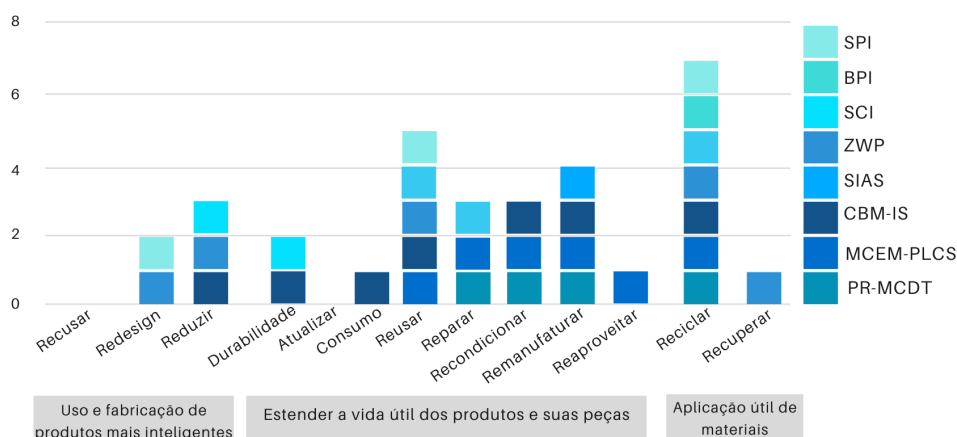
Nos ciclos biológicos, os materiais podem ser restaurados diretamente para a biosfera. Medir o ciclo biológico permite que a EC seja preventiva e ativa na reparação de danos anteriores (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017). Assim, os sistemas de indicadores do ciclo biológico se aliam ao primeiro princípio da EC, preservando e aprimorando o capital natural. O que parece claro é a necessidade de maior integração entre os sistemas de indicadores de circularidade e o ciclo biológico dentro dos ciclos de produção e consumo, bem como entre as perspectivas de curto e longo prazo, ou seja, entre o crescimento econômico e as metas ambientais e sociais (FASSIO; TECCO, 2019).

5.1.6 Pesos diferentes para estratégias de EC

Os resultados destacam que a principal estratégia de EC é a Reciclagem, seguida por Reuso e Remanufatura, como mostra a Figura 34. Os resultados estão alinhados com estudos anteriores, como Panchal, Singh e Diwan (2021); Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) e Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016).

A ênfase em Reciclar está de acordo com os estudos de Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), Kristensen e Mosgaard (2020), Morsetto (2020) e Jerome et al. (2022). A reciclagem é uma estratégia bem conhecida na gestão de resíduos e foi adicionada como uma estratégia para EC (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020). No entanto, em EC, a reciclagem representa o ciclo mais externo (EMF; GRANTA, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016) como a opção menos sustentável em EC. Além disso, Morsetto (2020) concluiu que a Reciclagem não

Figura 34 – Os oito sistemas de indicadores categorizados pelas estratégias de EC.



Fonte: Elaborada pela autora

promove necessariamente uma EC, pois as atividades de reciclagem são intensivas em energia, destroem a integridade e o valor de mercado dos produtos, degradam a qualidade dos materiais e não ajudam os produtos a permanecerem na economia. Além disso, a Reciclagem tem pouca influência na produção e no consumo (POTTING et al., 2017).

Todos os sistemas de indicadores têm origem acadêmica e, ainda assim, priorizaram estratégias de menor circularidade como Reciclar, mesmo existindo a possibilidade de abranger o escopo. Por outro lado, os sistemas de indicadores mostram uma divergência significativa em termos de estratégias de EC que têm em foco e os processos que capturam. Uma primeira observação é que nenhum dos sistemas de indicadores selecionados consegue monitorar os benefícios relacionados a todas as estratégias de EC. Em particular, nenhum deles consegue capturar Recusar e Atualizar.

Recusar e Atualizar podem exigir uma mudança significativa no produto ou empresa; por esse motivo, Recusar e Atualizar estão intimamente conectados ao *design* (MORSELETTTO, 2020). Conforme previsto por Potting et al. (2017), Recusar envolve “tornar o produto redundante, abandonar sua função ou oferecer a mesma função com um produto radicalmente diferente”; Recusar também pode se estender ao uso de certos materiais ou processos de produção (MORSELETTTO, 2020), e Atualizar envolveria estender o ciclo de uso existente agregando valor ou aprimorando a função de um produto que não costuma envolver desmontagem. Este benefício específico da EC, fomentado por pressões políticas que visam desencorajar a obsolescência planejada, mas também apoiado por estratégias de ecodesign, possibilitadas por uma gestão eficaz do fluxo reverso e altamente influenciadas pelo comportamento do cliente, foi negligenciado até agora nos estudos considerados (ELIA; GNONI; TORNESE, 2017).

Ambas as estratégias de EC dizem respeito a conceitos de negócios mais inteligentes

que promovem o desacoplamento de recursos (MORSELETTTO, 2020). Essa estratégia requer uma mudança em direção a uma reinvenção “radical” de produtos (POTTING et al., 2017; KRAVCHENKO; PIGOSSO; MCALOONE, 2020). É por isso que Recusar e Atualizar são tão desafiadores de medir e avaliar, pois entra em um dilema de que produtos e indústrias não circulares poderão ser descontinuados; são exemplos de produtos de uso único, canudos descartáveis, embalagens secundárias inúteis ou mesmo alguns produtos que podem ser substituídos por produtos não materiais (por exemplo, digitais).

Nossos resultados apresentaram que apenas um sistema, dos oito sistemas de indicadores da seleção, capturou a estratégia de EC Reaproveitar. Reaproveitar é o uso de produtos descartados ou suas partes em um novo produto com uma função diferente (POTTING et al., 2017). Também denota a reutilização de um produto para uma finalidade alternativa (MORSELETTTO, 2020). Para Morseletto (2020), cinco questões dificultam o monitoramento da estratégia Reaproveitar: (1) produtos abrangentes diferentes podem receber muitas peças e componentes no Reaproveitar; (2) depende da criatividade do *designer*; (3) produção em pequena escala; (4) o Reaproveitar não está conectado com a empresa que produz o produto/componentes; e (5) difícil rastreabilidade das peças. Com todas essas questões, os indicadores da estratégia Reaproveitar são frequentemente usados em uma pequena proporção.

Os sistemas de indicadores analisados fornecem uma boa visão geral da circularidade do produto e possíveis ciclos de vida múltiplos, mas não entram nessas medidas. Em alinhamento com os resultados de Saidani et al. (2017), nossos resultados mostraram que os métodos usados pelos sistemas de indicadores não abordam estratégias específicas de EC e carecem de orientação para *designers* de produtos. Vale ressaltar que cada estratégia de EC traz um mundo de medições possíveis, por exemplo, se o indicador se concentra em Reutilizar no primeiro ciclo de vida, ele pode se concentrar em Remanufaturar no segundo ciclo de vida e Reciclar no terceiro ciclo de vida. Além disso, uma abordagem de fluxo de circuito fechado estabelecida é um facilitador de indicadores (AYDIN; BADURDEEN, 2019; HAPUWATTE; SEEVERS; JAWAHIR, 2022). Os resultados de (MORSELETTTO, 2020) mostraram que múltiplos ciclos de vida podem levar a compensações, sinergias ou complementaridades. Por exemplo, Reciclar ou Recuperar podem ser minimizadas usando outras estratégias de EC (Reutilizar, Reparar, Remanufaturar, Recusar e Reduzir) (MORSELETTTO, 2020). Alguns métodos de avaliação múltipla estão sendo desenvolvidos, como a sustentabilidade do ciclo de vida baseada em métricas (HAPUWATTE; SEEVERS; JAWAHIR, 2022) e a Avaliação de Múltiplos Ciclos de Vida, baseada na ACV, mas cujas avaliações se concentram principalmente na remanufatura e reciclagem de produtos (SUHARIYANTO; WAHAB; RAHMAN, 2017). De uma perspectiva de múltiplos ciclos de vida, indicadores circulares podem ser usados para definir um roteiro para implementar a EC com sucesso. Esse cenário evidencia como a proposta metodológica aqui consolidada pode apoiar a seleção de indicadores capazes de capturar estratégias negligenciadas, ampliando o escopo de avaliação.

5.1.7 Os oito sistemas de indicadores e a relação com os ODS

Existe uma crescente atenção dada às ligações entre a EC e os ODS (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2023). Diferentes autores estipularam conjuntos de ODS principais abrangidos por uma EC (FASSIO; TECCO, 2019; RODRIGUEZ-ANTON et al., 2019; SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019). Embora as listas de ODS alvo variem de acordo com cada publicação, todas apontam para a EC como uma estratégia valiosa para contribuir com os ODS. Portanto, uma compreensão mais profunda das ligações entre indicadores de circularidade e pilares de sustentabilidade é benéfica não apenas para a EC, mas também para criar caminhos assertivos em direção aos ODS.

Os resultados da análise dos sistemas de indicadores mostram uma relação entre os princípios da EC e os ODS. Nesse sentido, foi demonstrado que alguns sistemas de indicadores de circularidade são altamente correlacionados com alguns ODS. Consequentemente, se as empresas e os tomadores de decisão seguissem esses sistemas de indicadores, os ODS poderiam atingir melhores valores. Especificamente, medidas voltadas para os ODS 7, 8, 12 e 15 foram pontos centrais nos sistemas de indicadores. Esse resultado está de acordo com Belmonte-Ureña et al. (2021) de que a EC tem um foco tendencioso em relação aos ODS 7, 8, 9, 11 e 12.

O ODS 3 destaca a busca por uma vida saudável e promove o bem-estar para todas e todos. Nossos resultados mostram que não há um foco no ODS 3, o que corrobora as pesquisas de Belmonte-Ureña et al. (2021) e Schroeder, Anggraeni e Weber (2019). Ademais, (SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019) afirma que a maioria das metas sob ODS 3 não tem relação com práticas de EC, mas implementar práticas de EC sob o ODS 6 (Água potável e Saneamento) e o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) contribuirá significativamente para o progresso em saúde e bem-estar.

O ODS 7 busca garantir a disponibilidade de energia confiável e renovável para todos. Da mesma forma, a EC incentiva a transição para um modelo baseado em capital econômico, natural e social apoiado por energia renovável (EMF; GRANTA, 2015). Portanto, a maioria dos oito sistemas de indicadores de circularidade se concentra no ODS 7. Ao desvincular a sociedade dos combustíveis fósseis, a EC endossa o uso generalizado de fontes de energia para reduzir a poluição. Além disso, os sistemas de indicadores do ciclo biológico devem fazer parte do foco do ODS 7. Ao abordar a geração de resíduos orgânicos e práticas de conversão de resíduos em energia, como a produção de energia por meio de biomassa, a EC promove o uso de energias renováveis (PADILLA-RIVERA; RUSSO-GARRIDO; MERVEILLE, 2020).

O ODS 8 visa promover o crescimento econômico ao mesmo tempo em que fornece empregos e trabalho justo para todos. A importância de medir a EC com foco no ODS 8 é a previsão de que a transição para a EC exigirá que os trabalhadores sejam treinados de forma eficiente e entendam os princípios e paradigmas de uma empresa circular. Além disso, o possível surgimento de novas tecnologias requer diferentes habilidades (KIRCHHERR; PISCICELLI, 2019), influenciando potencialmente o mercado de trabalho.

O ODS 9 que lida com inovação e infraestrutura. Na pesquisa de Belmonte-Ureña et

al. (2021) e Panchal, Singh e Diwan (2021), EC tem grande contribuição com o ODS 9. No entanto, nossa pesquisa apresenta que os sistemas de indicadores de circularidade que englobam a sustentabilidade não focam no ODS 9. Vale ressaltar que atingir as metas do ODS 9, pode trazer um aprimoramento para a EC (SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019).

O ODS 12 pode ser um dos objetivos mais alinhados com as diretrizes da EC. Nossos resultados são consistentes com Boluk, Cavaliere e Higgins-Desbiolles (2019) e Belmonte-Ureña et al. (2021) de que a EC é altamente relevante para o ODS 12. As estratégias de EC são ativos valiosos para o ODS 12 (PRIYADARSHINI; ABHILASH, 2020) e, para Belmonte-Ureña et al. (2021), seu relacionamento está relacionado a palavras-chave como “gestão de resíduos”, “uso de recursos” e “cadeia de suprimentos”. Além disso, o uso excessivo de recursos, energia e geração de resíduos pode ser minimizado pelo acompanhamento de empresas a partir dos indicadores de circularidade, o que indica uma convergência com os princípios da EC de aumentar o capital natural, otimizando o uso produtivo de recursos por meio da circulação de produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade e eficácia do sistema (EMF; GRANTA, 2015). Assim, a proposta metodológica se mostra relevante por permitir selecionar indicadores com maior potencial de conexão direta com os ODS, apoiando decisões empresariais mais integradas.

O núcleo da EC e do desenvolvimento sustentável são os recursos. A taxa de esgotamento florestal é alarmante (D’ANNUNZIO et al., 2015), o que trouxe incerteza ao fornecimento de recursos. Além disso, projeções futuras apresentam que haverá uma competição crescente por recursos naturais, particularmente água e terra (SARTAL; OZCELIK; RODRÍGUEZ, 2020). Esses desafios exigem uma mudança urgente dos modelos lineares atuais para modelos circulares que otimizem o desperdício como um recurso (primeiro princípio) e estendam a vida útil de produtos, peças e componentes (segundo princípio), ao mesmo tempo em que reduzem o consumo de água e outros recursos. Para manter os recursos do planeta, é necessário manter as florestas, reduzir a desertificação e reverter a degradação da terra. Portanto, a vida terrestre (ODS 15) é considerada na maioria dos oito sistemas de indicadores de circularidade. Assim, busca-se garantir os recursos básicos para o sistema de produção.

Ao mesmo tempo que o ODS 15 aparece na maioria dos sistemas de indicadores de circularidade que abrangem a sustentabilidade, nossa pesquisa mostra a lacuna existente nos sistemas de indicadores de circularidade relacionados à água potável e saneamento (ODS 6), embora ele apareça com uma forte ligação com a EC (SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019; BELMONTE-UREÑA et al., 2021). Além disso, os resultados de Panchal, Singh e Diwan (2021) mostram que o ODS 6 tem uma forte relação com os sistemas de indicadores de circularidade, mas que não são muito trabalhados no nível micro. Esse resultado é reforçado quando visualizamos os resultados dos Princípios da EC, pois o princípio de preservar e aprimorar o capital natural teve a menor representação pelos sistemas de indicadores de circularidade.

A água é um recurso finito consumido principalmente pela agricultura e indústria, que pode ser economizado, reutilizado ou tratado pelo consumidor. Portanto, o reúso da água fecha o ciclo entre o abastecimento de água e o saneamento e, além disso, fornece uma fonte alter-

nativa de água. Numa EC, as águas residuais tratadas podem repor fontes de água degradadas, garantir suprimentos suficientes e reduzir a lacuna de demanda e disponibilidade (NAIDOO et al., 2021). Portanto, os sistemas de indicadores de circularidade devem abranger tanto o uso eficiente da água quanto seu tratamento pós-uso.

Existem várias possibilidades e tecnologias para tratamento de água, mas são pouco aplicadas. As águas residuais não tratadas também contribuem para as emissões de GEE (NAIDOO et al., 2021). Além disso, o saneamento evita que os resíduos sejam descartados em fontes de água, contaminando-as (MALAR, 2021). Se bem monitoradas e com novas tecnologias, as águas residuais podem até trazer um retorno energético, ajudando a atingir o Objetivo 7 (NAIDOO et al., 2021). Este é um indicador das interdependências entre os ODS, destacando a necessidade de maior cooperação entre os setores, e é o cerne do desenvolvimento sustentável (MENSAH, 2019).

Os ODS devem ser fortemente interdependentes e nunca devem ser tratados isoladamente. No entanto, há uma falta de concretude dos ODS, suas metas e indicadores (BOLUK; CAVALIERE; HIGGINS-DESBIOLLES, 2019; BELMONTE-UREÑA et al., 2021). Portanto, mesmo para a implementação da EC, não é fácil estabelecer os ODS correspondentes. Além disso, a Agenda de Desenvolvimento Sustentável propõe uma colaboração entre estados, empresas, especialistas e sociedade civil (BELMONTE-UREÑA et al., 2021). No entanto, com base em nossos resultados, a perspectiva da EC é estruturada para atrair empresas.

5.1.8 Os três pilares da sustentabilidade podem ser avaliados por meio de sistemas de indicadores de circularidade?

De acordo com os argumentos acima mencionados, concluímos que os sistemas de indicadores de circularidade que formam nosso portfólio carecem de robustez para fornecer avaliações de desempenho de sustentabilidade de forma abrangente. Ademais, as estratégias de EC em direção à sustentabilidade são definidas de forma ambígua (GIAMPIETRO, 2019), e não está claro como a EC lida com indústrias que não podem ser circulares (BELMONTE-UREÑA et al., 2021). Os sistemas de indicadores de circularidade são reflexos dessa relação vaga. Embora um pequeno grupo de sistemas esteja equipado para analisar todos os três pilares, eles normalmente se concentram em pilares específicos ou não são estruturados em torno de metodologias científicas sólidas.

Duas exceções podem ser feitas: PR-MCDT e MCEM-PLCS (ALAMEREW et al., 2020; ALAMEREW; BRISSAUD, 2019), que são desenvolvidos por meio da aplicação de ferramentas combinadas de ACV e multicritério, fornecendo fortes fundamentos científicos. No entanto, como a grande maioria dos sistemas de indicadores cobre apenas parcialmente os três pilares da sustentabilidade, recomendamos que os tomadores de decisão utilizem procedimentos metodológicos, como o consolidado nesta tese, para analisar cuidadosamente a vasta lista de indicadores de circularidade disponíveis e estejam atentos às fragilidades de cada abordagem ou os combinem com outros procedimentos para alcançar resultados mais substanciais e

detalhados.

É importante sublinhar que cada sistema de indicadores é criado para traduzir informações sobre circunstâncias específicas (PATTERSON; MCDONALD; HARDY, 2017). No entanto, como o escopo da maior parte do nosso portfólio era flexível em termos do setor industrial ao qual eles poderiam ser aplicados (Apêndice A), nos baseamos nas visões de Niero e Kalbar (2019) e argumentamos que o uso de uma metodologia robusta orientada à sustentabilidade em paralelo com os sistemas de indicadores de circularidade baseados na recirculação de materiais e eficiência de recursos, provaria ser uma estratégia mais abrangente. Essa abordagem permitiria avaliações mais completas ao longo do ciclo de vida. Acreditamos que métodos já bem estruturados e robustos, quando combinados com indicadores de circularidade, podem trazer resultados otimizados em comparação ao procedimento seguido pelos oito sistemas de indicadores no centro da Figura 27.

5.2 ORIENTAÇÃO PARA A APLICAÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA EM EMPRESAS

A seleção dos indicadores exemplificativos apresenta um recorte dos principais sistemas de indicadores do portfólio. Dos 9 sistemas de indicadores principais, foram retirados 49 indicadores para compor um conjunto exemplificativo, utilizado como demonstração prática da proposta metodológica.

5.2.1 Definição do contexto organizacional, objetivos e escopo da avaliação

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a definição do contexto organizacional, dos objetivos da avaliação e do escopo da análise é uma etapa estratégica indispensável para garantir a aplicabilidade e a consistência da proposta metodológica apresentada. Ao longo de todo o desenvolvimento da estrutura, verificou-se que a ausência de objetivos claramente definidos compromete a seleção dos indicadores mais relevantes, dificultando tanto a interpretação dos dados quanto sua utilização para ação gerencial.

Essa limitação ficou evidente, por exemplo, na etapa de definição dos pesos atribuídos aos conjuntos e categorias na exemplificação da proposta metodológica. Sem um contexto organizacional claramente delineado, os pesos refletiram majoritariamente a experiência profissional dos respondentes, em vez de priorizarem de forma objetiva os focos estratégicos da economia circular. Da mesma forma, na análise da obrigatoriedade dos indicadores, observou-se que a utilidade prática da aplicação metodológica depende diretamente da clareza quanto ao objeto da avaliação (produto, operação, rede) e sua finalidade (gestão interna, comunicação externa, *benchmarking*).

Tais achados convergem com a diretriz da ISO 59020:2024, que estabelece a necessidade de uma etapa inicial de contextualização da avaliação, incluindo a definição do nível de aplicação, das metas circulares, dos impactos relevantes e da finalidade da mensuração —

como gestão interna, reporte, comparabilidade ou suporte à decisão (ABNT, 2024). De forma semelhante, a ISO 14001:2015 orienta que a política ambiental e seus objetivos estejam fundamentados na compreensão do contexto organizacional e dos aspectos ambientais significativos (ABNT, 2015).

A análise também mostrou que muitas limitações práticas observadas na seleção de indicadores — como redundância, baixa relevância ou inviabilidade de medição — poderiam ser evitadas com uma definição mais estruturada do escopo de aplicação. A definição do escopo envolve, por exemplo, a delimitação do sistema avaliado (produto, organização, território), os limites temporais e os fluxos a serem considerados. Essa escolha afeta diretamente a viabilidade de mensuração e a coerência dos dados obtidos, principalmente em setores com maturidade circular reduzida ou dados limitados.

A proposta metodológica contempla essas variabilidades ao permitir uma seleção modular de categorias e indicadores conforme o escopo e os objetivos definidos. Contudo, os resultados indicam que essa flexibilidade requer uma etapa deliberativa anterior, em que a organização analise suas prioridades estratégicas, recursos disponíveis e políticas internas. A compatibilidade com sistemas de gestão ambiental já existentes, como os baseados na ISO 14001, pode facilitar essa integração, promovendo sinergia com metas e processos previamente estabelecidos.

Em síntese, os resultados da pesquisa demonstram que a definição prévia e estruturada do contexto, dos objetivos e do escopo da avaliação não é apenas uma etapa metodológica recomendada, mas um fator determinante para a efetividade e aplicabilidade da proposta metodológica nos diferentes contextos organizacionais.

5.2.2 Etapas da proposta metodológica e sua aplicação

A proposta metodológica consolidada nesta tese baseia-se em uma lógica de organização que agrupa os indicadores em grandes conjuntos temáticos, desdobrados em categorias e subcategorias específicas. Essa organização foi construída com base em análises anteriores e na categorização de diferentes sistemas de indicadores de circularidade, resultando em um conjunto exemplificativo de indicadores que demonstra como a proposta metodológica pode ser aplicada. As categorias resultantes foram agrupadas, por exemplo, nos conjuntos “Indicador” e “Estratégias de EC”, permitindo estruturar os indicadores segundo sua natureza, função e relação com a lógica circular. Além disso, foi incluída uma categoria complementar (“Tributação e regulações”) para acomodar indicadores não abrangidos pelas classificações principais.

Com o objetivo de tornar a aplicação metodológica adaptável a diferentes contextos organizacionais, os indicadores foram classificados conforme sua essencialidade para a avaliação da circularidade. Foram definidos como obrigatórios aqueles diretamente relacionados a estratégias circulares centrais, como durabilidade, reuso, reciclagem, remanufatura, articulação interorganizacional e uso de materiais-chave. Os demais indicadores, ligados a aspectos ambientais, sociais, econômicos e organizacionais de suporte, foram classificados como optativos,

permitindo que sejam incorporados de forma complementar, de acordo com o escopo definido pela organização usuária. A classificação entre indicadores obrigatórios e optativos cumpre o segundo objetivo da pesquisa, ao propor critérios de análise e categorização que facilitam a comparação entre diferentes contextos organizacionais.

A modularidade da proposta metodológica permite sua adaptação a diferentes níveis de maturidade em EC. Conforme sugerem Arena et al. (2009), sua aplicação pode ser iniciada com foco em uma única dimensão, como um estágio do ciclo de vida ou uma estratégia específica, e posteriormente expandida à medida que a organização avança no processo de transição. Essa característica torna o modelo escalável e adequado a diferentes realidades organizacionais.

A análise do exemplo da aplicação da proposta metodológica permite identificar que o material constitui um dos aspectos mais críticos da EC, por influenciar diretamente a eficiência dos fluxos de recursos em um sistema produtivo, além da viabilidade das estratégias circulares. Essa centralidade é confirmada por estudos como os de Mayer et al. (2019) e EASAC (2016), que destacam que o material, sendo a base física da EC, afeta não apenas a eficiência e a viabilidade técnica, mas também os impactos ambientais associados às práticas adotadas. Sem uma gestão eficaz dos materiais, os princípios da circularidade dificilmente se concretizam de forma plena.

A importância dessa categoria pode ser observada sob diferentes perspectivas. Primeiramente, os materiais funcionam como base para modelos de negócios circulares, pois a escolha do tipo de material determina o potencial de reutilização, remanufatura e reciclagem. Materiais com baixo impacto ambiental, como os biodegradáveis ou recicláveis, viabilizam ciclos fechados de produção, enquanto o uso de materiais secundários (reciclados) contribui para a redução da pressão sobre recursos naturais e das emissões associadas à extração de matérias-primas (VELIS; VRANCKEN, 2015).

Além disso, o material está no centro de diversos indicadores-chave. O Material Circularity Indicator (MCI), por exemplo, avalia a eficiência do uso de materiais dentro de um ciclo fechado, e outros indicadores de fluxo material ajudam a quantificar o uso de insumos virgens e reciclados no processo produtivo (MAYER et al., 2019). Esse papel também se estende aos diferentes estágios do ciclo de vida dos produtos: a durabilidade, toxicidade e degradabilidade dos materiais afetam diretamente os custos, os impactos ambientais e a viabilidade de estratégias de reutilização (STAHEL, 2016; VELIS; VRANCKEN, 2015).

Do ponto de vista do *design*, a escolha de materiais afeta a possibilidade de desmontagem, reaproveitamento e desenvolvimento de modelos de negócio inovadores, como produto como serviço ou soluções baseadas em compartilhamento. O *design* voltado à reciclabilidade, por exemplo, reduz a geração de resíduos e melhora a eficiência na recuperação de materiais (VELIS; VRANCKEN, 2015). Finalmente, os materiais exercem um papel importante na resiliência industrial, ao reduzir a dependência de matérias-primas virgens e mitigar riscos relacionados à volatilidade de preços e à escassez de recursos. A substituição de materiais críticos ou escassos por alternativas recicláveis e abundantes pode contribuir para maior estabilidade das cadeias produtivas.

Outra categoria de destaque na exemplificação apresentada é a de modelo de negócios. A relevância dessa categoria decorre de sua capacidade de promover mudanças sistêmicas na forma como as empresas operam, oferecendo caminhos concretos para a superação do modelo linear tradicional de extração, produção e descarte (CORONA et al., 2019). Indicadores vinculados ao modelo de negócios possuem alto potencial de impacto sistêmico, uma vez que influenciam diretamente a estrutura e a lógica operacional das empresas, incentivando abordagens como *design* para durabilidade, manutenção, remanufatura, reutilização e reciclagem (PAULIUK et al., 2017; CHEN, 2020).

Do ponto de vista estratégico, os indicadores dessa categoria são altamente relevantes por abordarem de forma integrada o valor econômico, ambiental e social gerado pela organização (LINDER; SARASINI; LOON, 2017). Por estarem fortemente ligados à tomada de decisão, são de fácil integração ao planejamento empresarial, influenciando decisões gerenciais relativas ao ciclo de vida dos produtos, gestão de resíduos e logística reversa (BSI, 2017).

Por fim, trata-se de uma categoria com forte escalabilidade e transversalidade, aplicável a múltiplos setores e tipos de organização, desde microempresas até corporações multinacionais. Essa adaptabilidade torna os indicadores de modelo de negócios não apenas frequentes, mas também estruturantes dentro da proposta metodológica, pois fornecem a base sobre a qual os princípios da EC podem ser operacionalizados e internalizados pelas empresas.

Com essa estrutura lógica e adaptável, a proposta metodológica pode ser utilizada como instrumento de apoio à tomada de decisão na seleção de indicadores. A categorização e o refinamento dos indicadores, aliados à possibilidade de ajustes conforme o escopo organizacional, permitem que diferentes empresas priorizem os aspectos mais relevantes de acordo com seus objetivos, estágio de maturidade e recursos disponíveis.

5.2.3 Apoio à seleção dos indicadores relevantes

A aplicação prática da proposta metodológica apresentada requer adaptações específicas conforme o setor empresarial e o escopo da avaliação, o que demanda apoio na escolha, revisão e priorização dos indicadores. A comparação com a literatura existente mostrou que, embora a proposta metodológica aborde diferentes níveis sistêmicos e estágios do ciclo de vida, alguns indicadores são aplicáveis apenas a setores específicos, como construção civil, e não se adaptam a outros contextos (SU et al., 2013; LU et al., 2017; SÁNCHEZ-ORTIZ et al., 2020). Assim, ainda que tenha caráter genérico, a estrutura metodológica de seleção de indicadores precisa ser ajustada conforme o setor, produto ou componente em análise.

Uma abordagem recomendada é iniciar a aplicação utilizando um subconjunto de indicadores-chave, o que facilita a entrada progressiva das empresas no processo de medição da circularidade. Como ponto de partida, recomenda-se a seleção de ao menos um indicador de cada uma das categorias centrais — Variável, Modelo de Negócios, Ciclo Cruzado e Colaboração entre Setores — e o único indicador da categoria Tributação e Regulações. A partir dessa base, pode-se selecionar os indicadores que mais se alinham às estratégias de EC adotadas ou

previstas para o produto ou sistema analisado.

A escolha e priorização dos indicadores pode ser orientada, ainda, pelos quatro atributos organizadores da proposta metodológica: nível sistêmico de aplicação, estágio do ciclo de vida considerado, tipo de mensurabilidade (qualitativa, quantitativa ou ambos) e estratégia de EC representada. Esses atributos funcionam como filtros analíticos que facilitam a adequação dos indicadores ao escopo organizacional.

Esses indicadores principais devem apresentar algumas características essenciais: abrangência ao longo do ciclo de vida, relevância estratégica para a EC, flexibilidade de aplicação em diferentes contextos e setores, e capacidade de gerar impactos mensuráveis (KJAER et al., 2019; GENG; SARKIS; BLEISCHWITZ, 2019; LINDER; SARASINI; LOON, 2017). Com base nesses critérios, foram destacados cinco indicadores que podem compor esse conjunto inicial exemplificativo, funcionando como guia para demonstrar a aplicação da proposta metodológica: Saúde do Material, Investimento Circular, Mudança Cultural, Envolvimento de *Stakeholders* e Tributação e Regulações. A seleção se justifica pela relevância desses indicadores em fornecer dados críticos para decisões estratégicas e para uma avaliação robusta da circularidade organizacional (COBO; DOMINGUEZ-RAMOS; IRABIEN, 2018; CHEN, 2020).

Após a seleção preliminar, é fundamental revisar os indicadores propostos com base no contexto organizacional. Essa revisão deve ser conduzida a partir de critérios práticos e estratégicos, e pode ser apoiada por um conjunto de perguntas norteadoras sugeridas por Kravchenko, Pigosso e McAloone (2020), como:

- Qual a relevância do indicador para o setor específico?
- Qual a relevância do indicador para a estratégia de EC adotada?
- Quais dados são necessários? Eles são de fácil obtenção?
- O indicador é fácil de usar ou exige especialistas?
- Qual o custo ou esforço envolvido na coleta dos dados?

A aplicação dessas perguntas ajuda a refinar a seleção. Por exemplo, o indicador Saúde do Material pode ser altamente relevante para empresas industriais, mas irrelevante para empresas de *software*. Já o indicador Material Reutilization Score (MRS) é mais adequado para estratégias de reciclagem em ciclo fechado do que para reciclagem em ciclo aberto. Em outros casos, como a subcategoria Mercado, a coleta de dados pode ser custosa caso envolva consumidores finais, exigindo maior esforço de pesquisa primária.

Durante o processo de aplicação, os indicadores podem precisar ser adaptados às particularidades do setor ou da estratégia circular adotada (ISSA et al., 2015). Essa adaptação é parte de um processo iterativo, que contribui para o aprendizado organizacional ao revelar o que é mais relevante para cada contexto específico. Esse ciclo de revisão e ajuste não apenas melhora a utilidade dos indicadores, como fortalece o alinhamento com os objetivos internos e externos da organização (KRAVCHENKO; PIGOSSO; MCALOONE, 2020).

5.2.4 Considerações sobre os níveis sistêmicos dos indicadores

Os 49 indicadores selecionados na exemplificação se complementam ao fornecer uma análise detalhada do ciclo de vida dos materiais e componentes, desde a extração e fabricação até o reuso, remanufatura e reciclagem.

Os indicadores são classificados como nano porque analisam aspectos intrínsecos e específicos dos materiais, componentes e produtos, oferecendo uma visão detalhada da circularidade na base dos processos produtivos. Esses indicadores analisam aspectos específicos dos materiais e componentes, buscando maximizar a circularidade na base do processo produtivo, onde cada escolha de material, *design* e técnica de fabricação pode impactar diretamente a eficiência e a reutilização de recursos (ALAERTS et al., 2018). Indicadores como o “Material Circularity Indicator (MCI)”, que mede o quanto os materiais circulam dentro do processo produtivo, e o “Índice de Fluxo Linear”, que avalia a proporção de materiais que seguem fluxos lineares versus circulares, fornecem uma base sólida para mensurar a circularidade de componentes específicos. Além disso, indicadores como a “Redução de Materiais na Fabricação” permitem identificar oportunidades para a otimização de insumos e recursos no nível mais fundamental das operações.

Os indicadores, ao serem aplicados no nível micro, fornecem visões valiosas, como a identificação de oportunidades para reduzir custos operacionais, o aumento da eficiência na utilização de recursos, o fortalecimento da cultura organizacional voltada à economia circular (AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017) e a melhoria da performance financeira, promovendo uma visão integrada e estratégica da circularidade nas operações empresariais (LINDGREEN; SALOMONE; REYES, 2020).

Como exemplo, o indicador “Participação dos Funcionários” mede como a equipe interna adere e se envolve com as práticas de circularidade, impactando diretamente os processos operacionais e a implementação de práticas circulares. Bem como “Envolvimento de *stakeholders*” e “Estrutura e Diversidade de *stakeholders*” avaliam como a empresa se comunica e colabora com seus parceiros, fornecedores e outras partes interessadas. Essas relações afetam o fluxo de materiais, o acesso a recursos circulares e a viabilidade de novos modelos de negócios circulares. E os indicadores relacionados ao mercado, como “Cliente”, “Valor Percebido pelo Mercado” e “Comunicação”, fornecem uma visão de como os produtos circulares são recebidos no mercado e ajudam a ajustar as estratégias de vendas e *marketing* dentro da própria organização (COBO; DOMINGUEZ-RAMOS; IRABIEN, 2018).

Os indicadores do nível nano e micro se complementam ao criar uma base integrada para a economia circular. Enquanto os indicadores nano garantem a circularidade e eficiência no uso de materiais desde o início do ciclo de vida do produto, os indicadores micro ampliam essa visão para o nível operacional, abordando o uso eficiente de recursos, a redução de custos e o impacto positivo na performance financeira e no engajamento organizacional (PEREY et al., 2018).

Essa sinergia evidencia como a abordagem sistêmica proposta permite que práticas cir-

culares em materiais e componentes impactem positivamente as operações empresariais, promovendo uma transição mais robusta e eficiente para a economia circular. Por exemplo, ao assegurar que os materiais utilizados possuem alta reciclabilidade e baixa pegada de carbono (indicadores nano), a empresa cria condições favoráveis para que os indicadores micro, como “Redução de Custos” e “Lucratividade”, reflitam os benefícios financeiros das práticas circulares. Além disso, o uso de componentes reconfiguráveis e desmontáveis (indicador nano) facilita o reuso e remanufatura de produtos, contribuindo para a geração de receita e criação de empregos (indicadores micro).

5.2.5 Ajustes e evolução da aplicação metodológica

A análise dos resultados revelou que, apesar da estrutura modular e adaptável da proposta metodológica apresentada, sua efetividade a médio e longo prazo depende de processos regulares de verificação e atualização, em função da evolução organizacional, de mudanças no mercado e de novas demandas regulatórias ou sociais. Essa necessidade emergiu, especialmente, nas etapas em que se avaliou a aplicabilidade dos indicadores selecionados frente a diferentes setores, estratégias circulares e níveis de maturidade das organizações.

Durante a estruturação da proposta metodológica, observou-se que alguns indicadores inicialmente classificados como relevantes passaram a ser considerados redundantes ou desatualizados quando aplicados a diferentes escopos de análise. Da mesma forma, indicadores tidos como optativos num contexto, podem ganhar centralidade em outro, conforme mudanças na estratégia da empresa, inovação em modelos de negócio ou novas políticas públicas. Essa variabilidade reforça que a estrutura de avaliação da circularidade não pode ser estática, mas precisa ser revista e ajustada periodicamente para manter sua coerência com os objetivos da organização.

Essa constatação é coerente com os princípios estabelecidos pela ISO 59020:2024, que recomenda que a avaliação da circularidade seja integrada a um processo cíclico, permitindo revisão e reavaliação dos indicadores sempre que houver alterações no escopo, nas metas ou nas condições operacionais (ABNT, 2024). De maneira semelhante, a ISO 14001:2015 propõe o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*) como base para o funcionamento dos sistemas de gestão ambiental, incluindo a revisão sistemática de metas, indicadores e procedimentos com vistas à melhoria contínua (ABNT, 2015).

No caso da proposta metodológica consolidada nesta tese, a própria organização usuária deve assumir a responsabilidade pela revisão contínua da seleção e classificação dos indicadores. Os critérios utilizados para essa revisão podem incluir mudanças nas estratégias circulares priorizadas, a evolução da maturidade da empresa em EC, a disponibilidade de novos dados ou indicadores, ou ainda a revisão da política interna de sustentabilidade. Essa prática permite que a proposta metodológica seja mantida como uma ferramenta viva, capaz de refletir não apenas o estágio atual da organização, mas também orientar sua trajetória de transformação.

Portanto, os resultados apontam que, mais do que um modelo de avaliação pontual,

a proposta metodológica deve ser compreendida como uma plataforma de acompanhamento dinâmico, cujo valor reside não apenas na sua estrutura inicial, mas na sua capacidade de se adaptar continuamente às necessidades, desafios e oportunidades emergentes em cada realidade organizacional. Além disso, os indicadores apresentados nesta pesquisa devem ser entendidos como uma exemplificação do uso da proposta metodológica, e não como um conjunto final prescritivo. Esse caráter adaptável e exemplificativo evidencia o atendimento ao terceiro objetivo da pesquisa, ao consolidar uma proposta metodológica estruturada para orientar a seleção de indicadores de circularidade em empresas.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões associadas às perguntas de pesquisa e aos objetivos. Além de identificar as contribuições, limitações da tese e perspectivas para futuras pesquisas.

6.1 RESPOSTAS ÀS PERGUNTAS DE PESQUISA

Os resultados e a discussão desta pesquisa demonstram que é possível apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas a partir da consolidação de categorias analíticas e de uma proposta metodológica que integra diferentes sistemas de indicadores.

Em relação à primeira pergunta, **“Quais categorias permitem organizar e comparar os sistemas de indicadores de circularidade existentes?”**, a pesquisa partiu de uma revisão ampla da literatura, da qual foram identificadas 34 categorias analíticas capazes de caracterizar os diferentes sistemas de indicadores. Essas categorias contemplam dimensões estratégicas da economia circular e foram concebidas para apoiar tanto a organização quanto a comparação entre sistemas distintos, oferecendo uma base estruturada para análises futuras. Como exemplificação da proposta metodológica, aplicou-se o método FAHP, que permitiu agrupar as 34 categorias em 13 conjuntos principais, evidenciando como a abordagem pode ser operacionalizada em diferentes contextos organizacionais. Esse exercício não representa um resultado único ou fechado, mas uma demonstração prática da aplicabilidade da estrutura categorial proposta. Em conjunto, tais categorias constituem a resposta à primeira subquestão da tese, ao fornecerem uma forma consistente de organizar e comparar os sistemas existentes, servindo de suporte para a etapa seguinte de seleção de indicadores de circularidade em empresas.

Para a segunda pergunta, **“Como estruturar um processo que auxilie a escolha de indicadores de circularidade de acordo com o contexto empresarial?”**, a pesquisa apresenta uma proposta metodológica consolidada, concebida como um processo estruturado para apoiar a seleção de indicadores. Essa proposta integra três etapas principais: (i) definição do escopo e do contexto organizacional; (ii) identificação, categorização e refinamento de indicadores a partir dos sistemas existentes; e (iii) seleção final de indicadores ajustados às necessidades estratégicas da empresa. Para demonstrar a aplicabilidade dessa proposta metodológica, foi realizada uma exemplificação prática, que resultou em um conjunto de 49 indicadores extraídos de nove sistemas principais. Esse conjunto não deve ser entendido como uma lista definitiva de indicadores, mas como uma ilustração do funcionamento do procedimento metodológico, evidenciando como diferentes filtros (obrigatoriedade, relevância estratégica, níveis sistêmicos, estágios do ciclo de vida) podem apoiar a tomada de decisão. Dessa forma, a resposta à segunda subquestão não reside em um portfólio fechado de indicadores, mas na disponibilização de uma metodologia estruturada e adaptável, capaz de guiar empresas na escolha de indicadores alinhados a seus objetivos estratégicos e contextuais.

A pesquisa não apenas identifica os sistemas de indicadores relevantes, mas também

demonstra como organizá-los e compará-los por meio de categorias analíticas, respondendo à primeira subquestão. Essas categorias funcionam como eixo estruturante para reduzir a dispersão da literatura e facilitar a seleção de indicadores de acordo com o contexto empresarial.

Em relação à segunda subquestão, a tese consolida uma proposta metodológica que integra: (i) a definição e refinamento de categorias, (ii) a aplicação da FAHP como procedimento de priorização, e (iii) a composição final de indicadores classificados segundo níveis nano e micro e estágios de ciclo de vida. Esse processo estruturado oferece um caminho prático para apoiar empresas na escolha dos indicadores de circularidade mais alinhados a seus objetivos estratégicos.

O conjunto de indicadores apresentado nos resultados deve ser entendido como uma exemplificação da aplicação da proposta metodológica, mostrando sua operacionalização em um caso prático. Assim, a principal contribuição desta pesquisa não reside na proposição de uma lista definitiva de indicadores, mas na disponibilização de um procedimento metodológico robusto e adaptável, capaz de orientar organizações em diferentes setores a selecionar os indicadores que melhor atendam às suas prioridades e recursos. Dessa forma, ao organizar e comparar os sistemas existentes por meio de categorias analíticas e ao consolidar um processo estruturado para guiar a escolha de indicadores, a tese responde à questão central: **apoiar de forma consistente a seleção de indicadores de circularidade em empresas a partir dos diversos sistemas disponíveis.**

6.2 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

Os resultados da pesquisa respondem de forma consistente ao objetivo geral e aos objetivos específicos definidos, ao consolidar uma proposta metodológica estruturada para apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas. Assim, a pesquisa fornece suporte metodológico para decisões estratégicas voltadas à circularidade, respeitando diferentes contextos e níveis de maturidade organizacional.

Para atingir o objetivo geral de **desenvolver uma proposta metodológica para apoiar a seleção de indicadores de circularidade em empresas**, a pesquisa consolidou um procedimento estruturado composto por etapas sucessivas, que vão da definição de categorias analíticas à exemplificação de sua aplicação prática. Esse procedimento permite orientar organizações na escolha dos indicadores mais adequados ao seu contexto, fortalecendo a base para decisões estratégicas voltadas à circularidade. A proposta metodológica consolidada é estruturada para orientar as empresas na seleção e priorização dos indicadores de circularidade. Esse procedimento permite uma avaliação sistemática e abrangente, considerando múltiplas categorias, variáveis, além de modelo de negócio, estratégias de EC, nível sistêmico e estágios de ciclo de vida. A abordagem facilita o monitoramento da transição das empresas para modelos de negócios mais circulares, viabilizando tomadas de decisão informadas e estratégicas.

Os objetivos específicos também foram atendidos de forma significativa. Quanto ao primeiro objetivo específico, **definir categorias analíticas que permitam organizar e com-**

parar os sistemas existentes de indicadores de circularidade, a pesquisa partiu de uma revisão sistemática da literatura, da qual emergiram 34 categorias iniciais. Essas categorias foram concebidas para abranger diferentes dimensões (contexto, sustentabilidade, estratégias de EC, níveis sistêmicos, entre outras), permitindo organizar e comparar os diversos sistemas de indicadores identificados. Esse levantamento reuniu uma diversidade de abordagens, ampliando a abrangência e a aplicabilidade prática dos sistemas de indicadores em diferentes áreas empresariais.

Em relação ao segundo objetivo específico, **analisar e classificar os indicadores identificados com base nas categorias propostas**, os sistemas foram avaliados a partir das 34 categorias analíticas e posteriormente organizados em conjuntos temáticos. Esse processo possibilitou a comparação estruturada dos sistemas de indicadores, destacando convergências e lacunas, bem como sua aplicabilidade em diferentes contextos empresariais.

O estudo definiu claramente categorias que permitem uma análise robusta e estruturada dos sistemas de indicadores. As categorias foram estruturadas em seis grandes conjuntos: (i) Contexto – abrangendo transversalidade, validação, tipo de indústria, produtos e materiais, tamanho das empresas e localização geográfica; (ii) Indicador – incluindo mensurabilidade, formato, unidades de medida mais utilizadas, utilização prática e temporalidade; (iii) Metodologia – descrevendo abordagens utilizadas para cálculo e aplicação dos indicadores, sejam métodos baseados em índices ou modelagem quantitativa; (iv) Sustentabilidade – abrangendo os pilares ambiental, econômico e social e a integração com práticas de governança (ESG), além do alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS); (v) Elementos da Economia Circular – categorização por níveis sistêmicos, estágios do ciclo de vida dos produtos e princípios fundamentais da EC; (vi) Estratégias da Economia Circular – detalhando categorias-chave como uso e fabricação de produtos mais inteligentes, estender vida útil de produtos e peças, aplicação útil dos materiais, modelo de negócios, reinvenção de paradigmas, ciclo cruzado e colaboração entre setores. Organizadas de modo sistemático e transparente, essas categorias permitiram a classificação e análise do portfólio de indicadores, resultando em uma estrutura coerente para seleção e priorização.

O terceiro objetivo específico, **consolidar uma proposta metodológica integrando as etapas anteriores em um processo estruturado que oriente a seleção de indicadores de circularidade em empresas**, foi atendido por meio da sistematização das categorias e da análise dos sistemas de indicadores. A proposta metodológica resultante contempla três etapas principais: (i) definição do contexto, escopo e objetivos da avaliação; (ii) categorização e refinamento de indicadores com base nos sistemas existentes; e (iii) seleção dos indicadores ajustados às necessidades estratégicas da organização. Como parte da exemplificação prática dessa proposta, aplicou-se o método FAHP para atribuir pesos às categorias, ilustrando como diferentes prioridades podem ser definidas. Esse processo resultou em um conjunto de 49 indicadores extraídos de nove sistemas principais, organizados em categorias e subcategorias específicas. Ressalta-se que esse conjunto não constitui um resultado definitivo, mas uma demonstração do funcionamento da proposta metodológica. Entre os resultados, destacou-se a centralidade do aspecto

material, reforçando sua relevância para a eficiência e viabilidade das estratégias circulares.

Os 49 indicadores obtidos indicam que os indicadores no nível nano permitem uma avaliação detalhada da circularidade de materiais e componentes, fornecendo métricas essenciais para o *design* de produtos circulares. No nível micro, a aplicabilidade prática é elevada, oferecendo métricas claras e tangíveis para as empresas melhorarem seus processos operacionais.

Assim, o conjunto exemplificado demonstra a viabilidade da proposta metodológica, consolidando o atendimento ao objetivo de orientar a seleção de indicadores de circularidade em empresas. Mais do que um resultado final, trata-se de um guia metodológico adaptável, que pode apoiar organizações em diferentes contextos e estágios de maturidade.

6.3 CONTRIBUIÇÕES

A pesquisa apresenta contribuições significativas tanto para o avanço teórico quanto para a prática da EC. Os principais resultados incluem a criação de um portfólio diversificado de sistemas de indicadores e a consolidação de uma proposta metodológica estruturada, que integra esse portfólio em um processo de seleção e aplicação de indicadores para avaliar práticas de circularidade. Essa proposta é flexível, podendo ser adaptada às realidades de diferentes empresas e oferecendo suporte à tomada de decisões estratégicas voltadas à EC.

6.3.1 Contribuição Acadêmica

A principal contribuição acadêmica está no desenvolvimento de uma estrutura metodológica para apoiar a seleção de indicadores de EC. Esse avanço possibilita reduzir a dispersão conceitual e metodológica encontrada na literatura, oferecendo uma estrutura de referência comparável para futuras pesquisas. A análise bibliométrica complementa essa contribuição ao apresentar um panorama detalhado da evolução científica no tema, incluindo tendências temporais, geográficas e conceituais.

6.3.2 Contribuições Gerenciais e Práticas

Para empresas, a contribuição prática reside na possibilidade de utilizar a proposta metodológica como guia para selecionar indicadores de circularidade alinhados a seus objetivos estratégicos, recursos disponíveis e exigências regulatórias, além de apoiar a comunicação externa e o atendimento a padrões internacionais como a ISO 59020. A categorização dos indicadores em dimensões de sustentabilidade e governança ESG fortalece sua aplicabilidade para organizações que buscam alinhar-se a políticas públicas, legislações ambientais e metas corporativas de sustentabilidade.

6.3.3 Outras contribuições

A compreensão do contexto da EC é vital para criar uma estratégia holística para implementar indicadores de circularidade com sucesso. Embora pesquisas anteriores mostrem que muitos sistemas de indicadores resultam em avaliações superficiais devido à abrangência excessiva ou baixa integração, esta pesquisa contribui ao propor uma abordagem metodológica capaz de organizar, classificar e priorizar indicadores de forma estruturada, evitando dispersão e promovendo maior rigor avaliativo.

Esta pesquisa tem implicações valiosas para empresas, formuladores de políticas, profissionais da indústria e pesquisadores acadêmicos. Uma inovação central desta pesquisa é a distinção clara entre indicadores em nível nano (materiais e componentes) e micro (processos e operações empresariais). Essa diferenciação contribui para avaliações mais precisas, evitando generalizações excessivas e permitindo separar a circularidade em produtos e componentes da avaliação em nível organizacional.

Nossas descobertas mostram que a divisão entre indicadores de nível nano e micro garante que as avaliações de circularidade forneçam uma linguagem padronizada para simplificar a compreensão e a troca de informações, facilitando assim a transição das empresas para a lógica circular. Além disso, argumentamos que os sistemas de indicadores investigados avaliam o desempenho da sustentabilidade superficialmente, principalmente devido aos seus escopos limitados.

De uma perspectiva geral, os sistemas de indicadores de nível nano se concentram em estratégias de recuperação de materiais e recursos, como reciclagem, reforma, recondicionamento, reaproveitamento, reutilização, etc. Por sua vez, os indicadores de circularidade em nível de empresa se concentram em processos de fabricação (ou seja, estratégias de *design*, implementação de recursos). Essas descobertas destacam os esforços gerais no desenvolvimento de metodologias para quantificar a mudança de uma perspectiva orientada ao produto para sistemas circulares.

Outra contribuição relevante é a classificação dos indicadores segundo os estágios do ciclo de vida, o que possibilita avaliar a circularidade em toda a trajetória do produto ou processo. Essa abordagem permite identificar com clareza as oportunidades e pontos críticos de melhoria, fortalecendo a adoção de estratégias direcionadas, como reciclagem, manutenção ou prolongamento da vida útil. Por exemplo, uma empresa que possui baixa performance no estágio de Recuperação pode focar em estratégias de reciclagem, enquanto outra que enfrenta desafios no Uso pode buscar melhorar a manutenção de seus produtos e o contato com o cliente.

Alguns indicadores possuem aplicação flexível, dependendo do escopo do estudo. Isso garante que a metodologia possa ser adaptada a diferentes contextos, setores e tipos de produtos, atendendo a diferentes necessidades organizacionais e setoriais.

Outra novidade da abordagem apresentada neste trabalho é que ela permite a implementação dos sistemas de indicadores de circularidade para metas de sustentabilidade e EC. Em conjunto, essas contribuições fortalecem o campo acadêmico ao oferecer uma estrutura meto-

dológica comparável e replicável, ao mesmo tempo em que disponibilizam às empresas uma ferramenta prática, flexível e adaptável para orientar a transição rumo à EC, alinhando práticas de gestão a metas ambientais, sociais e econômicas.

6.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Algumas limitações desta pesquisa podem ser reconhecidas. A principal limitação está na ausência de uma validação prática da proposta metodológica em contextos empresariais reais, o que permitiria testar sua aplicabilidade, verificar sua robustez e identificar ajustes necessários para setores específicos. A predominância de sistemas de indicadores com origem acadêmica — que representam 74% do total analisado — limita a representatividade de setores industriais, dada a menor inclusão de indicadores provenientes de práticas empresariais ou iniciativas corporativas. A maior incorporação desses sistemas poderia ampliar a aplicabilidade da proposta metodológica, promovendo maior aderência à realidade organizacional.

Outra limitação refere-se à falta de padronização e clareza metodológica de diversos sistemas de indicadores, especialmente aqueles provenientes da literatura cinzenta. Essa limitação dificulta a aplicação consistente da metodologia e a comparabilidade entre empresas, apontando para a necessidade de diretrizes mais uniformes e transparentes para garantir a confiabilidade dos dados.

Por fim, conforme ilustrado na Figura 9, esta pesquisa não desenvolveu as etapas de definição do contexto organizacional e de verificação contínua da proposta metodológica. Embora tais elementos constem como recomendação no desenho conceitual, não foram operacionalizados na presente investigação. Essa lacuna limita a capacidade da metodologia de adaptação a diferentes cenários e reforça a necessidade de pesquisas futuras que operacionalizem ferramentas de aplicação prática e mecanismos de acompanhamento contínuo.

6.5 TRABALHOS FUTUROS

As limitações identificadas nesta pesquisa oferecem oportunidades relevantes para aprimoramentos e desdobramentos futuros. Para aprofundar e expandir os resultados obtidos, recomenda-se a realização de estudos empíricos com aplicação prática da proposta metodológica em empresas reais, o que permitirá testar sua viabilidade, promover ajustes baseados em evidências e identificar barreiras e potencialidades em diferentes setores.

Além disso, mais investigações comparativas entre os indicadores de circularidade propostos podem contribuir para classificá-los segundo sua praticidade de implementação, grau de mensurabilidade e relevância estratégica. Essa análise pode fundamentar a criação de estruturas específicas por setor, com foco na padronização de dados e métricas, possibilitando que organizações de diferentes áreas desenvolvam, monitorem e comparem seus desempenhos em EC com maior coerência.

Outra frente de avanço consiste na elaboração de diretrizes metodológicas ou normativas para avaliação de indicadores de EC, de modo a superar a atual falta de padronização, identificada como limitação desta pesquisa, e assegurar maior uniformidade e comparabilidade entre abordagens. Essa uniformização pode ser orientada por iniciativas internacionais como a ISO 59020:2024 ou integradas a sistemas já consolidados, como os de gestão ambiental (ISO 14001) ou de relatórios de sustentabilidade (GRI).

Um aspecto relevante a ser explorado é a distribuição dos indicadores ao longo do ciclo de vida dos produtos. Observou-se, nos resultados desta pesquisa, uma concentração de indicadores na fase de produção, o que evidencia lacunas em estágios como extração e uso. Desenvolver novas métricas para esses estágios iniciais e finais do ciclo de vida pode ampliar a abrangência da proposta metodológica, promovendo uma avaliação mais completa e sistêmica da circularidade.

Tais direções futuras têm o potencial de fortalecer o impacto prático e teórico da metodologia desenvolvida, contribuindo para sua consolidação como referência metodológica no campo da avaliação da EC em empresas.

REFERÊNCIAS

- ADIBI, N. et al. Global resource indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 165, p. 1517–1528, 2017.
- AHMAD, N.; QAHMASH, A. Implementing fuzzy ahp and fucom to evaluate critical success factors for sustained academic quality assurance and abet accreditation. **PloS one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 15, n. 9, p. e0239140, 2020.
- AKANBI, L. A. et al. Salvaging building materials in a circular economy: A bim-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 129, p. 175–186, 2018.
- ÅKERMAN, E. **Development of Circular Economy Core Indicators for Natural Resources: Analysis of existing sustainability indicators as a baseline for developing circular economy indicators**. Dissertação (Mestrado) — Royal Institute of Technology, 2016.
- ALAERTS, L. et al. Towards a circular economy monitor for flanders: a conceptual basis. 2018.
- ALAMEREW, Y. A.; BRISSAUD, D. Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. **Journal of Remanufacturing**, Springer, v. 9, n. 3, p. 169–185, 2019.
- ALAMEREW, Y. A. et al. A multi-criteria evaluation method of product-level circularity strategies. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 12, p. 5129, 2020.
- ALLWOOD, J. M. et al. Material efficiency: A white paper. **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 55, n. 3, p. 362–381, 2011.
- ANTONETTI, E. et al. Waste-to-chemicals for a circular economy: the case of urea production (waste-to-urea). **ChemSusChem**, Wiley Online Library, v. 10, n. 5, p. 912–920, 2017.
- ARDENTE, F.; MATHIEUX, F. Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an energy using product. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 83, p. 126–141, 2014.
- ARENA, M. et al. A state-of-the-art of industrial sustainability: definitions, tools and metrics. **International Journal of Product Lifecycle Management**, Inderscience Publishers, v. 4, n. 1-3, p. 207–251, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 14001:2015**: Sistemas de gestão ambiental — requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 59020:2024**: Economia circular - mensuração e avaliação do desempenho de circularidade. Rio de Janeiro, 2024.
- AWASTHI, A.; GOVINDAN, K.; GOLD, S. Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy ahp-vikor based approach. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 195, p. 106–117, 2018.
- AYDIN, R.; BADURDEEN, F. Sustainable product line design considering a multi-lifecycle approach. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 149, p. 727–737, 2019.

AZEVEDO, S. G.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O. Proposal of a sustainable circular index for manufacturing companies. **Resources**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 4, p. 63, 2017.

BALANAY, R.; HALOG, A. Charting policy directions for mining's sustainability with circular economy. **Recycling**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 1, n. 2, p. 219–231, 2016.

BANAITE, D. Towards circular economy: analysis of indicators in the context of sustainable development. **Social Transformation in Contemporary Society**, v. 4, n. 9, p. 142–150, 2016.

BATTISTA, F. et al. Food wastes and sewage sludge as feedstock for an urban biorefinery producing biofuels and added-value bioproducts. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, Wiley Online Library, v. 95, n. 2, p. 328–338, 2020.

BELMONTE-UREÑA, L. J. et al. Circular economy, degrowth and green growth as pathways for research on sustainable development goals: A global analysis and future agenda. **Ecological Economics**, Elsevier, v. 185, p. 107050, 2021.

BLESSING, L.; CHAKRABARTI, A.; WALLACE, K. A design research methodology. In: HEURISTA. **Proceedings of the 10th International Conference on Engineering Design (ICED'95)**. [S.l.], 1995. v. 23, p. 50–55.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity. **Journal of industrial ecology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 603–614, 2017.

BLOMSMA, F. et al. Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 241, p. 118271, 2019.

BOLUK, K. A.; CAVALIERE, C. T.; HIGGINS-DESBIOLLES, F. **A critical framework for interrogating the United Nations Sustainable Development Goals 2030 Agenda in tourism**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2019.

BRANDON, P. S.; LOMBARDI, P. **Evaluating sustainable development in the built environment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.

BRAUN, A. T. et al. Case study analysing potentials to improve material efficiency in manufacturing supply chains, considering circular economy aspects. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 3, p. 880, 2018.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations-Guide**. London, UK, 2017.

BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy sets and systems**, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 233–247, 1985.

BUILDINGS AS MATERIAL BANKS. **Circular Building Assessment Prototype**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.bamb2020.eu/post/cba-prototype/>.

CAPELLINI, M. **Measure the circularity of a product**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.capcon.it/en/measure-the-circularity-of-a-product/>.

CAPSON-TOJO, G. et al. Food waste valorization via anaerobic processes: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Springer, v. 15, n. 3, p. 499–547, 2016.

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

CHEN, C.-T.; LIN, C.-T.; HUANG, S.-F. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. **International journal of production economics**, Elsevier, v. 102, n. 2, p. 289–301, 2006.

CHEN, C. W. Improving circular economy business models: Opportunities for business and innovation: A new framework for businesses to create a truly circular economy. **Johnson Matthey Technology Review**, Johnson Matthey, v. 64, n. 1, p. 48–58, 2020.

CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual review of energy and the environment**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 25, n. 1, p. 313–337, 2000.

CHERTOW, M. R. “uncovering” industrial symbiosis. **Journal of industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 11, n. 1, p. 11–30, 2007.

CHOU, S.-W.; CHANG, Y.-C. The implementation factors that influence the erp (enterprise resource planning) benefits. **Decision support systems**, Elsevier, v. 46, n. 1, p. 149–157, 2008.

CIRCULARITY IQ AND KPMG. **Circularity IQ: Product Circularity Improvement Program**. [S.l.], 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/ecoap/scalingcircularbusiness/solution/circular-iq_en.

COBO, S.; DOMINGUEZ-RAMOS, A.; IRABIEN, A. From linear to circular integrated waste management systems: A review of methodological approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 135, p. 279–295, 2018.

CORONA, B. et al. Towards sustainable development through the circular economy—a review and critical assessment on current circularity metrics. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 151, p. 104498, 2019.

COSTA, D.; QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C. A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. **Science of the total environment**, Elsevier, v. 686, p. 774–787, 2019.

CRADLE TO CRADLE PRODUCTS INNOVATION INSTITUTE. **Cradle to Cradle Certified™**. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.c2ccertified.org/get-certified/product-certification>.

CULLEN, J. Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine? Wiley, 2017.

DELOITTE. Study on data for a raw material system analysis: roadmap and test of the fully operational msa for raw materials. **Prepared for the European Commission, DG GROW**, p. 1–179, 2015.

DEMICHELIS, F. et al. Technical and economic assessment of food waste valorization through a biorefinery chain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 94, p. 38–48, 2018.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, TRANSPORT AND THE REGIONS. **Multi criteria analysis: a manual**. UK, 2001. Disponível em: <http://www.communities.gov.uk/documents/corporate/pdf/146868>.

DONIA, E.; MINEO, A. M.; SGROI, F. A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective. **Land use policy**, Elsevier, v. 76, p. 823–827, 2018.

D'ANNUNZIO, R. et al. Projecting global forest area towards 2030. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 352, p. 124–133, 2015.

ECOPRENEUR. **Circularity Check**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://ecopreneur.eu/circularity-check-landing-page/>.

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

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition**. Cowes, UK, 2013. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition**. Cowes, UK, 2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circulytics - Resources**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circulytics-measuring-circularity/resources>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA. **Circularity Indicators**. Cowes, UK, 2015. 1–98 p.

EUROPEAN ACADEMIES SCIENCE ADVISORY COUNCIL.EASAC POLICY REPORT 30. **Indicators for a circular economy**. [S.l.], 2016.

EUROPEAN COMMISSION. **Towards a Circular Economy: a Zero Waste Programme for Europe**. Brussels, 2014.

EUROPEAN COMMISSION. **Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy**. Brussels, 2015.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **More from less - Material resource efficiency in Europe**. [S.l.], 2016.

EVANS, J.; BOCKEN, N. M. P. Circular economy toolkit. **Cambridge Institute for Manufacturing**. <http://circulareconomytoolkit.org>, 2013.

FAN, Y. V. et al. Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, 2019.

- FASSIO, F.; TECCO, N. Circular economy for food: A systemic interpretation of 40 case histories in the food system in their relationships with sdgs. **Systems**, MDPI, v. 7, n. 3, p. 43, 2019.
- FAVI, C. et al. A design for eol approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products. **International Journal of Sustainable Engineering**, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 136–146, 2017.
- FIGGE, F. et al. Longevity and circularity as indicators of eco-efficient resource use in the circular economy. **Ecological Economics**, Elsevier, v. 150, p. 297–306, 2018.
- FOGARASSY, C. et al. A circular evaluation tool for sustainable event management—an olympic case study. **Acta Polytech. Hung.**, v. 14, p. 161–177, 2017.
- FORD, F. A. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems**. Washington: Island press, 1999.
- FRANCO, N. G.; ALMEIDA, M. F. L.; CALILI, R. F. A strategic measurement framework to monitor and evaluate circularity performance in organizations from a transition perspective. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 27, p. 1165–1182, 2021.
- FRANKLIN-JOHNSON, E.; FIGGE, F.; CANNING, L. Resource duration as a managerial indicator for circular economy performance. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 133, p. 589–598, 2016.
- FREGONARA, E. et al. Economic-environmental indicators to support investment decisions: A focus on the buildings' end-of-life stage. **Buildings**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 3, p. 65, 2017.
- GABRIELSEN, P.; BOSCH, P. Environmental indicators: typology and use in reporting. **EEA, Copenhagen**, 2003.
- GARCIA-BERNABEU, A. et al. A process oriented mcdm approach to construct a circular economy composite index. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 2, p. 618, 2020.
- GARCIA-HERRERO, I. et al. Connecting wastes to resources for clean technologies in the chlor-alkali industry: a life cycle approach. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 20, n. 2, p. 229–242, 2018.
- GARZA-REYES, J. A. et al. A circularity measurement toolkit for manufacturing smes. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 57, n. 23, p. 7319–7343, 2019.
- GEISSDOERFER, M. et al. The circular economy—a new sustainability paradigm? **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 143, p. 757–768, 2017.
- GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in china: an evaluation and critical analysis. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 216–224, 2012.
- GENG, Y.; SARKIS, J.; BLEISCHWITZ, R. **How to globalize the circular economy**. [S.l.]: Nature Publishing Group, 2019.
- GENG, Y. et al. Measuring china's circular economy. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 339, n. 6127, p. 1526–1527, 2013.

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**, Elsevier, v. 114, p. 11–32, 2016.

GHOSH, S. K.; AGAMUTHU, P. **Circular economy: The way forward**. [S.l.]: SAGE Publications Sage UK: London, England, 2018. 481–482 p.

GIACOMELLI, J.; KOZAMERNIK, D.; LAH, P. Evaluating and monitoring circularity. **Macro and Regulatory Environment in the EU and in Slovenia**, 2018.

GIAMPIETRO, M. On the circular bioeconomy and decoupling: implications for sustainable growth. **Ecological economics**, Elsevier, v. 162, p. 143–156, 2019.

GOLINSKA, P. et al. Grey decision making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 105, p. 28–40, 2015.

GOMES, L. A. et al. Screening of waste materials as adjuvants for drying sewage sludge based on environmental, technical and economic criteria. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 259, p. 120927, 2020.

GONÇALVES, P. V. dos S.; CAMPOS, L. M. A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 1–15, 2022.

GRIPPO, V.; ROMANO, S.; VASTOLA, A. Multi-criteria evaluation of bran use to promote circularity in the cereal production chain. **Natural Resources Research**, Springer, v. 28, p. 125–137, 2019.

GUE, I. H. V. et al. Sector perception of circular economy driver interrelationships. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 276, p. 123204, 2020.

GUILLÉN-MENA, V. et al. Lessons learned from a study based on the ahp method for the assessment of sustainability in neighborhoods. **MethodsX**, Elsevier, v. 11, p. 102440, 2023.

HAAS, W. et al. How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the european union and the world in 2005. **Journal of industrial ecology**, Wiley Online Library, v. 19, n. 5, p. 765–777, 2015.

HAHLADAKIS, J. N.; IACOVIDOU, E. Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 630, p. 1394–1400, 2018.

HAPUWATTE, B. M.; SEEVERS, K. D.; JAWAHIR, I. Metrics-based dynamic product sustainability performance evaluation for advancing the circular economy. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 64, p. 275–287, 2022.

HARRIS, S.; MARTIN, M.; DIENER, D. Circularity for circularity's sake? scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 26, p. 172–186, 2021.

HOEHN, D. et al. Energy embedded in food loss management and in the production of uneaten food: seeking a sustainable pathway. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 4, p. 767, 2019.

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

HUAMAO, X.; FENGQI, W. Circular economy development mode based on system theory. **Chinese Journal of Population Resources and Environment**, Taylor & Francis, v. 5, n. 4, p. 92–96, 2007.

HUYSMAN, S. et al. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 120, p. 46–54, 2017.

HUYSVELD, S. et al. Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 211, p. 1–13, 2019.

IACOVIDOU, E. et al. Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 166, p. 910–938, 2017.

INGHELIS, D. et al. Towards optimal trade-offs between material and energy recovery for green waste. **Waste Management**, Elsevier, v. 93, p. 100–111, 2019.

INGRAO, C. et al. Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: A comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 184, p. 869–892, 2018.

ISSA, I. I. et al. Leading product-related environmental performance indicators: a selection guide and database. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 108, p. 321–330, 2015.

JACKSON, L. E.; KURTZ, J. C.; FISHER, W. S. **Evaluation guidelines for ecological indicators**. [S.l.]: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000.

JEROME, A. et al. Mapping and testing circular economy product-level indicators: A critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 178, p. 106080, 2022.

JIMÉNEZ-RIVERO, A.; GARCÍA-NAVARRO, J. Indicators to measure the management performance of end-of-life gypsum: from deconstruction to production of recycled gypsum. **Waste and Biomass Valorization**, Springer, v. 7, n. 4, p. 913–927, 2016.

JUNIOR, H. R. A. de S. et al. Measuring the environmental performance of a circular system: Emergy and lca approach on a recycle polystyrene system. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 726, p. 138111, 2020.

JURGILEVICH, A. et al. Transition towards circular economy in the food system. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 1, p. 69, 2016.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy—from review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 135, p. 190–201, 2018.

KINGFISHER. **The Business Opportunity of Closed Loop Innovation: Closed Loop Innovation Booklet**. [S.l.], 2014. Disponível em: <http://www.truevaluemetrics.org/DBpdfs/Circular-Economy/Kingfisher.pdf>.

KIRCHHERR, J.; PISCICELLI, L. Towards an education for the circular economy (ece): five teaching principles and a case study. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 150, p. 104406, 2019.

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

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

KOBZA, N.; SCHUSTER, A. Building a responsible europe- the value of circular economy. **IFAC- PapersOnLine**, Elsevier, v. 49, n. 29, p. 111–116, 2016.

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

KRAVCHENKO, M.; PIGOSSO, D. C. A.; MCALOONE, T. C. A procedure to support systematic selection of leading indicators for sustainability performance measurement of circular economy initiatives. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 951, 2020.

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**, Elsevier, v. 243, p. 118531, 2020.

KWONG, C.-K.; BAI, H. Determining the importance weights for the customer requirements in qfd using a fuzzy ahp with an extent analysis approach. **Iie transactions**, Taylor & Francis, v. 35, n. 7, p. 619–626, 2003.

LASO, J. et al. Combined application of life cycle assessment and linear programming to evaluate food waste-to-food strategies: seeking for answers in the nexus approach. **Waste management**, Elsevier, v. 80, p. 186–197, 2018.

LÈBRE, É.; CORDER, G.; GOLEV, A. The role of the mining industry in a circular economy: a framework for resource management at the mine site level. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 662–672, 2017.

LEE, H. M.; LU, W. F.; SONG, B. A framework for assessing product end-of-life performance: reviewing the state of the art and proposing an innovative approach using an end-of-life index. **Journal of Cleaner production**, Elsevier, v. 66, p. 355–371, 2014.

LEE, S. Role of social and solidarity economy in localizing the sustainable development goals. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Taylor & Francis, v. 27, n. 1, p. 65–71, 2020.

LEE, Y.; HU, J.; LIM, M. K. Maximising the circular economy and sustainability outcomes: An end-of-life tyre recycling outlets selection model. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 232, p. 107965, 2021.

LEHMANN, S. Implementing the urban nexus approach for improved resource-efficiency of developing cities in southeast-asia. **City, Culture and Society**, Elsevier, v. 13, p. 46–56, 2018.

- LIANG, W.; ZHAO, G.; HONG, C. Performance assessment of circular economy for phosphorus chemical firms based on vikor-qualiflex method. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 196, p. 1365–1378, 2018.
- LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 115, p. 36–51, 2016.
- LINDER, M.; SARASINI, S.; LOON, P. van. A metric for quantifying product-level circularity. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 545–558, 2017.
- LINDGREEN, E. R.; SALOMONE, R.; REYES, T. A critical review of academic approaches, methods and tools to assess circular economy at the micro level. **Sustainability**, MDPI AG, v. 12, n. 12, p. 4973, 2020.
- LOON, P. van; WASSENHOVE, L. N. V. Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for oem suppliers. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 56, n. 4, p. 1662–1674, 2018.
- LU, J. W. et al. Status and perspectives of municipal solid waste incineration in china: A comparison with developed regions. **Waste Management**, Elsevier, v. 69, p. 170–186, 2017.
- LU, T.; HALOG, A. Towards better life cycle assessment and circular economy: on recent studies on interrelationships among environmental sustainability, food systems and diet. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Taylor & Francis, p. 1–9, 2020.
- LÜDEKE-FREUND, F.; GOLD, S.; BOCKEN, N. M. A review and typology of circular economy business model patterns. **Journal of industrial ecology**, Wiley Online Library, v. 23, n. 1, p. 36–61, 2019.
- MAANI, K.; CAVANA, R. Y. **Systems thinking, system dynamics: Managing change and complexity**. [S.l.]: Prentice Hall, 2007.
- MAINA, S.; KACHRIMANIDOU, V.; KOUTINAS, A. A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, Elsevier, v. 8, p. 18–23, 2017.
- MAIO, F. D.; REM, P. C. A robust indicator for promoting circular economy through recycling. **Journal of Environmental Protection**, Scientific Research Publishing, v. 6, n. 10, p. 1095, 2015.
- MALAR, J. P. Como a economia circular pode ajudar empresas a reduzir consumo de água. CNN, 2021.
- MANNINEN, K. et al. Do circular economy business models capture intended environmental value propositions? **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 171, p. 413–422, 2018.
- MAYER, A. et al. Measuring progress towards a circular economy: a monitoring framework for economy-wide material loop closing in the eu28. **Journal of industrial ecology**, Wiley Online Library, v. 23, n. 1, p. 62–76, 2019.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**. [S.l.]: North point press, 2010.

MCDOWALL, W. et al. Circular economy policies in china and europe. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 21, n. 3, p. 651–661, 2017.

MEADOWS, D. H. Indicators and information systems for sustainable development. Sustainability Institute Hartland, 1998.

MEADOWS, D. H. **Thinking in systems: A primer**. [S.l.]: Chelsea green publishing, 2008.

MEHRJERDI, Y. Z. Developing fuzzy topsis method based on interval valued fuzzy sets. **International Journal of Computer Applications**, International Journal of Computer Applications, 244 5 th Avenue, # 1526, New ... , v. 42, n. 14, p. 7–18, 2012.

MENSAH, J. Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. **Cogent social sciences**, Taylor & Francis, v. 5, n. 1, p. 1653531, 2019.

MESA, J.; ESPARRAGOZA, I.; MAURY, H. Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 196, p. 1429–1442, 2018.

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

MOHAN, V. et al. Waste derived bioeconomy in india: A perspective. **New biotechnology**, Elsevier, v. 40, p. 60–69, 2018.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the prisma statement. **BMJ (CR)-print**, v. 339, n. 7716, p. 332, 2009.

MORAGA, G. et al. Circular economy indicators: What do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 146, p. 452–461, 2019.

MORSELETTA, P. Targets for a circular economy. **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 153, p. 104553, 2020.

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**, Springer, v. 140, p. 369–380, 2017.

MYLAN, J.; HOLMES, H.; PADDOCK, J. Re-introducing consumption to the ‘circular economy’: a sociotechnical analysis of domestic food provisioning. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 8, p. 794, 2016.

NAIDOO, D. et al. Transitional pathways towards achieving a circular economy in the water, energy, and food sectors. **Sustainability**, MDPI, v. 13, n. 17, p. 9978, 2021.

NELEN, D. et al. A multidimensional indicator set to assess the benefits of weee material recycling. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 83, p. 305–316, 2014.

NG, K. S.; YANG, A.; YAKOVLEVA, N. Sustainable waste management through synergistic utilisation of commercial and domestic organic waste for efficient resource recovery and valorisation in the uk. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 227, p. 248–262, 2019.

NIERO, M.; KALBAR, P. P. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 140, p. 305–312, 2019.

NOGUEIRA, A.; ASHTON, W. S.; TEIXEIRA, C. Expanding perceptions of the circular economy through design: Eight capitals as innovation lenses. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 149, p. 566–576, 2019.

NUÑEZ-CACHO, P. et al. What gets measured, gets done: Development of a circular economy measurement scale for building industry. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 7, p. 2340, 2018.

OLIVEIRA, C.; BELDERRAIN, M. Considerações sobre a obtenção de vetores de prioridades no ahp. i erabio–xxi endio–xix epio. “sistemas boscosos y tecnologia”. **Posadas. Argentina**, 2008.

OLIVEIRA, C. T. D.; DANTAS, T. E. T.; SOARES, S. R. Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. **Sustainable Production and Consumption**, Elsevier, v. 26, p. 455–468, 2021.

OLIVEIRA, C. T. de et al. Continuing education to food waste management: a system dynamics simulation. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 2, 2023.

OLIVEIRA, C. T. de; LUNA, M. M.; CAMPOS, L. M. Understanding the brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 235, p. 562–573, 2019.

OLIVEIRA, C. T. de; OLIVEIRA, G. G. A. What circular economy indicators really measure? an overview of circular economy principles and sustainable development goals. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 190, p. 106850, 2023.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 325, n. 5939, p. 419–422, 2009.

PADILLA-RIVERA, A.; RUSSO-GARRIDO, S.; MERVEILLE, N. Addressing the social aspects of a circular economy: A systematic literature review. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 19, p. 7912, 2020.

PANCHAL, R.; SINGH, A.; DIWAN, H. Does circular economy performance lead to sustainable development?—a systematic literature review. **Journal of Environmental Management**, Elsevier, v. 293, p. 112811, 2021.

PARK, J. Y.; CHERTOW, M. R. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 137, p. 45–53, 2014.

PATTERSON, M.; MCDONALD, G.; HARDY, D. Is there more in common than we think? convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. **Ecological Modelling**, Elsevier, v. 362, p. 19–36, 2017.

PAUER, E. et al. Assessing the environmental sustainability of food packaging: an extended life cycle assessment including packaging-related food losses and waste and circularity assessment. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 3, p. 925, 2019.

PAULI, G. A. **The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs**. [S.l.]: Paradigm publications, 2010.

PAULIUK, S. Critical appraisal of the circular economy standard bs 8001: 2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 129, p. 81–92, 2018.

PAULIUK, S. et al. Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles—insights from the global multiregional matrace model. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 116, p. 84–93, 2017.

PENG, G. et al. An application of fuzzy analytic hierarchy process in risk evaluation model. **Frontiers in Psychology**, Frontiers Media SA, v. 12, p. 715003, 2021.

PEREY, R. et al. The place of waste: Changing business value for the circular economy. **Business Strategy and the Environment**, Wiley Online Library, v. 27, n. 5, p. 631–642, 2018.

PETTI, L.; SERRELI, M.; CESARE, S. D. Systematic literature review in social life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 23, p. 422–431, 2018.

PINTÉR, L. Circular economy in china: Moving from rhetoric to implementation. Citeseer, 2006.

POLATIDIS, H. et al. Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. **Energy Sources, Part B**, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 181–193, 2006.

POTTING, J. et al. **Circular economy: measuring innovation in the product chain**. [S.l.]: PBL Publishers, 2017.

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

PRIETO-SANDOVAL, V. et al. Key elements in assessing circular economy implementation in small and medium-sized enterprises. **Business Strategy and the Environment**, Wiley Online Library, v. 27, n. 8, p. 1525–1534, 2018.

PRIYADARSHINI, P.; ABHILASH, P. C. Circular economy practices within energy and waste management sectors of india: A meta-analysis. **Bioresource Technology**, Elsevier, v. 304, p. 123018, 2020.

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J.; 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**, Elsevier, 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**, MDPI, v. 12, n. 16, p. 6671, 2020.

RENDEMINT. **PRP® circular e-procurement**. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.rendemint.nl/en/circular-e-procurement-tool>.

RESOURCE CONSERVATIVE MANUFACTURING. **Circular Pathfinder and Circularity Calculator**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.rescoms.eu/platform-and-tools>.

RINCÓN-MORENO, J. et al. Advancing circular economy performance indicators and their application in spanish companies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 279, p. 123605, 2021.

RITTHOFF, M.; ROHN, H.; LIEDTKE, C. Calculating mips: Resource productivity of products and services. 2002.

ROCCHI, L. et al. Measuring circularity: an application of modified material circularity indicator to agricultural systems. **Agricultural and Food Economics**, Springer, v. 9, p. 1–13, 2021.

RODRIGUEZ-ANTON, J. et al. Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, Taylor & Francis, v. 26, n. 8, p. 708–720, 2019.

ROSSI, E. et al. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 247, p. 119137, 2020.

RUSSO, I. et al. From trash to treasure: The impact of consumer perception of bio-waste products in closed-loop supply chains. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 218, p. 966–974, 2019.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical modelling**, Elsevier, v. 9, n. 3-5, p. 161–176, 1987.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.

SAATY, T. L.; SAGIR, M. Extending the measurement of tangibles to intangibles. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, World Scientific, v. 8, n. 01, p. 7–27, 2009.

SAAVEDRA, Y. M. et al. Remanufacturing in brazil: case studies on the automotive sector. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 53, p. 267–276, 2013.

SABAGHI, M. et al. Sustainability assessment using fuzzy-inference technique (saft): A methodology toward green products. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 56, p. 69–79, 2016.

SADHUKHAN, J.; MARTINEZ-HERNANDEZ, E. Material flow and sustainability analyses of biorefining of municipal solid waste. **Bioresource technology**, Elsevier, v. 243, p. 135–146, 2017.

SAIDANI, M. et al. How to assess product performance in the circular economy? proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. **Recycling**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 2, n. 1, p. 6, 2017.

- SAIDANI, M. et al. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 207, p. 542–559, 2019.
- SAKAI, S. et al. Waste prevention for sustainable resource and waste management. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Springer, v. 19, n. 4, p. 1295–1313, 2017.
- SÁNCHEZ-ORTIZ, J. et al. Indicators to measure efficiency in circular economies. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 11, p. 4483, 2020.
- SANTAGATA, R. et al. Assessing the sustainability of urban eco-systems through emergy-based circular economy indicators. **Ecological indicators**, Elsevier, v. 109, p. 105859, 2020.
- SARTAL, A.; OZCELIK, N.; RODRÍGUEZ, M. Bringing the circular economy closer to small and medium enterprises: Improving water circularity without damaging plant productivity. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 256, p. 120363, 2020.
- SCHAIK, A. van; REUTER, M. A. Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. **World Metall Erzmetall**, v. 69, n. 4, p. 5–20, 2016.
- SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. **Journal of Industrial Ecology**, Wiley Online Library, v. 23, n. 1, p. 77–95, 2019.
- SEHNEM, S. et al. Circular business models: level of maturity. **Management Decision**, Emerald Publishing Limited, 2019.
- SEHNEM, S. et al. Circular economy: benefits, impacts and overlapping. **Supply Chain Management: An International Journal**, Emerald Publishing Limited, 2019.
- SENGE, P. M. **The fifth discipline: The art and practice of the learning organization**. [S.l.]: Currency, 2006.
- SHAVELSON, R. J.; MCDONNELL, L.; OAKES, J. What are educational indicators and indicator systems? **Practical Assessment, Research, and Evaluation**, University of Massachusetts Amherst Libraries, v. 2, n. 1, 1990.
- SINGH, R. K. et al. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological indicators**, Elsevier, v. 9, n. 2, p. 189–212, 2009.
- STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 531, n. 7595, p. 435–438, 2016.
- STEINMANN, Z. J. N.; HUIJBREGTS, M. A. J.; REIJNDERS, L. How to define the quality of materials in a circular economy? **Resources, conservation and recycling**, Elsevier, v. 141, p. 362–363, 2019.
- SU, B. et al. A review of the circular economy in china: moving from rhetoric to implementation. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 42, p. 215–227, 2013.
- SUHARIYANTO, T.; WAHAB, D.; RAHMAN, M. A. Multi-life cycle assessment for sustainable products: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 165, p. 677–696, 2017.

SULTAN, A. A. M.; LOU, E.; MATIVENGA, P. T. What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability. 2017.

SUMMERTON, L. et al. Industry-informed workshops to develop graduate skill sets in the circular economy using systems thinking. **Journal of chemical education**, ACS Publications, v. 96, n. 12, p. 2959–2967, 2019.

SUMTER, D. et al. Circular economy competencies for design. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 4, p. 1561, 2020.

TAELMAN, S. E. et al. A holistic sustainability framework for waste management in european cities: Concept development. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 7, p. 2184, 2018.

TEECE, D. J. Business models, business strategy and innovation. **Long range planning**, Elsevier, v. 43, n. 2-3, p. 172–194, 2010.

TIKKA, V. Charitable food aid in finland: from a social issue to an environmental solution. **Agriculture and human values**, Springer, v. 36, n. 2, p. 341–352, 2019.

TÜRKELI, S. et al. Circular economy scientific knowledge in the european union and china: A bibliometric, network and survey analysis (2006–2016). **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 197, p. 1244–1261, 2018.

UNION, E. Directive 2008/98/ec of the european parliament and of the council of 19 november 2008 on waste and repealing certain directives. **Off J Eur Union**, v. 51, p. 3–30, 2008.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Cities and buildings**. Division of Technology, Industry and Economics. New York, USA, 2013.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; EARTHPRINT. **Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth**. [S.l.], 2011.

UNITED STATES BUREAU OF LABOR STATISTICS. **List of industries**. USA, 2023. Disponível em: https://www.bls.gov/iag/tgs/iag_index_alpha.htm.

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

VELEVA, V.; BODKIN, G.; TODOROVA, S. The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from biogen’s “zero waste” journey. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 154, p. 517–529, 2017.

VELEVA, V. et al. Indicators of sustainable production. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 9, n. 5, p. 447–452, 2001.

VELIS, C. A.; VRANCKEN, K. C. **Which material ownership and responsibility in a circular economy?** [S.l.]: SAGE Publications Sage UK: London, England, 2015. 773–774 p.

VERBERNE, J. J. H. **Building circularity indicators: an approach for measuring circularity of a building**. Dissertação (Mestrado) — Technische Universiteit Eindhoven, 2016.

WANG, X. et al. A two-stage fuzzy-ahp model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain. **International journal of production economics**, Elsevier, v. 135, n. 2, p. 595–606, 2012.

WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME. **WRAP's vision for the UK circular economy to 2020**. [S.l.], 2017.

WEBSTER, K. What might we say about a circular economy? some temptations to avoid if possible. **World Futures**, Taylor & Francis, v. 69, n. 7-8, p. 542–554, 2013.

WEILAND, U. Sustainability indicators and sustainable development. **Wuyi, W., T. Krafft & F. Kraas. Global Change, Urbanization and Health. China Meteorological Press. Beijing**, p. 241–250, 2006.

WHALEN, K. A. et al. 'all they do is win': Lessons learned from use of a serious game for circular economy education. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 135, p. 335–345, 2018.

WHALEN, K. A.; WHALEN, C. J. The circular economy and institutional economics: Compatibility and complementarity. **Journal of Economic Issues**, Taylor & Francis, v. 52, n. 3, p. 605–614, 2018.

WIEK, A.; WITHYCOMBE, L.; REDMAN, C. L. Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. **Sustainability science**, Springer, v. 6, n. 2, p. 203–218, 2011.

WISSE, E. **Assessment of indicators for Circular Economy: The case for the Metropole Region of Amsterdam**. Dissertação (Mestrado) — Universiteit Utrecht, 2016.

WIT, M. D. et al. The circularity gap report: An analysis of the circular state of the global economy. **Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands**, 2018.

WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: **Proceedings of the 18th international conference on evaluation and assessment in software engineering**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–10.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Circular Transition Indicators V1.0 - Metrics for business, by business**. [S.l.], 2018.

YADAV, G. et al. Development of a lean manufacturing framework to enhance its adoption within manufacturing companies in developing economies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 245, p. 118726, 2020.

ZANGHELINI, G. M. et al. Ponderação de categorias de impacto ambiental através de análise de decisão multicritério: Weighting environmental impact categories through multicriteria decision analysis. 2018.

ZHANG, X. et al. Sustainable product design: A life-cycle approach. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 217, p. 115508, 2020.

ZHOU, Z.; CHEN, X.; XIAO, X. On evaluation model of circular economy for iron and steel enterprise based on support vector machines with heuristic algorithm for tuning hyper-parameters. **Applied Mathematics & Information Sciences**, Citeseer, v. 7, n. 6, p. 2215, 2013.

ZORE, Ž.; ČUČEK, L.; KRAVANJA, Z. Synthesis of sustainable production systems using an upgraded concept of sustainability profit and circularity. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 201, p. 1138–1154, 2018.

ZORPAS, A. A. et al. Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 172, p. 3567–3577, 2018.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DETALHADAS DO PORTFÓLIO DE ARTIGOS DOS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

As mesmas informações se encontram para download como material suplementar do artigo Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments (OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021).

ARTICLES	AUTHORS (YEAR)	PUBLICATION TITLE	JOURNAL	COUNTRY (FIRST AUTHOR)	DOI / Link
1	Alamerew et al. (2019)	Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies	Journal of Remanufacturing 9(3): 169-185	France	https://doi.org/10.1007/s13243-019-00069-4
2	Alamerew et al. (2020)	A multi-criteria evaluation method of product-level circularity strategies	Sustainability (Switzerland) 12(12)	France	https://doi.org/10.3390/su12125129
3	Azevedo et al. (2017)	Proposal of a sustainable circular index for manufacturing companies	Resources 6(4)	Portugal	https://doi.org/10.3390/resources6040603
4	Braun et al. (2018)	Case study analysing potentials to improve material efficiency in manufacturing supply chains, considering circular economy aspects	Sustainability (Switzerland) 10(3)	Germany	https://doi.org/10.3390/su10030880
5	Corona et al. (2019)	Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics	Resources, Conservation and Recycling 151	Netherlands	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498
6	Lundgreen et al. (2020)	A critical review of academic approaches, methods and tools to assess circular economy at the micro level	Sustainability (Switzerland) 12(12)	Italy	https://doi.org/10.3390/su12124023
7	Nieto and Kabeir (2019)	Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level	Resources, Conservation and Recycling 140: 305-312	Denmark	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002
8	Núñez-Cacho et al. (2018)	What gets measured, gets done: Development of a Circular Economy measurement scale for building industry	Sustainability (Switzerland) 10(7)	Spain	https://doi.org/10.3390/su10072340
9	Padiuk et al. (2017)	Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles—Insights from the global multiregional MaTrace model	Resources, Conservation and Recycling 116: 84-93	Germany	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.029
10	Padiuk (2018)	Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations	Resources, Conservation and Recycling 129: 81-92	Germany	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019
11	Rossi et al. (2020)	Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases	Journal of Cleaner Production 247	Brazil	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137
12	Saidani et al. (2019)	A taxonomy of circular economy indicators	Journal of Cleaner Production 207: 542-559	France	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014
13	Sarral et al. (2020)	Bringing the circular economy closer to small and medium enterprises: Improving water circularity without damaging plant productivity	Journal of Cleaner Production 256	Germany	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120363
14	Zore et al. (2018)	Synthesis of sustainable production systems using an upgraded concept of sustainability profit and circularity	Journal of Cleaner Production 201: 1138-1154	Slovenia	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.130
SNOWBALL PAPERS					
15	Adibi et al. (2017)	Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study	Journal of Cleaner Production 165: 1517-1528	France	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617316827
16	Alarabi et al. (2018)	Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator	Resources, Conservation and Recycling Volume 129: 175-186	United Kingdom	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026
17	Ardente and Mathieux (2014)	Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product	Journal of Cleaner Production 2014: 83, 126-141	Italy	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.028
18	Cayzer et al. (2017)	Design of indicators for measuring product performance in the circular economy	International Journal of Sustainable Engineering Volume 10: 2017 - Issue 4-5	United Kingdom	https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1333543
19	Cullen (2017)	Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine?	Journal of Industrial Ecology 21: 483-486	United Kingdom	10.1111/jiec.12592
20	Di Maio and Ren (2015)	A robust indicator for promoting circular economy through recycling	Journal of Environmental Protection, 2015: 6, 1095-1104	Netherlands	10.4236/jep.2015.610096
21	Favi et al. (2017)	A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products.	International Journal of Sustainable Engineering, 10: 136-146	Italy	https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1270369
22	Frigge et al. (2018)	Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy	Ecological Economics 150: 297-306	France	https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030

	AUTHORS (YEAR)	PUBLICATION TITLE	JOURNAL	COUNTRY (FIRST AUTHOR)	DOI / Link
23	Fogassy et al. (2017)	A Circular Evaluation Tool for Sustainable Event Management – An Olympic Case Study	Acta Polytechnica Hungarica Vol. 14, No. 7, 2017	Hungary	-
24	Franklin-Johnson et al. (2016)	Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance	Journal of Cleaner Production, 133, 589-598	France	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616301181?via=ihub
25	Fregonara (2017)	Economic-environmental indicators to support investment decisions: a focus on the buildings' end-of-life stage	Buildings	Italy	https://doi.org/10.3390/buildings7030065
26	Garza-Reyes et al. (2019)	A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs.	International Journal of Production Research, 57(4)	United Kingdom	https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1559861
27	Górska et al. (2015)	Grey Decision Making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies.	Journal of Cleaner Production 105, 284-40	Poland	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.040
28	Huysman et al. (2017)	Performance indicators for a circular economy: a case study on post-industrial plastic waste	Resources, Conservation and Recycling, 120, 46-54	Belgium	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.013
29	Huysveld et al. (2019)	Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions.	Journal of Cleaner Production, 211, 1–13	Belgium	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.110
30	Jiménez-Rivero and García-Navarro (2016)	Indicators to Measure the Management Performance of End-of-Life Gypsum: From Deconstruction to Production of Recycled Gypsum.	Waste Biomass Valorization, 7, 913–927	Spain	https://doi.org/10.1007/s12649-016-9561-3
31	Labre et al. (2017)	The Role of the Mining Industry in a Circular Economy: A Framework for Resource Management at the Mine Site Level	Journal of Industrial Ecology, 21, 662-672	Australia	https://doi.org/10.1111/jiec.12596
32	Lee et al. (2014)	A framework for assessing product End-Of-Life performance: Reviewing the state of the art and proposing an innovative approach using an End-of-Life Index.	Journal of Cleaner Production, 86, 355–371	Singapore	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.001
33	Liang et al. (2018)	Performance assessment of circular economy for phosphorus chemical firms based on VIKOR-QUALIFLEX method.	Journal of Cleaner Production, 196, 1365–1378	China	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.147
34	Linder et al. (2017)	A Metric for Quantifying Product-Level Circularity	Journal of Industrial Ecology, 21, 3 543-558	Sweden	10.1111/jiec.12552
35	Mesa et al. (2018)	Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model	Journal of Cleaner Production, 2018 196 1429-1442	Colombia	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131
36	Mohamed Sultan et al. (2017)	What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability	Journal of Cleaner Production, 154, 51–60	United Kingdom	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.201
37	Nden et al. (2014)	A multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling	Journal of Cleaner Production, 2014 83, 305-316	Belgium	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.094
38	Park & Chertow (2014)	Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources	Journal of Environmental Management, 137, 1, 45-53	United States of America	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924646014000887
39	Pauer et al. (2019)	Assessing the environmental sustainability of food packaging: An extended life cycle assessment including packaging-related food losses and waste and circularity assessment.	Sustainability, 11, 925	Austria	https://doi.org/10.3390/su11030924
40	Steinmann et al. (2019)	How to define the quality of materials in a circular economy?	Resources, Conservation and Recycling, 2019, 141, 362–363	Netherlands	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.022
41	Vanegas et al. (2018)	Ease of disassembly of products to support circular economy strategies	Resources, Conservation and Recycling, 135, 329-334	Ecuador	https://doi.org/10.1080/00207173.2017.1367107
42	van Loon and van Wassenhove (2018)	Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for OEM suppliers	International Journal of Production Research, 56, 1662-1674	Sweden	https://www.researchgate.net/profile/Antoinette_Schaik/publication/309566412_Recycling_indices_visualizing-
43	Van Schaik and Reuter (2016)	Recycling Indices Visualizing the Performance of the Circular Economy	World Metall. Emmentall 2016, 69, 4	Germany	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.177
44	Vedra et al. (2017)	The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen's “zero waste” journey	Journal of Cleaner Production, 2017, 154, 517–529	United States of America	https://research.bue.nl/en/studentTheses/building-circularity-indicators
45	Verbene (2016)	Building circularity indicators: an approach for measuring circularity of a building	Dissertation	Netherlands	

	AUTHORS (YEAR)	PUBLICATION TITLE	JOURNAL	COUNTRY (FIRST AUTHOR)	DOI / Link
		REPORTS / ONLINE TOOLS / WEBSITE			
46	BAMB (2020)	Circular Building Assessment Prototype	Website	Belgium	https://www.bamb2020.eu/post/cba-prototype/
47	Circle Economy (2018)	The Circularity Gap Report	Report	Netherlands	https://www.circle-economy.com/insights-the-circularity-gap-report-our-world-is-only-9-improvement-away/
48	Circularity IQ and KPMG (2020)	Circularity IQ: Product Circularity Improvement Program	Report	Netherlands	https://www.circular-iq.com/product-circularity-improvement-program/
49	C2C (2014)	Cradle to cradle	Website	Netherlands	https://www.c2certified.org/get-certified-product-certification
50	Ecopreneur (2019)	Circularity Check: How circular are the products and services your company puts on the market?	Online tool	n/a	https://ecopreneur.eu/circularity-check-landing-page/
51	EMF and Grants (2015)	Circularity indicators: an approach to measuring circularity	Report	United Kingdom	https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight-Circularity-Indicators_Project
52	EMF (2020)	Circularity - measuring circularity	Online tool	United Kingdom	https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/0-pdv-circularity-measuring-circularity
53	Evans and Bocken (2013)	Circular economy toolkit	-	United Kingdom	http://www.circular-economytoolkit.com/
54	Gacomelli et al. (2018)	Evaluating and monitoring circularity	Macro and regulatory environment in the EU and Slovenia. UDK 336.71(497.4)330.34	Slovenia	-
55	Kingfisher (2014)	The Business Opportunity of Closed Loop Innovation: Closed Loop Innovation Booklet	Online tool	United Kingdom	https://de.slideshare.net/sustainablebrands/kingfisher-closed-loop-innovation
56	Marco Capellini (2017)	Measuring the Products Circularity	Report	Italy	https://www.rndementi.nl/en/circular-e-procurement-tool
57	Rendement (2016)	PRP circular e-procurement	Online tool	n/a	https://www.rndementi.nl/en/circular-e-procurement-tool
58	ResCoM (2017)	Circular Pathfinder: Identify promising circular design strategies	Online tool	n/a	https://www.rndementi.nl/en/circular-e-procurement-tool
59	ResCoM (2017)	Circularity Calculator: Quickly compare the potential of different circular design strategies	Online tool	n/a	https://www.rndementi.nl/en/circular-e-procurement-tool
60	Ritthoff et al. (2002)	Calculating MIPS - Resource productivity of products and services	Report	Germany	https://pub.wuppertal.org/frontdoor deliver/index.do/cid/1577/file/WS27e.pdf
61	WBSCD (2020)	Circular Transition Indicators V1.0 - Metrics for business, by business	Report	Switzerland	https://www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy/Factor-10/Metrics-

**APÊNDICE B – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS ARTIGOS DE
CATEGORIZAÇÃO PARA OS RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS**

AUTHORS (YEAR)	PUBLICATION TITLE	JOURNAL	COUNTRY (FIRST AUTHOR AFFILIATION)	DOI / Link
ARTICLES				
1 Ahmed et al. (2022)	A comprehensive multi-level circular economy assessment framework	Sustainable Production and Consumption, 32, 700–717	United Arab Emirates	https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025
2 Cagno et al. (2021)	The Role of Digital Technologies in Operationalizing the Circular Economy Transition: A Systematic Literature Review	Applied Science, 11 3328	Italy	https://doi.org/10.3390/app11083328
3 Corona et al. (2019)	Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics	Resources, Conservation and Recycling 151	Netherlands	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498
4 Harris et al. (2021)	Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy	Sustainable Production and Consumption, 26, 172–186	Sweden	https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018
5 Kirchherr et al. (2017)	Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions	Resources, Conservation and Recycling, 127, 221–232	Netherlands	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
6 Kravchenko et al. (2019)	Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators	Journal of Cleaner Production, 241, 118318	Denmark	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118318
7 Kristensen and Mosgaard (2020)	A review of micro level indicators for a circular economy - moving away from the three dimensions of sustainability?	Journal of Cleaner Production, 243, 118531	Denmark	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531
8 Lindgreen et al. (2020)	A critical review of academic approaches, methods and tools to assess circular economy at the micro level	Sustainability (Switzerland) 12(12)	Italy	https://doi.org/10.3390/su12124973
9 Panchai et al. (2021)	Does circular economy performance lead to sustainable development? – A systematic literature review	Journal of Environmental Management, 293, 112811	India	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112811
10 Saidani et al. (2019)	A taxonomy of circular economy indicators	Journal of Cleaner Production 207: 542-559	France	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014
11 Sassanelli et al. (2019)	Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review	Journal of Cleaner Production, 229, 440e453	Italy	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019
12 Vinante et al. (2021)	Circular economy metrics: Literature review and company-level classification framework	Journal of Cleaner Production, 288, 125090	Italy	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125090
SNOWBALL PAPERS				
13 Ella et al. (2017)	Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis	Journal of Cleaner Production, 142, 2741e2751	Italy	http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196
14 Moraga et al. (2019)	Circular economy indicators: What do they measure?	Resources, Conservation & Recycling, 146, 452–461	Belgium	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045
15 Parchomenko et al. (2019)	Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics	Journal of Cleaner Production, 210, 200e216	Austria	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357
REPORTS / WEBSITE				
16 Ellen MacArthur Foundation (2015)	Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition	Report	United Kingdom	https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition
17 European Commission (2015)	Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy	Report	Belgium	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=ES
18 Potting et al. (2017)	Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain	Policy report	Netherlands	https://www.abl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2914.pdf

APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DETALHADAS DOS FORMULÁRIOS DA FASE IV

Todas as informações dos formulários é possível encontrar nos links abaixo:

1. Conjuntos (critérios segundo Saaty): <https://forms.gle/ZXbUfkVTob8w9mtM7>
2. Categorias (alternativas segundo Saaty) referentes a Contexto (C1) e Indicador (C2):
<https://forms.gle/PJR5EQ7Lf2zbr14f9>
3. Categorias referentes a Metodologia (C3), Sustentabilidade (C4) e Elementos da EC (C5):
<https://forms.gle/cCYrL3ZHziBAYn477>
4. Categorias referentes a Estratégias de EC (C6): <https://forms.gle/ccQ94MfMyQbBYkVs5>

Abaixo encontra-se o exemplo do primeiro formulário.

Classificação de indicadores de circularidade - Conjuntos

Prezado(a) participante,

Este formulário foi desenvolvido como parte da pesquisa de tese da pesquisadora Carla Tognato de Oliveira, do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental (PPGEA) da UFSC.

O objetivo deste formulário é de julgar a relevância dos conjuntos propostos para os indicadores de circularidade à luz de um feedback estatístico que reflete a opinião dos demais colegas, resultando numa tarefa de aprendizagem coletiva. Para isso, estamos utilizando o método multicritério conhecido como AHP. O AHP utiliza uma comparação de pares para dividir o processo de tomada de decisão em vários níveis hierárquicos. Os pesos preferenciais em cada nível da hierarquia são extraídos das matrizes de comparação de pares anteriores.

As respostas às quais forem identificadas inconsistências serão reavaliadas, e entraremos em contato para pedir novas análises. Enfatizamos que o estudo não tem como objetivo principal alcançar um nível específico (maximizar) a convergência dos julgamentos, mas sim desenvolver mecanismos de validação para a utilização dos indicadores considerados relevantes por meio de um processo de iteração. Destacamos também que todas as sugestões e críticas são extremamente essenciais e são consideradas durante todo o processo de análise dos resultados.

Tempo estimado de preenchimento: 15 minutos

Caso tenha alguma dúvida e/ou sugestão poderá entrar em contato com:

Carla Tognato de Oliveira - carla.tognato@posgrad.ufsc.br ou (48) 99928-5547

carlatog92@gmail.com [Switch account](#)

* Indicates required question

Email *

☒

Record carlatog92@gmail.com as the email to be included with my response

Next

Termo de consentimento

*O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) foi redigido em conformidade com a [Resolução CNS 466/2012](#). A pesquisadora garante e se compromete com o sigilo e a confidencialidade de todas as informações fornecidas por você para este estudo. Da mesma forma, o tratamento dos dados coletados seguirá as determinações da [Lei Geral de Proteção de Dados](#) (LGPD – Lei 13.709/18).

☒

Eu li os termos da Pesquisa e concordo em participar voluntariamente do presente estudo.

Back

Next

Page 2 of 9

Page 1 of 9

Indicadores de circularidade

Antes de iniciarmos os julgamentos dos conjuntos necessitamos sair da mesma base. Para tanto, apresentaremos algumas definições para serem levadas em consideração nos julgamentos.

A pesquisa presente usa a definição de Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) como base conceitual de EC:

Uma **economia circular** descreve um sistema econômico baseado em modelos de negócios que substituem o conceito de “fim de vida” pela redução, reutilização e reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção/distribuição e consumo, operando assim no nível micro (produtos, empresas, consumidores), nível meso (parques ecoindustriais) e nível macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, o que implica a criação de qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, para a benefício das gerações atuais e futuras.

A razão para uma mudança de foco para o **nível nano** é que este nível se concentrará na circularidade dos **produtos, componentes e materiais** incluídos nos três níveis sistêmicos (macro, meso e micro) da cadeia de valor e em todo o seu ciclo de vida" (SAIDANI et al., 2017). Como a nova divisão de nível de escala, o núcleo de **nível micro** é uma **empresa única ou consumidor** (SAIDANI et al., 2017) e o objetivo do nível nano é o produto, componente ou material.

Circularidade é definida como o alinhamento de um material ou fluxo de energia, produto, processos ou sistema a um conjunto de estratégias de EC (redesign, desmontagem de produto, reciclagem, uso de energia renovável, etc.) que atende a um ou mais princípios de EC (design sem resíduos, manter produtos e materiais em uso e regenerar sistemas naturais (EMF, 2020)). Portanto, os **indicadores de circularidade** podem ser entendidos como ferramentas analíticas voltadas para medir o grau de associação de um sistema (ou parte de um) às práticas e estratégias aplicadas para atingir os princípios da EC. Nesse sentido, maior circularidade significa que um item ou sistema específico está mais perto de atingir os objetivos definidos pelas normas orientadoras da EC.

Estruturação do problema

Componente	Categorias
Contexto (C ₁)	Transversalidade (C ₁₁) Vozes (C ₁₂) Categorias de Indústrias (C ₁₃) Produtos/Materiais (C ₁₄) Processos (C ₁₅) Localização (C ₁₆)
Indicador (C ₂)	Monitorabilidade (C ₂₁) Formas (C ₂₂) Unidades mais utilizadas (C ₂₃) Tipos de indicadores (C ₂₄) Foco temporal (C ₂₅)
Metodologia (C ₃)	Métodos baseados em índices (C ₃₁) Métodos de análise (C ₃₂) Métodos de avaliação (C ₃₃) Tipo de amostragem (C ₃₄) Tipo de amostragem (C ₃₅)
Sustentabilidade (C ₄)	Plano de sustentabilidade (C ₄₁) Políticas de sustentabilidade (C ₄₂) Normas internacionais (C ₄₃) OHSAS 18001 (C ₄₄) Normas internacionais (C ₄₅) Normas internacionais (C ₄₆) Normas internacionais (C ₄₇) Normas internacionais (C ₄₈) Normas internacionais (C ₄₉) Normas internacionais (C ₅₀) Normas internacionais (C ₅₁) Normas internacionais (C ₅₂) Normas internacionais (C ₅₃) Normas internacionais (C ₅₄) Normas internacionais (C ₅₅) Normas internacionais (C ₅₆) Normas internacionais (C ₅₇) Normas internacionais (C ₅₈) Normas internacionais (C ₅₉) Normas internacionais (C ₆₀) Normas internacionais (C ₆₁) Normas internacionais (C ₆₂) Normas internacionais (C ₆₃) Normas internacionais (C ₆₄) Normas internacionais (C ₆₅) Normas internacionais (C ₆₆) Normas internacionais (C ₆₇) Normas internacionais (C ₆₈) Normas internacionais (C ₆₉) Normas internacionais (C ₇₀) Normas internacionais (C ₇₁) Normas internacionais (C ₇₂) Normas internacionais (C ₇₃) Normas internacionais (C ₇₄) Normas internacionais (C ₇₅) Normas internacionais (C ₇₆) Normas internacionais (C ₇₇) Normas internacionais (C ₇₈) Normas internacionais (C ₇₉) Normas internacionais (C ₈₀) Normas internacionais (C ₈₁) Normas internacionais (C ₈₂) Normas internacionais (C ₈₃) Normas internacionais (C ₈₄) Normas internacionais (C ₈₅) Normas internacionais (C ₈₆) Normas internacionais (C ₈₇) Normas internacionais (C ₈₈) Normas internacionais (C ₈₉) Normas internacionais (C ₉₀) Normas internacionais (C ₉₁) Normas internacionais (C ₉₂) Normas internacionais (C ₉₃) Normas internacionais (C ₉₄) Normas internacionais (C ₉₅) Normas internacionais (C ₉₆) Normas internacionais (C ₉₇) Normas internacionais (C ₉₈) Normas internacionais (C ₉₉) Normas internacionais (C ₁₀₀)
Elementos de EC (C ₅)	Indicadores de EC (C ₅₁) Indicadores de EC (C ₅₂) Indicadores de EC (C ₅₃) Indicadores de EC (C ₅₄) Indicadores de EC (C ₅₅) Indicadores de EC (C ₅₆) Indicadores de EC (C ₅₇) Indicadores de EC (C ₅₈) Indicadores de EC (C ₅₉) Indicadores de EC (C ₆₀) Indicadores de EC (C ₆₁) Indicadores de EC (C ₆₂) Indicadores de EC (C ₆₃) Indicadores de EC (C ₆₄) Indicadores de EC (C ₆₅) Indicadores de EC (C ₆₆) Indicadores de EC (C ₆₇) Indicadores de EC (C ₆₈) Indicadores de EC (C ₆₉) Indicadores de EC (C ₇₀) Indicadores de EC (C ₇₁) Indicadores de EC (C ₇₂) Indicadores de EC (C ₇₃) Indicadores de EC (C ₇₄) Indicadores de EC (C ₇₅) Indicadores de EC (C ₇₆) Indicadores de EC (C ₇₇) Indicadores de EC (C ₇₈) Indicadores de EC (C ₇₉) Indicadores de EC (C ₈₀) Indicadores de EC (C ₈₁) Indicadores de EC (C ₈₂) Indicadores de EC (C ₈₃) Indicadores de EC (C ₈₄) Indicadores de EC (C ₈₅) Indicadores de EC (C ₈₆) Indicadores de EC (C ₈₇) Indicadores de EC (C ₈₈) Indicadores de EC (C ₈₉) Indicadores de EC (C ₉₀) Indicadores de EC (C ₉₁) Indicadores de EC (C ₉₂) Indicadores de EC (C ₉₃) Indicadores de EC (C ₉₄) Indicadores de EC (C ₉₅) Indicadores de EC (C ₉₆) Indicadores de EC (C ₉₇) Indicadores de EC (C ₉₈) Indicadores de EC (C ₉₉) Indicadores de EC (C ₁₀₀)
Estratégias em EC (C ₆)	Uso de estratégias de produção mais sustentáveis (C ₆₁) Estrutura e vida útil dos produtos e suas peças (C ₆₂) Materiais e componentes (C ₆₃) Métodos de produção (C ₆₄) Recursos e parâmetros (C ₆₅)

Objetivo:
Monitoramento e
avaliação por meio de
indicadores de
circularidade

O que os indicadores de circularidade precisam ter?

[Back](#)

Next

Page 3 of 9

Ranking de Conjuntos – CONTEXTO

A classificação dos conjuntos é realizada pela comparação par a par deles. A comparação é feita com base na figura abaixo.

Nessa seção, você fará a comparação **do conjunto CONTEXTO (C1) entre os outros conjuntos**, sendo eles:

- **Contexto (C1)**: se refere as informações básicas/iniciais dos indicadores.
- **Indicador (C2)**: características dos indicadores para que eles possam ser desenvolvidos dentro das empresa.
- **Metodologia (C3)**: metodologia empregada por cada indicador.
- **Sustentabilidade (C4)**: como cada indicador aborda a sustentabilidade.
- **Elementos da Economia Circular (C5)**: características de cada indicador em relação direta a elementos que dão base para a EC. Essas características estão relacionadas, por exemplo, ao nível sistêmico da EC, tipo de ciclo de EC analisado pelo indicador, princípios da EC que cada indicador aborda.
- **Estratégias da Economia Circular (C6)**: principais estratégias de EC focada nas divisões de Potting et al. (2017), além de visualizar o modelo de negócios e outras potenciais estratégias para que a EC aconteça.

Para maior embasamento, peça que vejam o quadro com os conjuntos, categorias, subcategorias e explicação delas que está no link abaixo:

[Quadro explicativo dos conjuntos e categorias](#)

Comparação de conjuntos

Decisores

1. Igual importância

3. Fraca importância

5. Razovel importância

7. Forte importância

9. Importância absoluta

2., 4., 6. e 8.

usados quando se tem dúvida

1/x, sendo que x pode variar de 2 a 9

usados quando se tem o pensamento contrário.

Em que você considera o CONJUNTO B "mais importante" do que o CONJUNTO A

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o CONJUNTO A tem _____ comparando com o CONJUNTO B?

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto CONTEXTO (C1) tem _____ comparando com o conjunto INDICADOR (C2).

1/3

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto CONTEXTO (C1) tem _____ comparando com o conjunto METODOLOGIA (C3).

1/4

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto CONTEXTO (C1) tem _____ comparando com o conjunto SUSTENTABILIDADE (C4).

1/5

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto CONTEXTO (C1) tem _____ comparando com o conjunto ELEMENTOS DA EC (C5).

1/7

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto CONTEXTO (C1) tem _____ comparando com o conjunto ESTRATÉGIAS DA EC (C6).

1/7

Back

Next

Page 4 of 9

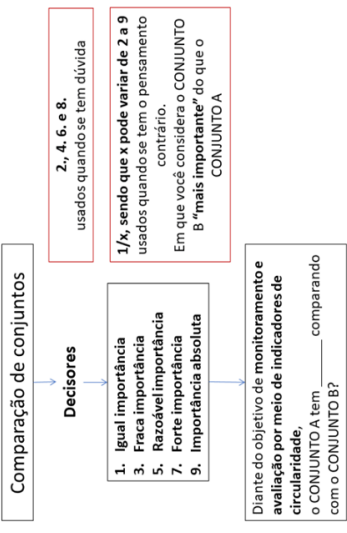
Ranking de Conjuntos - INDICADOR

A classificação dos conjuntos é realizada pela comparação par a par deles. A comparação é feita com base na figura abaixo. Nessa seção, você fará a comparação **do conjunto INDICADOR (C2) entre os outros conjuntos**, sendo eles:

- **Indicador (C2):** características dos indicadores para que eles possam ser desenvolvidos dentro das empresa.
- **Metodologia (C3):** metodologia empregada por cada indicador.
- **Sustentabilidade (C4):** como cada indicador aborda a sustentabilidade.
- **Elementos da Economia Circular (C5):** características de cada indicador em relação direta a elementos que dão base para a EC. Essas características estão relacionadas, por exemplo, ao nível sistêmico da EC, tipo de ciclo de EC analisado pelo indicador, princípios da EC que cada indicador aborda.
- **Estratégias da Economia Circular (C6):** principais estratégias de EC focada nas divisões de Potting et al. (2017), além de visualizar o modelo de negócios e outras potenciais estratégias para que a EC aconteça.

Para maior embasamento, peço que vejam o quadro com os conjuntos, categorias, subcategorias e explicação delas que está no link abaixo:

[Quadro explicativo dos conjuntos e categorias](#)



Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto INDICADOR (C2) tem _____ comparando com o conjunto METODOLOGIA (C3).

1/3

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto INDICADOR (C2) tem _____ comparando com o conjunto SUSTENTABILIDADE (C4).

1/3

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto INDICADOR (C2) tem _____ comparando com o conjunto ELEMENTOS DA EC (C5).

1/5

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o conjunto INDICADOR (C2) tem _____ comparando com o conjunto ESTRATÉGIAS DA EC (C6).

1/5

Ranking de Conjuntos - METODOLOGIA

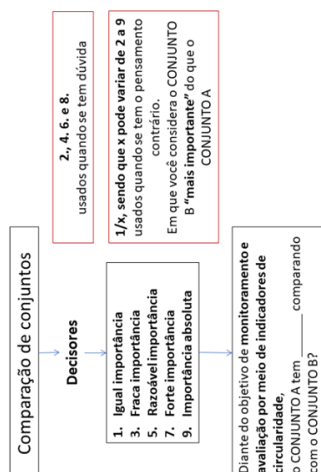
A classificação dos conjuntos é realizada pela comparação par a par deles. A comparação é feita com base na figura abaixo.

Nessa seção, você fará a comparação do conjunto METODOLOGIA (C3) entre os outros conjuntos, sendo eles:

- **Metodologia (C3):** metodologia empregada por cada indicador.
- **Sustentabilidade (C4):** como cada indicador aborda a sustentabilidade.
- **Elementos da Economia Circular (C6):** características de cada indicador em relação direta a elementos que dão base para a EC. Essas características estão relacionadas, por exemplo, ao nível sistêmico da EC, tipo de ciclo de EC analisado pelo indicador, princípios da EC que cada indicador aborda.
- **Estratégias da Economia Circular (C6):** principais estratégias de EC focada nas divisões de Potting et al. (2017), além de visualizar o modelo de negócios e outras potenciais estratégias para que a EC aconteça.

Para maior embasamento, peço que vejam o quadro com os conjuntos, categorias, subcategorias e explicação delas que está no link abaixo:

Quadro explicativo dos conjuntos e categorias



Diante do objetivo de **monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade**, _____ comparando com o conjunto METODOLOGIA (C3) tem _____ o conjunto SUSTENTABILIDADE (C4).

5

Diante do objetivo de **monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade**, _____ comparando com o conjunto METODOLOGIA (C3) tem _____ comparando com o conjunto ELEMENTOS DA EC (C5).

1/5

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, _____ comparando com o conjunto METODOLOGIA (C3) tem _____ comparando com o conjunto ESTRATÉGIAS DA EC (C6).

1/5

[Back](#)

Next

Ranking de Conjuntos - SUSTENTABILIDADE

A classificação dos conjuntos é realizada pela comparação par a par deles. A comparação é feita com base na figura abaixo.

Nessa seção, você fará a comparação **do conjunto SUSTENTABILIDADE (C4) entre os outros conjuntos**, sendo eles:

- **Sustentabilidade (C4)**: como cada indicador aborda a sustentabilidade.
- **Elementos da Economia Circular (C5)**: características de cada indicador em relação direta a elementos que dão base para a EC. Essas características estão relacionadas, por exemplo, ao nível sistêmico da EC, tipo de ciclo de EC analisado pelo indicador, princípios da EC que cada indicador aborda.
- **Estratégias da Economia Circular (C6)**: principais estratégias de EC focada nas divisões de Potting et al. (2017), além de visualizar o modelo de negócios e outras potenciais estratégias para que a EC aconteça.

Para maior embasamento, peço que vejam o quadro com os conjuntos, categorias, subcategorias e explicação delas que está no link abaixo:

[Quadro explicativo dos conjuntos e categorias](#)

Comparação de conjuntos

Decisões

1. Igual importância

3. Fraca importância

5. Razoável importância

7. Forte importância

9. Importância absoluta

2, 4, 6 e 8.

usados quando se tem dúvida

1/x, sendo que x pode variar de 2 a 9

usados quando se tem o pensamento contrário.

Em que você considera o CONJUNTO B "mais importante" do que o CONJUNTO A

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade, o CONJUNTO A tem _____ comparando com o CONJUNTO B?

1/3

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade,

o conjunto SUSTENTABILIDADE (C4) tem _____ comparando com o conjunto ELEMENTOS DA EC (C5).

1/3

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade,

o conjunto SUSTENTABILIDADE (C4) tem _____ comparando com o conjunto ESTRATÉGIAS DA EC (C6) .

Back

Next

Page 7 of 9

Ranking de Conjuntos - ELEMENTOS DA ECONOMIA CIRCULAR

A classificação dos conjuntos é realizada pela comparação par a par deles. A comparação é feita com base na figura abaixo.

Nessa seção, você fará a comparação **do conjunto ELEMENTOS DA EC (C5) entre os outros conjuntos**, sendo eles:

- **Elementos da Economia Circular (C5)**: características de cada indicador em relação direta a elementos que dão base para a EC. Essas características estão relacionadas, por exemplo, ao nível sistêmico da EC, tipo de ciclo de EC analisado pelo indicador, princípios da EC que cada indicador aborda.
- **Estratégias da Economia Circular (C6)**: principais estratégias de EC focada nas divisões de Potting et al. (2017), além de visualizar o modelo de negócios e outras potenciais estratégias para que a EC aconteça.

Para maior embasamento, peço que vejam o quadro com os conjuntos, categorias, subcategorias e explicação delas que está no link abaixo:
[Quadro explicativo dos conjuntos e categorias](#)

Comparação de conjuntos

Decisões

1. Igual importância

3. Fraca importância

5. Razoável importância

7. Forte importância

9. Importância absoluta

2., 4., 6., e 8.

usados quando se tem dúvida

1/x, sendo que x pode variar de 2 a 9

usados quando se tem o pensamento contrário.

Em que você considera o CONJUNTO B “mais importante” do que o CONJUNTO A

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade,

o CONJUNTO A tem _____ comparando com o CONJUNTO B?

1

Next

Back

Page 8 of 9

Diante do objetivo de monitoramento e avaliação por meio de indicadores de circularidade,

o conjunto ELEMENTOS DA EC (C5) tem _____ comparando com o conjunto ESTRATÉGIAS DA EC (C6) .

Feedback

Deixe seu feedback sobre o formulário e sobre os conjuntos

Your answer

Submit

Back

Page 9 of 9

APÊNDICE D – INDICADORES DOS SISTEMAS DE INDICADORES BASE PARA O *FRAMEWORK*

D.1 APL - ASSESSMENT OF CIRCULAR ECONOMY STRATEGIES AT THE PRODUCT LEVEL

Para esse sistema de indicadores, foram utilizados:

- *Material Circularity Indicators* (MCI) (EMF; GRANTA, 2015);
- *Material Reutilization Score* (MRS) (C2C INSTITUTE, 2014); e
- Indicadores baseados na ACV.

Esses indicadores são combinados via MCDA.

D.1.1 Indicadores baseados na Circularidade de Materiais

O MRS é uma métrica utilizada para quantificar a reutilização de materiais, considerando duas variáveis principais:

1. Reciclabilidade Intrínseca (IR): % do produto que pode ser reciclado ao menos uma vez após o uso inicial.
2. Conteúdo Reciclado (RC): % de material reciclado presente no produto.

A fórmula do MRS é dada pela Eq. D.1.

$$MRS = \frac{[(\%IR) + (\%RC \times 2)]}{3} \times 100 \quad (D.1)$$

onde o valor final varia de 0 a 100.

Já o MCI, mede o quanto os materiais circulam dentro do contexto da EC. O MCI varia de 0 a 1 e é representado pela Eq. D.2.

$$MCI = 1 - LFI \times F(X) \quad (D.2)$$

Onde:

LFI é o Índice de Fluxo Linear.

F(X) é a Função de utilidade.

A função F(X) considera a vida útil relativa do produto e sua frequência de uso, sendo que X é o fator de utilidade do produto, considerando sua longevidade e intensidade de uso. LFI representa a fração de material que segue um fluxo linear (sem reaproveitamento significativo). Sua fórmula é apresentada na Eq. D.3.

$$LFI = \frac{V + F}{V + W} \quad (D.3)$$

Onde:

V é a massa de material virgem utilizado na fabricação do produto.

W é a massa de resíduos não recuperáveis após o uso do produto.

F é a massa total de material remanufaturado ou reciclado no ciclo de vida do produto.

D.1.2 Indicadores baseados no Ciclo de Vida

Os indicadores baseados no ciclo de vida são obtidos por meio da ACV e representam diferentes categorias de impacto ambiental. A seleção das categorias seguiu as diretrizes do *Product Environmental Footprint Category Rules* (PEFCR) para embalagens de cerveja. Os impactos avaliados foram:

- Mudança climática (CC): $kgCO_{2eq}$
- Depleção de recursos abióticos (ARD): $kgSb_{eq}$
- Acidificação (AC): $molH_{eq}^{+}$
- Material particulado (PM): $kgPM_{2.5eq}$
- Consumo de água (WC): m^3

Os cálculos foram realizados com o *software Instant LCA Packaging* v1.15.2, adotando uma unidade funcional de 1 hectolitro (hl) de cerveja. A análise focou na produção da embalagem primária, excluindo transporte e outros processos para alinhar os cálculos com os indicadores de circularidade de materiais.

D.2 BCI - BUILDING CIRCULARITY INDICATORS

A metodologia de avaliação foi desenvolvida para medir a circularidade de edifícios por meio do *Building Circularity Indicator* (BCI), integrando três indicadores principais:

1. *Material Circularity Indicator* (MCI): Mede a circularidade dos materiais conforme EMF; Granta (2015).
2. *Product Circularity Indicator* (PCI): Avalia a capacidade de desmontagem e reutilização de produtos.
3. *System Circularity Indicator* (SCI): Avalia a circularidade de sistemas de construção com base no peso dos produtos e na separação em camadas do sistema.

Para o MCI, a metodologia segue o modelo da EMF; Granta (2015), adaptado para o ambiente construído. MCI utiliza a mesma Eq. D.2 do sistema de indicadores APL.

Para o PCI, a Eq. D.4 para cada um dos PCI_p para o produto (p) é a seguinte:

$$PCI_p = \frac{1}{F_d} \sum_{i=1}^n MCI_p \times F_i \quad (D.4)$$

Onde:

F_i é um dos Fatores Determinantes de Desmontagem (DDF) (VERBERNE, 2016) e a Eq. D.5 apresenta:

$$F_d = \sum_{i=1}^n F_i \quad (D.5)$$

Onde:

F_d é a soma de todos os fatores DDF.

Para agregar todos os MCI_p e PCI_p dentro de um sistema, são utilizados fatores normalizados para determinar uma média ponderada de cada produto. A Eq. D.6 para o valor teórico de $SCI_{s(t)}$ para um sistema é a seguinte:

$$SCI_{s(t)} = \frac{1}{W_s} \sum_{j=1}^n MCI_j \times W_j \quad (D.6)$$

Onde:

MCI_j o Indicador de Circularidade de Material para um produto j.

A Eq. D.7 para o valor prático de $SCI_{s(p)}$ para um sistema s é a seguinte:

$$SCI_{s(p)} = \frac{1}{W_s} \sum_{j=1}^n PCI_j \times W_j \quad (D.7)$$

ambos com W_j a massa do produto j e, a massa total do produto do intervalo do produto (j, n) identificado pela Eq. D.8:

$$W_s = \sum_{j=1}^n W_j \quad (D.8)$$

O indicador SCI pode variar de 0 a 1. Num sistema completamente circular, $SCI = 1$.

Para determinar o Indicador BCI, todos os Indicadores de Circularidade do Sistema (SCI), tanto práticos quanto teóricos, e as variáveis ponderadas devem ser agregados em um único valor específico. A determinação do BCI para um edifício pode ser feita utilizando as seguintes equações (Eq. D.9 e Eq. D.10):

$$BCI_{(t)} = \frac{1}{LK} \sum_{k=1}^n SCI_{(t)k} \times LK_k \quad (D.9)$$

$$BCI_{(p)} = \frac{1}{LK} \sum_{k=1}^n SCI_{(p)k} \times LK_k \quad (D.10)$$

Onde:

$SCI_{(t)k}$ é o valor teórico do Indicador de Circularidade do Sistema.

$SCI_{(p)k}$ é o valor prático do Indicador de Circularidade do Sistema para um sistema.
 LK_k é o fator de dependência do sistema.

$$LK = \sum_{k=1}^n LK_k \quad (D.11)$$

Onde LK é a soma das dependências do sistema.

No desenvolvimento do BCI, foram feitas suposições relacionadas aos indicadores de impacto remanescente. Com base no interesse dos *stakeholders*, uma seleção de precondições pode ser feita. Todas essas precondições estão associadas a benefícios ambientais e são projetadas para avaliar como a mudança no nível de circularidade dos produtos impacta outros fatores ecológicos. As pré-condições levantadas são:

1. Saúde do Material: Baixa toxicidade e alta reciclabilidade.
2. Uso de Energia: Otimização do uso de energia, priorizando fontes renováveis.
3. Pegada de Carbono: Minimização das emissões de CO_2 durante todo o ciclo de vida do edifício.

A saúde do material refere-se à toxicidade e à presença de substâncias químicas perigosas. No modelo utilizado, optou-se pelo *Cradle to Cradle Certification - Material Health approach* (C2C INSTITUTE, 2014), que classifica os materiais conforme sua segurança e impacto na saúde humana e ambiental. Os resultados da avaliação da saúde do material são apresentados de acordo com a metodologia C2C, utilizando uma escala de cores:

- Verde: Baixo risco ou nenhum risco associado ao material, preferido para uso.
- Amarelo: Risco moderado, aceitável, a menos que uma alternativa verde esteja disponível.
- Vermelho: Alto risco e perigo associado ao uso do material, estratégia de eliminação necessária.

Para uso de energia, foi feita uma distinção clara entre recursos energéticos renováveis e combustíveis fósseis. A Eq. D.12 para um único produto, com base em todos os subconjuntos, peças e/ou materiais X, é a seguinte:

$$E_p = \frac{\sum_x E_{F(X)}}{\sum_x E_{R(X)}} \quad (D.12)$$

Onde: E_p é a razão entre o uso de energia renovável e combustíveis fósseis para o produto.

E_F é a energia de combustível fóssil usada na produção.

E_R é a energia renovável utilizada.

Para a pegada de carbono, a Eq. D.13 da quantidade de emissões de CO_2 , com base em todos os subconjuntos, peças e/ou materiais X , é a seguinte:

$$CO_{2,tot} = \sum CO_{2,(X)} \quad (D.13)$$

Onde:

$CO_{2,tot}$ são as emissões totais de CO_2 do produto.

$CO_{2,(X)}$ Emissões totais de CO_2 dos subconjuntos, peças e/ou materiais X .

D.3 BWPE - BIM-BASED WHOLE-LIFE PERFORMANCE ESTIMATOR

O modelo BWPE foi desenvolvido com base no princípio da distribuição de confiabilidade de produtos, especificamente a distribuição de Weibull, que é amplamente utilizada para descrever o comportamento de falha de produtos ao longo de seu ciclo de vida. O modelo considera o período útil e o período de desgaste do ciclo de vida de um edifício, enquanto o período de mortalidade infantil é desconsiderado, pois não afeta significativamente o desempenho de recuperação de materiais. A Eq. D.14 da distribuição de Weibull utilizada no modelo é dada por:

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\}, \quad t \geq 0 \quad (D.14)$$

Onde:

α é o parâmetro de escala.

β é o parâmetro de forma.

t representa o tempo.

Com base nesta equação, foi desenvolvida uma função de recuperação de edifícios Y (Eq. D.15), definida como:

$$Y = f < S, D(t) > \quad (D.15)$$

Onde:

S representa o conjunto de especificações de projeto que influenciam a recuperabilidade (reutilização e reciclagem) dos materiais do edifício.

$D(t)$ é o fator de deterioração, que varia ao longo do tempo.

A reusabilidade dos materiais de um edifício foi determinada com base nos seguintes fatores:

1. Proporção de conexões desmontáveis (d_c) em relação ao total de conexões no edifício (Eq. D.16):

$$d_c = \frac{ndc}{nc} \quad (D.16)$$

Onde, o ndc é o número de conexões desmontáveis e o nc é o número total de conexões.

2. Uso de montagens pré-fabricadas (f_b), representado pela Eq. D.17:

$$f_b = \frac{nfb}{ne} \quad (D.17)$$

Onde, o nfb é o número de montagens pré-fabricadas e o ne é o número total de elementos de construção.

3. Proporção de materiais sem acabamentos secundários ($\bar{S}_f$, Eq. D.18):

$$\bar{S}_f = \frac{v\bar{S}_f}{vm} \quad (D.18)$$

Onde, o $v\bar{S}_f$ é o volume de materiais sem acabamentos secundários e o vm é o volume total de materiais no edifício.

4. Proporção de materiais sem conteúdo tóxico ou perigoso ($\bar{h}_t$, Eq. D.19):

$$\bar{h}_t = \frac{v\bar{h}_t}{vm} \quad (D.19)$$

Onde, o $v\bar{h}_t$ é o volume de materiais sem conteúdo tóxico e o vm é o volume total de materiais do edifício.

A equação final para o componente de reusabilidade do desempenho de recuperação do edifício (S_{ru}) é dada pela Eq. D.20:

$$S_{ru} = (\beta d_c + \lambda f_b + \mu \bar{S}_f + \rho \bar{h}_t) \quad (D.20)$$

Onde os parâmetros β , λ , μ e ρ são a função de ponderação que determina a importância de cada um dos fatores para a reutilização de materiais de construção em fim de vida. Já a reciclabilidade dos materiais do edifício (S_{rc}) é definida como o complemento da reusabilidade (Eq. D.21):

$$S_{rc} = 1 - S_{ru} \quad (D.21)$$

D.3.1 Integração do Modelo com BIM

O BWPE foi implementado no ambiente BIM como um *add-in* para o *Autodesk Revit*. A integração foi realizada por meio da API do Revit, utilizando Visual Studio e a linguagem de programação C. Os principais componentes da integração incluem:

- Criação de parâmetros personalizados no Revit (como identificação de conexões desmontáveis e uso de montagens pré-fabricadas).

- Interface para entrada de dados no Revit, onde o usuário pode especificar os parâmetros de cada componente do edifício.
- Geração de relatórios automatizados com a análise do desempenho de recuperação do edifício, auxiliando na tomada de decisões sobre reutilização e reciclagem de materiais.
- A interface personalizada no Revit permite que os projetistas insiram as especificações do edifício na aba “App Setting” e obtenham uma avaliação do desempenho de recuperação do modelo. A análise gera gráficos e tabelas que mostram a proporção de materiais que podem ser reutilizados, reciclados ou descartados.

D.4 C2C INDICATORS - CRADLE TO CRADLE INDICATORS

O conceito Cradle to Cradle (C2C) foi desenvolvido para criar produtos que possam ser completamente reciclados ou compostados, eliminando resíduos e minimizando impactos ambientais. Ele se baseia em três princípios fundamentais:

1. Eliminar o conceito de resíduo: Os materiais devem ser reutilizados continuamente, mantendo seu valor.
2. Uso de energia renovável: O ciclo de produção deve ser abastecido com energia de fontes renováveis.
3. Celebrar a diversidade: Apoio a ecossistemas diversos e práticas sociais justas.

O C2C avalia produtos em cinco categorias principais:

1. Saúde do Material: Garante que os materiais usados são seguros para seres humanos e o meio ambiente.
2. Reutilização de Materiais: Mede a capacidade dos materiais de serem reutilizados no ciclo técnico ou biológico.
3. Energia Renovável e Gestão de Carbono: Avalia o uso de energia renovável e estratégias de redução de carbono.
4. Gestão da Água: Promove práticas responsáveis de uso e descarte de água.
5. Justiça Social: Certifica que as práticas de produção respeitam os direitos humanos e normas trabalhistas.

Os produtos podem ser certificados em cinco níveis: Básico, Bronze, Prata, Ouro e Platina, dependendo do desempenho nas cinco categorias.

D.4.1 Saúde do Material

Avalia a toxicidade dos materiais usados no produto e seu impacto na saúde humana. Materiais proibidos incluem:

- Metais pesados (chumbo, cádmio, mercúrio).
- Produtos químicos persistentes no meio ambiente.
- Substâncias que afetam negativamente a saúde humana.

Os materiais são classificados em um sistema de categorias:

- A (Seguro): Sem substâncias problemáticas.
- B (Aceitável): Pode ser melhorado, mas não representa riscos imediatos.
- C (Melhorável): Contém substâncias problemáticas, mas com viabilidade de substituição.
- X (Não Aceitável): Contém substâncias perigosas que devem ser eliminadas.

D.4.2 Reutilização de Materiais

Os produtos são avaliados pela sua circularidade, ou seja, a capacidade dos materiais de serem reutilizados após o fim da vida útil. A fórmula usada para calcular o MRS foi apresentada pela Eq. D.1.

Os produtos são classificados com base na porcentagem de material reutilizável, com um mínimo de 35% para a certificação Bronze e 100% para Platina.

D.4.3 Energia Renovável e Gestão de Carbono

Esse critério avalia o uso de energia renovável no processo de fabricação. A métrica principal (Eq. D.22) é a fração de energia renovável usada no processo de produção:

$$REI = \frac{E_{renovavel}}{E_{total}} \quad (D.22)$$

Onde:

REI é o índice de energia renovável.

$E_{renovavel}$ é a energia de fontes renováveis consumida.

E_{total} é a energia total consumida na produção.

Para atingir a certificação Ouro, pelo menos 50% da energia utilizada na produção deve vir de fontes renováveis. Para Platina, esse valor deve ser 100%.

D.4.4 Gestão da Água

A gestão da água no processo produtivo é avaliada com base no cumprimento de regulamentações ambientais, eficiência no uso da água e tratamento de efluentes. Um dos indicadores-chave (Eq. D.23) é a eficiência no uso da água:

$$WEI = \frac{W_{usada}}{W_{produzida}} \quad (D.23)$$

Onde:

WEI é o índice de eficiência no uso da água.

W_{usada} é o volume de água consumido no processo.

$W_{produzida}$ é o volume total de produto fabricado.

Os produtos de nível Platina devem garantir que toda a água descartada tenha qualidade de água potável.

D.4.5 Justiça Social

Esse critério avalia as condições de trabalho, impacto social e conformidade com normas internacionais de direitos humanos. Os produtos podem atingir certificações mais altas se suas empresas implementarem programas de responsabilidade social, como auditorias de fornecedores e projetos comunitários.

D.4.6 Melhoria Contínua

O programa C2C busca incentivar melhorias contínuas. Empresas certificadas devem apresentar planos para eliminar substâncias problemáticas e aumentar o uso de materiais sustentáveis ao longo do tempo.

D.5 CBM – IS - *CIRCULAR BUSINESS MODEL SET OF INDICATORS BASED ON SUSTAINABILITY*

Os indicadores propostos neste estudo foram desenvolvidos com base nos princípios da EC, nos Modelos de Negócios Circulares (CBM) e na sustentabilidade. Foram criados dezoito indicadores agrupados em três pilares principais: ambiental, econômico e social. O pilar ambiental inclui redução de materiais, reciclabilidade e redução de substâncias tóxicas. O pilar econômico analisa custos, receitas e tributação. O pilar social cobre aspectos como geração de empregos, caracterização de mercado e envolvimento de *stakeholders*. Pontos-chave do CBM-IS:

1. Interdependência dos Indicadores:

Melhorar um único aspecto, como a redução de matéria-prima, pode não ser benéfico se isso comprometer a longevidade do produto.

Exemplo: Se uma empresa reduz o uso de matéria-prima, mas fabrica produtos menos duráveis, ela pode estar apenas antecipando resíduos, contrariando os princípios da Economia Circular.

2. Avaliação Conjunta para Melhor Compreensão:

Os indicadores devem ser analisados em conjunto para fornecer uma visão holística do desempenho circular.

Apenas com um conjunto completo de indicadores é possível determinar se uma empresa realmente evoluiu em direção à circularidade.

3. Efeito de Compensação:

Melhorias em um indicador podem ser anuladas por retrocessos em outro.

Exemplo: Aumento da reciclabilidade de um material, mas com maior consumo de energia na reciclagem, pode não ser um ganho líquido para a Economia Circular.

Os indicadores da dimensão I: Material são descritos em detalhes no Quadro D.1.

Quadro D.1 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Material

Indicador	Subindicador	Medida	Descrição
Redução de materiais	Fabricação	Quantidade reduzida	Mede a redução de materiais no processo de produção
	Produto	Peso reduzido	Avalia a redução no peso do produto final
Renovabilidade	Energia renovável	% de uso de energia renovável	Mede a quantidade de energia renovável usada na produção
	Matérias-primas renováveis	% de materiais renováveis	Mede a quantidade de materiais renováveis usados no produto
Reciclabilidade	Materiais reciclados	% de material reciclado	Mede o uso de materiais reciclados no produto
	Potencial de reciclabilidade	% de produto reciclável	Mede o potencial do produto para ser reciclado após o uso
Redução de substâncias tóxicas		Quantidade reduzida	Quantifica a redução de substâncias tóxicas no produto
Reuso	Processo de produção	Quantidade reutilizada	Mede a quantidade de materiais reutilizados na cadeia de suprimentos
	Produto	Quantidade reutilizada	Mede a quantidade de materiais reutilizados no produto
Remanufatura		Quantidade de produtos remanufaturados	Mede a quantidade de produtos remanufaturados
Recondicionamento		Quantidade recuperada	Mede a recuperação total de partes ou componentes do produto
Longevidade do produto		Tempo de vida adicional	Mede o aumento da vida útil do produto
Estrutura e diversidade de stakeholders	Estrutura	Qualitativo	Avalia as sinergias da empresa com a cadeia de suprimentos
	Stakeholders	Qualitativo	Mapeia os stakeholders envolvidos na cadeia de valor circular

Os indicadores da dimensão II: Econômico são descritos em detalhes no Quadro D.2.

Quadro D.2 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Econômico

Indicador	Subindicador	Medida	Descrição
Resultados financeiros	Redução de custos	Valor monetário	Mede a redução de custos na produção e no uso de materiais
	Geração de receita	% de mercado	Mede a vantagem competitiva e novas receitas geradas pela EC
	Lucratividade	ROA e ROE	Mede a rentabilidade financeira da empresa
Tributação e regulações		Qualitativo	Identifica marcos regulatórios que subsidiam o modelo de negócio circular
Investimento circular	Inovação	Valor monetário investido	Mede os investimentos em inovações para tornar o modelo de negócio mais circular
ROA: Retorno Sobre o Ativo		ROE: Retorno Sobre o Capital	

Os indicadores da dimensão III: Social são descritos em detalhes no Quadro D.3.

Quadro D.3 – Conjunto de indicadores do CBM-IS - Social

Indicador	Subindicador	Medida	Descrição
Criação de empregos		Quantidade de novos empregos	Mede o impacto da EC na geração de empregos
Renda gerada		Valor monetário gerado	Mede a renda gerada pelos empregos criados na EC
Participação dos funcionários		% de trabalhadores envolvidos na EC	Mede o envolvimento dos trabalhadores nas atividades circulares
Caracterização do mercado	Cliente	Qualitativo	Analisa o perfil do consumidor e sua percepção sobre produtos circulares
	Valor percebido	Qualitativo	Mede os benefícios percebidos pelos clientes
	Comunicação	Qualitativo	Mede como é absorvida a comunicação sobre EC da empresa pelos consumidores
Envolvimento de <i>stakeholders</i>		Qualitativo	Caracteriza a participação de <i>stakeholders</i> na tomada de decisão
Mudança cultural		Qualitativo	Mede a mudança de mentalidade na organização devido à EC

D.6 CHECK - CIRCULARITY CHECK

O sistema de indicadores se encontra numa plataforma online em que é possível responder as questões gratuitamente e verificar o grau de circularidade de seu produto. São dados resultados parciais por indicador e o total de circularidade do seu produto ou serviço, levando em consideração as condições impostas por cada indicador. As questões do formulário online se encontram abaixo.

D.6.1 Questões gerais

- Por favor, indique que tipo de usuário você é.
- Nome do produto/serviço.
- Nome da empresa fornecedora deste produto e/ou serviço.
- Tipo de empresa.
- O que envolve a sua proposta de negócios?

D.6.2 Indicador 1: Circularidade do Design, aquisição e produção (incluindo embalagens)

Pelo menos uma pergunta deve obter uma pontuação positiva para ser qualificada como circular.

Design

- Até que ponto todos os materiais presentes no produto e na embalagem e/ou utilizados para o serviço foram listados e categorizados como pertencentes ao tecnociclo e/ou ao biociclo?
- A qual ciclo o produto, embalagem e/ou serviço (se aplicável) foram categorizados?
- O produto ou serviço foi (re)desenhado para circularidade?
- Cradle-to-cradle, biomimética, a Blue Economy, a abordagem Products that Last ou The Natural Step foram utilizados como estratégia de design?
- Os produtos (e embalagens) possuem certificação Cradle-to-cradle?
- Existem produtos químicos da Lista de Produtos Proibidos Cradle-to-cradle presentes no produto e na embalagem acima dos limites permitidos? (Não é relevante, se o produto tiver pelo menos o selo Bronze)
- Foi tomada alguma ação para otimizar todos os produtos químicos remanescentes qualificados pelo Cradle-to-cradle como X-Assessed? (Não é relevante, se o produto tiver pelo menos o selo Bronze)
- O produto e/ou a embalagem ou a infraestrutura de serviços contêm materiais tóxicos? (Não é relevante, se o produto tiver pelo menos o selo Bronze)
- O produto ou serviço foi redesenhado para uso, reutilização e reciclagem ideais? Marque quantas respostas forem aplicáveis.
- O produto ou serviço foi redesenhado para prolongar o tempo de vida útil do produto e/ou melhorar sua funcionalidade? Marque quantas respostas forem aplicáveis
- Qual aumento no tempo de vida útil do produto e/ou na funcionalidade você alcançou?
- Você utiliza a votação dos clientes para selecionar o design final?

Aquisição

- Você implementou a aquisição verde para este produto e embalagem?
- Qual a porcentagem de insumos do produto que provém de materiais reciclados, componentes reutilizados, resíduos/subprodutos de outros produtos ou processos de produção e/ou fornecedores com certificado de sustentabilidade?
- Qual a porcentagem de insumos da embalagem que provém de materiais reciclados ou reutilizados?
- O produto (ou a infraestrutura do serviço) contém materiais escassos?

- O produto ou a embalagem contêm matérias-primas secundárias provenientes de plásticos oceânicos?
- Em qual escala geográfica você adquire seus componentes e materiais?

Produção

- Qual a eficiência dos processos de reciclagem utilizados para produzir insumos reciclados?
- Quanto valor material é mantido/perdido na cadeia de produção e valor até a entrega?
- Quanto de água é preservada em alta qualidade durante a fabricação?
- Em que medida você utiliza energia renovável na fabricação? (Solar, eólica, geotérmica, etc.)

D.6.3 Indicador 2: Entrega

Para esse indicador, não há pontuação mínima.

- A que distância você transporta seus produtos/serviços para entrega?
- Em que medida o transporte do produto e/ou a entrega do serviço são movidos por energia renovável?
- Em que medida os materiais (por exemplo, embalagens, produtos químicos, água de resfriamento) utilizados durante a entrega do produto e/ou serviço estão sendo reutilizados ou coletados para reciclagem?

D.6.4 Indicador 3: Uso

Pelo menos uma pergunta deve obter uma pontuação positiva para ser qualificada como circular.

- Seu produto é um bem durável?
- Para qual parte das vendas do produto/serviço você utiliza pelo menos um dos seguintes modelos de negócios?

Serviços baseados em produtos (por exemplo, reparo)

Plataformas de compartilhamento (por exemplo, Airbnb, compartilhamento de carros)

Pagamento por uso (por exemplo, pagamento por cópia)

Aluguel

Vendas com prêmio de recompra ou depósito

Leasing (excluindo leasing financeiro e leasing convencional de carros)

Serviço com contrato baseado em desempenho

- Você oferece e/ou facilita a manutenção e/ou reparo do produto durante toda a sua vida útil?
- Você tem uma relação direta com o usuário?
- Em que medida você fornece informações sobre o produto, embalagem e/ou serviço? É possível marcar mais de uma opção.
- Em que medida o uso do produto e/ou serviço é alimentado por energia renovável? (eletricidade verde e/ou gás verde)

D.6.5 Indicador 4: Recuperação

Todas as perguntas devem obter uma pontuação positiva para serem qualificadas como circulares.

- Qual porcentagem dos produtos vendidos pela empresa e seus materiais de embalagem foram recuperados no ano passado (ou seja, reciclados ou reutilizados no mercado da UE, reformados, remanufaturados e revendidos, aproveitados pela cascata de biomassa ou como composto) ao final de sua vida útil?
- Qual a eficiência das capacidades de reciclagem dos materiais após o primeiro uso do produto? Marque apenas uma opção.
- Você possui um sistema de gerenciamento de devolução ou coleta para reciclagem?
- Após o uso na UE, mais de aproximadamente 25% dos produtos (ou da infraestrutura do serviço) estão sendo vendidos para mercados fora da UE?
- No caso de conteúdo reciclado, a aplicação foi avaliada quanto aos riscos de materiais legados?
- E Microplásticos e plásticos oxo-degradáveis estão excluídos do produto e da embalagem, impedidos de entrar no meio ambiente ou existe um projeto iniciado para alcançar esse objetivo?
- Alguns biomateriais utilizados são biodegradáveis no ambiente natural, incluindo o ambiente marinho, ou são coletados separadamente para reutilização ou reciclagem?

D.6.6 Indicador 5: Sustentabilidade

Todas as perguntas devem obter uma pontuação positiva para serem qualificadas como sustentáveis e circulares.

- Sua empresa foi publicamente acusada nos últimos dois anos de tratamento injusto de funcionários, fornecedores ou parceiros?
- Sua empresa foi publicamente acusada nos últimos dois anos de fraude fiscal, violação da lei ou descumprimento de regulamentos?
- No caso de custos sociais decorrentes de impactos negativos do novo modelo de negócios, a empresa está evitando esses impactos ou compensando-os?
- Em que medida sua empresa é dedicada à sustentabilidade? (Você pode marcar mais de uma opção)
- Os esforços para reciclagem, reparo e manutenção do produto causam mais de aproximadamente 25% de emissões adicionais de CO_2 ?
- Existe uma avaliação baseada no ciclo de vida disponível para comprovar os impactos ambientais totais?
- O produto foi otimizado para eficiência energética ao longo de todo o ciclo de vida?

D.6.7 Questões finais

- Tamanho da empresa:
- Grupo de produtos:
- Você tem algum comentário adicional sobre esta lista de verificação? Agradecemos seu feedback! (Por favor, use o inglês, se possível)
- Pergunta aberta, não para a pontuação: quais são os principais gargalos que você experimenta para modelos de negócios circulares? Você pode marcar mais de uma opção, se desejar.
- Esta informação foi verificada por:
- Pessoa de contato:
- E-mail:
- País (residência do principal local de produção ou sede):

D.7 CMT - CIRCULARITY MEASUREMENT TOOLKIT

A estrutura do CMT foi baseada em uma revisão da literatura, buscando categorizar e padronizar diferentes níveis de circularidade para Pequenas e Médias Empresas do setor manufatureiro. O estudo propôs nove níveis de circularidade, comparáveis a níveis de maturidade, onde o nível 1 é o mais alto e o nível 9 o mais baixo. Cada nível possui características específicas relacionadas à adoção da economia circular:

Nível 1: **Circular Developer**: Organizações líderes na implementação da EC, que contribuem para o desenvolvimento de novas tecnologias e regulamentações ambientais que beneficiam e aprimoram a circularidade.

Nível 2: **Circular Promoter**: Empresas que integraram com sucesso a EC em sua estratégia de negócios, atendendo clientes e expandindo o mercado ambientalmente consciente.

Nível 3: **Circular**: Organizações que adotaram completamente práticas de EC em seus negócios e cadeia de valor, incluindo práticas de compras circulares e aumento da longevidade com clientes, fornecedores e outras empresas.

Nível 4: **Waved**: Empresas que estão iniciando a conscientização externa e introduzindo os princípios da EC aos clientes e à cadeia de suprimentos para promover a circularidade em toda a cadeia de valor.

Nível 5: **Curved**: Organizações que adotaram integralmente práticas de EC internamente, mas sem a colaboração de clientes, fornecedores ou outras empresas.

Nível 6: **Saw-Tooth**: Empresas que introduziram práticas importantes de EC internamente, reconhecendo melhorias e iniciando o processo de adoção da circularidade como parte da cultura empresarial.

Nível 7: **V-shape up**: Organizações que ainda não aplicaram práticas de EC, mas estão começando a explorar os benefícios potenciais da economia circular, muitas vezes devido à conscientização ambiental de algum membro da alta gestão.

Nível 8: **^-shape down**: Empresas que, sem perceber, já aplicam algumas práticas internas relacionadas à eficiência e consumo de recursos, mas ainda sem plena consciência sobre a EC.

Nível 9: **Linear**: Organizações que seguem apenas uma abordagem linear, focadas exclusivamente em benefícios econômicos e no cumprimento mínimo das exigências governamentais ou legislativas para operar.

Para chegar aos níveis de circularidade foram identificados fatores e transformados na Eq. D.24 apresentada abaixo.

$$\text{Nível de Circularidade} = (A + B) + D + E + F + G + H + I \quad (\text{D.24})$$

Os principais fatores considerados são:

A: Práticas internas de eficiência de recursos.

B: Conscientização interna.

C: Soma de A e B (para medir a eficiência e a conscientização interna).

D: Conscientização externa.

E: Suporte à cadeia de valor.

F: Práticas externas para aumento da longevidade.

G: Desenvolvimento do mercado verde.

H: Desenvolvimento tecnológico.

I: Desenvolvimento legislativo.

O CMT inclui oito questionários, cada um relacionado a um dos fatores de circularidade. Os questionários abordam desde práticas internas e conscientização até suporte à cadeia de valor e desenvolvimento legislativo. Os questionários são apresentados a seguir.

D.7.1 Seção A: Uso de Recursos

Design

- **A.a) Design de produtos para redução do consumo de recursos**

O design do produto considera o uso mínimo de recursos?

A empresa evita o uso de recursos não renováveis no design, a menos que seja impossível?

- **A.b) Design de produtos para reutilização, reciclagem e/ou recuperação de materiais e/ou componentes**

A empresa considera e aplica o design para reutilização?

A empresa considera e aplica o design para desmontagem?

A empresa considera e aplica o design para recondicionamento?

A empresa considera e aplica o design para remanufatura?

A empresa considera e aplica o design para reciclagem?

- **A.c) Design de processos para minimização de resíduos**

A empresa considera e aplica o design para a minimização de resíduos?

- **A.d) Design de produtos para durabilidade**

A empresa considera e aplica o design para produtos duráveis?

Produção

- **A.e) Redução de materiais (ou seja, matéria-prima e/ou água)**

Matéria-prima

A empresa mantém registro do consumo de materiais?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de materiais utilizados?

A empresa já está implementando ações para reduzir a quantidade de materiais utilizados?

Água

A empresa mantém registro da taxa de água descartada e do consumo de água?

A empresa aplica medidas de conservação de água?

A empresa trata a água residual?

- **A.f) Redução do consumo de energia (ou seja, eletricidade, carvão, gás)**

A empresa mantém registro do consumo de energia?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de energia consumida?

A empresa já está implementando ações para reduzir a quantidade de energia consumida?

A empresa já está analisando ou identificando se algum de seus processos pode produzir energia?

A empresa está utilizando energia produzida por ela mesma?

A empresa utiliza energia renovável?

- **A.g) Uso de materiais e energia renováveis no processo de produção**

Materiais renováveis

A empresa mantém registro do consumo de materiais não renováveis?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir ou eliminar o uso de materiais não renováveis, substituindo-os por materiais renováveis?

A empresa já está implementando ações para reduzir o uso de materiais não renováveis?

Energia renovável

A empresa mantém registro do consumo de fontes de energia não renováveis?

A empresa já está analisando e identificando a possibilidade de fabricar seus produtos com o uso de energia renovável?

A empresa já está implementando ações para substituir a energia não renovável por fontes de energia renovável?

- **A.h) Redução das emissões de poluentes**

A empresa mantém registros de poluição?

A empresa mantém registro de suas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de emissões de GEE?

A empresa já está implementando ações de redução de GEE?

A empresa mantém registro do uso de fertilizantes?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de fertilizantes?

A empresa já está implementando ações de redução de fertilizantes?

A empresa mantém registro do uso de pesticidas?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de pesticidas?

A empresa já está implementando ações de redução de pesticidas?

A empresa mantém registro do uso de gasolina?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de gasolina utilizada?

A empresa já está implementando ações de redução do uso de gasolina?

A empresa mantém registros do uso de diesel?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de diesel utilizado?

A empresa já está implementando ações de redução do uso de diesel?

A empresa mantém registros do uso de gás natural?

A empresa já está analisando e identificando possíveis maneiras de reduzir a quantidade de gás natural?

A empresa já está implementando ações de redução do uso de gás natural?

- **A.i) Redução de resíduos**

A empresa apoia a prevenção de aterros sanitários?

A empresa mantém registros da geração de resíduos?

A empresa realiza a separação de resíduos de forma eficiente?

A empresa apoia a circulação de resíduos, entendendo o resíduo como um insumo?

Em caso de descarte, a empresa o faz de forma adequada em relação ao meio ambiente?

Embalagem e distribuição

- **A.j) Embalagem verde**

A empresa utiliza embalagens verdes e eficientes?

- **A.k) Distribuição verde**

A empresa escolhe opções de transporte com impacto ambiental comparativamente menor, como ferrovia ou transporte aquático para a distribuição de seus produtos?

A empresa está utilizando ferramentas de gestão, técnicas e tecnologias para otimizar a eficiência da distribuição e do transporte?

D.7.2 Seção B: Conscientização Interna

- **B.a) Gestão circular, cultura e monitoramento contínuo**

A organização formulou uma estratégia de economia circular?

A empresa designou uma pessoa responsável por questões ambientais e circulares?

A empresa possui uma estrutura funcional encarregada das práticas de circularidade?

A gestão está comprometida e envolvida com a circularidade?

Os acionistas e investidores estão envolvidos e apoiando a circularidade?

A organização está desenvolvendo a economia circular como uma cultura?

A circularidade faz parte dos valores da cultura organizacional da empresa?

A empresa designou um orçamento anual para despesas ambientais?

A empresa está criando e compartilhando relatórios ambientais anuais com seus stakeholders?

A empresa aplica o monitoramento contínuo em relação à circularidade?

A empresa utiliza sistemas e tecnologias da informação para gerar e comunicar dados precisos?

A empresa reconheceu alguma vantagem competitiva e reputacional devido às práticas circulares?

A empresa reconheceu algum benefício econômico ou evitação de custos devido às práticas circulares?

- **B.b) Treinamento especial para trabalhadores em questões ambientais e economias circulares**

A empresa está contribuindo para aumentar a conscientização ambiental entre todos os membros da organização?

A empresa oferece treinamento formal e periódico, compartilhamento de informações e realizações sobre economia circular para novos e atuais membros da organização?

- **B.c) Inclusão de fatores ambientais no sistema de avaliação de desempenho interno**

A empresa estabeleceu metas de redução de água, energia, resíduos, matérias-primas, etc.?

A empresa leva em consideração os fatores ambientais ao avaliar o desempenho interno?

A organização utiliza um painel de indicadores para entender e visualizar suas metas?

- **B.d) Programa de auditoria ambiental**

A empresa identifica os riscos ambientais?

A empresa mede e monitora seus impactos ambientais por meio de ferramentas como ISO14000, análise do ciclo de vida ou análise do fluxo de materiais?

A empresa segue algum framework de sustentabilidade, como o Carbon Disclosure Project (CDP), Global Reporting Initiative (GRI) ou Dow Jones Sustainability Index (DJSI)?

A empresa possui uma política ambiental?

A empresa está realizando ações para reduzir o impacto ambiental de suas atividades no setor de energia?

A empresa está realizando ações para reduzir o impacto ambiental de suas atividades no setor de água?

A empresa está realizando ações para reduzir o impacto ambiental de suas atividades na conservação do meio ambiente?

D.7.3 Seção D: Conscientização Externa

- **D.a) Conscientização entre os clientes**

A empresa está medindo ou fazendo algo para entender o nível de conscientização de seus clientes?

A empresa está contribuindo para aumentar a conscientização sobre a circularidade entre seus clientes?

A empresa está contribuindo para aumentar a conscientização sobre a circularidade na comunidade?

- **D.b) Rotulagem ecológica dos produtos**

A empresa está compartilhando com os clientes os benefícios ambientais para motivar a compra de seus produtos?

- **D.c) Conscientização entre os fornecedores**

A empresa está medindo ou fazendo algo para entender o nível de conscientização de seus fornecedores?

A empresa está contribuindo para aumentar a conscientização social entre seus fornecedores?

D.7.4 Seção E: Suporte na Cadeia de Valor

- **E.a) Seleção de fornecedores utilizando critérios ambientais**

A empresa está utilizando aquisições sustentáveis/circulares para melhorar os materiais?

A empresa está utilizando aquisições sustentáveis/circulares para garantir recursos sustentáveis futuros?

A empresa está utilizando aquisições sustentáveis/circulares para encontrar materiais reciclados ou de segunda mão, se possível?

A cadeia de suprimentos está envolvida na circularidade?

Os fornecedores são obrigados a fornecer informações ambientais sobre suas atividades e produtos?

A empresa está utilizando aquisições sustentáveis/circulares para desenvolver fornecedores?

A empresa está utilizando aquisições sustentáveis/circulares para avaliar a circularidade dos fornecedores?

A empresa baseia suas decisões de compra em uma avaliação de custo total que considera transporte, uso e custos de gerenciamento de resíduos?

A empresa comunica os critérios de compra ambiental a todos os stakeholders?

- **E.b) Cooperação com outras empresas para estabelecer cadeias eco-industriais**

A empresa está trabalhando em parcerias com empresas do mesmo setor?

A empresa está trabalhando em parcerias com empresas de setores diferentes?

A empresa está trabalhando em parcerias com fornecedores?

A empresa está trabalhando em parcerias com instituições educacionais?

A empresa identificou a quantidade de empregos diretos e indiretos gerados pela criação de parcerias?

- **E.c) Reutilização de energia e/ou água ao longo da cadeia de valor**

A empresa compartilha a energia produzida por seus processos com outra empresa para utilização futura?

A empresa compartilha água utilizada com outra empresa para posterior utilização?

A empresa utiliza energia gerada por outra empresa?

A empresa utiliza água gerada por outra empresa?

D.7.5 Seção F: Longevidade

- **F.a) Recolhimento de produtos dos consumidores após o fim de sua vida funcional**

A empresa já está recolhendo produtos dos consumidores ao final de sua vida funcional?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre a recuperação ao final da vida funcional de seus produtos?

A empresa já está implementando métodos para evitar ou reduzir a variabilidade das condições na recuperação de resíduos, mesmo que tenham sido fabricados juntos?

- **F.b) Recolhimento de produtos dos consumidores após o fim de seu uso**

A empresa já está recolhendo produtos dos consumidores ao final de seu uso?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre a recuperação ao final do uso de seus produtos?

A empresa já está implementando métodos para evitar ou reduzir a variabilidade das condições na recuperação de resíduos, mesmo que tenham sido fabricados juntos?

- **F.c) Reutilização de produtos**

A empresa já está implementando a reutilização como modelo de negócio?

A empresa trabalha para evitar os equívocos ou mal-entendidos sobre produtos reutilizados em comparação com produtos de segunda mão?

- **F.d) Recondicionamento de produtos (ou seja, devolvê-los a boas condições de funcionamento substituindo ou reparando componentes principais defeituosos)**

A empresa já está implementando o recondicionamento como modelo de negócio?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre o recondicionamento em relação a produtos de segunda mão e risco de obsolescência?

A empresa trabalha para evitar a falta de peças sobressalentes para recondicionamento?

- **F.e) Remanufatura de produtos**

A empresa já está implementando a remanufatura como modelo de negócio?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre a remanufatura em relação a produtos de segunda mão?

A empresa trabalha para evitar a falta de peças sobressalentes para remanufatura?

- **F.f) Uso de materiais reciclados**

A empresa já está utilizando materiais reciclados para a produção?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre a reciclagem de materiais?

- **F.g) Reciclagem de sucata**

A empresa já está reciclando a sucata gerada pelos processos de produção?

- **F.h) Reciclagem de produtos recuperados após o fim da vida funcional**

A empresa já está reciclando produtos recuperados dos clientes ao final de sua vida funcional?

- **F.i) Reciclagem de produtos recuperados após o uso**

A empresa já está reciclando produtos recuperados dos clientes ao final de seu uso?

- **F.j) Adoção de uma estratégia de marketing baseada em leasing ou serviços**

A empresa já está implementando o leasing como modelo de negócio?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre o leasing?

- **F.k) Adoção de uma estratégia de mercado baseada em atualização**

A empresa já está implementando a atualização como modelo de negócio?

A empresa trabalha para evitar o equívoco ou mal-entendido sobre a atualização?

- **F.l) Uso em cascata (ou seja, múltiplos usos/aplicações) de componentes e materiais quando suas propriedades são perdidas e não podem mais ser reciclados**

A empresa já está implementando ações em cascata para os materiais que não são mais adequados ou perderam suas propriedades?

D.7.6 Seção G: Desenvolvimento do Mercado Verde

- **G.a) Segmentação de segmentos 'verdes' do mercado**

A empresa compreende totalmente as necessidades do mercado verde ou ambientalmente consciente?

A empresa está implementando ações para satisfazer plenamente as necessidades do mercado verde ou ambientalmente consciente?

A empresa possui um plano ou estratégia de expansão para o mercado verde?

A estratégia de marketing da empresa inclui os aspectos ambientais de seus produtos?

- **G.b) Incentivos**

A empresa oferece incentivos de preço para produtos recuperados, reutilizados, recondicionados, remanufaturados, reciclados, alugados e atualizados para promover o crescimento e desenvolvimento da economia circular?

A empresa oferece incentivos como serviços de garantia para produtos reutilizados, recondicionados, remanufaturados, reciclados, alugados e atualizados para reduzir o risco de obsolescência?

A empresa oferece incentivos como períodos de teste para produtos reutilizados, recondicionados, remanufaturados, reciclados, alugados e atualizados para gerar confiança?

A empresa oferece incentivos dentro da organização para promover o crescimento e desenvolvimento da economia circular?

A empresa oferece incentivos para seus fornecedores com o objetivo de promover o crescimento e desenvolvimento da economia circular?

D.7.7 Seção H: Desenvolvimento Tecnológico

- **H.a) Cooperação multifuncional para melhorias ambientais**

A empresa está investindo em infraestrutura para apoiar a economia circular?

A empresa está acompanhando as inovações ambientais e as melhorias de produtividade dentro do seu setor?

A empresa está avaliando os custos ambientais de aquisições de capital e novas tecnologias a serem adquiridas?

A empresa está realizando pesquisas e desenvolvimentos em circularidade? Por exemplo, processos de reciclagem.

A empresa está continuamente buscando programas de financiamento para criar programas de desenvolvimento?

A empresa está trabalhando em colaboração com outras empresas para desenvolver tecnologias úteis para economias circulares?

A empresa está trabalhando em colaboração com instituições educacionais para desenvolver tecnologias úteis para economias circulares?

D.7.8 Seção I: Desenvolvimento de Legislação

- **I.a) Legislação e políticas**

A empresa está em conformidade com a legislação e as políticas ambientais de acordo com as geografias de suas operações?

A empresa está trabalhando com ONGs para melhorar as economias circulares fora de sua cadeia de valor?

A empresa está colaborando com agências governamentais no desenvolvimento de legislação e políticas ambientais, como tributação contra recursos não renováveis?

A empresa está contribuindo para aumentar a conscientização no governo?

A avaliação de circularidade requer que um representante da empresa responda aos questionários, escolhendo entre “Sim”, “Parcialmente” ou “Não” para cada prática listada. A pontuação é atribuída da seguinte forma:

Sim: 1 ponto (adoção de 70% a 100% das práticas).

Parcialmente: 0,5 ponto (adoção de 1% a 70% das práticas).

Não: 0 ponto (nenhuma prática adotada).

A pontuação final permite calcular o nível de circularidade da organização, fornecendo ideias sobre ações corretivas e futuras estratégias de adaptação à economia circular.

D.8 MIS - *MULTIDIMENSIONAL INDICATOR SET*

O MIS é composto por quatro indicadores para avaliar a reciclagem de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) no contexto da gestão sustentável de materiais. Abaixo estão os indicadores, suas fórmulas e o uso de cada um.

D.8.1 Weight Recovery of Target Material(s) (IW)

Essa equação (Eq. D.25) mede a eficiência de recuperação de peso dos materiais-alvo durante o processo de reciclagem.

$$IW = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad (D.25)$$

Onde:

A letra m é o número de frações de saída destinadas à recuperação de materiais.

A letra n é o número de materiais presentes na entrada do processo de reciclagem.

W'_i é o peso dos materiais-alvo na fração de saída i .

W_j é o peso do material j presente na entrada do processo de reciclagem.

Idealmente, o indicador alcança 1 quando todos os materiais de entrada são completamente recuperados em frações de saída compostas apenas pelos materiais-alvo e impurezas desejadas.

D.8.2 Recovery of Scarce Materials (IS)

A Eq. D.26 avalia a recuperação de materiais críticos com base na importância econômica e no risco de fornecimento, sendo relevante para materiais com alto risco de escassez e importância estratégica para a economia europeia.

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i \times EI_i \times SR_i}{\sum_{j=1}^n W_j \times EI_j \times SR_j} \quad (D.26)$$

Onde:

EI é a importância econômica do material.

SR é o Risco de fornecimento do material.

D.8.3 Closure of Material Cycles (IC)

A Eq. D.27 mede o grau de fechamento do ciclo de materiais comparando o valor de mercado das frações recicladas com o valor dos materiais originais, indicando a substituição eficaz de materiais primários por reciclados.

$$IC = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i \times V'_i}{\sum_{j=1}^n W_j \times V_j} \quad (D.27)$$

Onde:

V'_i é o preço de mercado da fração de saída i .

V_j é o preço de mercado do material j na aplicação original.

D.8.4 Avoided Environmental Burdens (IE)

A Eq. D.28 avalia os benefícios ambientais da reciclagem, focando nas frações recicladas que substituem diretamente os materiais virgens e ajudam a evitar os impactos ambientais da extração e produção de materiais primários.

$$IE = \frac{\sum_{i=1}^m W'_i \times B'_i}{\sum_{j=1}^n W_j \times B_j} \quad (D.28)$$

Onde:

B'_i é a carga ambiental associada à produção do material que é evitada pela fração reciclada.

B_j é a carga ambiental da produção do material presente no EEE.

D.8.5 Agregação dos Indicadores em um Índice Único de Reciclagem (RI)

Os indicadores podem ser combinados em um índice único (Eq. D.29) utilizando pesos específicos para cada indicador, permitindo a personalização de acordo com as prioridades de diferentes stakeholders, como indústrias de reciclagem ou autoridades de gerenciamento de resíduos.

$$RI = a_1 IW + a_2 IS + a_3 IC + a_4 IE \quad \text{com} \quad \sum a_i = 1 \quad (D.29)$$

A fórmula do Índice Único de Reciclagem (RI) representa uma média ponderada dos quatro indicadores apresentados anteriormente. Cada indicador (IW, IS, IC, IE) é multiplicado por um peso específico (a_1 , a_2 , a_3 , a_4), que reflete a importância relativa daquele indicador no contexto da análise. A soma dos pesos deve ser igual a 1, garantindo que o índice agregado permaneça balanceado e permita comparar diferentes cenários ou processos de reciclagem de forma objetiva.

D.9 SPI - SUSTAINABILITY PERFORMANCE INDICATORS

Antes de apresentar os indicadores do sistema SPI, é importante explicar o que é família de produtos. Uma família de produtos refere-se a um conjunto de produtos similares que são desenvolvidos a partir de uma plataforma comum e fornecem funcionalidades específicas para atender diferentes necessidades dos clientes. Cada produto dentro de uma família de produtos é chamado de variante de produto, e essas variantes compartilham componentes e processos de fabricação. Isso possibilita um equilíbrio entre personalização e economia de escala, permitindo que diferentes segmentos de mercado sejam atendidos.

Os indicadores estão divididos em duas categorias principais: Indicadores de desempenho sustentável e Indicadores de desempenho funcional. Cada indicador é descrito abaixo, incluindo sua fórmula de cálculo e os parâmetros envolvidos.

D.9.1 Indicadores de desempenho de sustentabilidade

Índice de Fluxo Linear para Famílias de Produtos (LFI2) mede a proporção de material que flui linearmente, ou seja, do uso de materiais virgens até o desperdício irrecuperável.

Esse índice é uma adaptação do MCI (EMF; GRANTA, 2015) e sua equação (Eq. D.30) é apresentada abaixo.

$$LFI2 = \sum_{j=1}^n \frac{V + M}{2M_t + W_{fj} - W_{cj}} \quad (D.30)$$

Onde:

V é a massa do material virgem usado para fabricar a variante de produto.

W é a massa do resíduo irrecuperável na fabricação da variante de produto.

M é a massa total da variante de produto.

W_{fj} é o resíduo irrecuperável gerado ao produzir material reciclado.

W_{cj} é o resíduo irrecuperável durante o processo de reciclagem.

Índice Potencial de Reuso mede o grau de potencial de reuso de componentes entre diferentes variantes de produto na família. Sua equação (Eq. D.31) é apresentada abaixo.

$$\text{Índice Potencial de Reuso} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ri} \times k_i}{M_t} \quad (D.31)$$

Onde:

M_{ri} é a massa do componente reutilizável i .

k_i é o número de vezes que o componente é reutilizado na família de produtos.

M_t é a massa total da família de produtos.

Índice Potencial de Reciclagem mede o grau de potencial de reciclagem dos componentes dentro da família de produtos. Sua equação (Eq. D.32) é apresentada abaixo.

$$\text{Índice Potencial de Reciclagem} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times F_i \times E_i}{M_t} \quad (D.32)$$

Onde:

M_i é a massa do componente i .

F_i é a fração da massa reciclável do componente i .

E_i é a eficiência do processo de reciclagem.

D.9.2 Indicadores de desempenho funcional

O Índice de Reconfiguração (RI) descreve a relação entre o número de reconfigurações possíveis e a complexidade da família de produtos. Sua equação (Eq. D.33) é apresentada abaixo.

$$RI = \frac{R \times P}{n} \quad (D.33)$$

Onde:

R é o número de possíveis reconfigurações.

P é o número de variantes de produtos.

n é o número de peças na família de produtos.

O Índice de Variedade Funcional (FV) mede a relação entre o número de funcionalidades e a complexidade da família de produtos. Sua equação (Eq. D.34) é apresentada abaixo.

$$FV = \frac{C_2}{C_v} \quad (D.34)$$

Onde:

C_2 é o número de variedades de componentes que oferecem mais de uma funcionalidade.

C_v é a variedade total de componentes na família de produtos.

O Índice de Alcance Funcional (FR) denota a relação entre o alcance operacional fornecido pela família de produtos e sua complexidade. Sua equação (Eq. D.35) é apresentada abaixo.

$$FR = \frac{C_1}{C_v} \quad (D.35)$$

Onde:

C_1 é o número de variedades de componentes capazes de operar em diferentes faixas operacionais.

D.10 WCI - IMPROVED WATER CIRCULARITY INDEX

Foram utilizados 3 indicadores, eles são:

- **Índice de Circularidade da Água (WCI) (%)**: índice adimensional que varia de 0 a 1, onde 1 indica um processo completamente circular (100% de reutilização da água). A Eq. D.36, que tem como base o MCI (EMF; GRANTA, 2015), é apresentada abaixo:

$$WCI = 1 - \frac{\text{Blue water} + \text{Wastewater}}{2 \times \text{Total Water Flow}} \quad (\text{D.36})$$

Onde, Blue Water é o volume de água virgem retirada de fontes superficiais ou subterrâneas; Wastewater é o volume de água poluída e descarregada; e o Total Water Flow é o volume total de água usada nas operações da planta.

- **Eficiência Hídrica (kg/m³)**: A eficiência da água mede a quantidade de produto acabado gerado por unidade de água utilizada no processo produtivo. A Eq. D.37 (UNEP, 2013) é apresentada abaixo:

$$\text{Eficiência hídrica} = \frac{\text{Produto acabado (kg)}}{\text{Consumo de água (m}^3\text{)}} \quad (\text{D.37})$$

Onde, o Produto Acabado é a quantidade total de produto final gerado pela planta industrial; e o Consumo de Água é o volume total de água utilizada durante o processo produtivo.

- **Produtividade do Trabalho (LP)**: A produtividade do trabalho é medida pelas vendas da planta por empregado. A Eq. D.38 é apresentada abaixo:

$$LP = \frac{\text{Vendas líquidas (milhões de euros)}}{\text{Número total de empregados}} \quad (\text{D.38})$$