



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

Thales Eduardo Tavares Dantas

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO INTEGRADA DA
CIRCULARIDADE E IMPACTOS ECONÔMICO-AMBIENTAIS DO CICLO DE
VIDA DE ORGANIZAÇÕES**

Florianópolis

2023

Thales Eduardo Tavares Dantas

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO INTEGRADA DA
CIRCULARIDADE E IMPACTOS ECONÔMICO-AMBIENTAIS DO CICLO DE
VIDA DE ORGANIZAÇÕES**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação
em Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.

Florianópolis

2023

Dantas, Thales Eduardo Tavares

Desenvolvimento de um método para a avaliação integrada da circularidade e impactos econômico-ambientais do ciclo de vida de organizações / Thales Eduardo Tavares Dantas ; orientador, Sebastião Roberto Soares, 2023.

203 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Economia Circular. 3. Avaliação do Ciclo de Vida. 4. Indicadores de Circularidade. I. Soares, Sebastião Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Thales Eduardo Tavares Dantas

Desenvolvimento de um método para a avaliação integrada da circularidade e impactos econômico-ambientais do ciclo de vida de organizações

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

Prof.(a) Cassiano Moro Pierkarski, Dr.(a)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.(a) Lucila Maria de Souza Campos, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Rodrigo Almeida Mohedano, Dr.(a)
Universidade Federal 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 doutor em Engenharia Ambiental.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico esse trabalho a minha família e a todos aqueles que lutam pela ciência, educação e meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer. Tanto que essas palavras nunca serão suficientes.

Agradeço primeiramente a minha família. Obrigado pelo suporte incondicional em todas as grandes escolhas que tive na minha vida. Obrigado por todo o cuidado e preocupação. Obrigado por todos os sacrifícios feitos para que eu tivesse tantas oportunidades. A cada dia que se passa entendo um pouco mais sobre tudo que foi necessário para eu que pudesse me desenvolver e buscar os meus objetivos. Por vocês e para vocês, sempre.

Obrigado a todos os meus amigos por estarem sempre ali. Se em algum momento dos últimos anos você me ouviu falar sobre, explicar ou reclamar (ocorreu com frequência) sobre a minha pesquisa, obrigado. Você me deu espaço para que as minhas ideias se desenvolvessem. Obrigado também a todos os que estavam comigo fora dessa loucura que é o mundo acadêmico. Sem os momentos de descontração que me ajudaram a manter a sanidade durante esses anos, eu com certeza não teria fôlego para passar por essa fase. Seria injusto listar nomes aqui, e como quem é de verdade sabe quem é de mentira, deixo aqui apenas um obrigado cheio de carinho para vocês, amigos queridos. Vocês são ouro.

Agradeço aos colegas do CICLOG. Foram 5 anos 3 três meses na Sala 93 do ENS entre o mestrado e doutorado. Ali vivi muitos aprendizados, risadas, trabalho, tive muitos surtos e tomei uma quantidade preocupante de café. Muito obrigado a todos aqueles que conviveram comigo durante esses anos marcantes da minha vida. Deixo meu agradecimento ao Prof. Sebastião por me proporcionar a plataforma necessária para meu desenvolvimento científico e profissional. Um agradecimento especial vai para o Dr. Henrique, por toda parceria, amizade, suporte e paciência – obrigado por tudo. Espero que o CICLOG continue ativo nos anos a seguir, e que nele se desenvolvam cada vez mais pesquisadores e profissionais que se importem com as agendas ambientais e climáticas. Nós nunca seremos numerosos demais nessa luta.

Hoje tenho certeza de que este texto nada mais é do que um procedimento para a conquista de um objetivo. Um meio para um fim. Ele não traduz ou materializa o conhecimento adquirido durante essa caminhada acadêmica. Entendo hoje que o real valor dessa trajetória reside no crescimento pessoal e profissional, nas experiências vividas, no processo, na perseverança, e nos desafios enfrentados durante essa fase da minha vida. Eu não poderia ter feito nada disso sozinho. Obrigado a todos que entraram na minha vida durante esses anos. Obrigado a todos que me apoiaram. Contem comigo sempre.

“É preciso sair da ilha para ver a ilha. Não nos vemos se não saímos de nós.”

José Saramago

RESUMO

A Economia Circular visa operacionalizar temas ligados ao desenvolvimento sustentável por meio da melhor gestão de recursos e resíduos. Algumas organizações privadas têm reavaliado as suas atividades de modo a diminuir os seus encargos ambientais e promover maior circularidade dos seus sistemas. Entretanto, as mudanças necessárias para tal transição podem acarretar *trade-offs* ambientais e econômicos, sendo então necessária uma análise criteriosa da viabilidade econômico-financeira da implementação de práticas circulares por organizações. Esta tese tem o objetivo de desenvolver um método para avaliar a influência de práticas circulares nos impactos potenciais ambientais e no custo do ciclo de vida de organizações. Essa abordagem é construída por meio da integração metodológica entre a Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional, Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional e Indicadores de Circularidade. Os resultados de tais análises são utilizados para a construção de uma equação de regressão por meio de *Generalized Linear Model (GLM)*. Através desse tratamento estatístico é possível avaliar a correlação entre as variáveis ambientais, econômicas e a circularidade da organização avaliada. Um estudo de caso de um restaurante lixo-zero aplica o método proposto para validar essa estratégia. Dentre os cenários avaliados pelo estudo de caso, o cenário *baseline* apresentou maior circularidade, menores impactos ambientais potenciais e menores custos totais do ciclo de vida, não havendo *trade-offs* entre as variáveis avaliadas. Por meio do GLM construído para esse estudo de caso, notou-se que, para essa organização e período reportado, o fator econômico não é influenciado diretamente pela circularidade, já os impactos ambientais diminuem conforme o aumento da circularidade. Foi também construído um *framework* processual para auxiliar pesquisadores futuros no desenvolvimento de estudos similares. Essa tese contribui com o avanço científico ligado à Economia Circular e a métodos de avaliação organizacional baseados no Pensamento do Ciclo de Vida. Conclui-se que a integração entre indicadores de circularidade, e metodologias de avaliação do ciclo de vida ambiental e econômico é possível principalmente pelo uso das mesmas definições-base, o que diminui os recursos e tempo empregados para a condução dessa avaliação, ao mesmo tempo que dá maiores informações sobre a influência da circularidade dos impactos ambientais-econômicos de organizações.

Palavras-chave: Economia Circular; Avaliação do Ciclo de Vida; Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida; Indicadores de Circularidade.

ABSTRACT

The Circular Economy emerged from recent debates related to the depletion of natural resources and waste management. Private organizations have been reassessing their activities in order to reduce their environmental burdens and promote greater circularity in their systems. However, the changes necessary for such a transition can lead to environmental and economic trade-offs, requiring a careful analysis of the economic-financial feasibility of implementing circular practices by organizations. This thesis aims to develop a model to assess the influence of circular practices on potential environmental impacts and life cycle cost of organizations. This approach is built through the methodological integration between the Organizational Life Cycle Assessment, Organizational Life Cycle Cost Assessment, and Circularity Indicators. The results of such analyzes are used to construct a regression equation using the Generalized Linear Model. Through this statistical treatment, it is possible to assess the correlation between environmental and economic variables and the circularity of the assessed organization. A case study of a zero-waste restaurant is proposed to apply the proposed model and validate this strategy. Among the scenarios evaluated by the case study, the as-is scenario presented greater circularity, lower potential environmental impacts and lower total life cycle costs, with no trade-offs between the evaluated variables. Through the GLM built for this case study, it was noticed that, for this organization and reported period, the economic factor is not directly influenced by circularity, whereas the environmental impacts decrease according to the increase in circularity. A processual framework was also built to assist future researchers in the development of similar studies. This thesis contributes to the scientific advance linked to Circular Economy and organizational evaluation methods based on Life Cycle Thinking. It is concluded that the integration between circularity indicators and methodologies for assessing the environmental and economic life cycle is possible mainly because of the same base definitions, which reduces the resources and time used to conduct this assessment, at the same time that gives more information about the influence of the circularity of the environmental-economic impacts of organizations.

Keywords: Circular Economy; Life Cycle Assessment; Life Cycle Costing; Circularity Indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Escalas da EC	20
Figura 3-1- Hierarquia de resíduos utilizada pelo WHI.	41
Figura 3-2 - Fases de um estudo de ACV.....	42
Figura 4-1 - Casos de aplicação do método integrado desenvolvido.	62
Figura 4-2 - <i>Framework</i> processual do método integrado para avaliação do ciclo de vida econômico-ambiental e de circularidade de organizações.	65
Figura 4-3 – Passo-a-passo para a aplicação do Caso 01 e Caso 02.	67
Figura 4-4 – Cenários e fronteiras do sistema.	71
Figura 4-5 - Principais entradas, saídas, e atividades diretas e indiretas relacionadas à organização reportada.....	74
Figura 4-6 - Fronteiras metodológicas dos métodos de avaliação apresentados.	80
Figura 5-1 – System processes and boundaries.	97
Figura 5-2 – Inputs, outputs, direct and indirect activities of the reporting organization.	98
Figura 5-3 - Methodological boundaries of applied assessment methods illustrated for the baseline scenario.....	101
Figura 5-4 - Material flows analyzed by CTI. Adapted from WBCSD (2019a).....	102
Figura 5-5 - Waste hierarchy according to the Waste Framework Directive 2008/98/EC (European Parliament, 2008).....	104
Figura 5-6 - Impact assessment of the reporting organization’s OLCA.....	106
Figura 5-7 – LCIA main drivers.....	107
Figura 5-8 - Methodological pathway for the combined circularity and environmental impact assessment.	116
Figura 6-1 – Gráfico 3D com a disposição de todos os pontos analisados.	127
Figura 6-2 – Regressão linear simples entre os fatores ambientais e de circularidade.	134
Figura 6-3 - Regressão linear simples entre os fatores econômicos e de circularidade	136
Figura 6-4 - Regressão linear simples entre os fatores econômicos e ambientais.....	137
Figura 6-5 – Fases de implementação dos casos de uso de método integrado no ciclo PDCA.	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1 - Exemplos de custos recorrentes e não recorrentes.....	50
Quadro 4-1 – Principais definições da ACVO.	72
Quadro 4-2 - Categorias de impacto a serem aplicadas na ACVO.	77
Quadro 4-3 - Categorias de impacto a serem aplicadas na ACVO.	77
Quadro 5-1 – Impact categories applied in the study (Huijbregts et al., 2016).....	99
Quadro 5-2 – Strengths and weaknesses of the applied methodologies.....	114
Quadro 6-1 - Passo-a-passo para a avaliação integrada econômico-ambiental e de circularidade de organizações.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Objetivos e conclusões de cada capítulo.	30
Tabela 4-1 - Inventário de dados de <i>inflow</i> para cálculo do CTI.	82
Tabela 4-2 - Inventário de dados de <i>outflow</i> para cálculo do CTI.	82
Tabela 5-1 – Main OLCA definitions.....	95
Tabela 5-2 – LCIA results.	105
Tabela 5-3 – CTI results.	109
Tabela 5-4 – WHI results.....	110
Tabela 6-1 - Resultados do CTI.....	119
Tabela 6-2 - Resultados da ACVO do Cenário 1 na perspectiva <i>endpoint</i>	122
Tabela 6-3 - Resultados da ACVO do Cenário 2 na perspectiva <i>endpoint</i>	122
Tabela 6-4 - Resultados da ACVO do Cenário 3 na perspectiva <i>endpoint</i>	122
Tabela 6-5 - Resultados da ACCVO para o estudo de caso proposto.	123
Tabela 6-6 - Resultados compilados para do Cenário 1.	125
Tabela 6-7 - Resultados compilados para o Cenário 2.	125
Tabela 6-8 - Resultados compilados para o Cenário 3.	125
Tabela 6-9 – Média, maiores e menores valores encontrados para cada Cenário.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ACVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional

ACCVO – Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

ALOP – *Agricultural land occupation*

BSI – *British Standards Institution*

CE – *Circular Economy*

CTI – *Circular Transition Indicators*

EC – Economia Circular

EMF – Ellen MacArthur Foundation

EoL – *End-of-life*

EES – *Environmental Engineering Science*

FDP – *Fossil depletion*

FEP – Freshwater eutrophication

GWP – *Climate change*

HTP – *Human toxicity*

IC – Indicadores de Circularidade

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

ILZB – Instituto Lixo Zero Brasil

ISO – *International Organization for Standardization*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCI – *Life Cycle Inventory*

LCIA – *Life Cycle Impact Assessment*

L&T – Logistics and Transport

MCI – *Material Circularity Indicator*

MEP – *Marine eutrophication*

NLTP – *Natural land transformation*

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

OLCA – *Organization Life-Cycle Assessment*
PDCA – *Plan, Do, Check, Act*
P&P – *Production and Procurement*
PME – *Pequena e Médias Empresa*
PPGEA – *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental*
SETAC – *Society for Environmental Toxicology and Chemistry*
SME – *Small and Medium Enterprises*
TAP – *Terrestrial acidification*
UNEP – *United Nations Environment Programme*
WBCSD – *World Business Council for Sustainable Development*
WDP – *Water depletion*
WHI – *Waste Hierarchy Index*

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

1,4-DCB eq. – 1,4-diclorobenzeno equivalente

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO₂ eq. – Dióxido de carbono equivalente

g – Grama

pp – performance points

ha – Hectares

kg – Quilograma

km – Quilômetro

kWh – Quilowatt-hora

l – Litro

m²a crop eq. – Metro quadrado de área cultivada equivalente

m³ – Metro cúbico

N eq. – Nitrogênio equivalente

NO_x eq. – Óxidos de nitrogênio equivalente

oil eq. – Óleo equivalente

P eq. – Fósforo equivalente

PO₄--- eq. – Fosfato equivalente

SO₂ eq. – Dióxido de enxofre equivalente

t.km – Tonelada-quilômetro

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1	INTRODUÇÃO	19
1.2	PERGUNTAS DE PESQUISA	23
1.3	HIPÓTESE	23
1.4	OBJETIVOS	24
1.4.1	Objetivo geral.....	24
1.4.2	Objetivos específicos	24
1.5	JUSTIFICATIVA	24
2	CAPÍTULO 2 - ESTRUTURA DE TESE	28
3	CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
3.1	ECONOMIA CIRCULAR	31
3.1.1	Indicadores de Circularidade	34
3.1.2	Circularity Transition Indicators.....	38
3.1.3	Waste Hierarchy Index	40
3.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	42
3.3	Avaliação Organizacional do Ciclo de Vida	45
3.4	AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA	47
3.5	Avaliação dos Custos Ciclo de Vida Organizacional	50
3.6	<i>TRADE-OFFS</i> ambientais e econômicos NO ÂMBITO DA GESTÃO AMBIENTAL e circularidade	51
3.7	INTEGRAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS BASEADAS NO PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA E INDICADORES DE CIRCULARIDADE	54
3.8	<i>GENERALIZED LINEAR MODEL</i>	56
3.9	CONCLUSÃO do capítulo	59

4	CAPÍTULO 4 – MÉTODO INTEGRADO PARA A AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL E DE CIRCULARIDADE DE ORGANIZAÇÕES	60
4.1	INTRODUÇÃO	60
4.2	METODOLOGIA	60
4.3	ESTUDO DE CASO	67
4.3.1	Caracterização do estudo de caso.....	68
4.3.2	Avaliação Organizacional do Ciclo de Vida.....	72
4.3.2.1	<i>Objetivo e escopo.....</i>	72
4.3.2.2	<i>Inventário do Ciclo de Vida.....</i>	75
4.3.2.3	<i>Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida.....</i>	76
4.3.2.4	<i>Interpretação</i>	77
4.3.3	Avaliação Organizacional dos Custos do Ciclo de Vida	78
4.3.4	Avaliação da Circularidade	79
4.3.4.1	<i>Circularity Transition Indicators</i>	81
4.3.4.2	<i>Waste Hierarchy Index</i>	83
4.3.5	<i>Generalized Linear Model</i>.....	83
4.4	CONCLUSÃO do capítulo	84
5	CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO INDIVIDUAL DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ORGANIZACIONAL EM CONJUNTO COM INDICADORES DE CIRCULARIDADE.....	86
5.1	RESUMO EXPANDIDO DO ARTIGO (EM PORTUGUÊS)	86
5.1.1	Introdução	86
5.1.2	Metodologia	87
5.1.3	Resultados e discussão.....	88
5.1.4	Conclusão do resumo expandido.....	90
5.2	INTRODUCTION	93
5.3	METHODOLOGY	95

5.3.1	Organizational Life Cycle Assessment.....	95
5.3.1.1	<i>Goal and scope</i>	96
5.3.1.2	<i>Life Cycle Inventory.....</i>	98
5.3.1.3	<i>Life Cycle Impact Assessment.....</i>	99
5.3.1.4	<i>Interpretation.....</i>	100
5.3.2	Circularity assessment.....	100
5.3.2.1	<i>Circularity Transition Indicators</i>	101
5.3.2.2	<i>Waste Hierarchy Index</i>	103
5.4	Results	105
5.4.1	Organizational Life Cycle Assessment.....	105
5.4.2	Circularity Assessment.....	109
5.4.2.1	<i>Circularity Transition Indicators</i>	109
5.4.2.2	<i>Waste Hierarchy Index</i>	110
5.5	DISCUSSION.....	111
5.5.1	Organizational Life Cycle Assessment.....	111
5.5.2	Circularity Assessment.....	112
5.5.3	Combined assessment of circularity and environmental impacts.....	113
5.6	CONCLUSIONS	116
6	CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO ECONÔMICO-ambiental DO CICLO DE VIDA E DE CIRCULARIADE A UMA ORGANIZAÇÃO DO SETOR ALIMENTÍCIO.	118
6.1	INTRODUÇÃO	118
6.2	RESULTADOS INDIVIDUAIS DAS METODOLOGIAS APLICADAS	118
6.2.1	Avaliação da Circularidade	119
6.2.2	Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional.....	120
6.2.3	Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida Organizacional.....	123

6.3	RESULTADOS COMPILADOS	124
6.4	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E conclusão do estudo de caso	126
6.4.1	Aplicação da Equação de Regressão Múltipla para o Caso 01 – Análise de Período Reportado Anterior.....	129
6.4.2	Aplicação da Equação de Regressão Múltipla para o Caso 02 – Simulação Futura	132
6.4.3	Análises das Regressões Simples	133
6.4.3.1	<i>Fator Ambiental (ACVO) e Fator de Circularidade (CTI)</i>	<i>134</i>
6.4.3.2	<i>Fator Econômico (ACCVO) e Fator de Circularidade (CTI)</i>	<i>135</i>
6.4.3.3	<i>Fator Econômico (ACCVO) e Fator Ambiental (ACVO).....</i>	<i>137</i>
6.4.4	Utilização e aplicabilidade do método por organizações.....	138
6.5	DISCUSSÕES SOBRE MÉTODO INTEGRADO PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ECONÔMICO-AMBIENTAL E DE CIRCULARIDADE DE ORGANIZAÇÕES	142
7	CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
7.1	ANALISE CRÍTICA E LIMITAÇÕES	150
7.2	RESPOSTA A PERGUNTA DE PESQUISA.....	153
7.3	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS	154
7.4	CONCLUSÃO GERAL	154
7.5	PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	156
8.	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A	173
	APÊNDICE B.....	176
	APÊNDICE C	202

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) é um dos principais conceitos que emergiu dos recentes debates relacionados à exaustão de recursos naturais e gestão de resíduos (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). Ela opõe-se ao atual método de desenvolvimento econômico, que está baseado na lógica linear de “extrair, produzir e descartar” (NESS, 2008). A EC defende a extração mínima de matérias-primas e a maximização do ciclo de vida de materiais por meio da promoção de práticas como a reutilização, reciclagem, compostagem, dentre outras (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Sendo comumente dividida entre o ciclo tecnológico e biológico¹, as mudanças a serem aplicadas rumo ao desenvolvimento de sistemas mais circulares são embasadas em diferentes práticas que visam: i) diminuir a poluição e produção de resíduos; ii) manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível; e iii) regenerar sistemas naturais (EMF, 2015).

Como apontado por Geissdoerfer et al. (2017), a transição de um sistema linear para um circular se reflete não somente em impactos ambientais, mas também *trade-offs* diversos (ambientais, sociais, econômicos). Dessa forma, a implementação de práticas circulares por organizações visando melhorias no seu desempenho ambiental está inevitavelmente ligada a viabilidade financeira das mudanças processuais aplicadas. Como argumentado por Holzer et al. (2021), empresas comumente focam na avaliação de seus resultados financeiros. Entretanto, o contexto atual tem cada vez pressionado as corporações a não só avaliar, mas também reportar seus impactos ambientais de modo a atender às novas exigências e pactos globais ambientais (SADHUKHAN et al., 2020).

Pesquisas recentes apontam que diversos fatores atuam como barreiras enfrentadas por organizações que buscam maior alinhamento com a EC, dentre elas: a falta de uma agenda centralizada, a expertise necessária, o difícil entendimento das métricas pelo mercado, e o custo dessas análises (INOUE et al., 2020; PRIETO-SANDOVAL et al., 2018; ZARTE;

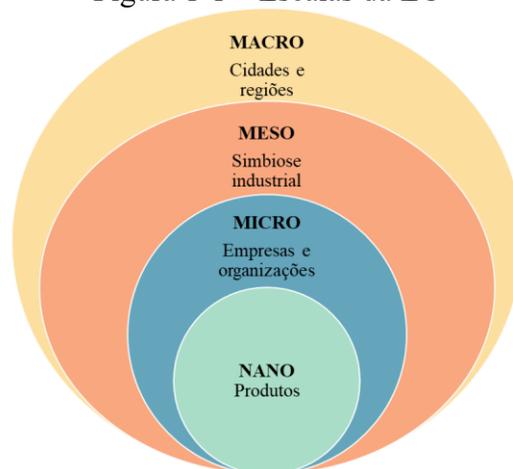
¹ O ciclo técnico corresponde ao fluxo de produtos e materiais que por meio de processos como reuso, reparo, remanufatura e reciclagem em sistemas criados pelo homem. O ciclo biológico compreende o fluxo de nutrientes e materiais biodegradáveis por sistemas biológicos. Adaptado de EMF (2015).

PECHMANN; NUNES, 2019). Ademais, como argumentado por Khan, Mubarik e Paul (2022), alguns dos principais impedimentos para o desenvolvimento da EC são relacionadas com as alterações nos perfis financeiros e ambientais de organizações resultantes do movimento de transição para sistemas mais circulares, que apenas recentemente vem chamando a atenção de gestores da área (XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021). As pesquisas de Wuni (2022), também apontam a falta de conhecimento técnico e conhecimento das partes interessadas, assim como a falta de metodologias específicas para a avaliação da transição de sistemas em direção a EC, como barreiras para seu desenvolvimento.

A fim de combater tal problemática, a mensuração dos benefícios dos sistemas circulares vem mobilizando pesquisadores na busca por Indicadores de Circularidade (IC), que pode ser entendido como o alinhamento de um material ou fluxo de energia, produto, processo ou sistema a um conjunto de estratégias da EC (*re-design*, compostagem, reciclagem, etc.) (OLIVEIRA, et al., 2021), para a avaliação quantitativa da circularidade de sistemas produtivos (NIERO, KALBAR, 2019).

Diversos indicadores foram desenvolvidos nos últimos anos. Revisões sistemáticas da literatura apresentam listas exaustivas de IC (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021; ROSSI et al., 2020; SAIDANI et al., 2019). Seguindo as divisões das escalas de EC apresentadas na Figura 1-1, os IC podem ter como alvo produtos, empresas ou mesmo sistemas de maior escala (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021).

Figura 1-1 – Escalas da EC



Fonte: Adaptado de Oliveira, Dantas e Soares (2021).

No entanto, os IC geralmente ignoram os impactos ambientais e focam nos fluxos de materiais, energia e resíduos referentes ao item avaliado (MORAGA et al., 2019; ROSSI et al., 2020). Por mais que os IC apresentem informações importantes referentes aos sistemas estudados, sua aplicação não necessariamente informa os tomadores de decisão quanto aos impactos ambientais e/ou econômicos da implementação de práticas circulares (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). Como descrito por Geissdoerfer et al. (2017), podem haver *trade-offs* negativos entre a sustentabilidade geral de um sistema e sua circularidade (ex: aumento dos potenciais impactos ambientais do sistema após a implementação de sistemas de reciclagem). Assim sendo, diversas fontes defendem o uso de metodologias baseadas no pensamento de ciclo de vida para a avaliação de sistemas circulares (DE SOUZA JUNIOR et al., 2020; HOMRICH et al., 2018; NIERO; RIVERA, 2018).

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma metodologia analítica, dinâmica e normatizada (ISO, 2006a), que tem como o objetivo a quantificação dos impactos ambientais potenciais de sistemas de produtos e serviços. A ACV é amplamente utilizada no processo de tomada de decisão por ser capaz de avaliar um sistema desde a extração dos recursos naturais, até disposição ou tratamento final dado aos resíduos gerados pelo sistema avaliado (ISO, 2006b). Recentemente, tal método foi ampliado para a análise de organizações, dando origem à Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional (ACVO) (ISO, 2014) ACVO é a avaliação de todas as entradas, saídas e potenciais impactos ambientais das atividades associadas a uma organização por meio de uma perspectiva de ciclo de vida (UNEP, 2015).

Além da contabilização de impactos ambientais, a ACV possui uma contraparte metodológica focada na determinação dos encargos econômicos relacionados ao ciclo de vida de um produto ou serviço, a Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida (ACCV) (SWARR et al., 2011). Embora normalmente aplicada a produtos e serviços, a ACCV poderia também ser empregada para a contabilização dos custos do ciclo de vida de organizações (NIERO E REIVEIRA, 2018), que neste trabalho é referida como Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional (ACCVO).

Com base na problemática previamente exposta, nota-se que uma metodologia única que pudesse facilitar e integrar o processo de avaliação de uma organização, beneficiaria sua gestão a fim de melhor prepará-la para atender às atuais demandas de mercado relacionadas ao

progresso da EC. A integração entre ACV e ACCV foi amplamente discutida por França et al. (2021). Os autores apontam que essa abordagem combinada permite que projetos, produtos e serviços reduzam impactos ambientais e econômicos, que podem ser quantificados e comparados por meio de uma avaliação aprimorada dos possíveis *trade-offs* do sistema. Por outro lado, trabalhos como os de Ruffi-Sális et al. (2021a) e Schulte et al. (2021), defendem a integração metodológica entre ACV e ICs no intuito de prover informações referentes à circularidade e potenciais impactos ambientais de produtos. Entretanto, a possibilidade de uma avaliação combinada com base na ACV, ACCV e IC segue ainda inexplorada, especialmente no âmbito organizacional.

Nesse contexto, este trabalho propõe a elaboração de um método para a avaliação integrada de circularidade, impactos ambientais e custo do ciclo de vida de organizações. Com essa abordagem, visa-se informar analistas especializados sobre o desempenho econômico-ambiental de organizações resultante da implementação de práticas circulares, a fim de determinar se tais mudanças são ambientalmente benéficas e economicamente viáveis. Ressalta-se ainda que essa a estrutura metodológica proposta objetiva dar maior suporte a tomadores de decisão em suas escolhas gerenciais, visando assim prover informações assertivas que contribuam para a aplicação de práticas circulares e potencialmente menos impactantes.

Para o desenvolvimento de tal método foram empregadas a ACV e ACCV em nível organizacional (ACVO e ACCVO) para a contabilização dos potenciais impactos ambientais e custos do ciclo de vida. Dois IC foram testados para a avaliação de circularidade, o *Circularity Transition Indicators* (CTI) (WBCSD, 2021a) e o *Waste Hierarchy Index* (WHI) (PIRES; MARTINHO, 2019). Ambos os indicadores foram selecionados por terem sido previamente destacados em uma revisão bibliográfica elaborada pelo autor e colaboradores, que teve o intuito de mapear os principais IC direcionados a produtos e empresas (DE OLIVEIRA, et al. 2021). Além de tais metodologias, o método integrado² propõe um tratamento estatístico dos resultados. É proposto a construção de uma regressão linear por meio de um *Generalized Linear Model* dos resultados encontrados a fim de avaliar o impacto das alterações de circularidade

² No contexto dessa tese, o termo “método integrado” e seus sinônimos se referem à abordagem para avaliação econômico-ambiental e de circularidade de organizações, que é o produto dessa tese, que não se limita a parte final desse procedimento (equação de regressão múltipla das variáveis analisadas).

nos compartimentos ambientais e econômicos de organizações. Com o intuito de validar o método proposto, ele foi aplicado a um estudo de caso direcionado ao setor alimentício.

A atual agenda internacional em prol de um desenvolvimento mais sustentável é regida pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) elaborados pela Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2015). De acordo com Schroeder et al. (2019), a EC contribui diretamente para o atingimento dos ODS 6³, ODS 7⁴; ODS 8⁵; ODS 12⁶; e ODS 15⁷. Nesse contexto, devido ao foco do método integrado apresentado nessa tese, esse trabalho pode ser relacionado com esses cinco ODS. Entretanto, devido à natureza analítica da ACV e dos IC no que tange a sistemas de produto, serviços ou organizações, destaca-se o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, como o principal ODS relacionado a este trabalho.

Com base no panorama apresentado, foi elaborada uma pergunta de pesquisa e hipótese condizentes com o tema abordado. Por meio dessas, foi possível traçar objetivos gerais e específicos para esse projeto de pesquisa. Abaixo são apresentados a pergunta de pesquisa, hipótese e objetivos deste trabalho.

1.2 PERGUNTAS DE PESQUISA

P: Como avaliar a influência da implementação de práticas circulares nos custos e impactos ambientais potenciais de uma organização?

1.3 HIPÓTESE

H: A integração da ACVO, ACCVO e IC permite e facilita avaliação econômico-ambiental e de circularidade de organizações.

³ ODS 6 – Água potável e saneamento.

⁴ ODS 7 – Energia Acessível e Limpa

⁵ ODS 8 – Trabalho Decente e Crescimento Econômico

⁶ ODS 12 – Consumo e Produção Sustentáveis

⁷ ODS 15 – Vida Terrestre

1.4 OBJETIVOS

Abaixo são apresentados os objetivos gerais e específicos da tese.

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver um método para a avaliação de influência de práticas circulares nos custos e impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de organizações.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Estruturar de um método integrado para a avaliar a relação entre a circularidade, impactos ambientais potenciais e custos do ciclo de vida de organizações.
- ii. Desenvolver de um *framework* processual para a avaliação integrada proposta.
- iii. Avaliar a aplicabilidade do modelo por meio de um estudo de caso.

1.5 JUSTIFICATIVA

A promoção de práticas sustentáveis vem levando as indústrias a gradualmente abandonar os métodos clássicos de produção e se voltar para novas demandas de mercado (FUSO NERINI et al., 2019). Nesse contexto, a EC surge como um método de desenvolvimento que abarca práticas e diretrizes que visam a combater a exaustão dos recursos naturais e promoção de um método de desenvolvimento menos impactante (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

Atualmente, organizações buscam se diferenciar de seus pares por meio de vantagens competitivas que tratam não somente de fatores técnico-econômicos, mas também com base em seu desempenho ambiental (PALOMARES-RODRÍGUEZ et al., 2017). Segundo França et al. (2021), organizações tem visado a otimização dos seus processos, reduções de custos e minimização dos impactos ambientais como estratégias para manter sua competitividade de mercado enquanto atendem a padrões e metas no âmbito da sustentabilidade corporativa. Nessa

conjuntura, a literatura aponta os métodos baseados no Pensamento do Ciclo de Vida como metodologias capazes de fornecer informações de cunho econômico e ambiental, provendo uma base para a adoção de estratégias produtivas ambientalmente menos impactantes e economicamente viáveis (RASHIDI et al., 2018).

Paralelamente a essa tendência, o setor privado tem impulsionado a implementação de práticas circulares como uma estratégia para a promoção de iniciativas que combinem o ganho econômico com a diminuição dos encargos ambientais (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). A literatura aponta que diversos indicadores voltados à quantificação da circularidade de produtos e organizações vêm sendo desenvolvidos, proporcionando assim a possibilidade de monitoramento e melhoria de processos que promovem a EC (ROSSI et al., 2020; SAIDANI et al., 2019). Entretanto, os IC comumente focam na quantificação de fluxos energéticos e de materiais relacionados a produtos ou organizações e não são capazes de avaliar os potenciais impactos provenientes da implementação de práticas circulares (ROSSI et al., 2020). Recentemente, pesquisas tais como as de Glogic et al. (2021), Schulte et al. (2021) e Rufi-salís et al. (2021), respondem a tal fragilidade ao aplicar IC em paralelo a ACV, complementando a avaliação da circularidade com a contabilização de potenciais impactos ambientais dos sistemas avaliados.

Além dos encargos ambientais, a implementação de práticas circulares também infere impactos socioeconômicos a sistemas em transição (OLIVEIRA et al., 2021). Nesse contexto, Niero e Rivera (2018), apontam as metodologias baseadas no Pensamento do Ciclo de Vida como opções para a avaliação de sistemas circulares. Ademais, de Oliveira et al. (2021) identificaram que tais metodologias compartilham estruturas e procedimentos metodológicos similares com os IC como, por exemplo: i) base teórica amparada pelo pensamento do ciclo de vida; ii) definição e implementação de fronteiras do sistema do berço-ao-portão ou do berço-ao-túmulo; iii) procedimentos similares de coleta de dados. Com base nessas pesquisas, identificou-se uma lacuna científica no que tange à possível avaliação conjunta da circularidade e desempenho em econômico-ambiental de organizações.

A aplicação simultânea da ACV e ACCV facilita a identificação de *trade-offs*⁸ ambientais e econômicos na avaliação de sistemas. França et al. (2021), apontam que

⁸ Um *trade-off* é uma decisão situacional que envolve diminuir ou perder uma qualidade, quantidade ou propriedade de um conjunto ou design em troca de ganhos em outros aspectos.

frameworks normativos e processuais facilitariam a integração dessas técnicas, habilitando a ação mais efetiva por parte de analistas e gestores. Por outro lado, Alejandrino et al. (2021), destacam que pesquisas ainda são necessárias para o desenvolvimento de métodos quantitativos para a análise conjunta de circularidade e os pilares da sustentabilidade, com especial foco nas análises ambientais e econômicas. Figge et al. (2018) e Niero e Kalbar (2019), também apontam a necessidade de pesquisas que liguem a avaliação de indicadores ambientais e socioeconômicos com IC.

Pesquisas prévias, como as de Rufi-Sális et al. (2021a), Schulte et al. (2021) e de Souza Junior (2021) combinaram diversas metodologias analíticas baseadas no pensamento do ciclo de vida para a avaliação de sistemas circulares. Dentre as dificuldades levantadas pelos autores, podem-se listar (i) a necessidade de escolha de metodologias com grupo de dados que sejam transferíveis e passíveis de serem analisados pelos diversos métodos implementados, (ii) a dificuldades de comunicação os resultados encontrados pelas indicadores aplicados, que comumente apresentam respostas difusas e não intuitivas ao tomador de decisão, e (iii) a grande quantidade de dados que normalmente devem ser analisados, muitas das vezes sem que haja um software único onde as diversas metodologias possam ser implementadas concorrentemente. Essas limitações apontam para a necessidade da criação de uma estratégia que facilite a integração entre as metodologias do pensamento do ciclo de vida e avaliações de circularidade.

Ademais, como descrito por Cardoso (2022), adoção da EC ao nível de empresarial, assim como a metrificação ainda está em fases iniciais, especialmente quando as esferas sociais são levadas em questão. Entretanto, a medição da adoção de práticas circulares é de extrema importância para a definição de estratégias que sejam capazes de acompanhar a transição entre a economia linear e a EC. Portanto, nota-se que mais pesquisas que visam a identificação de indicadores de circularidade propícios para a devida metrificação da circularidade são necessárias, especialmente no âmbito organizacional.

Portanto, essa pesquisa visa desenvolver um *framework* para a avaliação integrada dos impactos ambientais, custos do ciclo de vida e circularidade de organizações. Com base nos resultados dessa pesquisa, analistas especializados poderiam avaliar os impactos econômico-ambientais da implementação de práticas circulares, e assim identificar caminhos que sejam economicamente viáveis e promovam um melhor desempenho ambiental em nível

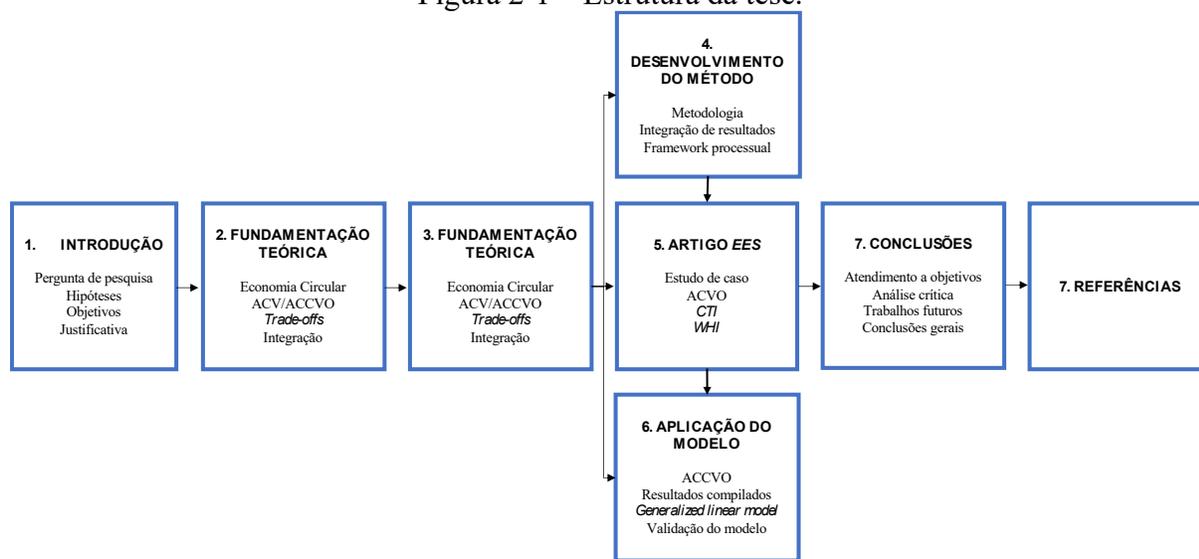
organizacional. Tal integração metodológica em nível organizacional também diminuiria esforços e tempo gasto em tais análises devido ao escopo compartilhado aplicado sobre o sistema avaliado.

Por fim, essa tese se enquadra dentro dos temas abordados pelo Grupo de Pesquisa em Avaliação de Ciclo de Vida (CICLOG), que se empenha no desenvolvimento científico relacionado à ACV e a EC. Por conseguinte, esse estudo contribui com o Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por meio de avanços científicos na busca por metodologias que viabilizem a análise e gestão de organizações no contexto abordado pelo programa de pesquisa.

2 CAPÍTULO 2 - ESTRUTURA DE TESE

No intuito de facilitar a leitura e levando em consideração o formato definido para a estruturação deste documento, o texto encontra-se dividido em oito capítulos, conforme apresentado na Figura 2-1.

Figura 2-1 – Estrutura da tese.



ACVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional; ACCVO – Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional; CTI – *Circular Transition Indicators*; IC – Indicadores de Circularidade; WHI – *Waste Hierarchy Index*. Fonte: O autor (2023).

O propósito deste arranjo é possibilitar a leitura dos capítulos de maneira individualizada sem que a compreensão e o entendimento sejam afetados por falta de informações adicionais. Ressalta-se que os conteúdos dos capítulos são relacionados, permitindo uma colaboração para o atendimento dos objetivos estabelecidos na presente tese.

O capítulo a seguir, o Capítulo 3, intitulado de “Fundamentação Teórica”, os conceitos que apoiam e sustentam o desenvolvimento do trabalho são apresentados na fundamentação teórica. Neste capítulo é possível encontrar uma revisão bibliográfica do atual estado da arte da EC e os IC a ela ligados, além de maior detalhamento sobre os procedimentos metodológicos da ACV, ACCV e GLM. Neste capítulo também se encontram tópicos específicos que tratam da aplicação da ACV e ACCV a nível organizacional, que recebem as abreviações ACVO e ACCVO, respectivamente. O intuito deste capítulo é familiarizar o leitor com os conceitos e processos intrínsecos a essas metodologias para melhor entendimento do contexto desta tese.

O Capítulo 4 discorre sobre a estrutura e desenvolvimento do método integrado de avaliação proposto por essa tese. O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia que sustenta essa tese. Nele são apresentadas as definições-base de cada metodologia individual (ACVO, ACCVO, IC e GLM) sendo empregadas neste trabalho. Além disso, o estudo de caso por meio do qual o desenvolvimento do método integrado foi possibilitado. A organização reportada (Casa Origem) é descrita, além das especificidades da aplicação de cada metodologia para este caso.

Em seguida, o Capítulo 5 é apresentado na forma de um artigo científico publicado no jornal científico *Environmental Engineering Science* (DANTAS et al. (2021)). De modo a produzir artigo publicado em semelhança ao original, o capítulo foi mantido em inglês. Porém, seguindo as normas do PPGEA, ele é acompanhado por um resumo expandido em português que precede o artigo em língua estrangeira. O resumo expandido é composto por uma introdução, metodologia, resultados e discussões e conclusão. O artigo em questão conta com a discorre sobre a fase inicial do desenvolvimento dessa pesquisa, na qual a ACVO e dois IC (CTI e WHI) foram aplicados na avaliação dos potenciais impactos ambientais e da circularidade da organização Casa Origem por meio de um estudo de caso. Esse artigo foi imperativo para o desenvolvimento futuro do método integrado objetivado por essa tese, uma vez que por meio do estudo conduzido para essa publicação, as estruturas iniciais do método foram estabelecidas (ex: exclusão do WHI do método integrado, identificação de definições-base que permeariam todas as outras análises).

O Capítulo 6 apresenta os resultados remanescentes e continua a discorrer sobre a implementação do método proposto. Esse capítulo se baseia nos resultados e discussões levantadas pelo Capítulo 5. Esta parte do texto se encarrega de apresentar os resultados financeiros do estudo de caso, provenientes da ACCV, além de também apresentar os resultados da ACVO na perspectiva *endpoint* (os resultados da ACVO presentes no Capítulo 5 foram apresentados na perspectiva *midpoints*). Além disso, neste capítulo são apresentados os resultados de todas as metodologias anteriormente implementadas (ACVO, ACCVO, CTI) são compilados e então integrados por meio da aplicação do GLM. Discussões sobre os resultados da integração, a utilização e usabilidade do modelo integrado desenvolvido, e também recomendações sobre seu uso futuro encerra esse capítulo.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais e a relação dos resultados de cada capítulo com o cumprimento dos objetivos propostos por essa tese. A tese é concluída por meio da apresentação de possíveis caminhos futuros de pesquisa. As referências dos trabalhos citados durante o corpo desta tese são apresentados no Capítulo 8.

A Tabela 2-1 resume os objetivos e resultados de cada capítulo, além de também destacar quais são os principais tópicos e resultados abordados em cada capítulo.

Tabela 2-1 – Objetivos e conclusões de cada capítulo.

Capítulo	Objetivo	Tópicos	Resultados
1	Enquadramento do tema, definir as perguntas de pesquisa e hipóteses, e justificar a pesquisa.	Contextualização, Objetivos da tese; Justificativa.	Identificação de lacuna científica voltada a avaliação integrada dos custos, impactos ambientais e circularidade de sistemas.
2	Apresentar a estrutura da tese.	Estruturação da tese.	A tese é composta por 7 capítulos principais.
3	Fornecimento de elementos fundamentais para a compreensão da pesquisa.	EC, ACV/ACVO, ACCV/ACCVO, Trade-offs, GLM Integração metodológica.	A EC é um tema emergente no contexto da gestão de recursos e resíduos. As metodologias baseadas no Pensamento do Ciclo de vida vêm sendo aplicadas junto aos IC no intuito de diminuir o trade-offs na avaliação de sistemas produtivos.
4	Desenvolvimento um método de avaliação integrada de circularidade, impactos ambientais e econômicos	Estruturação do método, Proposta de integração de resultados, Framework processual.	Delineamento de um método para a integração metodológica da ACVO, ACCVO e IC. Os resultados dessas metodologias são integrados por meio de um GLM. É apresentado um <i>framework</i> processual para o desenvolvimento e aplicação do método.
5	Avaliação dos potenciais impactos ambientais e circularidade de uma organização.	Estudo de caso, ACVO, CTI, WHI	Dentre os cenários avaliados, o que conta com a implementação de estratégias circulares apresenta um melhor perfil ambiental. Diferentemente do WHI, as fronteiras metodológicas do CTI favorecem sua aplicação conjunta com as metodologias baseadas no Pensamento do Ciclo de Vida.
6	Aplicação do método proposto.	ACCV, Resultados compilados GLM Aplicação do método	O método integrado foi aplicado com sucesso ao estudo de caso desenvolvido. Para a organização estudada, os fatores econômicos não têm correlação direta com o a circularidade, e quanto maiores são os impactos ambientais, menor é a circularidade total da organização avaliada.
7	Conclusão geral	Conclusões; Respostas às perguntas de pesquisa; Análise crítica; Recomendações.	Contribuição no avanço científico de métodos de integração metodológica Contribuição para o avanço científico na combinação entre ACV, ACCV e IC.

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida; ACCV – Avaliação dos Custos Ciclo de Vida; ACVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional; ACCVO – Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional; CTI – *Circular Transition Indicators*; IC – Indicadores de Circularidade; GLM – *Generalized Linear Model*; WHI – *Waste Hierarchy Index*. Fonte: O autor (2023).

3 CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo fornece embasamento teórico para uma melhor compreensão desta pesquisa. Com base nos objetivos propostos, e visando descrever as metodologias a ser aplicadas conjuntamente no estudo desenvolvido, a revisão bibliográfica foi dividida em cinco partes principais: i) Economia Circular, ii) Avaliação do Ciclo de Vida, iii) Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida, iv) *Trade-offs no âmbito da Gestão Ambiental*, e v) Integração entre Metodologias Baseadas no Pensamento do Ciclo de Vida e Circularidade.

3.1 ECONOMIA CIRCULAR

Apesar dos temas relacionados a esse tópico estarem presentes nas discussões relacionadas à gestão ambiental de organizações há décadas, o termo “EC” começou a ser amplamente utilizado na última década no âmbito da gestão de recursos e resíduos (KIRCHHERR et al. 2017; KALMYKOVA et al.; 2018). A EC descreve a ruptura de certos paradigmas econômicos, apresentando uma melhor alternativa para o atual método de desenvolvimento, que está baseado na lógica linear de “extrair, produzir e descartar” (NESS, 2008). Por mais que a EC tenha recentemente se tornado um tópico emergente, a sua disseminação é dificultada devido à difusão de conceitos e proposições para sua avaliação (KALMYKOVA et al., 2018). McDowall et al. (2017) argumentam que a EC apresenta um escopo amplo, que oferece potencial para a flexibilidade interpretativa, isto é, pode ser entendida ou aplicada de forma distinta em diferentes contextos, a fim de acomodar uma ampla gama de interesses políticos.

Devido ao crescimento do tópico, diversas pesquisas focadas na conceituação da EC foram desenvolvidas a fim de criar um maior alinhamento de discurso entre pesquisadores e instituições (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). Uma das definições mais abrangentes do tema é a apresentada por Kirchherr et al. (2017), elaborada após a análise de mais de 110 definições diferentes apresentadas para tal conceito. Segundo os autores, a EC é um sistema que substitui o conceito de “fim de vida” com a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais e nutrientes nos processos de produção, distribuição e consumo, operando em diferentes escalas para alcançar um desenvolvimento mais sustentável. Como previamente apresentado pela

Figura 1.1, as escalas de operação da EC são divididas entre nano (produtos), micro (empresas, organizações), meso (simbiose industrial, parques industriais) e macro (cidades, regiões, nações) (SAIDANI et. al., 2017; DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021).

Entretanto, nota-se que a EC abrange mais do que práticas para uma melhor gestão de fim-de-vida de recursos e resíduos. Dessa forma, o autor propõe a seguinte definição-base a ser utilizada nesta tese: “*A EC consiste na produção de bens e condução de serviços de forma mais sustentável, limitando o consumo e desperdício de recursos e a produção de resíduos por meio da implementação de práticas circulares*”. Ressalta-se que tais práticas abrangem não somente o fim-de-vida dos resíduos, mas também formas de melhor gerir os recursos e organizações buscando maior circularidade e sustentabilidade geral do sistema. Exemplos de práticas circulares são: localismo, servitização, reciclagem, reuso, redução, compostagem, cooperação entre elos da cadeia produtiva, etc.

A literatura recente liga a EC a outras agendas de desenvolvimento vigentes. Como exemplo da relevância do tema, pode-se destacar os estudos de Brandão et al. (2021), Biber-Freudenberger et al. (2020), e Ubando et al. (2020), que vinculam a EC com as atuais discussões referentes à bioeconomia, conceito que compartilha muitos dos objetivos e estratégias ligadas ao ciclo biológico da EC. Por outro lado, a relação entre a EC e o atual momento de profundo desenvolvimento tecnológico no âmbito industrial, intitulado Indústria 4.0, também tem sido alvo de diversos estudos (CHIAPPETTA JABBOUR et al., 2020; DANTAS et al., 2021; DEV; SHANKAR; QAISER, 2020).

Nota-se também que um grande número de pesquisas correlaciona os possíveis benefícios da EC com o desenvolvimento sustentável (D’AMATO; VEIJONAHU; TOPPINEN, 2020; OLIVEIRA et al., 2021; SADHUKHAN et al., 2020). Nesse contexto, as pesquisas de Dantas et al. (2021), Rodriguez-Anton et al. (2019) e Schroeder et al. (2019), apresentam as relações entre a EC e os ODS a fim de destacar como e quais objetivos a transição para um sistema mais circular pode auxiliar. Tais autores destacam que a EC contribui diretamente para o atingimento dos ODS, em especial o ODS 6 - Água potável e Saneamento, ODS 7 - Energia Limpa e Acessível; ODS 8 - Trabalho Decente e Crescimento Econômico; ODS 12 - Consumo e produção Responsáveis; e ODS 15 - Vida Terrestre. (DANTAS et al., 2021; SCHROEDER et al., 2019). Por meio das pesquisas mencionadas, destaca-se a

abrangência da EC, sendo este um conceito capaz de permear as principais agendas intergovernamentais e científicas atuais.

Estudos de caráter mais prático também povoam a literatura atual voltada ao tema. Pesquisas tais como as apresentadas por Dagevos e Lauwere (2021), Hossain et al. (2020) e Xavier et al. (2021), analisam as perspectivas de setores industriais específicos em relação à EC. Além disso, trabalhos como os de D'Amato et al. (2020) e Manninen et al. (2018), analisam empresas que empregam métodos de negócio circulares, o que também vem sendo uma tendência nesse ramo científico. Outra tendência atual é o desenvolvimento de estudos de caso baseados na avaliação da circularidade de sistemas produtivos, que comumente são aliados ao desenvolvimento de IC específicos para setores ou fins diversos (SAIDANI et al., 2019).

Por mais que a atenção dada ao tema tenha aumentado nos últimos anos, sua implementação prática em larga escala ainda apresenta progresso limitado (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018). Uma importante ferramenta para o alinhamento conceitual e fomento do tema dentre os meios acima citados foi a publicação da norma BSI 8001 – *Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations* (BSI, 2017), que tem como objetivo guiar organizações de diferentes tamanhos e setores na transição para métodos circulares. Nota-se que a publicação desta norma é um marco na disseminação do conceito de EC, uma vez que é a primeira normatização referente ao tema. Entretanto, a norma BSI 8001 (BSI, 2017) recebeu diversas críticas devido a seus apontamentos brandos (PAULIUK, 2018), demonstrando que este é um campo que ainda carece de aprofundamento e regulamentação (STANKEVIČIUS et al., 2020).

A elaboração de uma norma abrangente no âmbito da EC está atualmente sendo desenvolvida pela *International Organization for Standardization* (ISO), por meio do Comitê Técnico 323 (ISO, 2021). O Comitê foi criado em 2018 e conta com mais de 70 organizações contribuintes. O escopo definido é a “normalização na área da EC para o desenvolvimento de marcos, orientações, ferramentas de apoio e requisitos para a implementação das atividades de todas as organizações envolvidas, de forma a maximizar a contribuição para o desenvolvimento sustentável”. A data de publicação de tal norma ainda é incerta, mas demonstra o crescimento da pauta da EC. Espera-se que a publicação desta norma gere maior solidificação e padronização das temáticas ligadas ao tema.

Por enquanto, autores mencionam que o desenvolvimento da EC tem se dado primordialmente por parte dos interesses e engajamento do setor privado (RASHED; SHAH, 2020; ROSSI et al., 2020), que por sua vez pressiona o setor governamental para a promoção de maiores e melhores regulações referentes aos aspectos tratados neste contexto (BALANAY; HALOG, 2016; D'AMATO; VEIJONAHU; TOPPINEN, 2020).

3.1.1. Indicadores de Circularidade

Faz-se necessária a criteriosa definição dos termos “indicador” e “circularidade”, para que então se possa conceituar o que são os IC.

Segundo Gallopin (1996) os indicadores mais desejados são aqueles que resumem ou, de outra maneira, simplifiquem as informações relevantes, ou que façam com que certos fenômenos que ocorrem na realidade se tornem mais aparentes, aspecto este que é particularmente importante na gestão ambiental. Nesta área é necessário especificamente que se quantifiquem, se medem e se comuniquem ações relevantes. Para Van Bellen (2002), a partir de um certo nível de agregação ou percepção, indicadores podem ser definidos como variáveis individuais ou uma variável que é função de outra(s) variável(is). A função pode ser simples como uma (a) relação, que mede a variação da variável em relação a uma base específica, um (b) índice, um número simples que é uma função simples de duas ou mais variáveis, ou (c) complexa, como o resultado de um grande método de simulação.

Segundo de Oliveira et al. (2021), “indicadores são ferramentas analíticas utilizadas para simplificar informações em avaliações quantitativas ou qualitativas”. Os principais objetivos do uso de indicadores estão relacionados ao rastreamento, monitoramento e medição do progresso e do desempenho de sistemas ou processos específicos. Ainda, segundo os autores, “circularidade” é o alinhamento de um material ou fluxo de energia, produto, processo ou sistema a um conjunto de estratégias da economia circular (*re-design*, compostagem, reciclagem, energia renovável, localismo, etc.). Dessa forma, no contexto desse trabalho, IC são representações analíticas que medem o grau de associação de um sistema (ou parte de um) às práticas e estratégias circulares.

O desenvolvimento de IC foi discutido por diversos estudos de revisão bibliográfica (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021; ROSSI et al., 2020; SAIDANI et al., 2019),

acentuando a atual importância dada à quantificação da circularidade de produtos e organizações. Entretanto, essas mesmas pesquisas sinalizam que os IC comumente têm o foco voltado à circulação de recursos e resíduos por sistemas, regularmente não contabilizando os potenciais impactos ambientais que podem ocorrer na transição para sistemas mais circulares (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021).

Saidani et al. (2019), desenvolveram um estudo que categorizou mais de 55 IC. Para os autores, tais indicadores são essenciais para que profissionais da indústria e legisladores possam tomar decisões sobre projetos relacionados à EC de forma embasada. De fato, como apontado por Smol et al. (2017), o desenvolvimento de políticas voltadas a EC devem ser embasados em métricas claras e abrangentes. Rossi et al. (2020), ao avaliar um conjunto de IC em nível organizacional considerando métodos de negócios, afirmam que IC deve atingir os princípios gerais da EC, ao mesmo tempo que apresenta informações relacionadas ao setor específico de aplicação. Tal afirmação vai ao encontro do que é apresentado pela norma BSI 8001 (BSI, 2017), que aponta a escolha dos IC a serem aplicados como responsabilidade da própria organização no intuito de atender às necessidades específicas de cada caso.

Lindgreen, Salomone e Reyers (2020), identificaram 74 diferentes abordagens de avaliação de EC na escala micro. O inventário das abordagens disponíveis foi categorizado em uma estrutura de revisão dividida em 4 grupos: perspectiva geral, aspectos metodológicos, conexões com o desenvolvimento sustentável e o foco de implementação. Os resultados corroboram o estudo de Kristensen e Mosgaard (2020), indicando que a maioria das abordagens é muito diferente em termos de metodologia, que a relação entre EC e desenvolvimento sustentável ainda é vaga em termos dos impactos ambientais e econômicos da EC e que as conexões entre a pesquisa acadêmica e a implementação prática das abordagens de avaliação de EC estão em um estágio inicial.

A fim de avaliar como as diferentes práticas de EC se associam entre si e como se relacionam com cada um dos indicadores, Parchomenko et al. (2018) avaliaram 63 IC e 24 práticas circulares por meio do método *Multiple Correspondence Analysis*. A análise identificou três grupos principais de indicadores, embasados em: eficiência de recursos, estoques e fluxos de materiais e foco no produto. Os resultados indicam predomínio de práticas de EC que focam em reciclagem, eficiência de recursos, eliminação de resíduos e uso

secundário de recursos. Ainda, apenas alguns IC avaliam as práticas de EC relacionadas à manutenção do valor, como retenção, alteração de valor e longevidade.

Guogang e Jing (2011) produziram um dos primeiros IC datados. Esse indicador é voltado ao nível macro e utiliza um índice de avaliação do nível de desenvolvimento da EC. Tal sistema é constituído por 16 indicadores quantitativos enquadrados em quatro categorias: consumo de recursos, perturbação ambiental, reciclagem e desenvolvimento social. Sendo a classificação do índice feita através dos métodos *Analytic Hierarchy Process* e Matriz de Avaliação Difusa.

Ainda no nível macro de implementação, Qing, Qiongqiong e Mingyue (2011) também desenvolveram um índice para avaliação do desenvolvimento da EC na província chinesa de Shaanxi. Os indicadores se agrupam em cinco aspectos: proteção do meio ambiente, redução da poluição, reciclagem e reutilização de recursos, eficiência de recursos e desenvolvimento social e econômico. O índice é construído utilizando Processamento de Dados Não Dimensionais, Análise Fatorial e *Analytic Hierarchy Process* para determinação do peso de cada indicador.

No que tange ao nível meso, Wen e Meng (2015) avaliaram a contribuição da simbiose industrial para o desenvolvimento da EC através da combinação de *Substance Flow Analysis* e *Resource Productivity*. Os indicadores foram testados em dois cenários, com e sem utilização de resíduos e de materiais essenciais (cobre, água e energia), na produção de placas de circuito impresso. Constataram que ao prolongar a cadeia de produção industrial e optar pelo cenário sem utilização de resíduos é possível aumentar a economia de recursos.

Li e Su (2012) analisaram o sistema de índice de avaliação do desenvolvimento da EC nas empresas químicas chinesas (nível micro de implementação), composto por 18 indicadores classificados em 5 categorias. Um método de soma ponderada, com critérios de custo e benefício, é utilizado para estimar o índice de EC. Tal índice varia em uma escala de 0 a 1, que representa desde o método tradicional de desenvolvimento econômico até a maturação do desenvolvimento da EC.

Diversos autores têm estudado a relação entre metodologias de avaliação de impactos ambientais como alternativas para a quantificação do impacto e eficiência de práticas circulares (ELIA et al., 2017; KHARRAZI et al., 2014; SAIDANI et al., 2019). Uma vez que a EC é intrinsecamente ligada ao conceito de pensamento de ciclo de vida (BSI, 2017), se torna lógico

que os métodos de avaliação de suas práticas sejam também baseados no ciclo de vida dos recursos e materiais (GHISELLINI et al., 2016). Giorgi et al. (2019) ressaltam a importância do uso de metodologias analíticas baseadas no pensamento do ciclo de vida durante o processo de tomada de decisão voltado a práticas da EC. Os autores argumentam que o uso de metodologias desse cunho é imperativo para a otimização do uso de recursos e energia e consequente melhor desempenho ambiental.

A quantidade de IC desenvolvidos nos últimos anos é alta, sendo que vários desses foram pensados para contextos específicos, como é o caso do *Building Circularity Indicator*, desenvolvido por Verbene (2016) para a avaliação da circularidade da construção civil, ou o *Circularity Measurement Toolkit*, desenvolvido por Garza-reyes et al. (2019) para o estudo de pequenas e médias empresas no contexto da EC. Por outro lado, dada a grande quantidade de IC atualmente disponíveis, também existem aqueles que foram desenvolvidos com escopo metodológico amplo, a fim de poderem ser aplicados a setores e casos diversos, como é o caso do CTI (*Circularity Transition Indicators*) (WBCSD, 2020) e do *Material Circularity Indicator* (EMF, 2015). O CTI foi selecionado para a estratégia de mensuração de circularidade e sustentabilidade descrito nesta pesquisa e será aprofundado no tópico seguinte.

O *Material Circularity Indicator* (MCI) foi um dos primeiros IC a serem desenvolvidos para o nível micro e nano, dando início à tendência atual de criação de métodos para a quantificação da circularidade por meio de cálculos baseados no fluxo de materiais pelo sistema. Ele conta ainda com uma “ferramenta agregadora”, elaborada para agrupar o resultado de diferentes produtos analisados e apresentar a circularidade da organização-alvo. Entretanto, tal abordagem recebeu críticas de pesquisadores, uma vez que a ferramenta não seria capaz de contabilizar fatores externos aos fluxos materiais dos produtos para o cálculo da circularidade de organizações (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021; SCHULTE; MAGA; THONEMANN, 2021).

Uma tendência que pode ser identificada na literatura recente é a aplicação de metodologias de quantificação de impacto ambiental, como a ACV, em paralelo com IC (PEÑA et al., 2021; RUFÍ-SALÍS et al., 2021). Entretanto, nota-se que o foco dessas pesquisas é comumente voltado à manufatura de produtos específicos. Isso posto, esta pesquisa se baseia no estudos de Niero e Riveira (2018), que defendem o uso de metodologias baseadas no pensamento do ciclo de vida em paralelo a avaliações de circularidade no contexto

organizacional. O tópico a seguir discorre em maior detalhe sobre o IC a ser utilizado nessa pesquisa em paralelo à ACV e ACCV para o desenvolvimento do método proposto.

Como previamente mencionado, um grande número de IC foram desenvolvidos, sendo que a maioria atende a casos específicos (SAIDANI et al., 2019). Alguns autores ainda apontam essa grande diversidade de indicadores atualmente disponíveis, o que dificulta o desenvolvimento de uma estratégia e conceitualização única para o cálculo da circularidade de sistemas produtivos (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021). Nesse contexto, a seleção do IC a ser utilizado nessa pesquisa foi baseada em uma publicação anterior do presente autor e colaboradores (DE OLIVEIRA et al., 2021). Por meio da revisão de cerca de 60 artigos científicos, os autores identificaram o CTI como um indicador adequado para a avaliação da circularidade de organizações. Tal escolha se deu principalmente por sua metodologia sedimentada sob o pensamento do ciclo de vida, sendo assim capaz de analisar o fluxo de materiais e energia ao longo do ciclo de vida de uma organização para um período reportado. Uma vez que esse indicador é extensivamente utilizado nas análises presentes nessa tese, maiores detalhes sobre o CTI são apresentados no tópico a seguir.

O Apêndice A lista cerca de 60 indicadores de circularidade avaliados de Oliveira et al. (2020). Com base na análise crítica realizada nesse artigo, dois indicadores foram pré-selecionados para sua aplicação nessa tese: o CTI e o WHI. Os tópicos a seguir apresentam maiores detalhamentos relacionados a esses indicadores.

3.1.2 Circularity Transition Indicators

Em 2020, o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) apresentou o CTI, uma ferramenta para medir o progresso em direção à circularidade de empresas e auxiliar nas tomadas de decisão (WBCSD, 2020a). Apesar de não indicar os impactos ambientais e sociais das atividades da empresa, a ferramenta permite compreender o fluxo e ciclagem de materiais, energia e nutrientes em um sistema de produto (DE LOS SANTOS, 2019). Os indicadores foram primeiramente desenvolvidos em 2019, validados em 2020 (WBCSD, 2020b), e atualizados em 2021 por meio da ampla aplicação em empresas de diversos setores, habilitando assim o desenvolvimento do CTI versão 2.0 (WBCSD, 2021a).

A estrutura do CTI é quantitativa, capaz de determinar o desempenho circular por meio da avaliação dos processos, aquisição e recuperação da massa circular ou linear na empresa. A avaliação consiste em três módulos: fechar, otimizar e valorizar o ciclo, cada um apresentando indicadores específicos (WBCSD, 2020b). Tais indicadores permitem a avaliação dos materiais, energia e nutrientes ciclados e recuperados em cadeias de valor. Por exemplo, o indicador “% de recuperação” leva em consideração a proporção de material recuperado que é reciclado, remanufaturado, reconicionado, reparado e/ou reutilizado (GROOT, 2020).

A ferramenta é baseada no fluxo de materiais e energia dentro da empresa, avaliando três pontos-chave: *inflow* (analisa o quão circulares são os recursos, materiais, produtos e peças que entram na fronteira do sistema), potencial de recuperação do *outflow* (como a empresa projeta seus produtos e destina seus resíduos para garantir a recuperação técnica e biológica) e a recuperação efetiva do *outflow* (quanto da saída da empresa realmente é recuperado). O *inflow* pode ser dividido entre entradas circulares, que são materiais recuperados ou renováveis, e entradas lineares, que são materiais virgens e não renováveis (WBCSD, 2020a). Já o *outflow* considera o ciclo de EC o qual o material pode se vinculado (ciclo técnico, ciclo biológico ou ciclo biológico alimentício), qual o percentual de potencial de recuperação (0 a 100), a percentagem de recuperação efetiva (0 a 100) e o tipo de recuperação (reutilização, renovação, remanufatura, reciclagem, compostagem, consumo, incineração e aterro sanitário) (WBCSD, 2021a).

Os três principais subindicadores do CTI são “% fluxo de entradas circulares”, “% fluxo de saídas circulares” e “% circularidade”, que representam o módulo “fechar o ciclo”. Tais indicadores serão descritos com maior detalhamento a seguir.

Para o primeiro subindicador, “% fluxo de entradas circulares, é necessário a obtenção da massa (m) e circularidade de todos os inputs do sistema. Com base nesses dados, aplica-se a Equação 1 (Eq.1):

$$\% \text{ entradas circulares} = \frac{\sum_{i=0}^n (\% \text{ circularidade dos fluxos de entrada}_i * m_i)}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Os materiais recuperados (secundários) ou renováveis (provindos do ciclo biológico e produzidos de forma regenerativa) tem uma % de circularidade de fluxo de 100%. Por outro lado, é dado um valor nulo para a materiais virgens e ou não-renováveis (WBCSD, 2021a).

O segundo indicador, “% fluxo de saídas circulares”, é calculado de forma análoga ao primeiro, utilizando a Equação 2 (Eq. 2):

$$\% \text{ saídas circulares} = \frac{\sum_{i=0}^n (\% \text{ circularidade dos fluxos de saída}_i * m_i)}{\sum_{i=0}^n m_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde,

$$\% \text{ circularidade do outflow } X = \% \text{ potencial de recuperação do fluxo } X \times \% \text{ recuperação efetiva fluxo } X \quad (\text{Eq. 3})$$

A métrica “% potencial de recuperação do fluxo” representa o percentual de massa que pode ser reutilizado ou reinserido na cadeia produtiva, e “% recuperação efetiva do fluxo” representa o quanto de massa foi reinserido na cadeia (WBCSD, 2021a). Por fim, o indicador “% circularidade” é a média ponderada entre a “% de fluxos de entrada circulares” e a “% de fluxos de saída circulares”, que reflete o desempenho global do módulo “fechar o ciclo”. O resultado desse indicador pode variar de 0 (método de negócios totalmente linear) a 100% (método de negócios totalmente circular) (WBCSD, 2021a).

3.1.3 Waste Hierarchy Index

O WHI é um indicador desenvolvido por Pires e Martinho (2019) que permite calcular o nível de implementação da hierarquia de resíduos considerando diferentes tipos de reciclagem e incineração, onde são atribuídos pesos diferentes a cada método de tratamento de resíduos dependendo da forma como as operações de resíduos contribuem para a EC. Os resultados do WHI podem ajudar os formuladores de políticas e tomadores de decisão a definir metas com base neste índice, além de ajudá-los a fornecer incentivos ou desincentivos adequados em torno das operações de resíduos e determinar os resíduos operações a serem aprimoradas e aquelas a serem abandonadas para chegar a uma EC, em qualquer escala geográfica.

O WHI considera apenas as operações que ocorrem após a geração de resíduos e não inclui a prevenção. A Figura 3-1 ilustra a hierarquia de resíduos que guiou o desenvolvimento

do WHI. O indicador considera diferentes tipos de opções de tratamento de gestão de resíduos e aplica um método de ponderação para atribuir valor às práticas que contribuem para a EC.



Fonte: Adaptado de DEFRA (2011).

O trabalho de Pires e Martinho (2019) apresenta duas formulações para o cálculo do WHI. A primeira seria a formulação “completa”, entretanto, os desenvolvedores do artigo mencionam que essa estratégia não é a mais benéfica para a avaliação de sistemas devido à grande variedade de dados necessários. Dessa forma, os autores apresentam também uma fórmula simplificada para o cálculo do WHI (*streamlined WHI*). A Equação 4 (Eq. 4) apresenta a fórmula simplificada do WHI é apresentada abaixo.

$$WHI = \frac{[(1 \times (M_{pr} + M_r + M_c)) + (-1 \times (M_i + M_a))]}{M_t} \times 100 \text{ (Eq. 4)}$$

Nessa equação, M_{pr} representa massa total de resíduo sendo preparada para reuso (limpeza ou reparação de operações de valorização de resíduos que podem ser reutilizados sem reprocessamento); M_r é massa total de resíduos enviados para a reciclagem; M_c corresponde a massa total de resíduos enviados para a compostagem; M_i representa massa total de resíduos incinerados; M_a é massa total de resíduos enviados para o aterro sanitário; e M_t é massa total gerada pela organização ou sistema durante o período reportado. As variáveis previamente mencionadas devem seguir uma mesma unidade de medida de massa (ex: quilogramas, toneladas, etc.).

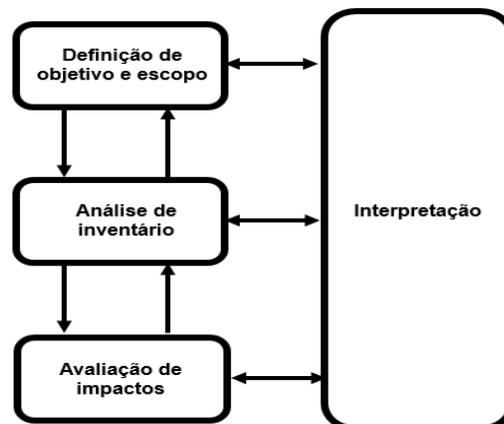
Os dados de massa de resíduos (base úmida) em quilogramas são inseridos na equação. Os resultados do WHI variam entre -100% e 100%. Um WHI de -100% descreve um sistema em que os princípios de hierarquia de resíduos não são implementados de uma forma que possa contribuir para a EC. Por outro lado, um sistema que apresenta um WHI de 100% reflete que todos os resíduos sólidos são encaminhados corretamente exclusivamente para operações vinculadas a EC.

3.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma metodologia importante para investigações científicas em diferentes áreas (VISENTIN et al., 2020). Ela configura-se como um dos principais métodos para quantificar impactos ambientais a fim de apoiar a tomada de decisões comerciais e regulatórias (LI; ROSKILLY; WANG, 2018). De forma prática, a ACV pode ser descrita como uma metodologia analítica para a avaliação dos aspectos ambientais e potenciais impactos ambientais gerados por um processo, atividade ou serviço ao longo do ciclo de vida de um produto (ISO, 2006a).

A ACV é normatizada pela ISO 14040 (2006a) e ISO 14044 (2006b). Esse método é composto por quatro fases principais, sendo estas: Definição de Objetivo e Escopo, Análise de Inventário, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e Interpretação (ISO, 2006a). As quatro fases funcionam de forma interativa, como ilustrado pela Figura 3-2.

Figura 3-2 - Fases de um estudo de ACV.



Fonte: Adaptado de ISO (2006b).

A primeira fase, Definição de Objetivo e Escopo, consiste na definição da razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e limites, a Unidade Funcional (UF), a metodologia de avaliação de impactos ambientais a ser adotada, e os procedimentos considerados necessários. Dentre tais elementos incorporados por esta etapa, é necessária maior atenção à definição de UF e da Fronteira do Sistema (ISO, 2006a).

A norma conceitua UF como “o desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência.” (ISO, 2006a). Aplicar corretamente a UF de uma ACV é a chave para se desenvolver um estudo sem ambiguidades, principalmente em projetos de comparabilidade, em que os sistemas devem ser comparados de acordo com a mesma UF (ZIMEK et al., 2019).

A Fronteira do Sistema é definida como a “interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto.” (ISO, 2006a), ou como o “conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto” (ISO, 2006b). Após o devido estabelecimento da UF, da Fronteira do Sistema, e dos processos a serem estudados, a condução da ACV segue para a fase da construção do ICV.

O ICV consiste no processo de coleta e quantificação dos dados de todas as entradas (energia, matéria-prima, etc.) e saídas (emissões, resíduos, coprodutos, etc.) pertinentes a um sistema de produto. O processo de condução de um inventário é interativo, na medida em que os dados são coletados, podem ser identificados novos requisitos ou limitações que requeiram mudanças nos procedimentos de coleta de informações, de forma que os objetivos do estudo ainda sejam alcançados (ISO, 2006a).

A norma recomenda ainda que as entradas e saídas sejam representadas graficamente dentro de uma fronteira do sistema por meio de fluxogramas contendo especificação das unidades dos valores levantados e descrição clara dos métodos de coleta de dados. Tais informações são coletadas de forma direta, analisando as entradas e saídas de matérias de um processo produtivo *in loco*, caracterizando dados primários, ou também por meio de bases de dados, que apresentam dados secundários baseados em medições feitas por terceiros.

A etapa seguinte da avaliação é a AICV. Esta fase é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais usando dados coletados no ICV (ISO, 2006a). Em geral, a AICV envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreendê-los, convertendo-os em categorias de impacto

ambiental (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Os resultados são possíveis em nível *midpoint*, *endpoint* e *single score*. Categorias de impacto *midpoint* incluem aquecimento global, depleção da camada de ozônio, eutrofização, acidificação, toxicidade humana (carcinogênicas e não-carcinogênicas), uso de terra e esgotamento de recursos, dentre outras. As categorias de impacto *endpoint* apresentam valores em termos de danos a áreas de proteção, como a saúde humana, recursos naturais e danos ao ecossistema (HUPPES et al., 2012). As categorias *endpoint* se relacionam às categorias *midpoint* através de caminhos de impacto (*damage pathways*).

A título de exemplo, é possível analisar as categorias de impacto do método de AICV ReCiPe 2016. O caminho de impacto “aumento de doenças respiratórias” relaciona a categoria de impacto *midpoint* “material particulado” à categoria *endpoint* “danos à saúde humana”. Salienta-se que diferentes métodos de AICV apresentam diferentes categorias e caminhos de impacto. A avaliação dos impactos por meio de um *single score* (*medido em performance points (pp)*, que é a agregação das três categorias *endpoint*), por sua vez, corresponde à compilação dos impactos ambientais encontrados pelas categorias de impacto escolhidas em um fator único. É necessária a agregação de muitas informações para a formação do *single score*, havendo assim alta incerteza no procedimento de cálculo (VAN HOOFF et al., 2013).

A última fase da ACV é denominada de Interpretação do Ciclo de Vida (ISO, 2006a). Ela se relaciona diretamente com as outras três fases da ACV, o que reflete a necessidade de constante interpretação e análise dos dados e processos, sendo que, caso necessário, este estágio possibilita a alteração de escopo, objetivos e processos analisados. Nesta etapa três principais elementos devem ser destacados: i) a identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV; ii) a avaliação do estudo de ACV considerando elementos opcionais da AICV, como a análise de sensibilidade e consistência dos dados; e iii) formulação de conclusões e limitações sobre o sistema estudado (ISO, 2006b). Nota-se que as constatações desta interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações para os tomadores de decisão, de forma consistente com o objetivo e o escopo do estudo (ISO, 2006a).

3.3 AVALIAÇÃO ORGANIZACIONAL DO CICLO DE VIDA

Segundo Martínez-blanco et al. (2015), análises de cunho quantitativo baseadas no Pensamento do Ciclo de Vida não haviam sido aplicadas a nível organizacional até então. Embora a ACV tenha sido definida originalmente para produtos e serviços, seus benefícios e potencial podem ser estendidos à avaliação das organizações (FORIN; MARTÍNEZ-BLANCO; FINKBEINER, 2019). No entanto, a avaliação do desempenho ambiental de empresas e instituições pode ser mais complexa que uma ACV direcionada a produtos ou serviços, uma vez que as cadeias de valor envolvem não apenas fornecedores diretos, mas toda a rede vinculada a uma organização (MARTÍNEZ-BLANCO; FORIN; FINKBEINER, 2020).

De acordo com a definição apresentada pela ISO 14072 (2014), que é utilizada em paralelo ao relatório intitulado *Guidance on Organizational Life Cycle Assessment* (UNEP, 2015) como documentos de orientação, a ACVO é a “compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de atividades associadas a uma organização como um todo, ou parte dela, adotando uma perspectiva de ciclo de vida”. Essa abordagem fornece informações referentes aos potenciais impactos e *hotspots* ambientais, além de identificar possíveis *trade-offs* relacionado aos impactos ambientais do sistema, permitindo assim a construção de decisões gerenciais que possam influenciar e reduzir os encargos ambientais de cadeias de valor relacionadas à organização estudada (FORIN; MARTÍNEZ-BLANCO; FINKBEINER, 2019; MARTÍNEZ-BLANCO; FORIN; FINKBEINER, 2020). Ainda, pesquisas recentes analisam a possibilidade da expansão dessa abordagem para avaliações sociais e econômicas a nível organizacional (D’EUSANIO et al., 2020; MARTÍNEZ-BLANCO et al., 2020; UNEP, 2020).

A ACVO segue a metodologia de quatro fases declarada pela ISO 14040 e ISO 14044 (2006a; 2006b), incluindo a Definição de Objetivo e Escopo, ICV, AICV e Interpretação (Figura 3-2). Da mesma forma, a maioria dos princípios, requisitos e diretrizes da ACV voltada a produtos e serviços também se aplicam à ACVO. Entretanto, algumas nomenclaturas e definições diferem-se entre as duas metodologias. Segundo Martínez-blanco et al. (2020), as principais diferenças entre as duas metodologias estão no nível do escopo. Na ACVO, o conceito de UF é substituído por um conjunto de conceitos: organização reportada, unidade

reportada, fluxo reportado. Com base em UNEP (2015) e ISO 14072 (2014), às definições para tais conceitos são apresentadas abaixo:

- Organização reportada: É a unidade de análise da ACVO. Deve ser claramente definida e mensurável, além de ser consistente com os outros elementos do objetivo e escopo. Portanto, os seguintes itens devem ser definidos: i) Nome e descrição da organização ou assunto de estudo; ii) Definição do método de consolidação (controle financeiro ou operacional sobre o sistema estudado); iii) Período de referência.
- Unidade reportada: Expressão quantitativa do desempenho da organização em estudo para uso como referência. Conjuntamente com o fluxo reportado, é um elemento comparável à UF na ACV.
- Fluxo reportado: É a medida quantitativa das saídas da organização relatora. Constitui a base para a conclusão do ICV. O fluxo reportado vincula as diferentes unidades da cadeia de valor ao portfólio da organização reportada.

A fim de testar as definições metodológicas estabelecidas pela UNEP (2015), 12 organizações aplicaram o método documentado no Guia O-LCA em um processo chamado de “road test”, gerenciado pela *Life Cycle Initiative*. Essa iniciativa visou o desenvolvimento de estudos ACVO em empresas de tamanhos e setores diferentes, a fim de melhor entender como estudos de ACV a nível organizacional poderiam ser aplicados e otimizados (FORIN; MARTÍNEZ-BLANCO; FINKBEINER, 2019). Detalhes do *road test*, bem como os resumos dos estudos relacionados, são descritos em UNEP (2017). As opções metodológicas e caminhos de aplicação escolhidos pelas organizações, bem como os desafios encontrados por outros estudos de caso focados em ACVO são documentados por Forin et al. (2019) e Martínez-Blanco et al. (2020). As principais dificuldades relatadas pelos participantes do *road test* e relatado pelos autores são: categorização das atividades diretas e indiretas das organizações, definição da fronteira do sistema, e coleta de dados.

Segundo a UNEP (2015), diferentemente da ACV, a ACVO não permite a comparação de resultados entre organizações. Isso se dá devido aos componentes de sua unidade de análise primária, a organização reportada. Dessa forma, os resultados da ACVO são comumente direcionados ao uso interno pelos tomadores de decisão da organização. Exemplos de uso são: identificação de *hotspots* ambientais, apoio a gestão estratégica, monitoramento de desempenho ambiental, aumento de transparência e controle.

Ainda, UNEP (2015) destaca a importância da aplicação da ACVO em pequenas e médias empresas. Segundo o relatório, os impactos ambientais dessa porção do mercado são comumente subestimados. Entretanto, o efeito coletivo dos impactos de pequenas e médias empresas é significativo. Dessa forma, o guia aponta a ACVO como uma ferramenta valiosa para a quantificação do impacto ambiental relacionado com essas organizações. Além disso, em muitas organizações de pequeno e médio porte, avaliações de produto e o nível organizacional são frequentemente semelhantes devido ao portfólio reduzido (FORIN; MARTÍNEZ-BLANCO; FINKBEINER, 2019; UNEP, 2015).

3.4 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA

Apesar de menos usual, a ACCV precede a ACV (SWARR et al., 2011). Tal metodologia foi originalmente conceptualizada como uma abordagem para avaliar os custos ao longo do ciclo de vida de um produto, a fim de prover uma avaliação econômica abrangente que vá além da contabilização de investimentos diretos. Segundo Hunkeler et al. (2008), a ACCV considera todos os custos associados ao ciclo de vida de um produto que são diretamente cobertos por qualquer ator no ciclo de vida do sistema de produto estudado (como fornecedor, fabricante, usuário ou consumidor), sendo que as externalidades do sistema podem também ser incluídas na análise. Por iniciativa da *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), Swarr et al. (2011) desenvolveram um Código de Práticas para a ACCV. Nesse documento é destacado que, assim como a ACV, a ACCV segue as quatro fases interativas, previamente ilustradas pela Figura 3-2.

Além disso, a SETAC classificou as avaliações econômicas baseadas no pensamento do ciclo de vida em “Convencional”, Ambiental (ACCV) e Societal (SWARR et al., 2011). A metodologia convencional é uma prática atual em muitos governos e empresas, e se baseia em

uma avaliação puramente econômica, considerando diversos custos associados a um produto associado diretamente a um determinado ator. Nessa análise, custos externos são frequentemente negligenciados. A avaliação de caráter social contabiliza também os possíveis impactos econômicos que o sistema emprega em contextos sociais (TEERIOJA et al., 2012). Por outro lado, a ACCV resume todos os custos associados ao ciclo de vida de um produto que são diretamente cobertos por um, ou mais, dos atores envolvidos em seu ciclo de vida, incluindo externalidades que são antecipadas para serem internalizadas no futuro relevante para a decisão. Segundo de Menna et al. (2018), a ACCV ambiental não é uma técnica independente, mas é vista como uma análise complementar à avaliação do ciclo de vida ambiental.

Segundo Ciroth et al. (2008), a ACCV pode ser vista como uma ferramenta tanto para comunicação externa e certificação quanto para rotulagem, enquanto o método “convencional” é normalmente usado como uma ferramenta de avaliação interna de algumas organizações. A principal diferença metodológica entre ambos é referente à obrigatoriedade de contabilizações de estágios do ciclo de vida nas análises. Na ACCV, é tido como obrigatório incluir todos os estágios do ciclo de vida, por outro lado, a metodologia “convencional” muitas vezes não leva em consideração os custos de fim de vida.

Existem *frameworks* e teorias estabelecidas para a estrutura computacional de estudos de custo do ciclo de vida. Ainda, padrões e diretrizes internacionais específicas da indústria foram desenvolvidos para esses métodos (ILYAS; KASSA; DARUN, 2021). Entretanto, devido à falta de uniformidade metodológica, o caso da ACCV é menos claro (DE MENNA et al., 2018). Mesmo o Código de Práticas desenvolvido por Swarr et al. (2011) não especifica estruturas e procedimentos formais a serem utilizados (Heijungs et al., 2013). Dessa forma, a ACCV não apresenta uma estrutura amplamente estabelecida e metodologia comumente aceita (AMMAR; ZAYED; MOSELHI, 2013; ILYAS; KASSA; DARUN, 2021).

Os resultados da ACCV são fortemente dependentes da perspectiva do agente considerado (fornecedor, cliente, etc.) (WULF et al., 2019). No entanto, a maioria dos estudos considera apenas a perspectiva do produtor, sendo que a perspectiva do consumidor é remotamente levada em consideração (VOGT GWERDER et al., 2019). Alejandrino et al. (2021), por meio de uma revisão de literatura, destacam que o principal indicador avaliado por estudos de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (metodologia que une ACV, ACCV e Avaliação Social do Ciclo de Vida) que incluem ACCV é o custo total, ou seja, a somatória

total dos custos relacionados ao ciclo de vida estudado. Isso está em linha com as diretrizes propostas por Swarr et al. (2011) no Código de Práticas. Entretanto, os mesmos autores também mencionam que outros indicadores são comumente analisados nesses estudos, como: receitas totais, lucro, preço, valor presente líquido, valor adicionado, tempo de retorno, investimento, taxa interna de retorno, contribuição para o produto interno bruto (PIB), risco, incentivos financeiros, dentre outros. Os autores também mencionam que devido à falta de normatização, a escolha dos indicadores na ACCV é dependente do contexto do estudo e escolha do praticante.

Uma vez que não há uma abordagem metodológica única para esse tipo de análise, diversos métodos de cálculo são comumente utilizados, sendo que cada um embarca uma série de indicadores diferentes (ALEJANDRINO et al., 2021). O Quadro 3-1 apresenta alguns dos principais indicadores parte da ACCV e normalmente analisados por tomadores de decisão. Os indicadores apresentados foram separados entre custos recorrentes e custos não recorrentes. O primeiro grupo se refere a gastos que possuem recorrência periódica (semanal, quinzenal, mensal, etc), como por exemplo, conta de luz, salários e taxas de disposição final de resíduos. Já os custos não recorrentes são compra/venda de ativos, por exemplo, imóveis/campos/concessões, recebimento ou pagamento de créditos tributários, indenizações, reparo de instalações que não foram planejadas, manutenções corretivas. Com base nesses indicadores e disponibilidade de dados, os praticantes desenvolvem equações que se enquadrem no contexto estudado a fim de quantificar os custos do ciclo de vida do sistema.

Quadro 3-1 - Exemplos de custos recorrentes e não recorrentes.

Recorrência	Tipo de custos
Custos recorrentes	Custos de aquisição
	Custos de produção/operação
	Custos de mão de obra
	Custos de inventário
	Custos de gestão
	Custos de disposição final de resíduos
Custos não recorrentes	Custos de manutenção
	Custos de instalação
	Custos de pesquisa e desenvolvimento
	Custos de construção
	Custos de pesquisa e desenvolvimento
	Custos de investimento

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com base no que foi previamente destacado, essa tese amplia a visão clássica da ACCV, voltada a produtos e serviços, à avaliação financeira de cunho organizacional, aqui referida como ACCVO. O próximo capítulo melhor detalha essa abordagem metodológica.

3.5 AVALIAÇÃO DOS CUSTOS CICLO DE VIDA ORGANIZACIONAL

Diferentemente da ACV, a ACCV não possui formalmente uma contraparte metodológica voltada à avaliação de organizações. Entretanto, como apontado por Niero e Riveira (2018), além ACCV apresentar uma estrutura metodológica similar à da ACV, avaliações econômicas a nível organizacional são práticas comuns de mercado.

Dessa forma, essa pesquisa emprega o termo ACCVO para conceituar a aplicação da ACCV direcionada à contabilização de custos do ciclo de vida de uma organização relacionado a um determinado período reportado. Essa abordagem segue os procedimentos descritos por Swarr et al. (2011) em paralelo às recomendações apresentadas pela ISO 14072 (2014). Dessa forma, a ACCVO tem um processo metodológico similar ao apresentado pela Figura 3-2. A única alteração é referente à terceira fase desse procedimento iterativo, no qual ao invés da

AICV do sistema, são calculados os custos e indicadores econômicos referentes ao período reportado.

3.6 *TRADE-OFFS* AMBIENTAIS E ECONÔMICOS NO ÂMBITO DA GESTÃO AMBIENTAL E CIRCULARIDADE

Prado-Lopez et al. (2016) explicam que, por meio das metodologias de contabilidade ambiental voltadas ao suporte à tomada de decisão, onde há a meta de identificar a alternativa ambientalmente mais viável entre um conjunto de opções, se pode (i) orientar a seleção de material e processamento na indústria; (ii) identificar o melhor cenário político para informar regulamentações ambientais; e ainda (iii) direcionar pesquisadores para áreas mais promissoras para redução de impactos ambientais no desenvolvimento de tecnologia. No entanto, os resultados raramente são conclusivos, e quando uma alternativa apresenta o melhor desempenho em alguns aspectos, ela frequentemente também apresenta resultados piores em outros. Tal situação é comumente referenciada no âmbito científico e organizacional como um *trade-off*. Segundo de Souza Junior (2021), *trade-offs* entre indicadores, principalmente na esfera ambiental, dificultam a identificação da alternativa mais viável, necessitando maior entendimento pelas partes interessadas, e possivelmente a aplicação de técnicas adicionais para o apoio à tomada de decisão.

Reap et al. (2008b) afirmam que os tomadores de decisão muitas vezes consideram vários objetivos que entram em conflito ou de compensação através de um conjunto de opções de decisão (uma opção domina as outras por um objetivo, mas é dominada por outro objetivo). Um exemplo clássico desta situação que acontece no âmbito de estudos de ACV são os casos em que um processo é mais impactante para uma categoria de impacto A, enquanto, outro processo é mais impactante para uma categoria de impacto B (de Souza Júnior, 2021). Laurin et al. (2016) corroboram com esta observação, quando afirmam que as ACV nem sempre mostram uma vantagem clara de uma opção sobre a outra em todas as categorias de impacto. Além disso, quando uma clara vantagem (ou desvantagem) é observada, isso deve conter uma margem grande o suficiente para acomodar a incerteza relacionada aos dados de inventário e aos métodos de avaliação de impacto.

Para informar adequadamente os tomadores de decisão, dentro do contexto de suas metas e objetivos, é necessário que haja metodologias cientificamente sólidas para abordar as compensações no processo de tomada de decisão. Para Laurin et al. (2016), para identificar a melhor alternativa ao fazer uma comparação, muitas vezes é necessário entender os *trade-offs* entre os diferentes indicadores. Os autores sugerem técnicas de análise de decisão multicritério, análise multivariada ou métodos baseados na construção de equações de regressão dos resultados para auxiliar nessa interpretação produtos das análises, podendo incluir neste quadro a ponderação para agregação. Tais metodologias permitem a relativização da importância ou do valor de diferentes objetivos e a fim de agregá-los em uma única pontuação composta (indicador único).

Em consonância com Hahladakis e Iacovidou (2019) e Niero e Kalbar (2019), Kravchenko, Pigosso e Mcaloon (2020) apresentam os *trade-offs* como situações caracterizadas por conflitos entre os objetivos desejados, onde é impossível satisfazer todos os critérios simultaneamente. Para os autores, embora a identificação dos *trade-offs* entre os pilares de sustentabilidade seja algo comum, ainda há uma lacuna nas abordagens existentes para apoiar o diálogo de *trade-offs* e a tomada de decisões envolvendo a EC. Ainda, afirmam que se os *trade-offs* não forem reconhecidos, existe o risco de tomadas de decisão levarem a subotimizações ou até impactos potenciais maiores.

Um exemplo prático desse tema é o trabalho de Rosenboom, Langer e Traverso (2022). Os autores avaliaram as vantagens e os desafios dos bioplásticos na transição para uma EC e identificaram que possuem e menor pegada de carbono em comparação com os plásticos de base fóssil, além de poderem ser biodegradados como opção de cenário de fim de vida e serem compatíveis com os atuais fluxos de reciclagem. Entretanto, a substituição de plásticos de base fóssil por bioplásticos resulta em alguns *trade-offs*. Os processos de fabricação de bioplásticos podem ser energeticamente menos eficientes do que os processos de fabricação usual e acarretam grande impacto ambientais potenciais associados à agricultura. Ainda, o uso de biomassa de primeira geração para confecção de bioplásticos é controverso devido à potencial competição com a produção de alimentos. Por fim, os fluxos de reciclagem de bioplásticos ainda precisam ser estabelecidos para torná-los verdadeiramente “circulares”, pois impactos ambientais potenciais associados ao fim de vida do material podem ser maiores em

comparação aos de plásticos de base fóssil, principalmente pelo fato dos bioplásticos compostáveis ainda serem frequentemente rejeitados pelos compostadores.

Segundo Glogic, Sonnemann e Younga (2021) é imprescindível que sejam considerados os impactos ambientais potenciais ao avaliar a aplicação de estratégias de EC para otimização do uso de materiais e recuperação de recursos. Os autores recomendam que essa avaliação seja feita utilizando o um IC e a metodologia de ACV, afirmando que os *trade-offs* ambientais podem ser subestimados para algumas estratégias, uma vez que a perda de qualidade do material com a reciclagem não é capturada dentro da estrutura metodológica do MCI (IC escolhido pelos autores). Isto posto, realizaram um estudo aplicando essa avaliação conjunta a diversos cenários para a melhoria da circularidade de baterias alcalinas. Os resultados demonstram quão significativamente essa limitação do MCI pode influenciar os *trade-offs* em um estudo de caso. Concluíram que, para o caso avaliado, melhorar a circularidade geralmente reduz os impactos ambientais, embora haja grande variabilidade entre dois conjuntos de valores. Por exemplo, um aumento de 14% na pontuação do MCI para dois cenários de reciclagem se traduz em uma pequena redução de impactos ambientais em um caso (até 1,64%) e uma grande redução em outro (até 56,82%).

De acordo com Peña et al. (2021), a tomada de decisão sobre as estratégias de EC geralmente faz perguntas que podem ser respondidas pela aplicação de metodologias baseada no Pensamento do Ciclo de Vida, fornecendo informações sobre os *trade-offs* entre os recursos, *outputs* e categorias de impactos, como, uso de água, energia, emissões, uso de materiais e conteúdo reciclado. Dentre alguns dos exemplos ilustrados de cuidados necessários relacionados a *trade-offs*, estão: i) para compor um produto com 100% de conteúdo reciclado é necessário considerar os impactos potenciais do uso de energia, água e materiais para obter e usar os materiais reciclados de maneira segura (ou seja, livre de substâncias tóxicas acumuladas em ciclos anteriores); ii) ao banir a utilização de produtos plásticos descartáveis, devem ser considerados simultaneamente os impactos econômicos, ambientais e sociais de alternativas (como papel, algodão ou sacolas plásticas duráveis), ao longo do ciclo de vida dos produtos; iii) optar por localismo, que envolve trabalhar com fornecedores próximos e diminuir o transporte para fornecimento de insumos, é necessário considerar como isso afetaria a qualidade e suprimento dos principais produtos de fontes locais, bem como os impactos socioeconômicos

no países fornecedores originais, como possíveis impactos na ocupação da região, mudanças de tipo de zoneamento, aumento no valor de imóveis, dentre outros.

3.7 INTEGRAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS BASEADAS NO PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA E INDICADORES DE CIRCULARIDADE

Uma perspectiva sistêmica pode auxiliar em esclarecer a relação entre indicadores circulares e ambientais (HAUPT; ZSCHOKKE, 2017; OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020; SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2016). Em particular, uma abordagem de ciclo de vida permite uma avaliação sistemática dos impactos e benefícios ambientais resultantes da implementação de estratégias circulares em diferentes fases do ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço (NIERO; KALBAR, 2019; PAULIUK, 2018).

De fato, o aumento da circularidade não resulta necessariamente em redução do impacto ambiental (NIERO; KALBAR, 2019), o que cria um conflito para a tomada de decisão ao selecionar inovações e práticas circulares adequadas. Ao passar da teoria para a prática, esse conflito torna-se um desafio que demanda mais atenção. Dado o grande número de estratégias circulares disponíveis e seus potenciais efeitos sobre o meio ambiente, é necessário priorizar aquelas que promovem a circularidade, minimizando os impactos e *trade-offs* entre as variáveis analisadas (RUFÍ-SALÍS et al., 2021). Dessa forma, o desenvolvimento de estudos de caso reais é primordial para ajustar os indicadores à complexidade inerente às atividades humanas.

Segundo os trabalhos de Haupt e Zschokke (2017) e Kalmukova et al (2018), a implementação de estratégias circulares apresenta uma oportunidade para a conservação de recursos, mas também apresenta um risco se resultarem em *trade-offs* negativos para o meio ambiente. Ainda, como apontado em revisões bibliográficas relacionadas à IC, tais indicadores focam na mensuração do fluxo materiais e energia por sistemas (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021; ROSSI et al., 2020; SAIDANI et al., 2019). Porém, tais análises comumente não são capazes de oferecer informações sobre os impactos ambientais decorrentes de tal fluxo de energético ou de matérias, sendo que pesquisadores vêm recorrendo ao uso de metodologias paralelas a fim de analisar não somente a circularidade do sistema, mas também seus potenciais impactos ambientais. Nesse contexto, destacam-se as metodologias baseadas no pensamento do ciclo de vida, e em especial, aquelas ligadas à ACV.

No intuito de melhor entender e trazer suporte para a gestão desses *trade-offs* entre a circularidade de sistemas e seus potenciais impactos ambientais, Glogic et al. (2021) recomendam a implementação de IC conjuntamente com métodos de avaliação de impacto ambiental. Com base nessa estratégia, os autores aplicaram o MCI em paralelo com uma ACV na avaliação de vários cenários de reciclagem de baterias alcalinas. Glogic et al. (2021) afirmam que *trade-offs* ambientais podem ser comumente subestimados para algumas estratégias, uma vez que a perda de material não é totalmente capturada pelo quadro metodológico MCI. Ainda, os resultados apresentados sugerem que, para os cenários estudados, melhorar e a circularidade geralmente reduz impactos ambientais, embora haja grande variabilidade entre dois conjuntos de valores. Por exemplo, um aumento da pontuação MCI em 14% para dois cenários de reciclagem se traduz em uma pequena redução de impactos em um caso (0,06–1,64%) e uma grande redução em outro (9,84–56,82%).

Schulte et al. (2021) avaliou os potenciais impactos ambientais de cateteres de eletrofisiologia por meio de uma ACV ao mesmo tempo que também avaliou o seu potencial de remanufatura por meio de um IC voltado à remanufatura do material desenvolvido pelos próprios pesquisadores. Os autores afirmam que a ACV pode ser significativa durante o processo de tomada de decisão de clientes preocupados com o meio ambiente. No entanto, essa perspectiva é menos significativa para outras partes interessadas, como tomadores de decisão que desejam saber se a remanufatura é uma estratégia mais estimulante do que a fabricação linear sob a ótica ambiental (PETERS, 2016). Esse público requer uma visão mais ampla sobre um horizonte de tempo estendido e sobre os benefícios ambientais de um determinado produto remanufaturado, incluindo, por exemplo, vários ciclos de remanufatura (SCHULTE et al., 2021). Nesse contexto, os autores recomendam o uso de IC em paralelo à ACV para suprir a analisar o processo de remanufatura ou a produção linear a partir de materiais virgens de produtos ao mesmo tempo que informações sobre os potenciais impactos ambientais de tal sistema de produto são obtidas, fornecendo assim maior suporte a tomadores de decisão.

Ruffi-salís et al. (2021) apresentam uma abordagem semelhante para a avaliação integrada da circularidade e impactos ambientais de sistemas urbanos agrários. Os autores desenvolveram um trabalho com o objetivo de analisar o desempenho ambiental e circularidade da aplicação de estratégias circulares em sistemas de agricultura urbana a fim de explorar indicadores que apoiem a tomada de decisão e priorização no contexto urbano. Os resultados

mostram que o *score* do MCI para todas as estratégias estudadas foi enviesado pelo excesso de peso do subsistema água no balanço de massa. Com base nessa constatação, foi proposto uma série de modificações no cálculo da circularidade. A utilização destes indicadores permite uma compreensão simples do desempenho circular e ambiental destes sistemas ao mesmo tempo que apresenta uma certa flexibilidade metodológica necessária para a abordagem de sistemas diversos.

Nota-se que a aplicação conjunta de IC com metodologias de contabilidade de impactos ambientais é uma estratégia que vem ganhando espaço no meio acadêmico. Entretanto, tais análises atualmente ignoram o fator econômico intrínseco à implementação de estratégias circulares para a melhoria de sistemas lineares (RABTA, 2020; RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017). Como apontado por Niero e Rivera (2018), as esferas econômicas e sociais também sofrem alterações e possíveis *trade-offs* na transição de sistemas lineares para circulares, sendo que maiores pesquisas devem ser empregadas para melhor alinhar as estratégias e objetivos da EC com outros compartimentos da sustentabilidade além da pauta ambiental (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; OLIVEIRA et al., 2021, 2021).

Com base nessa lacuna científica, o capítulo a seguir apresenta a proposta de um método integrado para avaliação dos impactos ambientais em conjunto com a avaliação econômica e de circularidade de organizações. Tal método lança mão de um Generalized Linear Model (GLM, do inglês, Método Linear Generalizado) para a avaliação da influência entre as variáveis estudadas. O tópico a seguir provê maiores explicações sobre tal abordagem estatística.

3.8 GENERALIZED LINEAR MODEL

O GLM foi desenvolvido por Nelder e Wedderburn (1972) e discutido em detalhes em McCullagh e Nelder (1989). Essa abordagem é uma generalização flexível da regressão linear ordinária. Segundo os autores, o GLM é uma classe de métodos estatísticos amplamente utilizada na análise de dados. Ele estende o método de regressão linear tradicional para acomodar variáveis de resposta que não seguem uma distribuição normal, como dados binários, de contagem ou de sobrevivência.

Essa abordagem generaliza a regressão linear ao permitir que o método avaliado seja relacionado à variável de resposta por meio de uma função de ligação, e permite analisar a magnitude da variância de cada medida em função a um valor previsto (RAYMOND, MONTGOMERY, 2018). Segundo Arnold et al. (2020), uma análise de GLM padrão é agnóstica em relação à estrutura causal dos dados aos quais são ajustados.

O GLM é estimado por meio de um processo iterativo de máxima verossimilhança ou de quase-máxima verossimilhança. O objetivo é encontrar os parâmetros do método que maximizam a verossimilhança dos dados observados (RAYMOND, MONTGOMERY, 2018). A inferência estatística é baseada nos erros padrão dos coeficientes estimados e nos testes de hipóteses para esses coeficientes (HARDIN et al., 2007).

O processo de ajuste de um GLM não faz suposições sobre causalidade, nem permite que conclusões sobre causalidade sejam tiradas sem outras suposições fortes (LINDSEY, 2008). De forma prática, por meio de um GLM é possível se analisar a correlação entre os fatores analisados, tornando, então, possível se entender com maior clareza como uma variável analisada influencia nos resultados das outras variáveis.

Esse método de regressão é composto por uma variável dependente y (também chamada de variável de desfecho) e é determinada por mais de uma variável independente x (também referida como variável preditora). Genericamente, um método de regressão linear múltipla com k variáveis independentes e p parâmetros ($p = k+1$) pode ser representado como descrito pela Eq. 5:

$$y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad \text{Eq. (5)}$$

Nesse contexto, α corresponde a um coeficiente técnico fixo (ou coeficiente linear), que é o valor esperado de y quando todas as variáveis independentes forem nulas. β_1 é o coeficiente angular, que implica na variação esperada em y dado um incremento unitário em X_1 , mantendo-se constantes todas as demais variáveis independentes, e assim sucessivamente (LINDSEY, 2008).

Nessa análise, quanto mais significativo for o peso de uma variável isolada (y), ou de um conjunto de variáveis explicativas, mais informações sobre os fatores que afetam o comportamento da variável resposta poderão ser adquiridas (HARDIN et al., 2007). Tal método

estatístico é comumente empregado para: i) projetar o valor de uma variável de desfecho através de um conjunto de outras variáveis preditoras; ii) investigar quais variáveis avaliadas se relacionam com uma variável de desfecho; iii) investigar qual conjunto de variáveis traz uma melhor explicação para a variável de resultado; iv) entender a relação entre uma variável de resultado e uma preditora, controlando pelo efeito de outras variáveis preditoras (LINDSEY, 2008).

Devido a sua ampla aplicação, é importante ressaltar os pontos positivos e negativos dessa avaliação estatística. Segundo Raymond e Montgomery (2018), dentre as principais vantagens do GLM, destacam-se sua praticidade, fácil adequação das variáveis e entendimento dos resultados. Por exemplo, como o GLM produz uma equação similar à descrita pela Eq 5, a direta avaliação das grandezas e diferenças entre os coeficientes lineares dos termos descritos pela equação descreve de forma preliminar qual fator influencia mais expressamente a variável dependente. Ademais, caso múltiplas variáveis sejam avaliadas, a relação entre duas das variáveis pode ser facilmente entrada ao simularmos um valor nulo para uma terceira variável, desdobrando assim a equação inicial para análises mais detalhadas.

Por outro lado, a principal fragilidade do GLM é o fato de que ele representa um método plano, sendo que seu ajuste dificilmente será totalmente compatível com variáveis que estejam espalhadas de forma não plana no espaço cartesiano. Nesse caso, o método representa uma projeção dos valores dispersos no espaço cartesiano em um plano (PAUL e SAHA, 2007). Dessa forma, o GLM apresenta uma solução prática para relacionar variáveis preditoras a uma única variável de resultado por meio de equação e gráficos de fácil entendimento.

Existe uma extensa lista de referências do uso de GLM em pesquisas relacionadas ao Pensamento do Ciclo de Vida. Por exemplo, Fabiani et al. (2021) utilizaram uma regressão logística e GLM para capturar o efeito de várias variáveis independentes na aceitação do trabalho remoto pelos usuários ao avaliarem os impactos ambientais e prós e contras do trabalho remoto durante a pandemia de COVID-19. Lüscher et al. (2017) aplicaram o GLM para investigar se a riqueza de espécies observada diversos grupos estava relacionada com os escores calculados pelo sistema SALCA-BD (Swiss Agricultural LCA—Biodiversity), que se baseia na ACV para calcular impactos sobre a diversidade local. Outro exemplo que pode ser citado é o trabalho de Morandini et al. (2020), que aplicou o GLM para a análise estatística para comparar as diferenças entre as médias dos tratamentos de culturas ao conduzir uma ACV de

sistemas de rotação de culturas de arroz no Irã. Nota-se que mais que várias pesquisas ligadas ao Pensamento do Ciclo de Vida tenham empregado o GLM, seu uso é condicionado à análise estatística ligada ao objetivo do pesquisador, sendo esta uma abordagem estatística flexível e de fácil entendimento para a análise de variáveis múltiplas relacionadas a um sistema.

O uso do GLM é proposto nesta tese com o intuito de avaliar qual seria a relação dos resultados da ACVO, ACCVO e IC. A intenção desse procedimento é entender quais seriam as implicações (positivas ou negativas) da implementação de práticas circulares por organizações referentes a seus potenciais impactos ambientais e custos totais do ciclo de vida. O capítulo a seguir discorre sobre os procedimentos metodológicos necessários para a construção dessa abordagem.

3.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

As informações apresentadas nesse capítulo aprofundam nos principais tópicos relacionados à temática central desta tese. Tais informações foram extraídas da literatura especializada a fim de apresentar a base teórica deste estudo.

Como apresentado, a EC se tornou um tema de interesse a organizações que visam melhorar sua gestão econômico-ambiental por meio do melhor gerenciamento de seus recursos e resíduos, objetivando a mitigação de seus impactos ambientais, a ampliação de vantagens competitivas em comparação a seus pares, e diminuição de gastos atrelados a seus negócios. Para esse fim, metodologias analíticas como a ACVO, ACCVO e IC são capazes de prover maiores informações sobre organizações e dar suporte a tomadores de decisões. Pesquisas recentes já desenvolveram abordagens híbridas que aplicam algumas dessas metodologias paralelamente. Entretanto, a avaliação integrada da circularidade, impactos ambientais potenciais e custos do ciclo de vida de uma organização por meio de uma metodologia única ainda não foi encontrada em literatura.

O capítulo a seguir discorre sobre os procedimentos metodológicos aplicados para o desenvolvimento do método integrado proposto por essa tese.

4 CAPÍTULO 4 – MÉTODO INTEGRADO PARA A AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL E DE CIRCULARIDADE DE ORGANIZAÇÕES

4.1 INTRODUÇÃO

A avaliação dos potenciais impactos ambientais de organizações é um tema que recentemente vem sendo tratado em paralelo à crescente necessidade mercadológica da mensuração da circularidade desses sistemas (HARRIS; MARTIN; DIENER, 2021; SCHULTE; MAGA; THONEMANN, 2021). Não obstante a este movimento atual, também cresce a necessidade e preocupação com a identificação dos potenciais custos adicionais relacionados à transição de um sistema linear para um sistema mais alinhado com os princípios da EC (WUNI, 2022).

Nesse contexto, este capítulo é direcionado ao detalhamento da proposição de método para a integração entre as metodologias previamente discutidas, que abrangem o cálculo da circularidade (IC), dos impactos ambientais potenciais (ACVO) e eventuais alterações de custos totais (ACCVO) provenientes da aplicação de práticas circulares em organizações.

O tópico seguinte apresenta os processos que compõem essa estratégia, assim como um *framework* que resume graficamente a proposta de integração metodológica. Por último, este capítulo descreve o procedimento de validação do método, que se deu por meio de um estudo de caso de uma empresa do setor alimentício.

4.2 METODOLOGIA

O objetivo da proposta apresentada nesta tese é prover informações sobre a influência da implementação de práticas circulares nos potenciais impactos ambientais e econômicos de organizações durante um determinado período reportado. Essa abordagem se baseia nas convergências metodológicas observadas entre os diferentes métodos de avaliação previamente apresentados. A avaliação integrada é possível, principalmente, pelo compartilhamento de um mesmo conjunto de dados (inventário), objetivo, escopo, e fronteiras entre as metodologias empregadas.

O método desenvolvido tem carácter descritivo, isto é, deve ser preferencialmente empregado posteriormente ao fim do período reportado e da execução das avaliações quantitativas que fazem parte de sua formulação. Entretanto, essa proposta pode ser utilizada em dois casos principais:

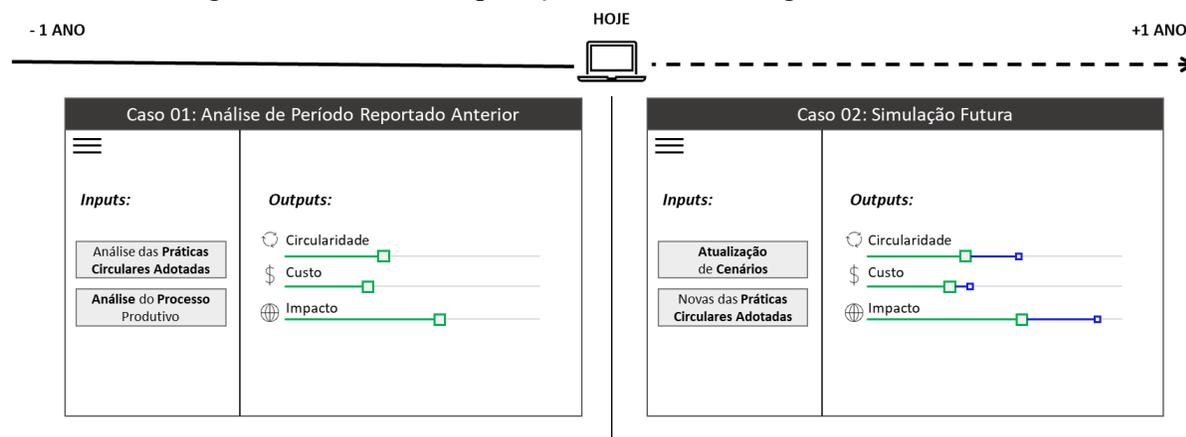
- i) **Caso 01:** Visa analisar as alterações econômico-ambientais causadas pela implementação de práticas circulares em sua organização com base na avaliação de um período reportado anteriormente ao estudo. O Caso 1 é composto pela ACVO, ACCVO e avaliação da circularidade (IC) de uma organização, além da construção de uma equação de regressão múltipla baseada nos resultados encontrados para tais avaliações para um determinado período reportado. A fim de melhor avaliar estatisticamente a relação entre as variáveis analisadas, a avaliação do Caso 01 pode ser realizada para o cenário-base da organização, ou também incluir cenários hipotéticos, desde que um ICV condizente com o sistema analisado seja desenvolvido.

- ii) **Caso 02:** Visa fornecer subsídios a tomadores de decisão que têm a intenção de planejar previamente as possíveis repercussões financeiras e ambientais de práticas ambientais que venham a ser empregadas em um período futuro. As simulações devem ocorrer após a conclusão da análise realizada no Caso 01 e se baseiam na condução de novas avaliações e construção de cenários por meio de alterações no ICV previamente utilizado que reflitam as alterações que se busca investigar (ex: aumento da reciclabilidade, alteração de matriz energética, mudança de insumos, mudança de método de tratamento de resíduos). Quaisquer alterações no ICV devem respeitar as fronteiras do sistema e unidade reportada estabelecida previamente. Recomenda-se que as alterações no ICV sejam conduzidas pelo gerente do projeto ou analista especializado a fim de se certificar a coerência das mudanças implementadas. Ressalta-se que não se deve utilizar a regressão múltipla encontrada ao fim da avaliação proposta pelo Caso 01, de forma que o analista deve revisitar as avaliações financeiras, ambientais e de circularidade referentes ao Caso 01 e

construir uma nova regressão múltipla para a organização fictícia analisada pelo Caso 02.

Ressalta-se que o método foi desenvolvido para atender principalmente ao primeiro caso, uma vez que o segundo implica em altas incertezas das análises. A Figura 4-1 ilustra esses dois casos.

Figura 4-1 - Casos de aplicação do método integrado desenvolvido.



Fonte: O autor (2023).

O método sugerido baseia-se em uma análise estatística capaz de identificar a possível relação entre múltiplas variáveis analisadas. O método estatístico escolhido é o GLM, uma metodologia estatística de previsão de valores de uma ou mais variáveis de resposta (ALEXOPOULOS, 2010). Ela é empregada tomando como variáveis os resultados encontrados para as três frentes metodológicas que a compõem: avaliação da circularidade (realizada por meio de IC), avaliação ambiental (desempenhada pela ACVO), e a avaliação de carácter econômica (atingida por meio da ACCVO).

No contexto dessa tese, o método desenvolvido visa a identificação de *trade-offs* entre a circularidade, potenciais impactos ambientais, e custo do ciclo de vida de organizações. Portanto, a circularidade do sistema, encontrada por meio da aplicação de IC a ser selecionada pelos analistas, é fixada como a variável dependente. Assim sendo, como o método desenvolvido visa avaliar as alterações causadas pela implementação de práticas circulares nos impactos ambientais e custos totais do sistema, a ACVO e ACCVO foram incluídas como

variáveis preditoras. Dessa forma, ao alterarmos a Eq. 5 com base nas três metodologias que compõem esse método, encontra-se a seguinte expressão matemática (Eq. 6):

$$IC = \alpha + \beta_1 ACVO_1 + \beta_2 ACCVO_1 + \dots + \beta_k ACVO_k + \beta_k ACCVO_k \quad \text{Eq. (6)}$$

Nessa equação, IC se refere ao indicador de circularidade a ser utilizado, sendo essa a variável dependente da equação. O símbolo α remete uma constante, que representa a interceptação da reta com o eixo vertical. O β representa a inclinação (coeficiente angular) em relação à variável explicativa. Os fatores ACVO e ACCVO são os resultados encontrados para essas respectivas análises. Nota-se que a equação acomoda k repetições dessas análises. Isso representa a inclusão dos resultados da ACVO e ACCVO para múltiplos períodos reportados a ser analisados pela equação.

Estudos no âmbito do Pensamento do Ciclo de Vida frequentemente apresentam cenários diversos relacionados a um mesmo sistema ou organização a fim de aprofundar as análises e avaliar potenciais *hotspots*. O método sugerido abrange tal abordagem, expressado pelos fatores “ $\beta_k ACVO_k$ ” e “ $\beta_k ACCVO_k$ ” da Eq. 6. Ressalta-se, porém, que a construção de tais cenários para análises adicionais deve seguir os mesmos princípios comparativos daqueles empregados a outros estudos de metodologias Pensamento do Ciclo de Vida (ex: seguir a mesma unidade funcional, fronteira do sistema, etc.).

Com base no exposto, seria possível identificar qual o efeito da aplicação de práticas circulares nas variáveis provenientes da ACVO e ACCVO por meio da aplicação do GLM. Entretanto, uma vez que tanto a análise de circularidade quanto a de custos do ciclo de vida resultam em um indicador único, a fim de simplificar o uso do método, recomenda-se que os resultados da AICV sejam agregados em um *single score* (indicador único da AICV). Uma vez que a construção de um *single score* depende das escolhas de normalização e ponderação do praticante, a definição de um método de agregação específico não é recomendada no processo de construção deste método, sendo essa uma opção do executor do projeto mediante o contexto analisado.

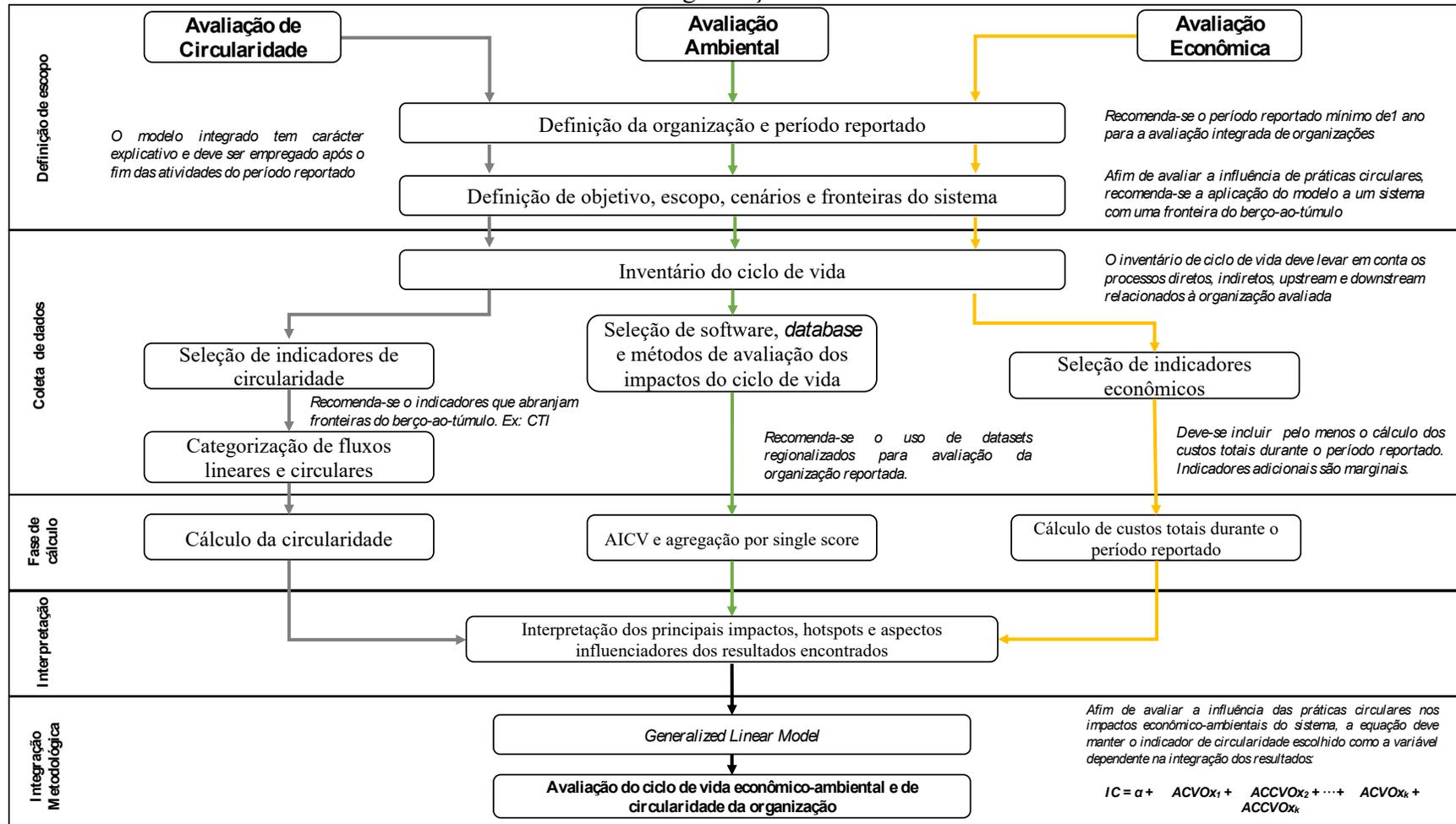
Ainda, diversos métodos de AICV (ex: ReCiPe 2016) apresentam opções de agregação que podem ser operacionalizadas de forma direta por meio de softwares especializados (ex: SimaPro, openLCA). Portanto, a definição de um *single score* pode ser limitada pela

disponibilidade de métodos de AICV. Porém, a fim de alinhar a proposta com os critérios metodológicos apresentados na ISO 14072 (2014), sempre que possível, o *single score* escolhido deve ser desenvolvido com base em categorias de impacto previamente validadas com as partes interessadas e que se correlacionem aos problemas ambientais locais e ligados aos aspectos ambientais abrangidos pelo setor da organização estudada.

Destaca-se que para o bom funcionamento do método expresso Eq. 6, quanto maior for o espaço amostral (período reportado e número de cenários avaliados) e o número de variáveis analisadas, maior será a confiabilidade dos resultados encontrados pelo GLM desenvolvido, sendo essa potencialmente a maior limitação do sistema. Portanto, por mais que a avaliação integrada possa ser empregada para os dados que descrevem o cenário base, recomenda-se que, sempre que possível, analistas empreguem essa abordagem com base em múltiplos cenários avaliados. Os diferentes cenários são incluídos à equação como variáveis preditoras (ex: $ACVO_1$, $ACVO_2$, etc.). Além disso, uma segunda limitação do método se refere ao espaço temporal de análise. Nota-se que quanto maior for o período reportado pela organização a ser avaliada, maior será a confiabilidade dos resultados e a profundidade da análise. Assim sendo, recomenda-se que o método integrado seja empregado para análises que cubram pelo menos um ano de operação da organização em foco, e que esse período mínimo seja separado em uma maior granularidade temporal (ex: mensalmente, trimestralmente, etc.).

Por fim, no intuito de dar maior suporte a estudos futuros e proporcionar maior eficiência na aplicação de recursos e tempo para organizações interessadas nas análises aqui propostas, foram identificados as principais fases e processos metodológicos dessa abordagem. A Figura 4-2 apresenta um *framework* processual que proporciona uma visão holística dos principais passos necessários para a quantificação conjunta dos impactos ambientais e econômicos provenientes da implementação de práticas circulares por organizações, assim como a aplicação do método integrado aqui apresentado.

Figura 4-2 - *Framework* processual do método integrado para avaliação do ciclo de vida econômico-ambiental e de circularidade de organizações.



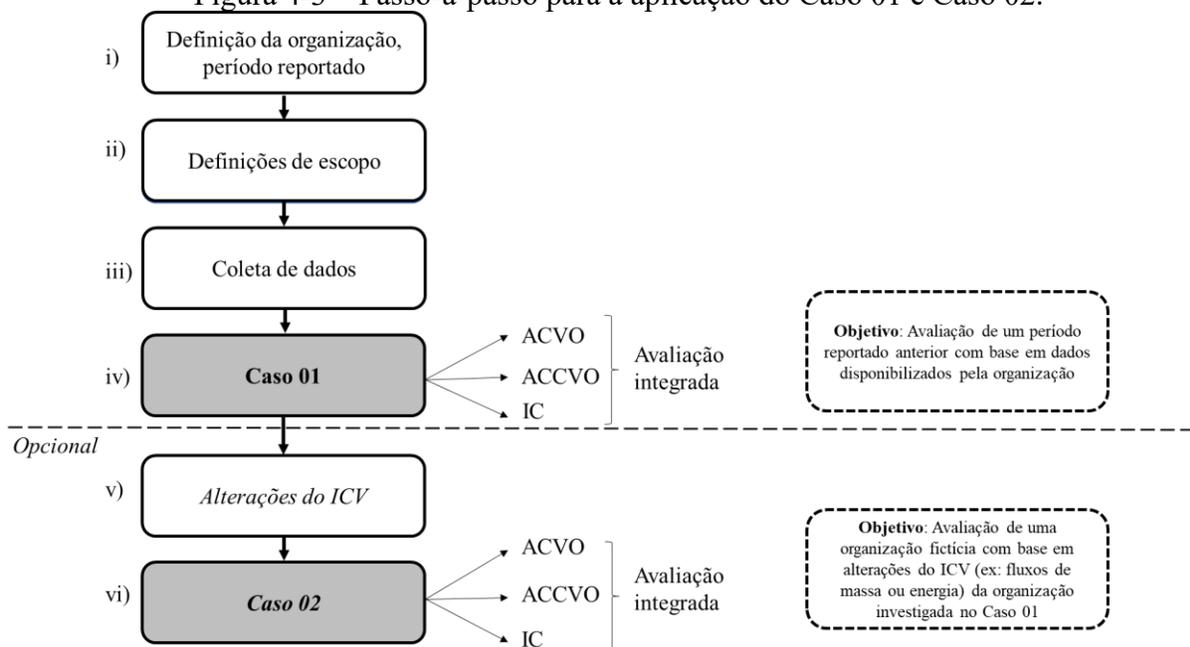
AICV – Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida; CTI – *Circular Transition Indicators*; IC – Indicadores de Circularidade; GLM – *Generalized Linear Model*; WHI – *Waste Hierarchy Index*. Fonte: O autor (2023).

Destaca-se que esse procedimento foi desenvolvido em meio a sua aplicação em uma organização (estudo de caso apresentado nos Capítulos 5 e 6) e, portanto, ilustra as principais fases identificadas em um caso real. O *framework* processual é dividido em quatro fases principais: i) definição do escopo; ii) coleta de dados; iii) fase de cálculo; iv) integração metodológica. Foram também incluídas recomendações gerais em *itálico* para maior direcionamento de pesquisadores ou praticantes futuros.

Nota-se que as três avaliações prévias à construção da equação de regressão passam por fases iniciais (definição de organização e período reportado, escopo, inventário, etc.) que devem ser necessariamente as mesmas entre as avaliações. Essas fases são os critérios mínimos que as avaliações devem conter para a aplicação do método. Se, por exemplo, um IC selecionado pelo executor do projeto não atende um dos critérios descritos nessas fases iniciais (ex: o indicador tem seu escopo voltado a produtos e não organizações, ou, o IC requer dados que não constam no inventário compartilhado pelas outras duas metodologias), então a análise tríplice aqui proposta não seria factível.

Ainda, caso o tomador de decisão opte pela condução das avaliações simuladoras do Caso 02, o mesmo deve ser atentar a esses mesmos pontos durante as alterações a serem realizadas no ICV da organização. É importante ressaltar que o analista não deve utilizar uma equação de regressão múltipla encontrada ao final do Caso 01 para alterações e simulações diretas, já que as alterações aplicadas diretamente à equação não respeitariam as alterações que seriam necessárias no ICV utilizado. Dessa forma, a Figura 4-3 apresenta a relação entre o Caso 01 e o Caso 02 por meio dos passos necessários para a condução dessas duas análises para uma organização específica.

Figura 4-3 – Passo-a-passo para a aplicação do Caso 01 e Caso 02.



ACVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional; ACCVO – Avaliação do Custo do Ciclo de Vida Organizacional; IC – Indicadores de Circularidade. Fonte: O autor (2023).

Uma vez desenvolvido o método integrado para avaliação do ciclo de vida econômico-ambiental e de circularidade de organizações e seu correspondente *framework* processual, partiu-se para a fase posterior desta pesquisa, que corresponde a validação do método. O tópico seguinte apresenta o estudo de caso desenvolvido e apresentado nesta tese, assim como as principais definições relacionadas às metodologias nele empregadas.

4.3 ESTUDO DE CASO

A fim de contribuir com a comunidade científica por meio de avanços teórico-práticos, um estudo de caso é proposto nesta pesquisa no intuito de testar o método previamente apresentado em uma situação real. Nesse caso, buscou-se validar o método desenvolvido por meio de sua aplicação em uma organização. Segundo Crowe et al. (2011), o desenvolvimento de um estudo de caso permite explorações detalhadas e multifacetárias de questões complexas em ambientes reais. Dessa forma, devido ao caráter prático das metodologias que compõem o procedimento intencional, o desenvolvimento da avaliação integrada proposta será realizado por meio da sua

aplicação em uma organização do setor alimentício classificada como uma Pequena ou Média Empresa (PME).

Como apresentado pela Figura 2-2 e Tabela 2-1, o estudo de caso e aplicação do método integrado apresentado permeiam os Capítulos 5 e 6 dessa tese. Isso se deu uma vez que os resultados parciais deste estudo de caso foram publicados no jornal *Environmental Engineering Science* por meio do artigo “*Combining Organizational Life Cycle Assessment with Company-Level Circularity Indicators: Case Study of a Vegan Zero-Waste Restaurant*” (DANTAS et al. 2022). Nesse artigo, que corresponde ao Capítulo 5 do corpo deste trabalho, foram publicados a avaliação da circularidade (CTI e WHI) e impactos ambientais potenciais (ACVO) de uma organização selecionada, que será abrangida no tópico seguinte. O capítulo subsequente complementa as fases do método integrado previamente discutido ao apresentar a avaliação econômica do estudo de caso (ACCVO), além da aplicação do GLM para avaliar a influência das variáveis ambientais e econômicas na circularidade. Ainda, as discussões presentes no Capítulo 6 complementam a fase de aplicação do método apresentado e discorrem sobre os produtos principais desta tese.

O tópico seguinte caracteriza a organização reportada analisada no estudo de caso proposto e discorre sobre as principais definições metodológicas relacionadas aos métodos aplicados no Capítulo 5 e 6 para o teste do método estabelecido. Tais definições abrangem as seguintes metodologias testadas por meio do estudo de caso durante a fase de elaboração do método descrito no tópico anterior: ACVO, ACCVO, CTI e WHI.

4.3.1 Caracterização do estudo de caso

A organização selecionada é chamada Casa Origem (Casa Origem, 2022). Fundada em 2017, a empresa é um restaurante localizado na cidade de Florianópolis, no estado de Santa Catarina, caracterizado como uma empresa de manufatura de bens consumíveis. A escolha de tal organização foi baseada em quatro critérios principais. Eles são:

- Método de negócio circular: A organização perenemente aplica diversas práticas diretamente relacionadas ao conceito da EC, como: compostagem dos resíduos orgânicos; encaminhamento dos resíduos recicláveis para cooperativas de reciclagem; localismo no processo de compras; eliminação de produtos de uso-único; eliminação de plásticos de toda a operação; uso de embalagens recicláveis e/ou compostáveis; insumos prioritariamente orgânicos e provindos de produções agroflorestais; dentre outros.
- Disponibilidade de dados: A empresa voluntariamente disponibilizou documentos financeiros e administrativos relacionados ao período escolhido para a análise (lista de fornecedores, tabela de balanço anual, lista de insumos adquiridos, etc.). Os dados disponibilizados cobrem as necessidades das avaliações ambientais, econômicas, sociais, e de circularidade pretendidas pela pesquisa.
- Transparência: Perante prévio requerimento e quando necessário, a empresa concordou em disponibilizar o contato dos parceiros e fornecedores para a validação de informações e dados agregados, caso necessário.
- Tamanho da organização: Devido à complexidade das análises desenvolvidas, uma PME foi escolhida devido ao menor tamanho, número de processos e inventário, facilitando assim o procedimento de desenvolvimento metodológico da proposta dessa tese.

Ademais, a organização estudada detém a Certificação Lixo Zero desenvolvida pelo Instituto Lixo Zero Brasil (ILZB) (ILZB, 2022a) e validada pela *Zero Waste International Alliance* (ZWIA) (ZWIA, 2022). Segundo o conceito estabelecido pela ZWIA, o termo “lixo zero” se refere a: “uma meta ética, econômica, eficiente e visionária para guiar as pessoas a mudar seus modos de vidas e práticas de forma a incentivar os ciclos naturais sustentáveis, onde todos os materiais são projetados para permitir sua recuperação e uso pós-consumo”. (ZWIA, 2022). O objetivo da certificação é atestar o desenvolvimento de melhores práticas e correta gestão dos resíduos sólidos da organização, portanto, o conceito de lixo-zero se relaciona diretamente com uma gestão de

resíduos ligada à EC. A aplicação de práticas circulares de gestão de resíduos (reciclagem, *re-design*, desvio de resíduos do aterro sanitário, etc.) são implementadas a um índice de boas práticas desenvolvido pelo ILZB, que ranqueia as organizações entre Compromisso com o Lixo Zero, Selo Rumo ao Lixo Zero, e Certificação Lixo Zero (ILZB, 2022b). A organização reportada foi o primeiro restaurante a receber a Certificação Lixo Zero no Brasil (Casa Origem, 2022).

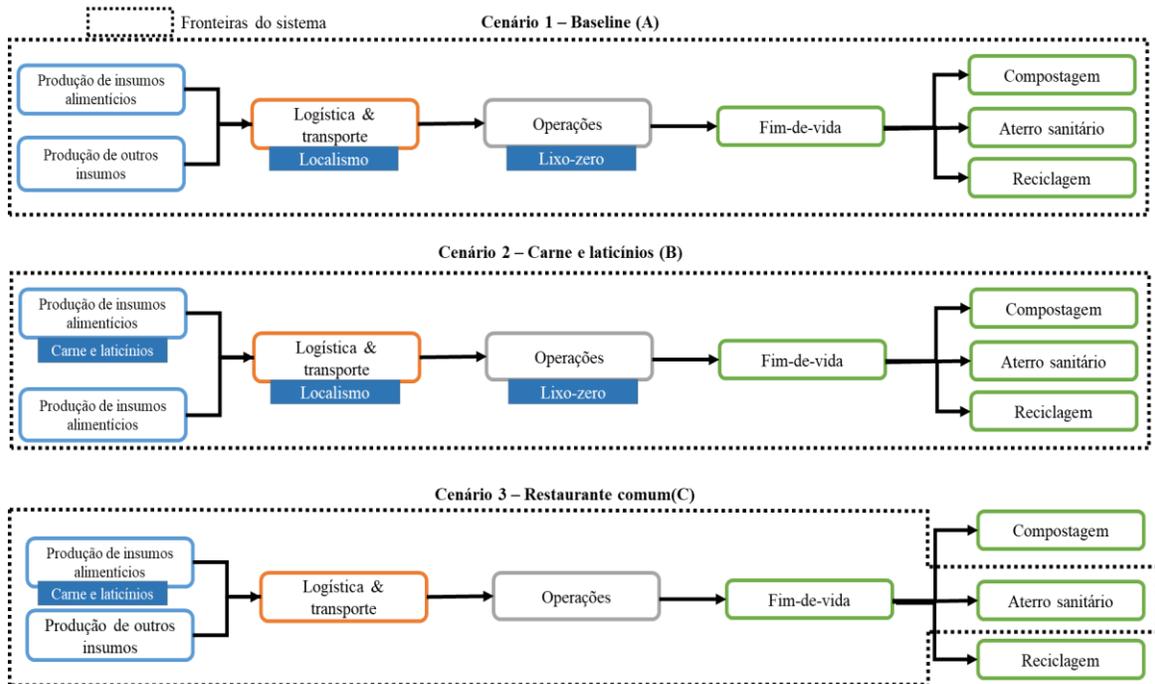
Como recomendado no Tópico 3.2, a fim de aprofundar as análises estatísticas propostas, três cenários foram criados para verificar a influência das práticas circulares, escolhas alimentares no menu oferecido (vegano ou com consumo de carne) e localismo nos potenciais impactos ambientais da organização reportada. Os cenários são descritos abaixo e ilustrados pela Figura 4-4.

- **Cenário 1** (*baseline*) – Casa Origem “*as-is*”. Inclui práticas circulares e lixo-zero (redução, reutilização, reciclagem, compostagem, etc.), localismo e opções alimentícias baseadas em plantas. Os resíduos não tratados pelas práticas circulares são enviados para o aterro sanitário. Ilustrado na Figura 4-4a.

- **Cenário 2** (Carne e laticínios). Substituição de opções de proteínas vegetais por carnes e laticínios. A substituição será feita seguindo a opinião de um profissional terceirizado do setor de alimentos. Inclui práticas circulares e localismo. Os resíduos não tratados pelas práticas circulares são enviados para o aterro sanitário. Ilustrado na Figura 4-4b.

- **Cenário 3** (Restaurante comum). Segue as mesmas substituições do Cenário 2, entretanto, todos os resíduos sólidos são encaminhados para aterro sanitário. As fases Produção dos insumos e Logística desconsideram o localismo. Ilustrado na Figura 4-4c.

Figura 4-4 – Cenários e fronteiras do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A fase de Produção de Insumos (alimentícios e outros insumos) abrange todas as atividades relacionadas à produção e/ou manufatura dos inputs consumidos ou requeridos pela organização. Logística & Transporte é relacionada ao transporte de tais insumos à organização. A fase de Operações engloba todas as atividades produtivas que ocorrem no dentro dos limites físicos da organização. Ressalta-se que o transporte ao cliente não é incluído (*delivery*) e o consumo das refeições não foram incluídos nesse caso. Por último, a fase de Fim-de-vida corresponde ao tratamento de todos os resíduos gerados pela organização durante o período reportado.

É importante ressaltar que por mais que o Cenário 1 seja, nesse estudo de caso, aquele com maiores propensões a circularidade, ele ainda contém práticas lineares, como a disposição final de resíduos no aterro sanitário. Isso ocorre pois nem todos os resíduos são passíveis de serem ciclados novamente no sistema. É importante ainda ressaltar que o por mais que a Figura 4-4 seja visualmente linear, as práticas circulares por ela descritas possibilitam a ciclagem dos recursos pelo sistema de forma aberta. Isto é, os materiais e recursos que saem das práticas circulares (reciclagem, compostagem, reuso, etc.), são destinados ao sistema de fundo, como uma ciclagem aberta, e não são reinseridos ao sistema da organização (que descreveria uma ciclagem fechada).

O sistema apresentado na figura anterior teve seus três cenários avaliados pelas metodologias empregadas neste trabalho (IC, ACVO e ACCVO). Os tópicos seguintes detalham as definições necessárias para o desenvolvimento de tais análises.

Destaca-se que o estudo de caso já teve seus resultados da ACVO e CTI e WHI publicados no jornal *Environmental Engineering Science* por meio de uma publicação prévia (DANTAS et al. 2022), apresentado posteriormente no Capítulo 5. Uma vez que esse capítulo é apresentado na forma de um artigo científico, as informações apresentadas nos tópicos abaixo são também reproduzidas no capítulo seguinte, já que tais informações também são essenciais para a contextualização e estruturação do artigo apresentado.

4.3.2 Avaliação Organizacional do Ciclo de Vida

A ACVO da organização selecionada seguirá as diretrizes apresentadas pelas normas ISO 14040, 14044, e 14072 (ISO, 2006a; 2006b, 2014) e UNEP (2015). O Quadro 4-1 resume as principais definições estabelecidas para a realização da ACVO do estudo de caso com base nas diretrizes apresentadas pela ISO 14072 (2014). Os tópicos a seguir detalham as informações presentes no Quadro 4-1 em relação às quatro fases interativas apresentadas na Figura 3-2.

Quadro 4-1 – Principais definições da ACVO.

Organização reportada	Casa Origem
Descrição	Restaurante vegano e certificado Lixo-Zero localizado em Florianópolis/SC
Tamanho	Pequeno porte
Período reportado	Janeiro - Dezembro/2020
Unidade reportada	Servir refeições durante um ano de operação
Fluxo reportado	18.000 refeições servidas em um ano de operação
Fronteira do sistema	Do berço ao túmulo
Processos analisados	Produção, Logística e Transporte, Operação, Fim-de-vida
Experience-based Pathway	<i>Pathway 1</i> : experiência e informações ambientais iniciais limitadas.
Método de consolidação	Controle operacional e financeiro
Método de coleta de dados	<i>Top-down</i> : dados agregados coletados por meio do balanço anual da empresa
Descrição de dados	Dados primários: fornecidos pela empresa com base no balanço anual de 2020. Dados secundários: bases de dados <i>agribalyse 3.0.1</i> e <i>ecoinvent 3.7.1</i>
Público-alvo	Comunidade científica, analistas especializados, tomadores de decisão da empresa

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.2.1 Objetivo e escopo

O objetivo da ACVO proposta é a identificação dos potenciais impactos ambientais referentes à operação da organização reportada no ano de 2020. Por se tratar de uma avaliação baseada, dentre outras fontes, nas diretrizes apresentadas pela ISO 14072 (2014), os resultados provindos desta análise são destinados para a elaboração da pesquisa aqui descrita, e compartilhados para uso interno com tomadores de decisão da organização. Dessa forma, conforme estabelecido pela norma acima mencionada, avaliações comparativas do sistema estudado com agentes terceiros não são recomendadas.

A organização reportada (Casa Origem) conta com uma unidade onde ocorrem todas as operações. A empresa é caracterizada como um restaurante e emprega de cinco a dez pessoas. Como o estudo foi realizado para o ano de 2020, devido à pandemia COVID-19, o contato com os clientes foi substancialmente reduzido por meio da implementação de restrições sanitárias. Por esse motivo, todas as refeições foram preparadas e pré-embaladas para entrega. Assim, as refeições foram padronizadas para se adequar à embalagem escolhida pela organização, que se refere a 400g de alimentos acondicionados em uma embalagem reciclável e compostável.

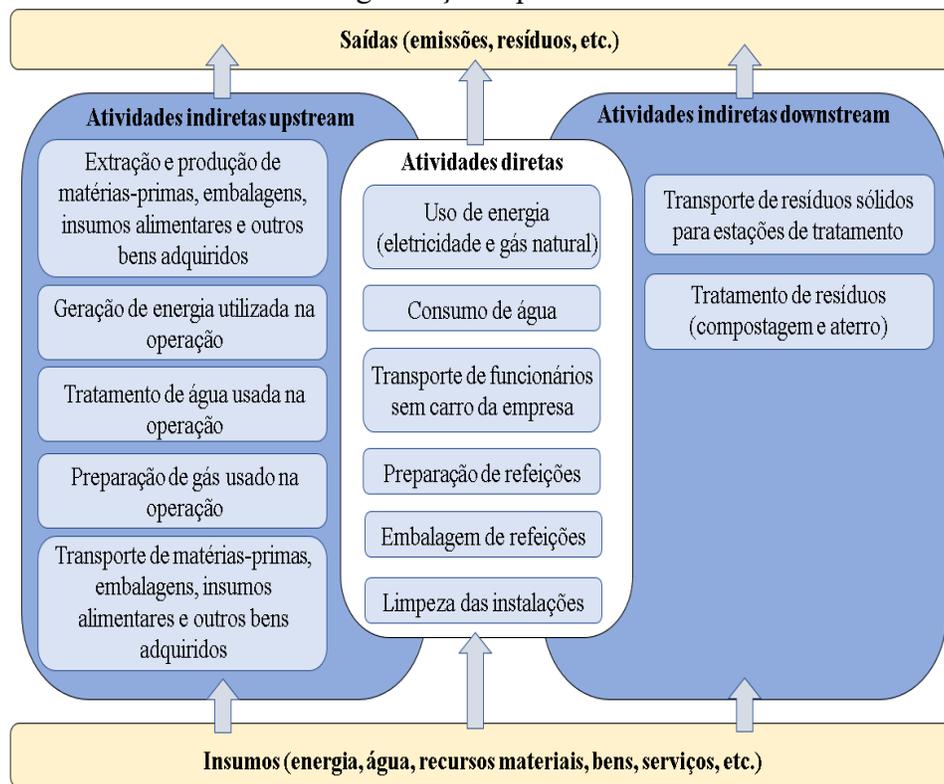
A unidade reportada foi definida como: “Servir refeições durante um ano de funcionamento”. O fluxo reportado é, portanto, de 18.000 refeições, que é o número aproximado de refeições vendidas em 2020 (período de referência). O método de consolidação aplicado é de total controle operacional e financeiro das atividades da organização reportada pelos seus administrados.

A fronteira do sistema tomará uma abordagem “do berço ao túmulo”. Quatro processos principais foram desenvolvidos para analisar melhor os impactos da organização reportada sob os limites do sistema definidos. Os quatro processos são Produção e Compras (P&C), Logística e Transporte (L&T), Operações e Fim-de-vida. P&C refere-se à produção e aquisição dos insumos. L&T está relacionado ao transporte do fornecedor para a organização relatora. As operações abrangem o preparo das refeições, atividades administrativas, e atividades de escritório. Fim de vida refere-se ao tratamento final fornecido a todos os resíduos sólidos gerados (aterro, compostagem, reciclagem). Como disposto previamente, o Cenário 2 conta com a substituição do menu do restaurante para a inclusão de carne e laticínios, e o Cenário 3 tem de excluir a compostagem, reciclagem e reuso na etapa de Fim-de-vida.

De acordo com a UNEP (2015), o sistema deve incluir (se possível) todas as entradas e saídas das atividades diretas e indiretas. O primeiro indica atividades inteiramente controladas pela

organização reportada, o último se relaciona às consequências das atividades da organização que ocorrem em locais de propriedade ou controlados por outros membros da cadeia de valor (produtores, fornecedores, tratamento de resíduos, etc). As atividades indiretas são divididas entre atividades indiretas a montante (processos que ocorrem “antes” da organização reportada) e atividades indiretas a jusante (processos que ocorrem “depois” da organização reportada). O guia desenvolvido pela UNEP (2015) também afirma que, em geral, o uso de dados específicos é recomendado para atividades diretas e indiretas, mas como a obtenção de informações sobre atividades a montante e a jusante pode ser custosa e demorada, dados aproximados podem ser usados. Portanto, dados primários serão usados para atividades diretas e uma combinação de dados medidos, estimados e genéricos foram utilizados para atividades indiretas. A Figura 4-5 ilustra as entradas, saídas e atividades diretas e indiretas relevantes analisadas neste projeto.

Figura 4-5 - Principais entradas, saídas, e atividades diretas e indiretas relacionadas à organização reportada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida

O guia para ACV a nível organizacional desenvolvido pela UNEP (2015) descreve quatro *Experience-based Pathways* (do inglês, caminhos baseados na experiência). Esses caminhos são orientações para a condução de projetos ACVO com base no nível de maturidade de organizações em relação à avaliação de impactos e/ou práticas de gestão do ciclo de vida. A organização reportada não tem experiência anterior no uso de ferramentas de análise do ciclo de vida, portanto, se encaixa no “*Pathway 1: Experiência e informações ambientais iniciais limitadas*”.

Como nenhum outro estudo de ciclo de vida foi aplicado à organização reportada até o momento, a coleta de dados seguirá a abordagem aplicada por Jungbluth, Keller e König (2016). Nos termos apresentados em UNEP (2015), tal abordagem de coleta de dados é categorizada como um procedimento *Top-down*, ou seja, considerando a organização como um todo, por meio de dados agregados referentes ao balanço anual da empresa. Portanto, um inventário detalhado de todas as informações referentes aos insumos utilizados foi fornecido pela organização reportada (peso, custo, fornecedor, data da compra, etc.). Tais dados baseiam as análises ambientais realizadas por meio da ACVO. Quando necessário, foi estabelecido contato direto com fornecedores para solicitação de arquivos de compras.

A maioria dos dados do ICV foi considerada de boa qualidade, pois foram obtidos diretamente da organização reportada e de seus fornecedores. No entanto, como o setor de alimentação depende de uma grande variedade de fornecedores e produtos, que também estão ligados às mudanças sazonais, estimativas e extrapolações foram necessárias para algumas compras. Ou seja, sempre que possível, foram aplicados os dados primários utilizados no estudo, caso haja limitação de dados, foram utilizados dados secundários.

O ICV foi construído com base em dados primários fornecidos pela empresa, e complementado por dados secundários retirados de duas bases de dados: *ecoinvent v3.7.1* e *agribalyse v3.0.1*. O uso conjunto de tais bases de dados se torna necessário devido à grande diversidade de insumos alimentícios empregados pela organização em suas operações. Ademais, as alterações realizadas no Cenário 2 foram feitas com base na opinião especializada de profissionais do setor alimentício e foram direcionadas à substituição de *datasets* que representam alimentos de proteína vegetal por alimentos de proteína animal. Como previamente apontado, as alterações do ICV para o Cenário 3 estão relacionadas à substituição de práticas que divergem do

encaminhamento de resíduos para o aterro sanitário (compostagem, reciclagem, reuso), por um tratamento inteiramente voltado para aterramento de resíduos.

Os dados compartilhados pela empresa avaliada no estudo de caso podem ser encontrados no Apêndice B.

4.3.2.3 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida

A AICV da organização reportada seguiu as diretrizes apresentadas na ISO 14044 (ISO, 2006b). Nessa fase, os dados catalogados pelo ICV serão correlacionados a indicadores ambientais presentes nas categorias de impacto selecionadas. O método de AICV aplicado no artigo científico apresentado no Capítulo 5 foi o *ReCiPe 2016 midpoint (H)* (HUIJBREGTS et al., 2017). Já o método de AICV aplicado no Capítulo 6 foi *ReCiPe 2016 endpoint (H,A)*. Essa mudança foi necessária já que o método integrado final apresentado no Capítulo 6 conta com o uso de um *single score* das categorias de impacto selecionadas. Tal escolha foi realizada no intuito de facilitar a construção da equação de regressão que sucede esse procedimento, como apresentado pela Figura 4-1.

De acordo com o guia da UNEP (2015), às categorias de impacto devem ser selecionadas levando em consideração o objetivo e escopo e as contribuições das partes interessadas. Logo, foram consultados estudos similares de ACVO (CREMER et al., 2020; DE CAMARGO et al., 2019; JUNGBLUTH; KELLER; KÖNIG, 2016) e também a organização reportada para a escolha das categorias de impacto. Nove categorias de impacto foram selecionadas em meio às dezoito opções que compõem o método apresentado. O Quadro 4-2 apresenta as categorias de impacto selecionadas para o estudo apresentado no Capítulo 5. A modelagem ocorreu por meio do software *openLCA v1.10.3*, e utilizando os *datasets* das bases de dados *ecoinvent 3.7.1* e *agribalyse 3.0.1*.

Quadro 4-2 - Categorias de impacto a serem aplicadas na ACVO.

Método de AICV	Abreviação	Categoria de Impacto	Unidade de medida
ReCiPe <i>midpoint</i> (H)	ALOP	Ocupação de terras agrícolas	m ² a
	GWP	Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq
	FDP	Depleção de recursos fósseis	kg petróleo eq
	FEP	Eutrofização de água doce	kg P eq
	HTP	Toxicidade humana	kg 1,4-DCB eq
	MEP	Eutrofização marinha	kg N eq
	NLTP	Transformação de terras naturais	m ²
	TAP	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq
	WDP	Depleção aquática	m ³

ALOP – *Agricultural land occupation*; GWP – *Climate change potential*; FDP – *Fossil depletion potential*; FEP – *Freshwater eutrophication*; HTP – *Human toxicity*; MEP – *Marine eutrophication*; NLTP – *Natural land transformation*; TAP – *Terrestrial acidification*; WDP – *Water depletion*. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Como previamente apontado, os resultados apresentados no Capítulo 6 para esse mesmo sistema são baseados em um *single score* desenvolvido pela agregação e ponderação do método de AICV *ReCiPe 2016 endpoint (H,A)*. Essa análise foi realizada por meio do mesmo software e bases de dados previamente mencionados. O Quadro 4-3 apresenta as categorias de impacto *endpoint* consideradas no desenvolvimento do *single score*. Ressalta-se que, a título de exemplo, o mesmo peso foi dado a essas categorias de impacto (ponderação igualitária).

Quadro 4-3 - Categorias de impacto a serem aplicadas na ACVO.

Método de AICV	Categoria de Impacto	Unidade
ReCiPe <i>endpoint</i> (H,A)	<i>Ecosystem quality</i>	<i>Espécies × anos</i>
	<i>Human health</i>	<i>Anos</i>
	<i>Resources</i>	<i>Dólares</i>

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3.2.4 Interpretação

A interpretação, última fase estudos de ACV, é responsável por prover informações relacionadas ao objetivo e escopo do projeto, por meio da observação dos resultados de ambas as fases de ICV e AICV. Além da análise de aspectos significativos do ICV, comparação entre os cenários, identificação de *hotspots* ambientais e principais processos e insumos contribuintes para

o potencial impacto ambiental da organização avaliada, os resultados também foram interpretados de acordo com o contexto da organização reportada.

A influência de mudanças na dieta alimentar (menu baseado em veganismo), localismo e implementação de práticas circulares no perfil ambiental da organização reportada receberá maiores detalhamentos neste projeto. Os resultados também são analisados em relação ao objetivo principal desta proposta de pesquisa, ou seja, a possibilidade da integração entre a ACVO, ACCVO e IC. O aprofundamento dado aos tópicos mencionados ocorrerá para a identificação de possíveis complementaridades e convergências metodológicas entre as abordagens propostas.

4.3.3 Avaliação Organizacional dos Custos do Ciclo de Vida

A ACCVO proposta seguiu as diretrizes para estudos de ACVO (UNEP, 2015), assim como as instruções estabelecidas pelo código de práticas desenvolvido por Swarr et al. (2011). Como pontuado por Valente et al. (2020), apesar desse corpo de recomendações, estudo de ACCV continuam sendo um exercício *ad hoc*, no qual os estágios do ciclo de vida incluídos, e quão profundamente serão modelados, frequentemente serão determinados por limitações práticas, como disponibilidade de dados.

O objetivo, escopo, fronteira do sistema e processos para esta fase do estudo se assemelham ao apresentado para a avaliação ambiental, descrita no tópico 3.4.1.1. Como a análise ocorreu a nível organizacional, a UF é substituída pelos conceitos de unidade reportada, fluxo reportado, e período reportado. Estas definições também seguem as mesmas que as estabelecidas para a avaliação ambiental, como descrito pelo Quadro 3-1.

As categorias de custo a serem estudadas foram estabelecidas com base nos quatro processos no qual a organização foi dividida: P&C, L&T, Operações e Fim-de-vida. A ACCVO foi aplicada aos três cenários previamente descritos, sendo que as alterações no inventário foram conduzidas com base na opinião de um especialista do setor alimentício.

Os dados utilizados para a realização dessa fase da pesquisa foram retirados do ICV realizado para a condução da ACVO. A organização também disponibilizou o também balanço financeiro e administrativo referente ao período reportado (gastos operacionais, gastos administrativos, compras, etc.), que subsidiaram as avaliações econômicas parte da ACCVO.

Diferentemente da ACVO, no qual a avaliação de impactos ocorre por meio por diversos indicadores ambientais (categorias de impacto), o procedimento proposto para essa ACCVO é composto por um indicador único, sendo esse o custo total do ciclo de vida da organização. Para fins de modelagem, tal valor será dividido também nos quatro processos previamente descritos. A Equação 7 apresenta o método de cálculo utilizado para a ACCVO da organização reportada com base nos indicadores de custo apresentados no Quadro 3-1.

$$ACCVO = Ka + Kop + Kl + Kg + Km + Kd \quad \text{Eq. (7)}$$

Nessa equação, *Ka* são os custos de aquisição dos insumos necessários para a realização da manufatura do produtos da organização ou condução dos serviços prestados; *Kop* corresponde aos custos de operação (custeio da energia elétrica, refrigeração, água, etc.) ; *Kl* são os custos de logística (combustíveis, contratação de empresas terceirizadas, etc.) ; *Kg* são os custos de gestão (salários, impostos, custeio de sistemas de gestão interna); *Km* são os custos de manutenção (manutenção de ativos como prédios, automóveis, etc); *Kd* são os custos de disposição final (taxa de coleta de resíduos sólidos, contratação de empresas terceirizadas, etc).

Por último, a interpretação dos resultados focou nas diferenças entre os custos dos três cenários estudados, assim como o custo encontrado para os processos que compõem tais cenários. A fim de trazer maior granularidade aos dados, a análise econômica foi realizada tanto para o período anual quanto mensal. Além disso, assim como na ACVO, a influência do cardápio proposto para cada cenário, localismo e implementação de práticas circulares no perfil econômico da organização reportada recebeu maiores detalhes neste estudo.

4.3.4 Avaliação da Circularidade

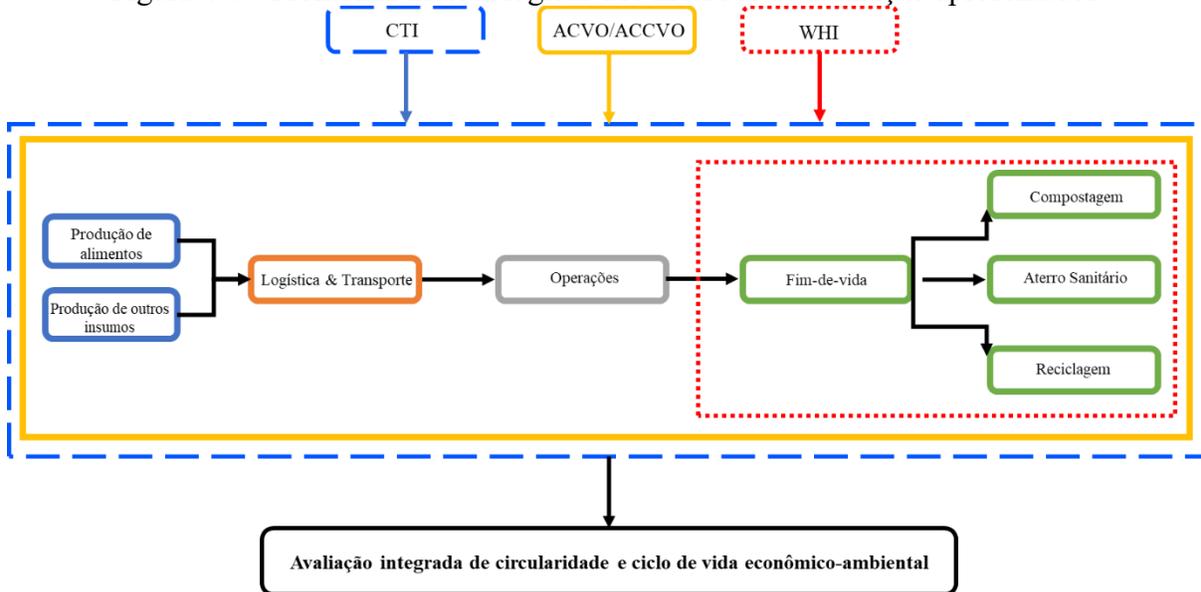
Conforme mencionado, a estratégia de avaliação integrada dos impactos ambientais, custos, e circularidade consiste na aplicação de IC para a mensuração do desempenho de organizações no âmbito da EC. Os indicadores CTI e WHI foram selecionados com base em uma publicação científica anterior realizada por este autor e colaboradores para a construção desse método conjunto de avaliação (DE OLIVEIRA et al., 2021).

Por meio de uma revisão bibliográfica da literatura focada em indicadores voltados à escala nano e micro, 61 publicações foram analisadas (44 artigos científicos, 16 *reports*, 1 dissertação). Dentre os 58 indicadores avaliados nessa publicação, o CTI se destaca por ser baseado no Pensamento do Ciclo de Vida (WBCSD, 2020a). Esse conjunto de indicadores possibilita a avaliação da circularidade de sistemas com fronteiras do berço a túmulo, analisa fluxos dos ciclos tecnológicos e biológicos, e é direcionado à avaliação da circularidade não somente de produtos, mas também de organizações (WBCSD, 2021b).

Quanto ao WHI, após uma cuidadosa análise metodológica do seu desenvolvimento e estrutura (PIRES; MARTINHO, 2019), este indicador foi julgado aplicável para a análise da hierarquia de resíduos em avaliações ao nível do negócio. Como apontado por Pires e Martinho (2019), WHI é uma ferramenta quantitativa que avalia o grau de hierarquia dos resíduos apresentada por um sistema ou organização. Explicações detalhadas da abordagem metodológica adotada em ambos os casos são apresentadas a seguir.

A Figura 4-6 ilustra a fronteira metodológica do CTI e do WHI, assim como sua comparação com a fronteira estabelecida para a avaliação realizada pela ACVO e ACCVO.

Figura 4-6 - Fronteiras metodológicas dos métodos de avaliação apresentados.



ACVO - Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional; ACCVO - Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida Organizacional; CTI: *Circularity Transition Indicators*; WHI: *Waste Hierarchy Indicators*. Fonte: O autor (2023).

4.3.4.1 *Circularity Transition Indicators*

Os cálculos proporcionados pelo CTI são realizados por meio de uma ferramenta online hospedada em um portal desenvolvido pela WBCSD, que permite avaliar a circularidade por meio da quantificação dos *inputs* e *outputs* do sistema. Por meio da inclusão da quantificação dos fluxos de materiais, energia e resíduos relacionados ao sistema, o CTI calcula a circularidade do produto/empresa utilizando as equações apresentadas no tópico 2.2.1.

Dessa forma, a aplicação do CTI seguiu a abordagem metodológica descrita no manual “*Circular Transition Indicators v2.0 – Metrics for business, by business*” (WBCSD, 2021). Primeiramente foram definidos o escopo e a fronteira do sistema. O CTI tem o propósito de analisar o nível de circularidade de produtos (escala nano) ou organizações (escala micro). Devido à sua aplicação no estudo de caso aqui descrito, uma abordagem ligada à escala micro foi selecionada, havendo assim o intuito de divulgar os resultados perante a comunidade científica por meio dos artigos científicos que comporão a tese apresentada.

A fim de assegurar a robustez metodológica da análise, os mesmos critérios aplicados para a ACVO foram aplicados à avaliação da circularidade. Portanto, o cálculo da circularidade para o estudo de caso apresenta o mesmo período de análise (de jan-dez/2020), inventário (dados utilizados pelo ICV), e escopo que a avaliação ambiental descrita no tópico 4.2.

Como a metodologia propõe uma ampla avaliação baseada em fluxos de massa, o material enviado para reciclagem foi considerado na análise por meio do uso recurso da ferramenta online que permite o acesso ao banco de dados BoKU, desenvolvido pela *University of Natural Resources and Life Sciences of Vienna*, possibilitando o uso de estimativas da taxa efetiva de recuperação para diferentes materiais (BoKU, 2019). Por meio dessa ferramenta, praticantes têm acesso a taxas de reciclagem para determinados materiais (ex: papel, plástico, etc.) durante o processo de cálculo, possibilitando assim a resolução de possíveis lacunas de inventário. Ou seja, mesmo que dados primários não tenham sido coletados, foi possível inferir taxas de reciclagem com base nos dados fornecidos por esse banco de dados.

Os subindicadores “% *inflows* circulares”, “% *outflows* circulares”, e “% circularidade” foram selecionados dentre as opções oferecidas pelo CTI para esse estudo. Tais indicadores habilitam o cálculo da circularidade com base nos *inflows* e *outflows* de materiais, energia e resíduos relacionados à organização avaliada. O CTI conta ainda com outros indicadores marginais

e ainda em desenvolvimento metodológico (ex: “de % água circulada”, “% de materiais críticos”), entretanto, esses não foram incluídos nesse projeto de pesquisa por não diretamente contribuírem com a metodologia aqui proposta, que foca nos fluxos acima citados para o cálculo do subindicador “Circularity (%)”.

Uma fase central da avaliação integrada de organizações é a coleta de dados. Devido à convergência metodológica entre as abordagens empregadas, os dados utilizados para o cálculo do CTI são extraídos do ICV realizado para a organização analisada no projeto. Para o estudo de caso apresentado pelo Tópico 4.1, os dados empregados retirados do ICV da Casa Origem, disposto no Tópico 4.2.2. A separação dos dados entre *inflow* e *outflow*, assim como um resumo dos dados utilizados na análise de circularidade podem ser observados nas Tabelas 4-1 e 4-2. Tabelas complementares referentes aos dados abaixo apresentadas podem ser encontradas no Apêndice B.

Tabela 4-1 - Inventário de dados de *inflow* para cálculo do CTI.

Fluxo	Material	Fonte de material	Massa (kg)
<i>Inflow</i>	Insumos alimentícios	Virgem e renovável	9.349,98
<i>Inflow</i>	Outros <i>Inputs</i> Técnicos	Virgem e não-renovável	142,98
<i>Inflow</i>	Outros <i>Inputs</i> Biológicos	Virgem e renovável	73,34
<i>Inflow</i>	Embalagem produto papel	Virgem e renovável	686,63
<i>Inflow</i>	Embalagem produto vidro	Virgem e não-renovável	324,03
<i>Inflow</i>	Embalagem produto plástico	Virgem e não-renovável	-
<i>Inflow</i>	Embalagem insumos vidro	Virgem e não-renovável	300,15
<i>Inflow</i>	Embalagem insumos plástico	Virgem e não-renovável	144,00
<i>Inflow</i>	Embalagem insumos papel	Virgem e renovável	192,00

Fonte: O autor (2023).

Tabela 4-2 - Inventário de dados de *outflow* para cálculo do CTI.

Fluxo	Tipo de Recuperação	Potencial de recuperação	Taxa de recuperação efetiva	Massa (Kg)
<i>Outflow</i>	Aterro Sanitário	0%	0%	600,00
<i>Outflow</i>	Compostagem	100%	70%	890,15
<i>Outflow</i>	Reciclagem de plástico	90%	29%	144,00
<i>Outflow</i>	Reciclagem de papel	90%	62%	192,00
<i>Outflow</i>	Reutilização	100%	100%	624,18
<i>Outflow</i>	Refeições servidas (consumo)	100%	100%	7.200,00

Fonte: O autor (2023).

Feita a tabulação e categorização dos dados, a próxima etapa consiste no cálculo da circularidade da organização por meio da plataforma online desenvolvida para o CTI. Seguindo o manual do CTI (WBCSD, 2021a), os dados foram imputados na ferramenta online, responsável pelo processo de cálculo por meio das equações listadas no item 2.2.1.

4.3.4.2 Waste Hierarchy Index

A aplicação do WHI no Capítulo 5 seguiu a abordagem metodológica descrita por Pires e Martinho (2019). O objetivo do WHI é medir o nível de implementação da hierarquia de resíduos de um sistema. O WHI foi desenvolvido e utilizado anteriormente para se enquadrar na macroescala de EC, mas devido à sua lógica simples, porém eficaz, argumentamos que sua abordagem pode ser estendida a outras escalas de EC. Assim, propomos a sua utilização na escala empresarial através da sua aplicação no mesmo sistema descrito na Secção 2.1.1. A versão simplificada do WHI desenvolvida por Pires e Martinho (2019) foi aplicada a este projeto, seguindo a Eq. 3 também apresentada na seção 6.1.1.

O WHI foi aplicado aos três cenários descritos na seção anterior para fornecer aos tomadores de decisão informações sobre as possíveis mudanças nos potenciais de implementação da hierarquia de resíduos entre os cenários analisados. Os dados usados para o cálculo foram extraídos do ICV da organização reportada. O uso do WHI no estudo é justificado pela possível combinação benéfica entre as metodologias baseadas no ciclo de vida e o WHI para o estudo de caso aqui descrito. Ressalta-se que esta estratégia fornece aos decisores informações e resultados relativos a um limite metodológico abrangente para as práticas de gestão de resíduos seguindo princípios de hierarquia de resíduos.

Como discutido posteriormente no Capítulo 6 (Tópico 5.2.1), esse indicador foi aplicado ao estudo de caso descrito ao Tópico 3.3. Entretanto, após as análises apresentadas no artigo do Capítulo 5, decidiu-se por excluir o WHI da proposta final de avaliação integrada. Dessa forma, detalhes de sua metodologia são apresentados aqui e no Capítulo 2 a fim de gerar melhor contexto para o leitor durante a leitura do Capítulo 5, porém, o indicador não é recomendado para uso em aplicações futuras da metodologia desenvolvida por esta tese.

4.3.5 *Generalized Linear Model*

A regressão a ser aplicada no estudo de caso foi realizada conforme a Eq. 6, apresentada no Tópico 3.2. Essa etapa foi realizada por meio do software *Statistica*TM v.12.5. Os dados analisados por esse procedimento foram provindos das avaliações econômicas, ambientais e de circularidade.

Como disposto na Figura 4-2, o método proposto baseia-se no uso de um *single score* das categorias *endpoint* provenientes da AICV (Quadro 5-3), e, portanto, seus resultados e discussões são apresentados no Capítulo 6 (os resultados de AICV do Capítulo 5 são apresentados em categorias *midpoint*). Os resultados do CTI são apresentados e discutidos no Capítulo 5, já os resultados da avaliação econômica realizada são dispostos no Capítulo 6. Como tais análises foram realizadas em uma temporalidade mensal para a organização avaliada e as três metodologias empregadas resultam em resultados únicos para um determinado mês, o espaço amostral a ser avaliado pelo GLM é composto por 36 pontos a serem avaliados. Dessa forma a uma variação da Eq. 6 foi construída com base nesses fatores para a avaliação econômico-ambiental e de circularidade da organização avaliada durante o período reportado avaliado.

A equação encontrada possibilitou maiores análises sobre a relação entre os três fatores avaliados. Tais discussões foram baseadas, por exemplo, em discussões sobre o coeficiente linear (que explica se o fator avaliado aumentar ou diminuir de acordo com que a variável preditora é alterada) coeficiente de determinação (R^2 , que expressa a quantidade da variância dos dados que é explicada pelo método linear), ou na avaliação de cenários preliminares (efeito do aumento ou diminuição de um determinado fator nas outras duas variáveis avaliadas), a fim de melhor discretizar a relação entre os grandezas avaliadas para o estudo de caso desenvolvido.

4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo é apresentado o detalhamento metodológico do desenvolvimento do método integrado para a avaliação econômico-ambiental e de circularidade de organizações.

Como disposto na Figura 4-2, o método é desenvolvido por meio da aplicação paralela da ACVO, ACCVO e IC. Os resultados dessas metodologias são os dados de entrada para a realização de um GLM, que é aplicado com o intuito de entender qual a relação entre os três compartimentos analisados (circularidade, ambiental e econômico) durante o período reportado no contexto organizacional. No intuito de testar e refinar o método proposto, ele é aplicado a um estudo de caso de uma empresa do setor alimentício.

Os capítulos a seguir apresentam os resultados e discussões relacionadas à aplicação do método construído. O Capítulo 5 é apresentado no formato de um artigo científico uma vez que foi publicado na revista *Environmental Engineering Science*. Portanto, esse capítulo, que discorre

sobre a aplicação da ACVO e IC na organização selecionada, é apresentado em inglês e é acompanhado de um resumo expandido em português. O Capítulo 6 completa as avaliações do método integrado ao apresentar os resultados da ACCVO e GLM.

5 CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO INDIVIDUAL DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ORGANIZACIONAL EM CONJUNTO COM INDICADORES DE CIRCULARIDADE

5.1 RESUMO EXPANDIDO DO ARTIGO (EM PORTUGUÊS)

5.1.1 Introdução

Segundo Fassio e Tecco (2019), a EC representa uma nova lógica de produção e consumo que pode ser aplicada ao ciclo de vida do sistema agroalimentar. Mudanças intensas no ciclo de vida dos produtos alimentícios precisam ocorrer para que ocorra uma transição circular dessa indústria (EMF, 2019b). Por sua grande capilaridade e características perenes, este setor oferece características atrativas para o desenvolvimento e implementação de práticas e soluções de EC devido à grande quantidade de Pequenas e Médias Empresas (PMEs) vinculadas a ele.

No entanto, deve-se ter cautela na avaliação da transição de sistemas lineares para circulares. Segundo de Souza Junior et al. (2020), as modificações nas cadeias de valor são passíveis de *trade-offs* ambientais. Os mesmos autores defendem que a ACV é uma das opções preferenciais para a avaliação de sistemas circulares. Recentemente, sua metodologia foi ampliada para ACVO, que fornece informações sobre o desempenho ambiental de empresas e organizações a tomadores de decisão, permitindo resoluções que podem influenciar cadeias de valor inteiras (UNEP, 2015). Em paralelo, às avaliações de circularidade também visam produtos, empresas ou sistemas ainda maiores. No entanto, ao invés de acessar os impactos ambientais, os indicadores de circularidade comumente focam nos fluxos de materiais, energia e resíduos de sistemas produtivos (de Oliveira et al., 2021).

Nesse contexto, fica claro que a ACVO e IC de nível micro compartilham o mesmo escopo. A partir disso, os autores argumentam que a combinação de IC de nível micro com a ACVO oferece resultados abrangentes sobre a circularidade de um sistema, recursos aplicados, resíduos gerados, ao mesmo tempo em que quantifica o perfil ambiental da empresa. O objetivo deste artigo é testar a implementação de dois IC em conjunto a ACVO. Os IC selecionados são *Circularity Transition Indicators* (CTI) (WBCSD, 2019a) e o *Waste Hierarchy Index* (WHI) (Pires e Martinho, 2019). O método proposto é aplicado na avaliação de um restaurante vegano e certificado lixo-zero localizado no Brasil. O objetivo deste artigo não se limita, portanto, a um

estudo de caso, mas também abrange o alinhamento metodológico entre as metodologias baseadas no ciclo de vida e as avaliações de circularidade.

5.1.2 Metodologia

O objetivo da ACVO foi avaliar os potenciais impactos ambientais de um restaurante vegano certificado e lixo-zero localizado em Florianópolis/Brasil em 2020. A organização conta com uma instalação onde ocorrem todas as operações. O restaurante é também o destino de todos os transportes quantificados. A unidade reportada foi definida como: “Servir refeições durante um ano de operação”. O fluxo de reportado é de 18.000 refeições, que é o número aproximado de refeições vendidas em 2020 (período de referência). O método de consolidação aplicado foi de total controle sobre os termos operacionais e financeiros. O estudo adotou uma fronteira do berço ao túmulo e o sistema foi dividido em quatro processos principais para fins de modelagem: Produção e Compras (P&P), Logística e Transporte (L&T), Operações e Fim de Vida (EoL).

Três cenários foram criados para verificar a influência das práticas circulares, veganismo e localismo nos potenciais impactos ambientais da organização relatora:

- Cenário 1 (Linha de base) – Processos que traduzem as operações reais do restaurante avaliado. Inclui práticas circulares e de desperdício zero (redução, reutilização, reciclagem, compostagem, etc.), localismo e opções baseadas em plantas

- Cenário 2 (Carne e laticínios). Substituição de opções de proteínas vegetais por carnes e laticínios. A substituição foi feita seguindo a opinião experiente de um profissional terceirizado do setor de alimentos. Inclui práticas circulares e localismo.

- Cenário 3 (Restaurante comum). Segue as mesmas substituições do Cenário 2. Todos os resíduos sólidos são encaminhados para aterro sanitário. A fase P&P desconsidera o localismo.

Os dados primários foram usados para atividades diretas e uma combinação de dados medidos, estimados e genéricos foram utilizados para atividades indiretas. A utilização das bases de dados seguiu uma abordagem híbrida. O sistema foi modelado principalmente usando o banco de dados *ecoinvent* 3.7.1, que foi combinado com o banco de dados *agribalyse* 3.0.1 para complementar as informações sobre o ciclo de vida dos produtos alimentícios. O sistema foi modelado utilizando o software *openLCA* v1.10.3. O método AICV aplicado foi o ReCiPe 2016 *midpoint* seguindo uma perspectiva hierárquica (Huijbregts et al., 2016). Nove categorias de impacto foram selecionadas com base em seu alinhamento ao escopo do projeto e validadas com

as partes interessadas. Eles estão relacionados a questões ambientais globais ou estão ligados a caminhos de impacto que dizem respeito ao setor agroalimentar. As categorias selecionadas foram: ocupação de área agricultável (ALOP), mudanças climáticas (GWP), depleção fóssil (FDP), eutrofização de água doce (FEP), toxicidade humana (HTP), eutrofização marinha (MEP), transformação de área natural (NLTP), acidificação terrestre (TAP), depleção de água doce (WDP).

Foram aplicados dois indicadores de circularidade: WHI e CTI. O WHI é direcionado principalmente às práticas de gestão de resíduos e à fase de EoL, enquanto o CTI aplica um limite mais amplo para contabilizar as entradas e saídas circulares do sistema. A escolha pela aplicação do CTI e WHI foi baseada em trabalhos anteriores realizados pelos autores (de Oliveira et al., 2021). Os cálculos do CTI foram realizados automaticamente por meio de seu portal online (WBCSD, 2019b). O cálculo do WHI seguiu a metodologia estabelecida por Pires e Martinho (2019). Os dados utilizados foram extraídos do inventário da organização relatora. Os mesmos cenários empregados na ACVO foram também seguidos nas avaliações de circularidade.

5.1.3 Resultados e discussão

O cenário de linha de base tem um melhor desempenho ambiental em oito das nove categorias de impacto, a única exceção é a categoria WDP, que o Cenário 2 apresentou uma ligeira vantagem. O cenário 3 foi classificado como o mais alto em termos de potenciais impactos ambientais entre os três cenários em sete categorias (GWP, FDP, FEP, HTP, MEP, NLTP e TAP). As únicas duas exceções foram ALOP e WDP, em que o Cenário 2 assumiu a liderança. De fato, o Cenário 2 apresentou resultados próximos ao Cenário 3 nas categorias GWP, TAP e NLTP. Esta última é a única categoria em que os impactos dos três cenários apresentaram resultados próximos.

Os resultados mostram que a implementação de práticas circulares e lixo-zero, localismo e uma dieta baseada em vegetais proporcionam melhorias consideráveis no desempenho ambiental do sistema. Isso pode ser justificado pela diferença de resultados entre os Cenários 2 e 3, principalmente quanto às categorias de impacto FDP, FEP, HTP e MEP, mas também presentes nas categorias GWP e NLTP. Os aspectos mais determinantes são a redução de embalagens plásticas e compostagem. Nos Cenários 1 e 2, a grande maioria dos produtos são embalados usando opções compostáveis e recicláveis à base de papel. Por outro lado, todos os produtos do Cenário 3

são embalados com embalagens plásticas. Além disso, os impactos da reciclagem não afetaram drasticamente os resultados, que foram direcionados principalmente para a fase de P&P.

Os resultados do CTI apontam que o cenário de linha de base apresentou o melhor desempenho de circularidade entre os três cenários, seguido pelo Cenários 2 e 3. Os resultados do CTI mostram altas porcentagens para todos os cenários, uma vez que o sistema é quase inteiramente baseado em insumos provenientes do ciclo biológico da EC. No entanto, a avaliação também comprova que a implementação de práticas de lixo-zero pela organização resulta em maior circularidade. A diferença substancial entre os Cenários 1 e 2 também mostra a influência das dietas à base de plantas na circularidade geral do sistema, conforme claramente expresso pela queda de 24% neste indicador. Além disso, o cenário que simula um restaurante regular é cerca de 30% menos circular do que o cenário de linha de base, enfatizando as implicações negativas das estratégias lineares de tratamento de resíduos sob a lógica do CE.

No que se refere aos resultados do WHI, como os mesmos insumos e práticas de tratamento são aplicados para os Cenários 1 e 2, os resultados desse indicador são os mesmos para esses dois casos (51%). Como a fórmula WHI penaliza a implementação de opções lineares de tratamento de resíduos e todos os resíduos são direcionados para o aterro no Cenário 3, esse cenário apresentou um menor índice de hierarquia de resíduos em comparação aos demais cenários. Os resultados mostram que as práticas de gestão de resíduos aplicadas ao Cenário 1 apresentam um melhor desempenho em relação à hierarquia de resíduos do sistema. Por outro lado, com resultados relativamente próximos do máximo negativo aceito pelo WHI, o Cenário 3 representa a lacuna técnica entre práticas lineares e circulares quando se trata de hierarquia de resíduos.

As principais limitações dessa abordagem integrada vêm das fronteiras intrinsecamente diferentes das metodologias. No entanto, os autores gostariam de enfatizar que a ACVO e o CTI são capazes de cobrir avaliações do berço ao túmulo, capturando o impacto e a influência na circularidade e cargas ambientais desde o valor da cadeia até o tratamento de resíduos. Esse alinhamento metodológico entre ACVP e CTI pode ser visto como um dos maiores pontos fortes dessa abordagem, capaz de possibilitar uma avaliação integrada de circularidade e impactos ambientais de uma organização. Por outro lado, o WHI é direcionado apenas para a fase de tratamento de resíduos, o que pode ser vista como uma limitação insolúvel. Embora os conceitos compartilhem semelhanças, também é importante destacar que o WHI é construído sobre o conceito de hierarquia de resíduos, e não de circularidade. Portanto, futuras aplicações da

abordagem aqui apresentada podem optar por deixar esse indicador fora da avaliação combinada. Esse ajuste não impediria a intenção de implementar uma avaliação combinada de ciclo de vida e circularidade no nível organizacional, mas forneceria uma estratégia mais direta.

Por meio da implementação integrada da ACVO e dos IC a nível micro, os tomadores de decisão podem tomar decisões assertivas e estratégicas com base na análise abrangente de sua circularidade e perfil ambiental da organização. Para melhor orientar futuros estudos, é apresentado um *framework* que descreve o caminho metodológico seguido por esta avaliação integrada. Os procedimentos ilustrados estão interligados por um fator principal: a disponibilidade de dados. Os dados coletados pelo inventário construído como parte da ACVO foram utilizados para o cálculo do CTI e WHI. Como a ACVO adota uma abordagem ampla na identificação de todas as atividades diretas e indiretas de uma organização, todas as informações necessárias para os indicadores de circularidade já estavam disponíveis antes da avaliação de circularidade. Devido a essa característica central, os autores descobriram que a avaliação tripla fornecida funciona de forma eficiente em termos da aplicação de esforço e tempo. Além disso, embora este trabalho tenha se concentrado no setor de serviços alimentares, devido à natureza holística de cada método aplicado, essa abordagem pode ser replicada em empresas e setores de diferentes origens.

5.1.4 Conclusão do resumo expandido

Os benefícios de transacionar para um sistema mais alinhado à EC e a oportunidade das PMEs contribuírem para essa transição têm sido amplamente discutidos na literatura recente. Esta pesquisa se soma a esse nicho científico ao fornecer uma avaliação combinada do ciclo de vida e da circularidade de um restaurante vegano lixo-zero no Brasil. Como a literatura atual se concentra principalmente no alinhamento entre ACV e IC no nível do nano (produto), nosso estudo inova ao fornecer um caminho metodológico para essa análise dupla no nível organizacional.

Essa abordagem é capaz não apenas de identificar os *hotspots* ambientais relacionados aos negócios de uma empresa, mas também fornecer informações sobre sua circularidade e hierarquia de resíduos. Como essas avaliações quantitativas geralmente consomem recursos e tempo, os profissionais se beneficiam dessa estratégia devido às semelhanças nos processos realizados durante a análise. Além disso, argumentamos que essa abordagem combinada baseada nas aplicações simultâneas da ACVO e de IC no nível meso (empresas e organizações) equipar

melhor os analistas para entenderem a circularidade, a hierarquia de resíduos e os possíveis impactos ambientais de seus negócios por meio de uma metodologia abrangente e criteriosa.

O cenário de linha de base teve o melhor desempenho ambiental em oito impactos de nove categorias avaliadas (ex: as emissões de carbono relacionadas a um restaurante comum foi 26% maior do que as da organização relatada), sendo a única exceção a categoria WDP. O CTI caracterizou os três cenários como sendo 91%, 67% e 62% circulares, respectivamente. Os resultados do WHI foram de 51% para os Cenários 1 e 2 e -83% para o Cenário 3. A produção de carne e laticínios foi o principal ponto crítico nos resultados de todos os três métodos aplicados. Além disso, a fase de produção e compras foi apontada como o principal impulsionador, responsável por mais de 83% dos impactos em todos os cenários.

A principal limitação deste estudo foi relacionada ao extenso processo de coleta de dados e ao nível de preparação dos membros da cadeia de valor, que comumente não possuíam a expertise ambiental e/ou processos internos de coleta de dados críticos para este trabalho. Estudos futuros podem aplicar a mesma abordagem a organizações de outros setores, potencialmente testando nossa abordagem para negócios maiores. Além disso, pesquisas futuras poderiam estudar o alinhamento de IC em nível de meso e Avaliações de Sustentabilidade do Ciclo de Vida, a fim de fornecer uma avaliação abrangente e combinada de circularidade e sustentabilidade das organizações.

Combining Organizational Life Cycle Assessment with Company-level Circularity Indicators – Case study of a vegan zero-waste restaurant

Authors: Dantas, T.E.T.^{1*}; Amaral, L.F.S.¹; Soares; S.R.¹.

***Corresponding author:** Dantas, T.E.T.

¹ Federal University of Santa Catarina (UFSC), Department of Sanitary and Environmental Engineering, Life Cycle Assessment Research Group (CICLOG), Florianopolis, 88040-970, Brazil.

DOI: 10.1089/ees.2021.0237

Keywords: Circular Economy; Foodservice sector; Small and Medium Enterprises; Organizational Life Cycle Assessment; Circularity Indicators.

Abstract. The transition to a circular economy (CE) challenges organizations from different backgrounds. This research performed a combined circularity and Organizational Life Cycle Assessment (OLCA) of a certified zero-waste vegan restaurant in Brazil. The circularity assessment was carried through the Circular Transition Indicators (CTI) and Waste Hierarchy Index (WHI). Three scenarios were developed: Scenario 1 characterizes the real operations of the organization; Scenario 2 adds meat and dairy to the menu, and Scenario 3 disregards all circular practices applied by the restaurant. Scenario 1 performed better in eight out of nine impact categories assessed (ex: the carbon footprint of a regular restaurant was 26% higher than the reported organization). OLCA results point at the environmental benefit of following a plant-based menu and applying circular practices in the case of the targeted organization. CTI characterized the three scenarios as being 91%, 67%, and 62% circular, respectively. These results showed that avoiding meat and dairy, procuring agroecological food options, and implementing practices such as reuse, recycling, and composting directly improve the overall circularity of the system. WHI results were 51% for Scenarios 1 and 2, and -83% for Scenario 3, pointing at a drastic change in waste hierarchy through redirecting waste to different pathways other than the sanitary landfill. Due to the large variety of inputs needed by the restaurant's, the production and procurement of goods were appointed as the main impact driver in all three methodologies. The influence of dietary changes, localism, and CE-related waste management practices is stressed in discussions

of the article. Our research innovates by combining life cycle and circularity assessments at the organizational scale. This integrated approach equips decision-makers to understand the circularity, waste hierarchy, and environmental impacts of their business through a unified methodology. Future studies could bring our approach to other sectors and companies.

Abbreviations. ALOP – Agricultural land occupation; CE – Circular economy; CTI – Circular Transition Indicators; EoL – End-of-life; FDP – Fossil depletion; FEP – Freshwater eutrophication; GWP – Climate change; HTP – Human toxicity; LCA – Life cycle assessment; LCI – Life cycle inventory; L&T – Logistics and transport; LCIA – Life cycle impact assessment; MEP – Marine eutrophication; NLTP – Natural land transformation; OLCA – Organizational life cycle assessment; P&P – Production and procurement; SME – Small and medium enterprises; TAP – Terrestrial acidification; WDP – Water depletion; WHI – Waste Hierarchy Index

5.2 INTRODUCTION

The rising attention given to the circular economy (CE) triggered responses from different sectors. The private sector embraced CE principles through the promotion of circular business models and the search for innovative pathways for handling resources and residues (Dantas et al., 2021; Geissdoerfer et al., 2018). According to Fassio and Tecco (2019), CE represents a novel production and consumption logic that can be applied to the life cycle of the agri-food system. Moving from a linear model to a large-scale regenerative profile could have emissions from the agri-food sector (EMF, 2019a). However, intense changes in the life cycle of food-related products have to occur for a circular transition of this industry to happen (EMF, 2019b). Against that background, literature shows that cross-sectoral cooperation between the several stakeholders involved in the sector is crucial for such a model shift to take place (Esposito et al., 2020).

The foodservice sector plays a central role in the broader agri-food sector. Due to its large capillarity and perennial characteristics, it works as a platform for experimentation and upscaling of circular strategies (MISTRETTA et al., 2019). However, as pointed out by Fusi et al. (2016), despite its substantial size and economic value, there is still limited information on its environmental impact, which also relates to the attention given to this industry under the CE scope. This sector offers alluring characteristics for the development and implementation of CE practices

and solutions due to a large amount of Small and Medium Enterprises (SMEs) linked to it. As reported by Garza-Reyes et al. (2019), there is still lacking information and tools preventing SMEs from fully contributing to CE. As SMEs are often embodied in the value chain of larger organizations (UNEP, 2015), it becomes clear that they have a substantial potential to reduce nationwide environmental impacts and further the development of CE.

Nevertheless, caution must be exercised in the evaluation of the transition from linear to circular systems. According to de Souza Junior et al. (2020), modifications in value-chains are liable to trade-offs between environmental impacts. The same authors argue that Life Cycle Assessment (LCA) is one of the preferable options for the assessment of circular systems. LCA is a science-based method for the quantification of environmental impacts from products and services (ISO, 2006a; 2006b). Recently, its methodology has been upscaled to Organizational Life Cycle Assessment (OLCA) to provide decision-makers with company-wide information on their environmental performance and possible trade-offs, enabling resolutions that could influence entire value-chains (UNEP, 2015). In parallel, circularity assessments also target products, companies, or even larger systems. However, rather than accessing environmental impacts, circularity indicators commonly focus on the flows of materials, energy, and waste through the evaluated system (de OLIVEIRA et al., 2021).

Against this background, it becomes clear that OLCA and company-level circularity indicators share the same scope. Therefrom, we argue that the combination of OLCA and micro-level circularity indicators delivers comprehensive outcomes regarding a system's circularity, applied resources, generated waste, while still quantifying the company's environmental profile. Similar approaches have been tested for products and services (GLOGIC et al., 2021; RUFÍ-SALÍS et al., 2021; SCHULTE et al., 2021), but an integrated approach capable of delivering the circularity and environmental assessment of entire businesses is still lacking.

The objective of this paper is to test the implementation of circularity indicators alongside OLCA. The two circularity indicators applied are the Circular Transition Indicators (CTI) (WBCSD, 2019a) and the Waste Hierarchy Index (WHI) (PIRES E MARTINHO, 2019). The proposed method is applied in the assessment of a vegan and certified zero-waste restaurant located in Brazil. The purpose of this paper is therefore not limited to a case study, but it also serves towards the methodological alignment between life cycle-based methodologies and circularity assessments. As far as the authors are aware, this is the first publication to propose such an

integrated approach at the organizational level. Thus, through this paper, the authors intend to test this strategy to further support the development of simultaneous sustainability and circularity assessments.

The remainder of the article presents as follows: Section 2 discloses the applied methodology. Following, Section 3 explores the results of each assessment. Section 4 addresses the main insights provided by the case study, as well as discusses the benefits and limitations of the strategy applied. Lastly, Section 5 provides final remarks and future research possibilities.

5.3 METHODOLOGY

5.3.1 Organizational Life Cycle Assessment

This study follows the procedures presented in the Guidance on OLCA report (UNEP, 2015) and ISO 14072 (ISO, 2014). According to the latter, “OLCA is the compilation and evaluation of all inputs, outputs, and potential environmental impacts of activities associated with an organization adopting a life cycle perspective” (ISO, 2014). Similarly, as in LCA (ISO, 2006a; 2006b), OLCA are interactive studies composed of four phases: i) goal and scope definition; ii) life cycle inventory (LCI); iii) life cycle impact assessment (LCIA)) and iv. interpretation. Table 5-1 summarizes the main definitions described in the upcoming topics.

Tabela 5-1 – Main OLCA definitions.

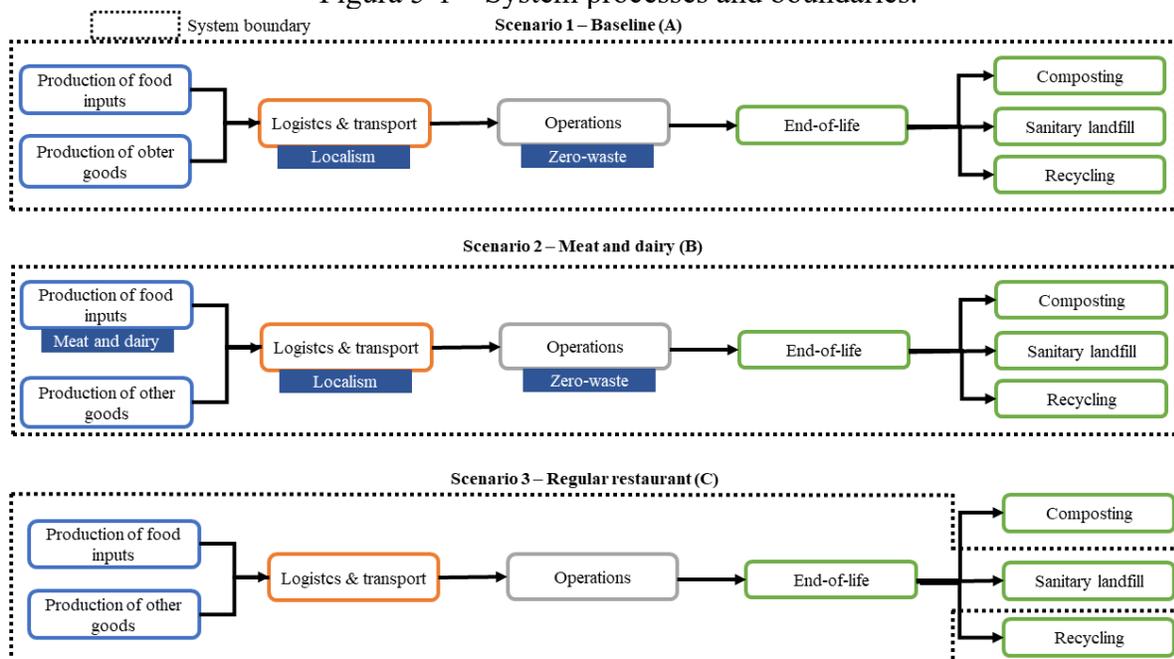
Reporting organization	Casa Origem
Description	Certified zero-waste vegan restaurant located in Florianopolis (Brazil)
Size	Small enterprise (< 50 employees)
Reporting period	Jan - Dec/2020
Reporting unit	Serving meals during one year of operation
Reporting flow	18,000 meals served in one year of operation
System boundary	Cradle-to-grave (excludes office equipment, cooking and cutlery gear, meal consumption and recycling).
Analyzed processes	Production, logistics and transport, operations, and end-of-life
Experience-based Pathway	Pathway 1: limited initial environmental experience and information
Consolidation method	Operational and financial control
Data collection method	Top-down: aggregated data collected through the company's annual balance sheet
Data description	Primary data: provided by the company based on the 2020 annual balance sheet Secondary data: from the agribalyse 3.0.1 and ecoinvent 3.7.1 databases
Targeted audience	Managers and founders
Intention of application	Identification of environmental hotspots, strategic management, monitoring of environmental performance, increased transparency and control

5.3.1.1 Goal and scope

The goal of the assessment was to evaluate the potential environmental impacts of a certified zero-waste vegan restaurant located in Florianópolis/Brazil in 2020. The organization bases its business models in the CE and waste hierarchy principles. Zero waste certification was provided by the Brazilian Zero Waste Institute (ILZB, 2018) according to its own methodology. The organization counts with one facility where the entire operations occur. The restaurant is also the destination of all transport quantified. Since the study was conducted for the year 2020, due to the COVID-19 pandemic, all meals were prepared and prepacked for delivery. Hence, meals were patronized to fit a 400g recyclable and compostable packaging option. The main zero-waste and circular practices applied by the company are: i. composting; ii. recycling; iii. reuse; iv. partnerships with waste-picker associations; v. use compostable and recyclable packaging.; vi. localism in their procurement processes; vii. agroecological and plant-based menu. Other minor practices and activities are also in place and can be consulted at Casa Origem (2021).

The reporting unit was defined as: “Serving meals during one year of operation”. The reporting flow is therefore 18,000 meals, which is the approximated number of sold meals in 2020 (reference period). The consolidation method applied was of total control over operational and financial terms. The study took a cradle-to-grave approach and the system was divided into four main processes for modeling purposes: Production and Procurement (P&P), Logistics and Transport (L&T), Operations, and End-of-life (EoL). P&P refers to the production and acquiring of all goods. L&T is related to the transport from the supplier to the reporting organization. Operations embrace cooking, preparation of meals, serving, cleaning, office and managerial activities, and related tasks. EoL refers to the final treatment provided to all solid waste generated (landfill, composting, recycling). System boundaries are illustrated in Figure 5-1.

Figura 5-1 – System processes and boundaries.

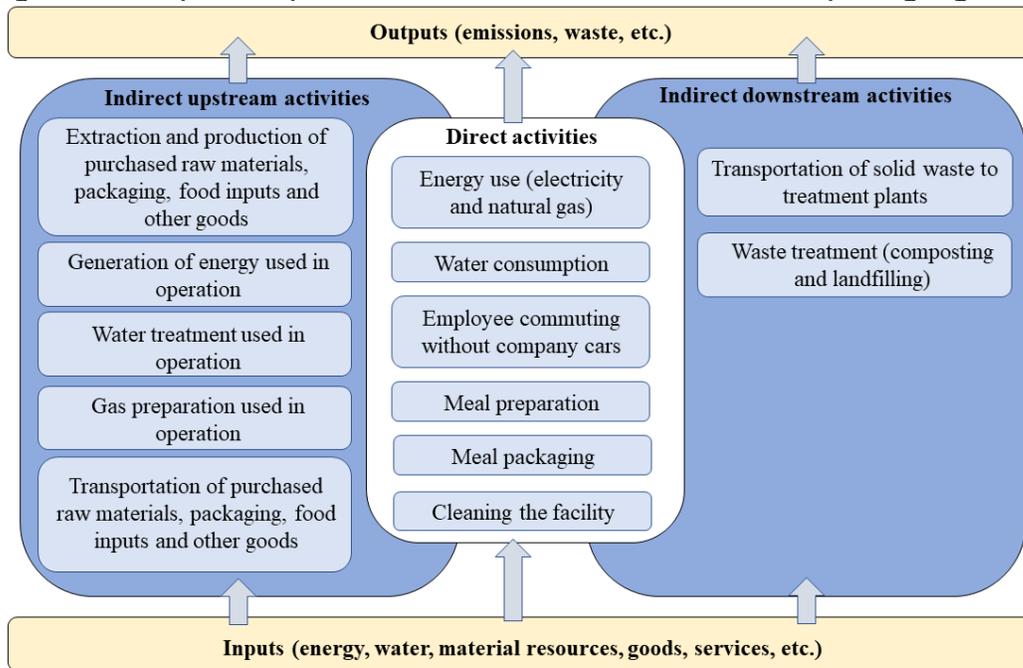


Three scenarios were created to verify the influence of circular practices, veganism, and localism in the potential environmental impacts of the reporting organization:

- Scenario 1 (**Baseline**) – Casa Origem “as-is”. Includes zero-waste and circular practices (reduction, reuse, recycling, composting, etc.), localism, and plant-based options. Illustrated in Figure 4.1a.
- Scenario 2 (**Meat and dairy**). Substitution of vegetal protein options for meat and dairy products. The substitution was made following the experienced opinion of a third-party professional from the food sector. Includes circular practices and localism. Illustrated in Figure 4.1b.
- Scenario 3 (**Regular restaurant**). Follows the same substitutions as in Scenario 2. All solid waste is sent to a sanitary landfill. The P&P phase disregards localism. Illustrated in Figure 4.1c.

According to the UNEP (2015), the system should include (if possible) all inputs and outputs from the direct and indirect activities. The former indicates activities owned or controlled by the reporting organization, the latter relates to the consequences of the reporting organization’s activities that occur at sites owned or controlled by other members of the value chain. Figure 5.2 illustrates the relevant inputs, outputs, direct and indirect activities analyzed in this project.

Figura 5-2 – Inputs, outputs, direct and indirect activities of the reporting organization.



5.3.1.2 Life Cycle Inventory

The UNEP report (2015) describes four “Experience-based Pathways” for the conduction of an OLCA. The reporting organization had never carried comprehensive environmental assessment projects before. Therefore, it fits the “Pathway 1: Limited initial environmental experience and information”. Data collection followed the approach applied by Jungbluth et al. (2016), along with the recommendations for OLCA in SMEs provided by UNEP (2015). The data collection method is categorized as a top-down procedure, i.e., company-wide (UNEP, 2015). Therefore, a detailed list of all purchases including weight and costs was provided by the reporting organization. Additionally, the researchers had access to the balance sheet for the reporting period. The balance sheet and purchasing list were first delivered with data separated by month, which was later aggregated per year for modeling reasons (Table SM 02). When needed, direct contact with suppliers was established to ask for procurement files.

Primary data was used for direct activities and a combination of measured, estimated, and generic data were utilized for indirect activities. Direct activities include energy use and water consumption, employee commuting, meal preparation, and packaging. Indirect activities (upstream and downstream) are related to the extraction of raw materials, operations, transport,

waste treatment, and office work from suppliers. Data regarding the indirect activities were shared by the suppliers through direct contact and aggregated alongside the LCI for the modeling stages. The complete LCI and list of assumptions of the project can be found in Table SM 08, located in the Supplementary Material.

5.3.1.3 Life Cycle Impact Assessment

The use of databases followed a hybrid approach in the referred project. The system was mainly modeled using the *ecoinvent 3.7.1* database, which was combined with the *agribalyse 3.0.1* database to complement information regarding the life cycle of food products. The system was modeled using the software openLCA v1.10.3. The LCIA method applied was ReCiPe 2016 at the midpoint level following a hierarchical perspective (Huijbregts et al., 2016). Nine impact categories were selected based on their alignment to the project’s scope and validated along with the stakeholders involved. They are either related to global environmental issues or be linked to impact pathways that concern the agri-food sector. Quadro 5-1 summarizes the impact categories applied in the study.

Quadro 5-1 – Impact categories applied in the study (Huijbregts et al., 2016).

Abbreviation	Impact category	Reference unit
ALOP	Agricultural land occupation	m ² a
GWP	Climate change	kg CO ₂ -Eq
FDP	Fossil depletion	kg oil-Eq
FEP	Freshwater eutrophication	kg P-Eq
HTP	Human toxicity	kg 1,4-DCB-Eq
MEP	Marine eutrophication	kg N-Eq
NLTP	Natural land transformation	m ²
TAP	Terrestrial acidification	kg SO ₂ -Eq
WDP	Water depletion	m ³

5.3.1.4 Interpretation

Apart from the common LCA interpretation procedures and goals (analysis of significant LCI aspects, identification of environmental hotspots, main drivers baseline, and created scenarios), the results of this article were also analyzed and interpreted following the context given by each scenario. The influence of dietary changes (veganism), localism, and implementation of circular practices in the environmental profile of the reporting organization is given particular attention in our analysis. Results are also analyzed concerning this article's main goal, i.e., the possibility of a combination between OLCA and circularity indicators. The following topics explore the methodology for each indicator implemented.

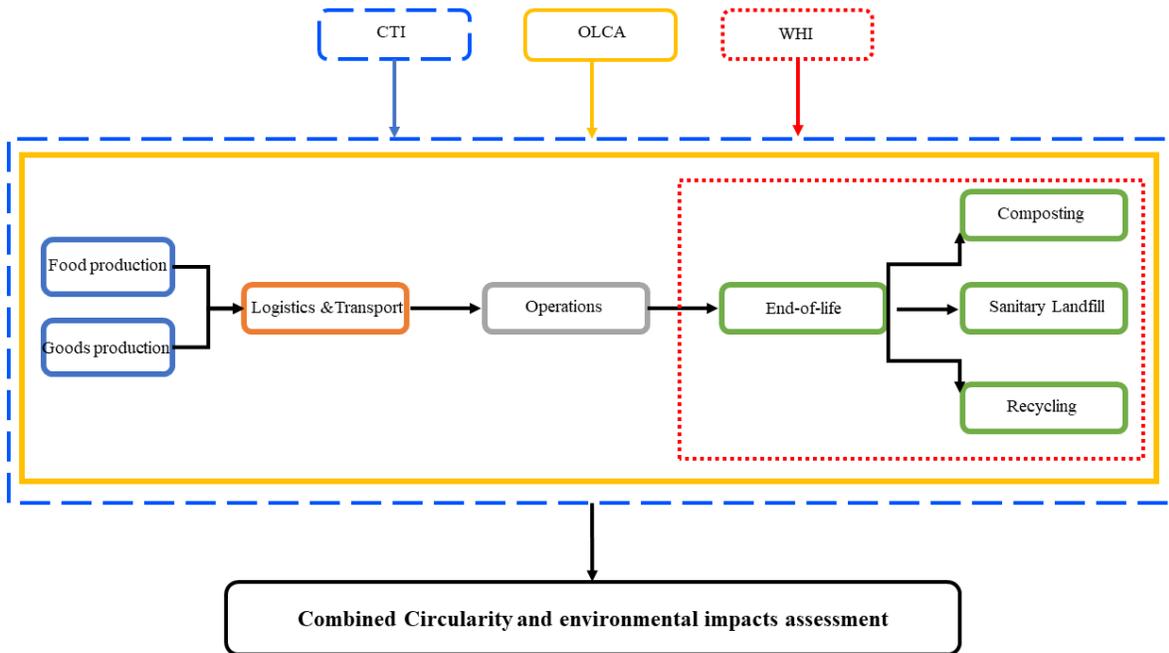
5.3.2 Circularity assessment

Saidani et al. (2019) define *indicators* as analytical tools used to simplify information in quantitative or qualitative assessments for tracking and measuring the performance of specific systems or processes. According to de Oliveira et al. (2021), *circularity* is the alignment of a material or energy flow, product, processes, or system to a set of CE strategies (redesign, composting, recycling, renewable energy, etc.) that meet the general CE goals. The same authors still define circularity indicators as analytical tools focused on measuring the degree of association of a system (or part of one) to practices and strategies applied to develop a CE further.

Two circularity indicators were applied: WHI and CTI. Figure 4.3 illustrates the methodological boundaries set for the circularity assessments using the OLCA baseline scenario. WHI is mainly directed to waste management practices and the EoL phase, while CTI applies a broader boundary to account for the circular inflows and outflows of the system. The choice for applying CTI and WHI was based on previous work conducted by the authors (de Oliveira et al., 2021). The authors identified CTI as a flexible, yet comprehensive indicator capable of delivering company-wide circularity results through a straightforward rationale and open methodology (WBCSD, 2019a). Additionally, similarities were identified between CTI's processes and the four methodological steps of life cycle studies. As for the WHI, after the careful methodological analysis of its development and structure (Pires and Martinho, 2019), this indicator was judged to

be applicable for the waste hierarchy analysis in business-level assessments. Detailed explanations of the methodological approach taken in either case are presented below in Figure 5-3.

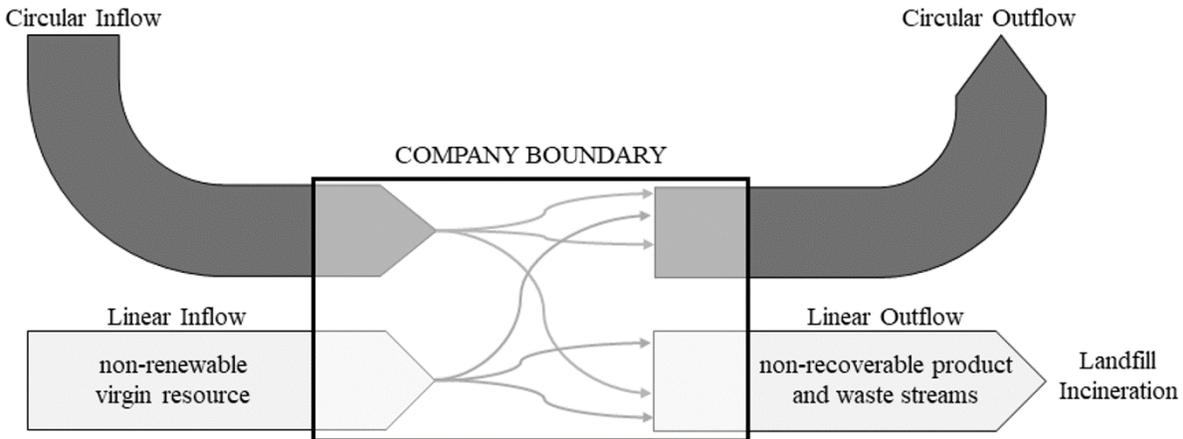
Figura 5-3 - Methodological boundaries of applied assessment methods illustrated for the baseline scenario.



5.3.2.1 Circularity Transition Indicators

The use of CTI in this work followed its methodological blueprint, the report “*CTI 2.0 – Metrics for business by business*” (WBCSD, 2019a). CTI focuses on mass flows (linear or circular) that flow through the evaluated organization (WBCSD, 2019a). Contrary to LCA, this method does not provide insights regarding the environmental impacts of product systems. It calculates the overall circularity of a business based on the linear and circular flows of a system. CTI presents its own nomenclature for the different mass flows analyzed in its methodology. The definition of “inflow”, “outflow”, “recovery” and other particular terms used in this indicator can be found in the Supplementary Material (please refer to Table SM 10). CTI’s rationale and the relationship between all flows accounted for are illustrated in Figure 5-4.

Figura 5-4 - Material flows analyzed by CTI. Adapted from WBCSD (2019a).



CTI indicators are clustered into three groups: Close the loop, Optimize the loop, and Value the loop. The first focuses on the company’s effectiveness in closing material loops. The second provides insights regarding resource-use efficiency. The third addressed how circularity can create value for a business. The first group of indicators is obligatory when applying CTI to a company, the other two sets of indicators are optional. CTI’s methodology is based on the application of weighted averages between the mass flows described in Figure 4.4 and Table SM 10. The indicators “% of inflow” and “% of outflow” are mandatory in CTI assessments since their values are used in the calculation of CTI’s main indicator: “% Circularity”. This percentage is calculated through the weighted average between “% of circular inflow” and “% of circular outflow” (Table SM 10). Due to this research’s scope and the nature of the analyzed business, only the “% circular inflow”, “% circular outflow” indicators were assessed. Water-related indicators were excluded since the company currently does not apply in-site water reuse practices. The renewable energy indicator was also ruled out of our study since all power consumed by Casa Origen comes from the grid and there is no in-site generation (i.e. solar panels). The same is true for the “% of critical material”, “Recovery type” and “Value the loop” indicators. Quadro 5-2 summarizes all indicators part of this tool.

Quadro 5-2 – CTI indicators (WBCSD, 2019a).

Group	Indicator
Close the loop	% circular inflow
	% circular outflow
	% water circularity
	% renewable energy
Optimize the loop	% critical material
	% recovery type
	Onsite water circulation
Value the loop	Circular material productivity
	CTI revenue

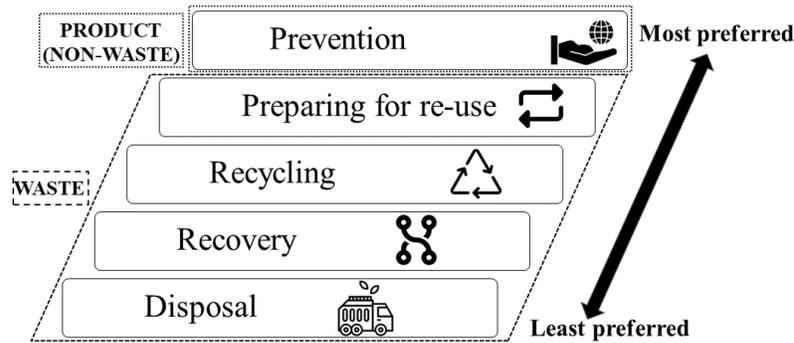
CTI calculations were carried out automatically through its online portal (WBCSD, 2019b). The data was extracted from the reporting organization’s LCI. Although CTI shows a larger boundary in comparison to the scenarios evaluated by OLCA, for this study, CTI was calculated for the same three scenarios shown in Section 2.1.1. Additionally, recycling rates used both in CTI and OLCA were extracted from a feature of the online toolbox, which offers access to access to the BoKU database (BoKU, 2019).

5.3.2.2 Waste Hierarchy Index

The application of WHI followed the methodological approach described by Pires and Martinho (2019). The goal of the WHI is to measure the waste hierarchy implementation level of a system. Figure 4.5 illustrates the waste hierarchy that WHI was built upon. The indicator considers different types of waste management treatments options and applies a weighting method to attribute value to practices that contribute to CE. WHI considers only the operations that occur after waste is generated, and it does not include prevention (Figure 5-5). WHI was developed and previously used to fit the macro scale of CE, but due to its simple yet effective rationale, we argue that its approach can be extended to other scales of CE. Therefore, we propose its use in the company-level scale through its application in the same system described in Section 4.2.1.1. The

streamlined version of WHI developed by Pires and Martinho (2019) was applied to this project, which was calculated according to the following formula:

Figura 5-5 - Waste hierarchy according to the Waste Framework Directive 2008/98/EC (European Parliament, 2008).



$$WHI = \frac{[(1 \times (M_{pr} + M_r + M_c)) + (-1 \times (M_i + M_l))]}{M_t} \times 100$$

where M_{pr} stands for the total mass of waste being prepared for reuse (cleaning or repairing recovery operations for waste that can be reused without re-processing). M_r and M_c regards the total mass of waste sent to recycling and composting, respectively. M_i concerns the total mass of waste treated via incineration and M_l is the sum of all waste sent to sanitary landfills. Lastly, M_t is the total mass of waste generated by the system during the reference period and sent to treatment options. Waste mass (wet basis) data in kilograms is inserted into the equation. WHI results range between -100% and 100%. A WHI of -100% describes a system in which waste hierarchy principles are not implemented in a way that could contribute to CE. On the other hand, a system that shows a WHI of 100% reflects that all solid waste is correctly sent to CE-linked operations exclusively.

WHI was applied to the three scenarios described in Section 2.1.1 to provide decision-makers with information regarding the possible changes in waste hierarchy implementation potentials between the scenarios analyzed. Data used for the calculation was extracted from the reporting organization's LCI. WHI's use in the study is justified by the possible beneficial combination between OLCA and WHI for the hereby described case study. This strategy provides

decision-makers with information and results concerning a comprehensive methodological boundary for waste management practices following waste hierarchy principles.

5.4 RESULTS

This section presents the main LCIA and circularity assessment results for the reporting organization. The inventory common to all approaches is presented in Table SM 08. The presentation order follows the same sequence as Section 2. To avoid overextending this section, the authors placed all marginal results in the Supplementary Material (Tables SM 01 – 07).

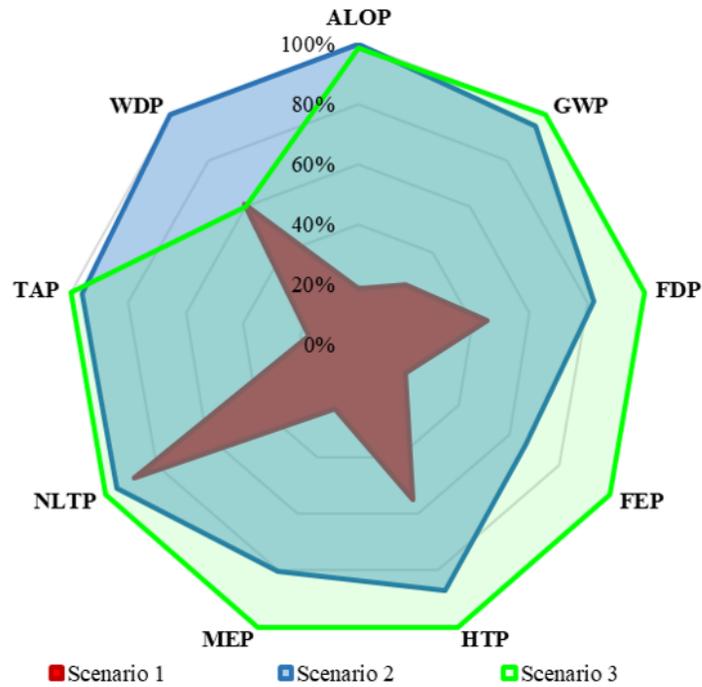
5.4.1 Organizational Life Cycle Assessment

LCIA results for each of the scenarios analyzed are presented in Table 5-2. As illustrated in Figure 5-6, the baseline scenario has a better environmental performance in eight out of the nine impact categories, the only exception is the WDP category, which Scenario 2 presented a slight advantage. Scenario 3 ranked as the highest in terms of potential environmental impacts between the three scenarios in seven categories (GWP, FDP, FEP, HTP, MEP, NLTP, and TAP). The only two exceptions were ALOP and WDP, in which Scenario 2 took the lead. In fact, Scenario 2 presented close results in the categories GWP, TAP, and NLTP to the aforementioned scenario. The latter is the only category in which the impacts of all three scenarios showed close results.

Tabela 5-2 – LCIA results.

Impact category	Reference unit	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
ALOP	m2a	32968,470	176664,690	174143,691
GWP	kg CO2-Eq	28171,573	103626,982	109562,982
FDP	kg oil-Eq	4809,733	8729,457	10940,770
FEP	kg P-Eq	7,909	27,970	44,662
HTP	kg 1,4-DCB-Eq	7784,954	12324,926	14122,020
MEP	kg N-Eq	153,264	543,561	679,828
NLTP	m2	125,209	134,955	142,666
TAP	kg SO2-Eq	205,290	1171,541	1223,697
WDP	m3	266,738	438,044	429,983

Figura 5-6 - Impact assessment of the reporting organization's OLCA.



As shown in Figure 5-7, the P&P phase is the main driver between the four processes. Operations follow as the second most impactful process in the majority of categories analyzed. L&T showed minimal contributions in all scenarios and categories. Although the recycling process contributed to higher results in Scenario 1 and 2 in the impact category WDP, overall EoL results also didn't show high relevance. For the detailed contribution of these four processes in terms of environmental burdens, please refer to Tables SM 01 – 03, located in the Supplementary Material.

Figura 5-7 – LCIA main drivers.



More than 83% of the environmental burdens in seven out of nine categories assessed for Scenario 1 are placed in the P&P phase (Tables SM 01-03). FDP and HTP are the only ones that destone but still manage to have P&P as their main driver (Figure 5.7). As shown by Table SM 04, the environmental burdens of Scenario 1 are closely linked to the production of diverse food items, such as chickpea, chocolate, rice, and many more. In this scenario, Operations are responsible for 36.1% of the impact related to FDP, and 16.5% for HTP. Although relatively low compared to P&P, these impacts are mainly derived from emissions related to the use of cooking gas and electricity. L&T and EoL have minimal contributions. According to Tables SM 01 – 03, in the majority of categories, these two processes are responsible for no more than 1% of the impact. The only two exceptions are again for the FDP and HTP categories, in which L&T contributed with 6.21%, and EoL contributes with 3.36%, respectively.

The production of meat and dairy present in Scenarios 2 and 3 strongly influenced the results in all categories (Table SM 05 and 06). The products with higher environmental burden in these two scenarios are different variations of meat production. Beef production is the main driver in the ALOP, GWP, TAP, and WDP categories in Scenarios 2 and 3. Fish production ranks as the highest impact for FDP, FEP, HTP, and MEP for the same scenarios. Pork or chicken production follows as the secondary drivers in the majority of categories in these two scenarios. These results, highlighted by Tables SM 04 – 06, point to the environmental benefit of the dietary choice that the studied restaurant is built upon.

Results show that the implementation of zero waste and circular practices, localism, and a plant-based diet, deliver considerable improvements in the system's environmental performance. That can be justified by the difference of results between Scenario 2 and 3, especially regarding the impact categories FDP, FEP, HTP, and MEP, but also present in the categories GWP and NLTP (Figure 5.6). The most determinant aspects, are the reduction in plastic packaging and composting. In Scenario 1 and 2, the vast majority of products are packed using paper-based compostable and recyclable options. Conversely, all products in Scenario 3 are packed using plastic packaging. Additionally, recycling impacts did not drastically affect the results, which were mainly directed to the P&P phase.

Another relatively significant difference relates to the implementation of composting in Scenarios 1 and 2. Since all waste is directed to the sanitary landfill without prior screening in Scenario 3 (a common practice in Brazil, as the majority of the cities still do not have specific organic waste collection and treatment systems (ALFAIA; COSTA; CAMPOS, 2017)), its higher impact concerning the other two scenarios can be linked to the increase in emissions coming from waste transport and emissions linked to landfilling practices. The implementation of company-wide composting and circular practices are then proven to be beneficial to the studied system.

5.4.2 Circularity Assessment

5.4.2.1 Circularity Transition Indicators

CTI results are shown in Table 5-3. For the detailed results of marginal indicators related to the “Close the loop” indicator group, please refer to Table SM 09, located in the Supplementary Material.

Tabela 5-3 – CTI results.

Indicator group	Indicator	Scenario 1 (%)	Scenario 2 (%)	Scenario 3 (%)
Close the loop	Circular Inflow	92	48	50
	Circular Outflow	89	89	77
	Circularity	91	67	62

Scenario 1 presents a much higher value for the “% of circular inflow” indicators than the other two scenarios. This difference is linked to how CTI handles food inputs in its methodology. Agricultural products are mainly modeled as being part of a regenerative system, in which the production process is linked to the cycling of nutrients and promotion of soil maintenance and health. Since the analyzed systems use mainly agroecological food inputs, that reasoning fits the described results. Such logic explains the high value found for Scenario 1, in which the majority of items are agricultural products.

According to the CTI guidelines (WBCSD, 2019a), meat and dairy production can’t be categorized as regenerative or renewable inflows (Table SM 10), ultimately not accounting for them as “circular inflows”. In this case, the inputs were categorized as “linear inflows”, resulting in a drastic variation between the baseline scenarios, and the other two is directly related to dietary changes. Regarding Scenario 3, the rise of 2% in this indicator relates to the use of single-use packaging and containers and the exclusion of internal reuse practices applied in Scenario 3.

The circular outflow indicator is mainly directed to the EoL phase. Due to the identical waste management practices applied to Scenarios 1 and 2, the same results were found for these two cases. The lower results found for Scenario 3 are caused by the exclusion of composting, reuse, and recycling. Still, this scenario showed a substantially high result for this indicator. That occurred because CTI recognizes food consumption as part of the biological cycle of CE since the

nutrients are being retained by the client, and therefore labels it as circular outputs. Thus, Scenario 3 results are driven by the consumption of meals by clients and not the implementation of linear waste treatment practices (landfilling).

The baseline scenario showed the best circularity performance between the three scenarios, followed by Scenario 2 and 3. Since circularity is calculated through the weighted average between the last two discussed CTI indicators, results are closely linked to the reasoning previously presented. CTI's outcomes show high percentages for all scenarios since the system is almost entirely based on inputs coming from the biological cycle of CE. However, the assessment also proves that the implementation of zero-waste practices by the organization results in higher circularity. The substantial difference between Scenario 1 and 2 also shows the influence of plant-based diets in the system's overall circularity, as clearly expressed by the decrease of 24% in this indicator. Furthermore, the regular restaurant scenario is circa 30% less circular than the baseline scenario, stressing the negative implications of linear waste treatment strategies under the CE rationale.

5.4.2.2 Waste Hierarchy Index

Table 5-4 shows the results encountered for WHI for each of the Scenarios. Since the same inputs and treatment practices are applied for Scenario 1 and 2, results are the same for this indicator for these two cases (51%). Since the WHI formula penalizes the implementation of linear waste treatment options and all waste is directed to the landfill in Scenario 3, it resulted in a worse outcome in comparison to the other scenarios. Results show that the waste management practices applied to Scenario 1 deliver a better performance concerning the system waste hierarchy. On the opposite side, with outcomes relatively close to the negative maximum accepted by WHI, Scenario 3 represents the technical gap between linear and circular practices when it comes to waste hierarchy.

Tabela 5-4 – WHI results

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
WHI	51%	51%	-83%

5.5 DISCUSSION

5.5.1 Organizational Life Cycle Assessment

Results show that the main environmental hotspot is the input of meat and dairy into the system (Scenarios 2 and 3). These findings are in line with other LCA studies that analyzed dietary choices in different contexts and argued the plant-based diets present higher environmental (Bruno et al., 2019). In fact, these outcomes echo the conclusions drawn by the work of Chai et al. (2019), indicates that there is a wealth of evidence supporting a transition to a more sustainable food system, in which plant-based diets substantially contribute to the reduction of impacts related to agri-food system and further strengthens the implementation of circular and bioeconomy strategies.

Figure 5.6 illustrates the difference that such dietary change causes in the environmental impacts of the foodservice business. Scenario 3 opposes the environmental profile of the plant-based restaurant described by the baseline scenario. Therefore, we argue the rise in consumer perception regarding sustainability-related topics sets the ideal platform for the development of circular business models in the agri-food system (Naspetti et al., 2021). However, as pointed out by Chai et al. (2019), for a plant-based diet to deliver its full benefits, local products that minimize the environmental impact of transport should be preferred.

The influence of localism is also highlighted in the results of this study. As illustrated by Figure 5.6, the main driver of all scenarios is the P&P phase. Although separated for methodological reasons in this study, P&P and L&T are strongly intertwined in the day-to-day activities of the agri-food sector. Consequently, based on the discrepancies found between the results encounter for Scenario 2 and 3, we reaffirm the benefits of local food production as a means to lower the environmental impact of value-chains. By applying localism to their sourcing practices, businesses may reduce their environmental footprint by reducing transport emission, shortening of value-chains, and ultimately contributing to the development of local communities

Scenario 3 outranked the other two in seven out of nine impact categories. These findings imply that the foodservice sector can be a platform for the implementation and spreading of CE principles. We highlight the positive impacts of the CE practices applied by the baseline scenario. This case study evidences that movement to a CE-based rationale in the foodservice can steer the

transition from the entire value-chain towards CE, as the operationalization of its practices like large-scale composting, recycling, and changes in packaging options are innately collaborative between many stakeholders. Therefore, if upscaled to larger systems, the practices implemented in Scenario 1 could further contribute to tackling climate issues and contributing to CE.

On the methodological aspect of OLCA, we reaffirm that one of the main challenges of OLCA in the foodservice sector is linked to data collection procedures, already evidenced by Jungbluth et al. (2016). Data collection is a common limitation in OLCA projects, especially regarding the invariability of primary data and information regarding supporting activities (MARTÍNEZ-BLANCO; FORIN; FINKBEINER, 2020). Since catering facilities frequently rely on an enormous number of supplies, data collection may become exhaustive and time-consuming. The authors found it to be helpful to follow an often disregarded procedure described in UNEP (2015) – the identification of indirect and direct activities (Figure 5.2). This approach allows the user to not only identify points of improvement that can be carried out directly and indirectly by the organization, but also clearly determine which data to pursue during the LCI development phase.

5.5.2 Circularity Assessment

The circularity indicators applied have different methodological features, and therefore present distinct system boundaries and calculation procedures. However, Tables 4.5 and 4.6 show that they pointed in the same direction in the presented project.

CTI results indicate that the use of this method is expected to deliver high circularity scores when applied to any other system in which food plays a major role as the final destination of inputs. That happens because food consumption is held as a preferable option in CTI's hierarchy (WBCSD, 2019a), translating into the full recovery of the nutrients and components linked to the agri-food system. Therefore, we argue that careful understating the cascading hierarchy and recovery levels (Table SM 10) presented in CTI's methodology is of ultimate importance to avoid misconceptions and overestimations of the results encountered.

WHI delivers straightforward results that can be used by decision-makers to steer a system's waste management strategies towards a more favorable context in light of the waste hierarchy principles. However, it is important to stress that WHI's methodology only accounts for

the outflows of the system. Authors believe that WHI results can provide stakeholders with an initial understanding of how circular the waste management practices or their business is (or can be), which could be further explored in depth through the combination with other methodologies to deliver optimal outcomes.

Lastly, circularity indicators point at how aligned a product/system is concerning the CE though by analyzing its material and energy flows, and therefore commonly lack information regarding a system's environmental performance (Harris et al., 2021). Additionally, neither CTI nor WHI were able to deliver useful information on the effects of localism, one of the main traits of CE. Hence, the authors maintain that a combined approach using OLCA in parallel with the aforementioned circularity indicators delivers a comprehensive understanding of the system's circularity and environmental burdens.

5.5.3 Combined assessment of circularity and environmental impacts

In order to provide a clear understanding of how the methodological tools applied in this study can contribute to the CE context, Quadro 5-2 was developed to summarize the main strengths and weaknesses of each method applied.

The main limitations of this integrated approach come from the intrinsically different boundaries of the methodologies. However, we would like to stress that OLCA and CTI are both capable of covering cradle-to-grave assessments, capturing the impact and influence in the circularity and environmental burdens from the value-to-chain to the EoL phase. Given the availability of data regarding value chain actors, both methodologies enable the extension of the analysis to the supplier network of the analyzed companies. This methodological alignment between OLCA and CTI can be seen as one of the greatest strengths of this approach, which is capable of enabling an integrated circularity and environmental impact assessment.

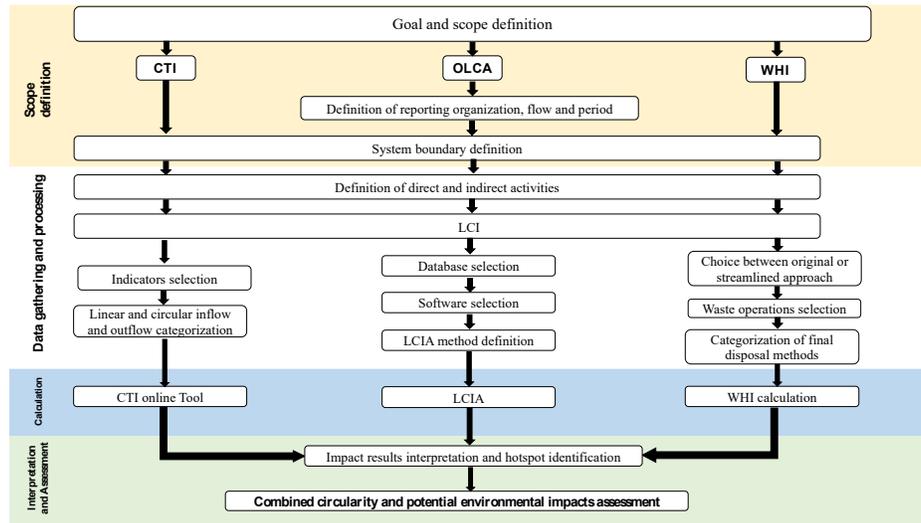
Quadro 5-2 – Strengths and weaknesses of the applied methodologies.

Method	Strengths	Weaknesses
OLCA	<ul style="list-style-type: none"> • Standardized methodology • Identification of trade-offs • Calculation of environmental impacts • Enables company-wide environmental assessments • Built upon methodology extensively applied in industry and academia • Applicable to cradle-to-gate, gate-to-gate, and cradle-to-grave boundaries 	<ul style="list-style-type: none"> • Resource and time-consuming • Demands previous expertise in LCA • Highly depended on external databases
CTI	<ul style="list-style-type: none"> • Access to the BOKU database • Free user guide report available • Developed by high-profile institution • Applicable to cradle-to-grave boundaries • Enables company-wide circularity assessments • Upstream and downstream circularity assessment • Calculations automatically run online in free portal • Built to fit the CE and bioeconomy rationale (technical and biological cycles) • Calculation of circularity and several other CE-related indicators 	<ul style="list-style-type: none"> • Confusing nomenclature • Tool in development phase • Some useful features only available in the paid premium version
WHI	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable to all CE scales • Straightforward methodology • Developed went through peer-reviewed process • Enables the analysis of waste management practices applied • Provides a numerical indicator for waste hierarchy principles 	<ul style="list-style-type: none"> • Does not account for recycling rates • Only accounts for EoL and downstream effects • Original version reported to encounter data availability problems.

On the other hand, WHI is only directed to the EoL phase, this difference might be seen as an unresolvable limitation. Even though the concepts share similarities, it is also important to highlight that the WHI is built upon the concept of waste hierarchy, not circularity. Therefore, future applications of the approach here presented might choose to leave this indicator out of the combined assessment. This adjustment would not hinder the intention of implementing a combined life cycle and circularity assessment at the organizational level but provide a more straightforward strategy. Nonetheless, we highlight that the synergy between circularity and waste hierarchy discussions demonstrates that additional information about waste hierarchy of businesses might be a relevant input to decision-makers in the building of circularity practices and goals.

Through the integrated implementation of OLCA and company-level indicators, decision-makers can make assertive and strategic resolutions based on the comprehensive analysis of their business circularity and environmental profile. To better guide future studies, Figure 5-8 illustrates the methodological pathway followed by this research. The procedures illustrated are interlinked by one principal factor: data availability. The data gathered for the LCI phase of OLCA was used for the calculation of CTI and WHI. Since OLCA takes a broad approach in identifying all direct and indirect activities of an organization (Figure 5-2), all the information needed for the circularity indicators was already available before the circularity assessment. Due to this central feature, the authors found the triple assessment provided to run efficiently effort- and timewise. Additionally, even though this work focused on the foodservice sector, due to the holistic nature of each method applied, this approach can be replicated in companies and sectors from different backgrounds.

Figura 5-8 - Methodological pathway for the combined circularity and environmental impact assessment.



5.6 CONCLUSIONS

The benefits of moving towards a system more closely aligned to the CE and the opportunity of SMEs to contribute to this transition have been extensively discussed in the recent literature. This research adds to this scientific niche by providing a combined life cycle and circularity assessment of a vegan zero-waste restaurant in Brazil. As the current literature mainly focuses on the alignment between LCA and circularity indicators at the product level, our study innovates by providing a methodological pathway for this dual analysis at the organizational level.

This approach is capable of not only identifying the environmental hotspots related to a companies' business but also provides insights regarding its circularity and waste hierarchy. Since such quantitative assessments are often resource- and time-consuming, practitioners may profit from this strategy due to similarities in the processes carried during the analysis. Furthermore, we argue that this combined approach based on the simultaneous applications of OLCA and company-level IC better equips decision-makers to understand the circularity, waste hierarchy, and potential environmental impacts of their business through a comprehensive and science-based methodology.

The baseline scenario performed better in eight impact of nine categories assessed (ex: carbon footprint of a regular restaurant was 26% higher than the reported organization), the only exception being the water depletion category. CTI characterized the three scenarios as being 91%,

67%, and 62% circular, respectively. WHI results were 51% for Scenarios 1 and 2, and -83% for Scenario 3. Meat and dairy production was the main hotspot in the outcomes of all three methods applied. Moreover, the production and procurement phase was appointed as the main driver, responsible for more than 83% of the impacts in all scenarios.

The main limitation of this study was related extensive data collection process and the level of preparedness of value-chain members, who commonly lacked the environmental awareness and/or internal data gathering processes critical to this work. Future studies could apply the same approach to organizations part of other sectors, potentially testing our approach to larger business. Additionally, future research could study the alignment of company-level circularity indicators and Life Cycle Sustainability Assessments in order to provide a comprehensive and combined circularity and sustainability assessment of organizations.

Acknowledgements

The authors would also like to acknowledge and thank Casa Origem for providing all data necessary for the development of this study.

Funding statement

This work was supported by the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES).

6 CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO ECONÔMICO-AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA E DE CIRCULARIDADE A UMA ORGANIZAÇÃO DO SETOR ALIMENTÍCIO.

6.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta os resultados encontrados para a aplicação e teste do método integrado proposto em uma organização real. São apresentados os resultados remanescentes das diferentes metodologias aplicadas para o estudo de caso desenvolvido: a avaliação da circularidade por meio do indicador CTI, os resultados a nível *endpoint* da avaliação de cunho ambiental realizada por meio da ACVO da organização reportada, além também da ACCVO da mesma organização.

Os dados apresentados neste capítulo, diferentemente dos que constam no Capítulo 5, além de serem apresentados por Cenário avaliado, foram também discretizados em uma temporalidade mensal. Isso se deu com o intuito de favorecer a construção de uma equação de regressão por meio da aplicação de um GLM dos resultados compilados dessas análises, também apresentada nesse capítulo.

As conclusões apresentadas ao fim dessa seção discorrem sobre os resultados oriundos da aplicação do método integrado e concluem o seu processo de validação ao avaliar a solução proposta em relação ao objetivo geral estabelecido. O tópico seguinte apresenta os resultados das metodologias aplicadas para a organização alvo do estudo de caso previamente descrito.

6.2 RESULTADOS INDIVIDUAIS DAS METODOLOGIAS APLICADAS

Os resultados encontrados pela aplicação das metodologias componentes do método integrado (CTI, ACVO, ACCVO) para o estudo de caso descrito pela Seção 6.3.1 são apresentados nos subtópicos a seguir.

6.2.1 Avaliação da Circularidade

Um dos principais resultados do artigo apresentado no Capítulo 5 é recomendação da exclusão do WHI como parte do método de avaliação integrada proposto. Como o método objetivado por esse trabalho é mais amplo que o apresentado pelo Capítulo 5, seguiu-se a recomendação do artigo em excluir o WHI da proposta de avaliação integrada de circularidade e impactos do ciclo de vida.

Tal exclusão baseia-se no fato de que o WHI não usa as mesmas fronteiras metodológicas que o CTI, ACVO e ACCVO (Figura 5.3), inviabilizando avaliações que abranjam todo o ciclo de vida de uma organização. O WHI é direcionado à medição do alinhamento de um sistema ou organização ao conceito de hierarquia de resíduos, não necessariamente contribuindo para discussões relacionadas à efetiva circularidade da organização. Esse indicador proporciona resultados com base em uma escala de -100% até 100%, que exprime o grau de alinhamento do item ou organização avaliada em relação à hierarquia de resíduos. Dessa forma, a métrica obtida pelo WHI não comunica diretamente informações relacionadas à circularidade do sistema, e portanto, foi excluído das análises seguintes propostas por este estudo.

Com base nessa linha de raciocínio, a aplicação do método proposto seguiu adiante utilizando o CTI como seu único IC. Tabela 5-3 apresentou os resultados do CTI para o estudo de caso enunciado. Afim de agrupar resultados gerais em maior granularidade para futuramente favorecer a construção de uma equação regressão dos resultados, os mesmos resultados foram então divididos em uma temporalidade mensal, e são apresentados pela Tabela 6-1.

Tabela 6-1 - Resultados do CTI.

Indicador	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Cenário 1	90	91	89	91	91	92	89	91	90	89	91	92
Cenário 2 <i>Circularity (%)</i>	67	66	67	66	67	67	66	68	67	67	66	66
Cenário 3	62	62	62	62	53	62	61	61	62	63	62	61

Fonte: O autor (2023).

A alteração da temporalidade dessa análise não afeta o resultado encontrado (circularidade da organização reportada para os cenários no período reportado delimitado). As discussões para o sistema de produto analisado podem ser encontradas nas Seções 4.3.2.1 e 4.4.2. O subtópico a seguir discorre os resultados para a avaliação ambiental do estudo de caso.

6.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional

As Tabelas 6-2, 6-3 e 6-4 apresentam os resultados da AICV *endpoint*, com perspectiva hierárquica (H), para os Cenários 1, 2 e 3, respectivamente. A soma dos resultados desses três indicadores *endpoint* nos apresenta o *single score (pp)*. Nota-se que, resultados apresentados no Capítulo 5 foram calculados por meio das categorias de impacto *midpoint* do método de AICV *ReCiPe* 2016. Entretanto, no intuito de facilitar a posterior agregação dos resultados, os dados dispostos abaixo seguiram o mesmo método de cálculo, porém foram calculados a nível *endpoint* no intuito da sua posterior agregação em um *single score*. Dessa forma, ao invés das nove categorias de impacto selecionadas, os resultados abaixo são apresentados pelas categorias que o método apresenta nessa perspectiva: *Ecosystem quality*, *Human health*, *Resources*. As análises foram realizadas para os doze meses do ano a fim de prover maior granularidade de dados.

A categoria *Ecosystem quality* foi a principal contribuinte dos potenciais impactos ambientais nos três cenários avaliados. O Cenário 2 foi que apresentou piores resultados (mais impactantes), com um total de 33.301,25, seguido de perto pelo Cenário 3, com 33.102,90. Ambos os cenários tiveram resultados cerca de 4,5 maiores que o Cenário 1, que apresentou um total de 8906,26. A mesma tendência, porém em menor escala, foi encontrada para os outros dois indicadores avaliados. Os resultados encontrados para a categoria *Human health* foram 1243,41, 4228,05, e 4560, para os Cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Nesse caso, o Cenário *baseline* apresentou resultados cerca de 3,6 vezes menor que os outros dois Cenários. Por fim, a categoria *Resources* seguiu a mesma tendência, sendo que os Cenários 2 (1.304,52) e o Cenário 3 (1.596,36) apresentaram resultados cerca de 2,30 vezes maiores que o Cenário 1 (685,62).

Ao agregarmos os resultados dessas três categorias, chegamos a um *single score* de 8906,26 *pp* para o Cenário 1, 38.833,82 *pp* para o Cenário 2, e 39259,81 *pp* para o Cenário 3. Esses resultados, assim como os apresentados no parágrafo anterior, reforçam e apontam para as mesmas conclusões gerais sobre os impactos ambientais da organização avaliada a nível *midpoint*, apresentada no Capítulo 5. Para o estudo de caso avaliado, o Cenário 1 (“circular”) tem melhor perfil ambiental do que os Cenários 2 (adição de carne e laticínios) e Cenário 3 (“linear”). Para maiores discussões sobre a interpretação dos resultados, recomenda-se que o leitor revise a Seção 6.4.1.

O *single score* a ser utilizado posteriormente na integração dos resultados foi desenvolvido a partir da soma direta dos resultados de cada categoria *endpoint*, não havendo assim, para esse caso, o processo de ponderação e atribuição de pesos às categorias. Tal escolha se baseia no fato de que o objetivo central desta tese é direcionado a construção, aplicação do método integrado, sendo que a escolha do método de AICV, *single score*, e ponderação varia com base nos objetivos e abordagem do executor do projeto.

O subtópico a seguir discorre os resultados para a avaliação econômica do estudo de caso.

Tabela 6-2 - Resultados da ACVO do Cenário 1 na perspectiva *endpoint*.

Categoria de impacto	Unidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>Ecosystem quality</i>	<i>espécies × ano</i>	334,70	484,31	282,32	387,64	432,22	543,03	832,57	597,97	1455,60	700,66	760,15	166,06
<i>Human health</i>	<i>anos</i>	101,69	122,31	84,14	78,93	83,33	76,29	143,33	94,30	170,97	120,83	134,12	33,17
<i>Resources</i>	<i>dólares</i>	50,86	58,77	51,21	50,45	50,33	52,58	64,31	55,22	94,25	59,76	65,78	32,10
Single score	<i>pp</i>	487,26	665,39	417,68	517,03	565,89	671,91	1040,22	747,51	1721,03	881,25	960,06	231,34

Fonte: O autor (2023)

Tabela 6-3 - Resultados da ACVO do Cenário 2 na perspectiva *endpoint*.

Categoria de impacto	Unidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>Ecosystem quality</i>	<i>espécies × ano</i>	1369,88	2793,55	1712,82	2247,05	2726,64	3213,75	3565,86	2120,48	4296,40	3553,64	4427,84	1273,34
<i>Human health</i>	<i>anos</i>	202,55	386,18	227,21	296,44	344,84	381,93	452,30	237,69	567,11	434,38	550,68	146,74
<i>Resources</i>	<i>dólares</i>	73,29	107,96	79,40	89,11	96,24	106,16	119,72	88,30	229,05	116,06	143,43	55,80
Single score	<i>pp</i>	1645,73	3287,70	2019,44	2632,61	3162,73	3071,86	4137,89	2446,48	5092,57	4010,11	5121,95	1457,89

Fonte: O autor (2023)

Tabela 6-4 - Resultados da ACVO do Cenário 3 na perspectiva *endpoint*.

Categoria de impacto	Unidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>Ecosystem quality</i>	<i>espécies × ano</i>	1378,24	2799,08	1724,64	2248,04	2726,71	3320,03	3569,57	2124,63	5050,68	3561,52	4433,05	166,71
<i>Human health</i>	<i>anos</i>	208,68	391,66	234,95	298,73	347,51	385,21	454,4	240,19	971,30	438,34	554,91	34,67
<i>Resources</i>	<i>dólares</i>	78,62	111,02	87,26	89,15	99,98	110,77	122,37	91,22	505,28	121,93	146,65	32,11
Single score	<i>pp</i>	1665,55	3301,76	2046,86	2635,93	3174,2	3716,02	4146,36	2456,06	6527,27	4121,8	5134,62	233,5

Fonte: O autor (2023)

6.2.3 Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida Organizacional

Os resultados da ACCVO foram obtidos por meio da metodologia descrita na Seção 6.3.1. A Tabela 6-5 apresenta os resultados encontrados para a ACCVO da organização avaliada pelo estudo de caso proposto. Os resultados dos cálculos para cada cenário são apresentados por período mensal, o que também possibilita o cálculo dos custos totais do ciclo de vida para cada cenário.

Tabela 6-5 - Resultados da ACCVO para o estudo de caso proposto.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Janeiro	9.926,84	12.800,73	12.719,42
Fevereiro	17.565,12	20.439,01	20.357,70
Março	11.137,38	14.011,27	13.929,96
Abril	12.331,66	15.205,55	15.317,90
Maiο	8.682,95	11.556,84	11.689,63
Junho	13.565,35	16.439,24	16.531,39
Julho	12.632,34	15.506,23	15.598,38
Agosto	13.047,60	15.921,49	16.013,64
Setembro	14.280,56	17.154,45	17.246,60
Outubro	16.867,89	19.741,78	19.833,93
Novembro	15.582,53	18.456,42	18.548,57
Dezembro	13.827,60	16.701,49	16.793,64
Total	R\$ 159.447,82	R\$ 193.934,47	R\$ 194.580,73

Fonte: O autor (2023).

Nota-se que o Cenário 1 (*baseline*), que inclui práticas circulares e um menu que exclui carnes e laticínios, apresenta um custo total cerca de 20% menor que os outros dois cenários para os custos totais da operação da organização durante o período reportado. O Cenário 3 é aquele que apresentou maiores custos totais para o período reportado. Esse cenário excede o Cenário 1 em R\$35.132,91,82 e o Cenário 2 em R\$646,26.

A diferença expressiva entre os resultados da ACCVO para os cenários está relacionada à substituição de proteínas vegetais por carnes e laticínios, apontando ao benefício econômico da escolha de um menu baseado em opções veganas e vegetarianas (Cenário 1). Já a diferença menos expressiva entre os Cenários 2 e 3 se dá devido à discrepância nas taxas de gestão de resíduos sólidos de cada cenário. No Cenário 2, além da taxa de recolhimento de resíduos sólidos cobrada pela prefeitura municipal (R\$3.975,60 anualmente), a organização ainda arca com o custo da

contratação de uma empresa terceirizada especializada para a gestão e compostagem de seus resíduos orgânicos (R\$1.341,52 pagos para que aproximadamente 890kg de resíduos sejam compostados). Entretanto, o fato de que no Cenário 3 todo o volume de resíduos é direcionado ao aterro sanitário implica na aplicação e pagamento de uma taxa de recolhimento de resíduos maior que os outros dois cenários (R\$5.963,40 anualmente).

Conclui-se então que, para o estudo de caso descrito pela Seção 6.3.1, o Cenário 1 é aquele que apresenta menores custos totais para a organização durante o período reportado. Por outro lado, o cenário que não implementa práticas circulares e também inclui laticínios e carne na produção das refeições é também aquele mais custoso (Cenário 3). Por meio desses resultados é possível notar que a implementação de práticas circulares para a gestão de resíduos sólidos para a organização estudada, além de diminuir o volume de resíduos sendo enviados para o aterro sanitário, também contribui para um menor custo da fase de Fim-de-vida do sistema. Dessa forma, atesta-se que para este estudo de caso, um maior alinhamento com a EC por parte da organização, aqui traduzido pela implementação de práticas circulares (técnicas como a reciclagem, reuso, compostagem, etc.), resulta também em menores custos totais relacionados aos procedimentos de tratamentos de resíduos da organização estudada.

6.3 RESULTADOS COMPILADOS

As Tabelas 6-6, 6-7 e 6-8 foram desenvolvidas no intuito de agregar em tabelas únicas os resultados das três análises realizadas para os três cenários estabelecidos. Elas apresentam os resultados dos Cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Como previamente enunciado, recomenda-se que os dados utilizados para o GLM sigam a maior gradualidade possível, que nesse caso foi obtida por meio de uma separação temporal mensal dos resultados da avaliação da circularidade (CTI, % de circularidade), avaliação ambiental (*single score* obtido a nível *endpoint* do método de AICV ReCiPe, *pp*) e avaliação econômica (ACCVO da organização, representando os custos totais (R\$) para sua operação durante o período reportado). A Tabela 6-9, apresenta os maiores menores valores encontrados para cada cenário, além de também incluir sua média.

O tópico seguinte apresenta os resultados finais dessa tese, que compreendem a integração dos resultados por meio de um GLM e as discussões oriundas desse procedimento.

Tabela 6-6 - Resultados compilados para do Cenário 1.

		Cenário 1												
	Indicador	Unidade	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
CTI	<i>Circularity</i>	%	90	91	89	91	91	92	89	91	90	89	91	92
ACVO	<i>Single score</i>	pp	487,25	665,39	417,67	517,02	565,88	671,9	1040,21	747,49	1720,82	881,25	960,05	231,33
ACCVO	Custos totais	R\$	9926,84	17565,12	11137,38	12331,66	8682,95	13565,35	12632,34	13047,60	14280,56	16867,89	15582,53	13827,60

Fonte: O autor (2023).

Tabela 6-7 - Resultados compilados para o Cenário 2.

		Cenário 2												
	Indicador	Unidade	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
CTI	<i>Circularity</i>	%	67	66	67	66	67	67	66	68	67	67	66	66
ACVO	<i>Single score</i>	pp	1645,72	3287,69	2019,43	2632,6	3167,72	3701,84	4137,88	2446,47	5092,56	4104,08	5121,95	1475,88
ACCVO	Custos totais	R\$	12800,73	20439,01	14011,27	15205,55	11556,84	16439,24	15506,23	15921,49	17154,45	19741,78	18456,42	16701,49

Fonte: O autor (2023).

Tabela 6-8 - Resultados compilados para o Cenário 3.

		Cenário 3												
	Indicador	Unidade	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
CTI	<i>Circularity</i>	%	62	62	62	62	53	62	61	61	62	63	62	61
ACVO	<i>Single score</i>	pp	1665,54	3301,76	2046,85	2635,92	3174,2	3816,01	4146,34	2456,04	6527,26	4121,79	5134,61	233,49
ACCVO	Custos totais	R\$	12719,42	20357,70	13929,96	15317,90	11689,63	16531,39	15598,38	16013,64	17246,60	19833,93	18548,57	16793,64

Fonte: O autor (2023).

Tabela 6-9 – Média, maiores e menores valores encontrados para cada Cenário.

	Indicador	Unidade	Menor valor	Maior valor	Média	
Cenário 1	CTI	<i>Circularity</i>	%	89	92	90,50
	ACVO	<i>Single score</i>	pp	231,33	1720,82	742,19
	ACCVO	Custos totais	R\$	8682,95	17565,12	13287,32
Cenário 2	CTI	<i>Circularity</i>	%	66	68	66,67
	ACVO	<i>Single score</i>	pp	1475,88	5121,95	3236,15
	ACCVO	Custos totais	R\$	11556,84	20439,01	16161,21
Cenário 3	CTI	<i>Circularity</i>	%	53	63	61,08
	ACVO	<i>Single score</i>	pp	233,49	6527,26	3271,65
	ACCVO	Custos totais	R\$	11689,63	20357,70	16215,06

Fonte: O autor (2023).

6.4 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO

Após a realização das avaliações ambientais, financeiras e de circularidade, seguindo o procedimento metodológico descrito pela Figura 4-2, passou-se à integração dos resultados do estudo de caso realizado. Uma equação de regressão foi construída por meio de um GLM, seguindo a Eq. 6, apresentada no Tópico 4.3.5. Ressalta-se que foram utilizados os resultados encontrados para os três cenários desenvolvidos na construção dessa equação, de forma que o método gerado avalia as alterações na variável desfecho (circularidade, calculada por meio do CTI) nas variáveis preditoras (impactos ambientais potenciais e custos totais do ciclo de vida, resultados da ACVO e ACCVO, respectivamente).

Os resultados dispostos nas Tabelas 6-6, 6-7 e 6-8 foram os dados de entrada para o desenvolvido o GLM no software *Statistica* 12.5. Um total de 36 pontos foram utilizados na construção da equação de regressão múltipla. A equação abaixo apresentada (Eq. 7) representa como os três fatores analisados (impacto ambiental, custo total e circularidade) se relacionaram durante o período reportado (2020) nas operações da organização reportada.

$$CTI = 89,23 - (0,005117 * ACVO) - (0,000270 * ACCVO) \quad (\text{Eq. 7})$$

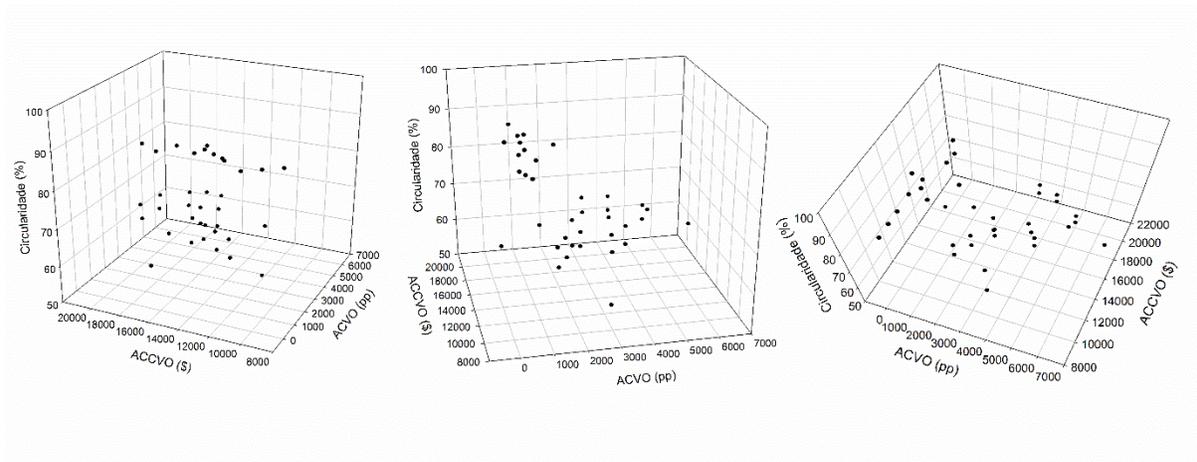
A Eq. 7 é o principal produto da abordagem apresentada pela Figura 4-2 para o estudo de caso avaliado. Os analistas da organização avaliada poderiam utilizá-la nos dois casos descritos pela Figura 4-1, sendo essas a avaliação de um período reportado anteriormente ou o desenvolvimento de simulações envolvendo os três termos analisado com base nos dados levantados. De forma prática, essa abordagem poderia ser utilizada, por exemplo:

- i) Avaliar como o investimento em práticas circulares afetaria o impacto ambiental potencial da organização durante o período analisado;
- ii) Prever o nível do impacto ambiental na medida em que se aumenta ou diminui a circularidade e o fator econômico;
- iii) Entender qual é o custo de sustentar boas práticas que visam a diminuição do impacto ambiental e altas taxas de circularidade.

Ressalta-se que a Eq. 7 não é uma equação geral para a avaliação de toda e qualquer empresa, sendo ela condicionada à organização e período reportado avaliados. Caso houvesse uma alteração no período avaliado (ex: inclusão de dados de mais um ano fiscal ao ICV avaliado), tal equação deveria ser refeita a fim de definir uma melhor curva e ajuste ao novo conjunto de dados. Ademais, é importante salientar que os valores das variáveis que compõem a Eq. 7 podem se aproximar, mas nunca serão iguais a zero. Isso se dá uma vez que a operação de uma organização real intrinsecamente conta com impactos ambientais, custos organizacionais e produção de recursos e resíduos, que atribui valores de circularidade ao sistema analisado. Os argumentos presentes neste capítulo aprofundam as discussões sobre a relação entre os fatores ambientais, econômicos e de circularidade de uma organização que podem ser levantados com base da equação descrita.

Como disposto, a Eq. 7 foi construída com base em um grupo de 36 pontos, que correspondem às coordenadas encontradas quando os dados apresentados nas Tabelas 6-6, 6-7 e 6-8 são dispostos no plano cartesiano. A Figura 6-1 foi desenvolvida para facilitar a visualização de tais pontos no espaço. A Figura apresenta três perspectivas do mesmo gráfico a fim de melhorar a visualização dos dados.

Figura 6-1 – Gráfico 3D com a disposição de todos os pontos analisados.



Fonte: O autor (2023).

O gráfico acima apresentado ilustra a disposição dos 36 pontos avaliados no espaço cartesiano, sendo que cada ponto é uma coordenada estabelecida com base nos resultados entre as três variáveis estudadas (ACVO, ACCVO, CTI) para um determinado mês, para os três cenários

avaliados, como disposto nas Tabelas Tabelas 6-6, 6-7 e 6-8. Não é possível identificar um agrupamento ou formação de tendência na disposição dos pontos. Dessa forma, nota-se que o resultado da Eq. 7 dificilmente teria um ajuste estatístico refinado em relação ao grupo de pontos estudados devido à dispersão dos pontos no plano cartesiano, o que afeta diretamente o coeficiente de determinação (R^2) a esse caso. O R^2 encontrado para a Eq. 7 é de 0,45. Esse valor significa que este método linear explica 45% da variância da variável dependente (circularidade) a partir das variáveis preditoras incluídas (impacto ambiental potencial e custo do ciclo de vida).

O valor relativamente baixo do R^2 encontrado se dá por três principais motivos:

- O pequeno grupo amostral avaliado nesse método, é composto por 36 pontos (Figura 6-1). Caso o método seja alimentado com um número maior de leituras (resultados das três metodologias aplicadas para um determinado período reportado), ele possivelmente teria um coeficiente de determinação maior devido ao maior número de dados que podem ser utilizados para a construção de uma equação geral do sistema. Nesse caso, a ampliação do período reportado por meio de um maior número ou frequência de medições ampliaria o conjunto de dados levantados e potencialmente melhoraria o ajuste;
- A pequena variação entre os resultados encontrados, ilustrado pelas Tabelas 6-6, 6-7 e 6-8. Há pouca variação entre os resultados da circularidade dos Cenários 1 e 2, o que também se confirma para os resultados da ACVO e ACCVO dos Cenários 2 e 3. Essa semelhança entre valores dos resultados mostra que, além de contarmos com um grupo reduzido de pontos a serem utilizados para a construção do método, eles também estão agrupados em uma pequena área do plano cartesiano, dificultado assim a construção de uma equação que melhor descreva a situação estudada;
- Possivelmente, outras variáveis além das três incluídas na Eq. 7 possam influenciar na avaliação da relação entre esses fatores.

Trabalhos na área do Pensamento do Ciclo de Vida que usaram o GLM se limitaram à aplicação do método e não apresentaram e discutiram o valor do R^2 encontrado (LÜSCHER et al., 2017; FABIANI et al., 2021; MORANDINI et al., 2020), impossibilitando a comparação do valor encontrado nesta pesquisa com casos semelhantes. Porém, ressalta-se que a Eq. 7 é um produto derivado da análise dos três fatores estudados (econômico, ambiental e circularidade), que até então não foram encontrados em literatura. Dessa forma, comparações diretas entre o R^2 dessa equação ou aplicações futuras dessa abordagem com trabalhos terceiros não são recomendadas uma vez que a Eq. 7 é condicionada à organização e período reportado, além de incluir ser baseada simultaneamente nos valores previamente dispostos.

Maiores detalhes sobre o funcionamento do método podem ser demonstrados por meio de sua aplicação direta. O tópico a seguir discute a aplicação da Eq. 7 para os dois casos de uso estabelecidos pela Figura 4-1.

6.4.1 Aplicação da Equação de Regressão Múltipla para o Caso 01 – Análise de Período Reportado Anterior

No primeiro caso de uso da equação de regressão múltipla descrita na Figura 4-1, voltado a análise das alterações econômico-ambientais causadas pela implementação de práticas circulares em organização em um período anterior à realização da análise, a Eq. 7 apresenta uma ferramenta estratégica e analítica para a melhor gestão de fatores econômico-ambientais em organizações. Por meio da análise de um período reportado anteriormente, analistas podem avaliar se suas práticas circulares internas têm efetivamente contribuído para a diminuição dos impactos ambientais potenciais da organização, além de também levantar e avaliar o custo total das operações durante esse período reportado.

Por exemplo, com base na Eq. 7, ao analisarmos a relação entre o fator “circularidade” com a “ACVO”, encontramos uma correlação inversa entre os fatores CTI e ACVO para a organização e período reportado avaliados nesse estudo de caso, visto o coeficiente angular atrelado ao fator “ACVO” na equação acima disposta. Uma vez que tal valor é negativo (-0,005117), um eventual aumento dos resultados da ACVO diminuiria a circularidade encontrada para o sistema. Entretanto, quanto maior os resultados da ACVO, maiores são os impactos

ambientais potenciais do sistema. Ou seja, por meio da Eq. 7, o aumento da circularidade é efetivamente acompanhado de uma melhoria do perfil ambiental do sistema.

A título de exemplo, podemos atestar esse efeito utilizando os dados apresentados na Tabela 6-9. Ao estabelecermos R\$ 13.287,32 como um valor fixo para o fator econômico (média da ACCVO para o Cenário 1 durante o período reportado, que traduziria um cenário financeiramente conservador), e aplicarmos o menor valor (231,33 *pp*), a média (742,19 *pp*), e o maior valor (1720,82 *pp*) encontrado para os resultados da ACVO também no Cenário 1, encontramos, respectivamente, os seguintes resultados para a circularidade segundo a Eq. 7: 84,45%; 81,84%; e 76,83%. Ou seja, nesse teste, o menor valor de ACVO aplicado ao sistema resultou na maior circularidade encontrada dentre os três valores listados. Por outro lado, o maior valor imputado para o fator ambiental da equação resultou na menor circularidade.

Portanto, ao analisarmos os três cenários do estudo de caso sob a ótica da Eq. 7, notamos que a implementação de práticas circulares, amplamente incorporadas no Cenário 1 e parcialmente presentes no Cenário 2, influenciam em menor impacto ambiental e maiores níveis de circularidade. Dessa forma, analistas da organização em questão poderiam utilizar a Eq. 7 para identificar essa correlação inversa entre CTI e ACVO, atestando que a mesma é benéfica para a organização avaliada. Ressalta-se que esta relação entre os fatores reforça os resultados apresentados no Capítulo 5 (calculados a nível *midpoint*), onde a melhoria do perfil ambiental atrelado ao aumento da circularidade do sistema.

De modo análogo, ao nos atentarmos ao coeficiente angular que acompanha o termo “ACCVO” na Eq. 7, notamos um comportamento semelhante. Ou seja, devido a coeficiente angular negativo (-,000270), um aumento da circularidade diminuiria os custos totais do sistema. Por outro lado, a Eq. 7 aponta que o compartimento econômico (ACCVO) não é fortemente influenciado pelas alterações da circularidade. Isso se torna claro pela diferença da grandeza entre os fatores que acompanham os termos ACVO e ACCVO (quanto maior o fator numérico que acompanha a variável preditora, maior sua influência na variável desfecho).

De forma prática, isso se dá visto que um aumento na circularidade do sistema é diretamente ligado com a implementação de práticas alternativas para a gestão de recursos e resíduos. Tais atividades são atreladas a custos e taxas fixas a serem pagas por prestadores de serviços (ex.: empresa terceirizada especializada em compostagem, taxas de recolhimento de resíduos sólidos urbanos). Ou seja, para o sistema avaliado, o custo relacionado à implementação

de práticas circulares (ex: compostagem, reciclagem, etc.) não é expressivamente maior que os custos de uma gestão de resíduos comum e/ou linear, onde todos os resíduos são enviados para o aterro sanitário para sua disposição final. Isso ocorre porque a empresa em questão, independentemente do cenário avaliado, tem custos obrigatórios para a compra de seus insumos e tratamento de seus resíduos. Ao nos debruçarmos sobre os ICVs gerados para o Cenário 1 e 3, notamos então que o aumento de gastos do Cenário 3 em relação ao Cenário 1 (R\$35.132,91,82) é fortemente proveniente dos insumos substituídos, não havendo forte alteração proveniente de fatores diretamente relacionados com as práticas circulares da organização.

Foi realizado um teste da aplicação da Eq. 7 para o melhor entendimento do comportamento entre as variáveis econômicas e de circularidade em relação ao fator ambiental. Ao fixarmos o valor de 742,19 *pp* para o fator ambiental (média encontrada para o Cenário 1), e aplicarmos o menor valor (R\$8.68,95), a média (R\$13.287,32), e o maior valor (R\$17.565,12) encontrado para os resultados da ACCVO também no Cenário 1, encontramos, respectivamente, os seguintes resultados para a circularidade segundo a Eq. 7: 83,08%; 81,84%; e 80,68%. Ou seja, é possível atestar que de forma geral, para a organização e período reportado, é esperado que o aumento da circularidade influencie na diminuição dos custos das operações da empresa.

Como apresentado por diversos autores (PADILLA-LOZANO; COLLAZZO, 2021; URAIN; EGUREN; JUSTEL, 2022), empresas que investem e apresentam resultados relacionados a uma melhor gestão ambiental, que inclui em seu cerne a melhoria da gestão de recursos e resíduos advogada pela EC, reportam que tais atividades vêm sendo aceitas pelo mercado como um diferencial da marca, ampliando assim suas vantagens competitivas. Assim sendo, de forma geral, uma vez que não há alteração significativa dos custos gerais do sistema, poderia ser recomendado aos tomadores de decisão que fossem feitos investimentos em práticas circulares, que essas não alterariam fortemente os custos do ciclo de vida da organização, mas influenciam diretamente no seu desempenho ambiental e de circularidade.

Como o Cenário 1 (que apresenta melhor perfil ambiental, melhores índices de circularidade, e menores custos totais do sistema) é aquele que descreve a operação atual da empresa, os resultados encontrados a partir do GLM validam e reforçam a estratégia atualmente escolhida pela empresa. Conclui-se, portanto, que dentre os cenários avaliados, a organização reportada atualmente opera em um cenário favorável ao seu perfil ambiental e de circularidade sem que haja custos adicionais expressivos em relação aos outros cenários.

Com base no que foi previamente disposto, a Eq. 7 nos ajuda a entender de forma geral o comportamento e relação entre as três variáveis que compõe essa avaliação integrada. Ressalta-se que esses resultados podem também ser influenciadas por outras variáveis que não compõe o método (o que influencia diretamente o coeficiente de determinação da equação). Portanto, analistas devem utilizar o caso 01 (Figura 4-1) da abordagem descrita nesta tese como uma análise preliminar e ampla do comportamento das variáveis.

O tópico a seguir foi desenvolvido a fim de também exemplificar o uso da Eq. 7 no segundo caso descrito na Figura 4-1. Posteriormente, o tópico que o segue (6.4.3) discorrerá mais profundamente sobre as relações entre variáveis encontradas ao avaliá-las em pares.

6.4.2 Aplicação da Equação de Regressão Múltipla para o Caso 02 – Simulação Futura

O segundo caso ilustrado pela Figura 4-1 descreve o uso da regressão múltipla implementada para a integração dos resultados das variáveis estudadas para fornecer subsídios a analistas que tem a intenção de planejar previamente as possíveis repercussões financeiras e ambientais de práticas ambientais que venham a ser empregadas em um período futuro.

Como ressaltado no Tópico 4.2, as simulações devem ser realizadas após a conclusão do Caso 1, e devem utilizar os resultados da análise prévia como ponto de partida para as simulações. Ressalta-se também que, como cada equação é montada com base em um ICV específico, o analista **não** deve utilizar a regressão múltipla encontrada ao fim da avaliação (que corresponde a Eq. 7 no estudo de caso apresentado) no intuito de desenvolver simulações diretas, uma vez que essa tentativa estaria alterando diretamente os fatores resultantes da análise, não respeitando as necessárias alterações nos aspectos avaliados e suas quantidades.

De forma prática, o Caso 02 descreve uma segunda rodada de avaliações, construída por meio de simulações baseadas nos dados e conhecimento do sistema estudado gerados após a condução do Caso 01. Nessa avaliação, o analista remodela o sistema e cenários por meio de alterações do ICV para a condução das três sub-análises previamente descritas. Por exemplo, caso a organização busque a eliminação de um tipo de resíduo, o aumento da circularidade, ou diminuição dos custos pela exclusão de um insumo, os analistas deveriam remodelar o sistema por completo de analisar qual seria a alteração entre as três variáveis por meio de uma nova regressão

múltipla. Essa nova alteração possibilitaria a identificação e maior detalhamento entre os *trade-offs* encontrados na operação da organização para essas três variáveis.

Ressalta-se que não é possível apresentar um equacionamento genérico para equações que serão geradas no Caso 02, uma vez que as novas equações serão desenvolvidas em alterações feitas no Caso 02, e, portanto, seguiram o formato da Eq. 6, mas agora terão alterações nos valores que acompanham os termos ACVO, ACCVO e IC.

O tópico a seguir discute a relação entre os fatores ao analisarmos duas das variáveis por vez a fim de aprofundar a relação entre as variáveis que são incorporadas ao método. Para tal, regressões lineares simples foram construídas para cada par de variáveis possíveis. Essa avaliação visa melhor detalhar a relação entre as variáveis que são incorporadas ao método.

6.4.3 Análises das Regressões Simples

A fim de melhor detalhar a relação entre os fatores estudados, regressões lineares e análises entre pares das três variáveis analisadas foram também realizadas e apresentadas abaixo.

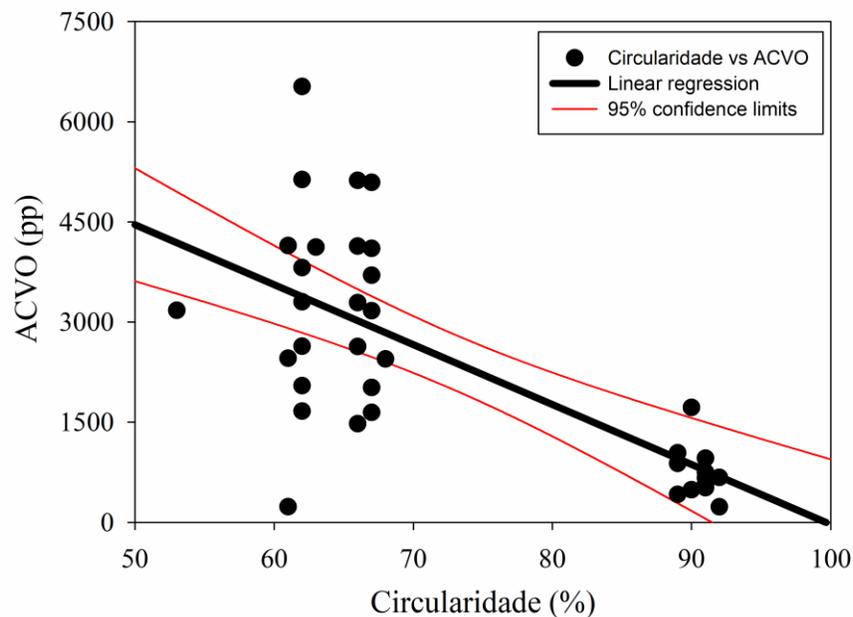
Assim como mencionado com Tópico 6.4, em nenhum dos subtópicos abaixo foi incluído análises correspondentes ao caso em que o coeficiente angular das equações fosse zero. Tal exclusão foi baseada no fato de que, em caso real, nenhuma das variáveis associadas ao estudo de caso seria zero. Por exemplo, a operação de uma organização intrinsecamente tem gastos financeiros e impactos ambientais relacionados. O mesmo é verdade para a variável de circularidade, já que a empresa em questão estaria consumindo recursos e produzindo resíduos durante sua operação. Assim sendo, tal exercício não contribuiria para as discussões visadas por essa tese.

6.4.3.1 Fator Ambiental (ACVO) e Fator de Circularidade (CTI)

A fim de melhor avaliar a relação entre os fatores ambientais de circularidade que compõe a Eq. 7, uma regressão linear simples foi desenvolvida envolvendo somente essas duas variáveis. A Eq. 8 e a Figura 6-2 descrevem essa regressão.

$$ACVO = 8948,33 - 89,78 * CTI \quad (\text{Eq. 8})$$

Figura 6-2 – Regressão linear simples entre os fatores ambientais e de circularidade.



ACVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional. Fonte: O autor (2023).

O coeficiente negativo que acompanha o fator “CTI” da Eq. 8 (-89,78) demonstra mais uma vez que o aumento dos impactos ambientais potenciais é acompanhado da diminuição da circularidade da organização. Ou seja, para esse estudo de caso, a implementação de práticas circulares por parte da organização reporta diminuiria seus potenciais impactos ambientais para o período reportado. O R^2 encontrado para Eq. 8 é 0,48, demonstrando que esse método explica cerca de 50% da variação da variância da variável dependente (ACVO) a partir da variável preditoras (circularidade). A título de exemplo, o intervalo de confiança de 95% foi incluído no gráfico deste e dos tópicos a seguir, que significa que se reproduzirmos a mesma pesquisa, e consequentemente

os intervalos de confiança, 95% dos intervalos gerados deverão conter os valores verdadeiros. Ademais, ressalta-se que a Figura 6-2 aponta que a maioria dos valores de circularidade estão dispostos entre 60 e 70% (dados provenientes do Cenário 3) ou cerca de 90% (dados referentes aos Cenários 1 e 2). Tal concentração dos valores em duas áreas do plano cartesiano pode influenciar diretamente no do ajuste e R^2 encontrado da equação devido a sua baixa variabilidade.

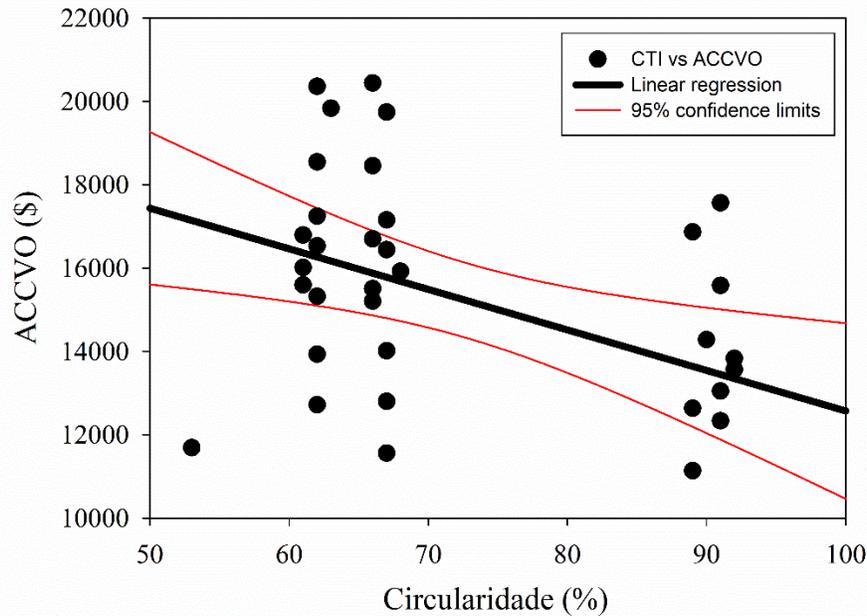
Como previamente disposto, a avaliação dos *trade-offs* impactos ambientais potenciais de um sistema de produto e sua circularidade vem sendo discutida em literatura, porém, durante a redação desta tese, não foram encontrados estudos que fizessem uma avaliação análoga no contexto organizacional. Porém, ao tomarmos as experiências de De Souza Junior et al. (2020); Glogic et al. (2021), Schulte et al. (2021), e outros pesquisadores, notamos que, diferentemente da situação enunciada pelo estudo de caso apresentado, nem sempre o aumento da circularidade é acompanhado da diminuição dos impactos ambientais, sendo que tal avaliação de tais *trade-offs* devem ocorrer de caso a caso.

6.4.3.2 Fator Econômico (ACCVO) e Fator de Circularidade (CTI)

Uma regressão linear simples que abranja os fatores econômicos e de circularidade também foi desenvolvida. A Eq. 9 e a Figura 6-3, dispostas abaixo, apresentam tal equação.

$$ACCVO = 22302,10 - 97,33 * CTI \quad (\text{Eq. 8})$$

Figura 6-3 - Regressão linear simples entre os fatores econômicos e de circularidade



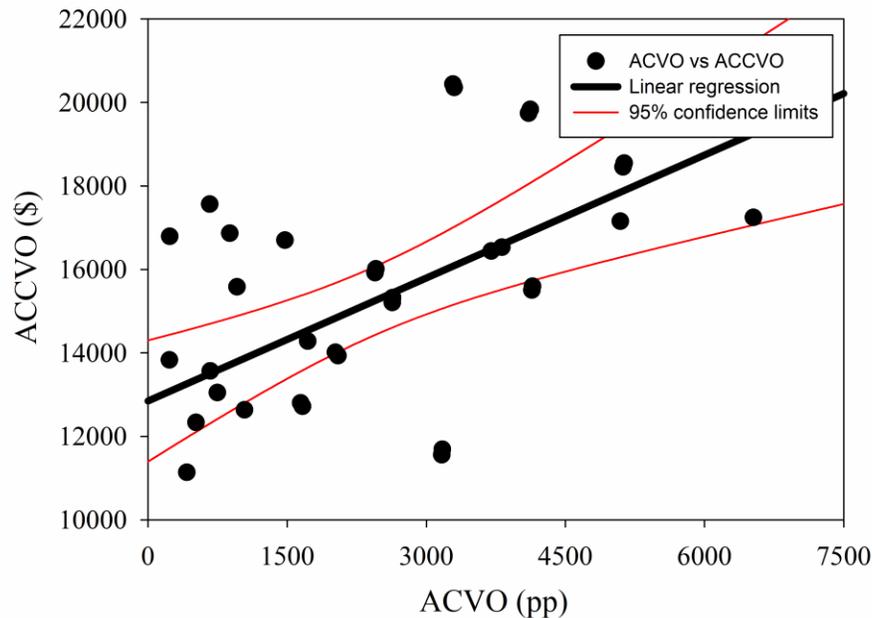
Como previamente disposto, a principal estratégia que pode ser proposta para a melhoria do ajuste da equação aos cenários avaliados seria a ampliação do período reportado em conjunto com o aumento da frequência das análises, resultando assim em um acréscimo ao grupo de dados utilizados para a construção das regressões em busca de um melhor ajuste às condições avaliadas.

6.4.3.3 Fator Econômico (ACCVO) e Fator Ambiental (ACVO)

A terceira regressão simples construída foi direcionada isolar e avaliar a relação entre as variáveis ambientais e econômicas atreladas a organização reportada. A representação gráfica dessa regressão é apresentada por meio da Figura 6-4, que também é descrita pela Eq. 9.

$$ACCVO = 12846,33 + 0,98 * ACVO \quad (\text{Eq. 9})$$

Figura 6-4 - Regressão linear simples entre os fatores econômicos e ambientais.



ACCVO – Avaliação do Ciclo de Vida Organizacional. ACCVO – Avaliação dos Custos do Ciclo de Vida Organizacional. Fonte: O autor (2023).

Diferentemente das outras regressões aqui apresentadas, a Eq. 9 é a única que apresenta uma correlação positiva entre os termos analisados. Nesse caso, o aumento dos impactos ambientais potenciais gerados pela organização reportada (ACVO) seria acompanhado pelo aumento dos custos totais do sistema para o período reportado avaliado. Ou seja, em adição aos resultados derivados da Eq. 7, essa regressão nos mostra que os cenários onde há maior preocupação com o perfil ambiental da empresa também são aqueles com menor custo associado. Esse ponto é de especial interesse, uma vez que comumente empresas acabam despriorizando suas obrigações ambientais com intuito de diminuir seus custos totais. A Eq. 9 e Gráfico 5-4 apontam que um maior engajamento com a gestão ambiental de uma corporação efetivamente diminuiria seus gastos associados. Porém, tal análise é relacionada ao estudo de caso, e análises similares deveriam ser aplicadas a outras organizações para a verificação dessa relação.

O baixo coeficiente de determinação dessa reta (0,32) novamente aponta que, com base nos dados disponíveis, o método é pouco explicativo, sendo que possivelmente outras variáveis não incluídas nesta avaliação contribuem para a relação entre essas variáveis. As mesmas recomendações quanto ao aumento do grupo de dados incluídos na análise também se aplicam a esse caso.

O tópico aprofunda nas discussões que podem ser levantadas sobre a abordagem proposta nessa tese.

6.4.4 Utilização e aplicabilidade do método por organizações

O estudo de caso apresentado no Capítulo 6 foi construído com base nos dados disponibilizados por uma empresa para o período reportado de um ano. Por mais que os dados sejam divididos em uma relativa granularidade (mensalmente), a construção de uma equação de regressão por meio do GLM se beneficiaria de um maior espaço amostral, que potencialmente auxiliaria no desenvolvimento de um método com melhor ajuste ao conjunto de dados disponíveis. Portanto, no caso da implementação do método desenvolvido em outras organizações, recomenda-se a ampliação do período reportado e frequência de análises para que mais dados sejam incluídos, o que aumentaria assim a profundidade da análise, resultando em uma melhor avaliação da influência da circularidade nos impactos ambientais e econômicos do sistema.

Dessa forma, maior valor pode ser exprimido da proposta desenvolvida nesta tese por meio de seu uso contínuo por organizações (ex: condução anual da avaliação). O aumento do período reportado aumenta também o espaço amostral incluído, promovendo assim uma avaliação maior e mais robusta da organização. Entretanto, o aumento na frequência de obtenção de resultados está atrelado a um maior número de avaliações individuais a ser conduzidas (ACVO, ACCVO, CTI), que pode ser uma limitação prática dessa estratégia.

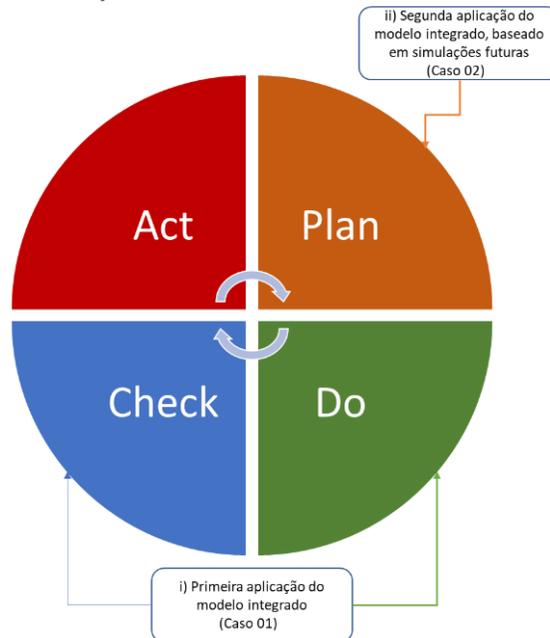
Este tópico visa responder a seguinte pergunta: “*Como analistas e tomadores de decisão poderiam utilizar os resultados dessa avaliação?*”. Primordialmente, é importante mencionar que a estratégia disposta nesta tese não oferece um resultado único, mas sim vários “sub-resultados” provindos das diferentes metodologias que a compõem, além de um melhor entendimento dos perfis ambiental, econômico e de circularidade da organização. Dentre os principais resultados que podem ser utilizados para tomadores de decisão, destacam-se:

- i. Lista, localização, e descrição de todos os fornecedores da organização;
- ii. Inventário de produtos e serviços necessários para a operação da organização durante o período reportado analisado;
- iii. Impacto ambiental potencial da organização durante o período reportado analisado;
- iv. Custo total para a operação da organização durante o período reportado analisado;
- v. Circularidade da organização durante o período reportado analisado;
- vi. Identificação dos principais contribuintes para os impactos ambientais potenciais e custos totais da organização;
- vii. Regressão múltipla para a avaliação da relação entre as três variáveis;
- viii. Regressões lineares para a avaliação entre as variáveis duas a duas;
- ix. Acesso a base de dados que possibilita o desenvolvimento de simulações para o atendimento de possíveis metas econômico-ambientais da organização.

Por meio do Caso 01, representado na Figura 4-1, tomadores de decisão poderiam principalmente utilizar essa estratégia para avaliar um período reportado passado. Os resultados acima listados poderiam então servir de base para o planejamento interno da organização ao desenvolver ou fortalecer práticas ambientais e/ou circulares benéficas ao sistema.

Ao aplicarmos o método desenvolvido ao ciclo “*Plan, Do, Check, Act*” (PDCA) (MOEN e NORMAN, 2009), uma metodologia comum para a gestão corporativa e ambiental de melhoria contínua de empresas, ele se enquadraria principalmente em dois pontos. A Figura 6-5 apresenta os principais momentos da gestão contínua onde o método integrado poderia ser implementado. O Caso 01 seria uma atividade listada durante as fases “Do” (fazer), pois o desenvolvimento desse estudo é um projeto que demandaria recursos internos considerativos, e “Check” (checar), já que os analistas poderiam já extrair informações importantes a serem passadas para os analistas, durante o desenvolvimento do método, e claro, após a finalização da análise das regressões múltiplas geradas pelo GLM para a avaliação do comportamento das variáveis analisadas. Após essa análise, os analistas poderiam utilizar os dados inventariados para construir novas análises simulativas de ACVO, ACCVO e IC a fim de planejar as práticas circulares e de gestão ambiental a serem implementadas no período reportado seguinte.

Figura 6-5 – Fases de implementação dos casos de uso de método integrado no ciclo PDCA.



Fonte: O autor (2023).

Por exemplo, se usarmos o caso da organização avaliada nos Capítulos 5 e 6 em uma primeira aplicação do método desenvolvido (Caso 01), analistas poderiam notar a correlação inversa entre os fatores CTI e ACVO para a organização e período reportado (Tópico 6.4.1), que atesta que o eventual aumento dos resultados da ACVO (aumento no impacto ambiental potencial da organização durante o ano avaliado) diminuiria a circularidade encontrada para o sistema. Ou seja, visando a melhoria contínua da organização, ao avaliar as informações extraídas do método desenvolvido durante a fase “Check” do ciclo PDCA, tomadores de decisão poderiam notar que seus atuais esforços para implementar práticas circulares têm surtido efeito devido a diminuição dos resultados da ACVO. Ademais, como já apresentado no Tópico 6.4.1, os analistas da organização poderiam usar a mesma linha de raciocínio para identificar que uma tendência similar acontece entre os aumentos dos resultados da ACVO e ACCVO desse período reportado. Portanto, para este estudo de caso, os analistas notariam que as estratégias circulares aplicadas trouxeram melhoras financeiras e ambientais no último período reportado.

Entretanto, caso a organização queira se aprofundar nas relações entre as três variáveis analisadas, ela pode optar por desenvolver avaliações simulativas adicionais (Caso 02) com base no período reportado anterior, e enquanto um novo período reportado não é finalizado. Nessa situação, munidos da base de dados desenvolvida para a avaliação inicial, os analistas da organização poderiam modelar o sistema novamente, mas agora se atentando aos *hotspots* encontrados na primeira análise. Por exemplo, uma simulação poderia ser feita na qual haja a redução ou substituição do uso de produtos contribuíssem fortemente para a categoria de impacto GWP, como por exemplo, o cacau e grão de bico (Tabela SM 04). Do ponto de vista ambiental e financeiro, outro ponto que poderia ser modelado é a substituição dos fogões a gás de cozinha (forte contribuinte para as categorias FDP e GWP) por fogões elétricos. Ademais, por mais que já altas, os projetistas poderiam avaliar qual seriam os efeitos econômico-ambientais do aumento das taxas de reciclagem e reuso da organização.

Com base nessas duas avaliações, os tomadores de decisão estariam mais bem equipados para empreender tendo a gestão econômico-ambiental da organização em mente. Dessa forma, as informações e resoluções encontradas seriam críticas para as partes “Plan” e “Do” do ciclo PDCA seguinte, o que culminaria em novas ações (“Act”) em prol da melhoria contínua da empresa nos tópicos aqui abordados.

No que tange a aplicabilidade do método desenvolvido, ressalta-se que ele seria melhor aplicado a organizações que têm relativa maturidade ambiental e financeira, a fim de certificar que as mesmas tenham o vasto conjunto de dados necessário para a condução dessas análises a dispor. Além disso, caso a organização tenha conhecimento e preocupação prévia com temas relacionados à gestão ambiental, ela estaria melhor preparada para a implementação das práticas de circularidade a eventual avaliação do possível benefício econômico-ambiental de sua implementação.

Vale ressaltar que devido a complexidade do método desenvolvido por essa tese, seu principal público alvo seriam analistas especializados na área de gestão ambiental que tem conhecimento prévio na aplicação de metodologias baseadas no pensamento do ciclo de vida. Destaca-se que, idealmente, o analista deveria ter prévia experiência na condução de ACVs, uma vez que as definições feitas durante o processo da ACVO são a base para a condução de todas as outras análises realizadas. Além disso, o analista deve ser capaz de realizar as devidas interpretações relacionadas a cada uma das metodologias antes que se chegue na fase de integração dos resultados por meio do GLM, para que o mesmo se certifique a integração dos resultados agregaria a organização-alvo, além de também apresentar os resultados das avaliações de forma estruturada a tomadores de decisão. Estes, por sua vez, se beneficiam dos resultados finais das análises do método descrito por essa tese, podendo melhor avaliar a influência da implementação de práticas circulares nos perfis ambientais e econômicos da organização.

6.5 DISCUSSÕES SOBRE MÉTODO INTEGRADO PARA A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ECONÔMICO-AMBIENTAL E DE CIRCULARIDADE DE ORGANIZAÇÕES

O método integrado desenvolvido é uma abordagem que pode auxiliar os tomadores de decisão a melhor entenderem a influência das práticas circulares de organizações no seu perfil ambiental e econômico. Tal abordagem se beneficia do mesmo grupo de dados e definições técnicas (fronteiras do sistema, cenários, objetivo de análise) para o desenvolvimento de três análises complexas que entregam individualmente informações relevantes para a gestão interna e futura da empresa. Devido a essa base comum a todas as avaliações, essa proposta, além de atender os objetivos iniciais de seu desenvolvimento, também apresenta uma estratégia que diminui o

tempo e esforço que seriam empregados pelo executor do projeto para a obtenção dos resultados individuais das análises.

O método disposto é principalmente baseado em uma análise *a posteriori* de um espaço temporal previamente delimitado. Ao aplicar o método descrito pela Figura 4-2 em uma organização, os analistas estariam então munidos com um grupo de dados que evidenciaríamos seus impactos ambientais potenciais, custos totais, e circularidade total do sistema. Além disso, a organização também teria em mãos os inventários de todos os aspectos e itens que influenciam direta ou indiretamente no em tais fatores. Por fim, a parte final da análise demonstraria as relações entre as três variáveis estudadas.

Com base em tais dados e resultados, o método permite aos tomadores de decisão a melhor planejar o futuro da organização com base em uma análise minuciosa de um período reportado (ao menos 1 ano) anterior. Isso possibilita que a organização estabeleça metas relacionadas com as três áreas estudadas pelo método, e, além disso, uma vez que o inventário e repositório de dados já foi estabelecido, a organização pode ainda criar simulações para melhor entender as mudanças necessárias para atender os critérios estabelecidos para fases futuras da operação da empresa.

O método integrado descrito pela Figura 4-2 foi testado por meio do estudo de caso (Capítulos 5 e 6) e vai além de uma ferramenta de integração de resultados e avaliação da influência de certas variáveis. É proposto um *framework* processual para melhor guiar o executor do projeto através das várias fases necessárias para a avaliação tríplice de uma organização. Ilustrado pela Figura 4-2, o *framework* desenvolvido funciona como um guia para praticantes que visam a aplicação parcial ou completa do método proposto. Por exemplo, se somente as avaliações de circularidade de impactos ambientais potenciais do sistema interessam a um tomador de decisão, ele pode optar por seguir o *framework* parcialmente, excluindo a parte direcionada à ACCVO e a integração metodológica proposta. Ademais, o *framework* conta com instruções e recomendações textuais adicionadas no intuito de melhor guiar pesquisadores futuros. Isto posto, ressalta-se que o *framework* apresentado pela Figura 4-2 é o principal produto dessa tese, uma vez que ele descreve o processo de construção do método integrado de avaliação econômico-financeira e de circularidade de organizações aqui proposto.

A fim de facilitar a aplicação do método integrado, o Quadro 6-1 apresenta um “passo-a-passo” para sua construção e utilização em 22 fases. Então, o Quadro 6-1 e as Figuras 4-1 e 4-2

podem ser utilizadas como guia processual para a construção e utilização desse método integrado. O quadro destaca procedimentos opcionais, resultados parciais encontrados durante a condução das avaliações e referências de apoio para cada fase.

Quadro 6-1 - Passo-a-passo para a avaliação integrada econômico-ambiental e de circularidade de organizações

#	Fase	Descrição e recomendações	Ref. de apoio
1	Definição da organização reportada	Seleção da organização a ser avaliada. Ressalta-se que a avaliação pode ser conduzida para uma parte e/ou setor da organização caso haja a clara definição de divisão dos dados a serem incluídos nas análises.	ISO (2014)
2	Definição do período reportado	Seleção do período avaliado. Recomenda-se um período mínimo de 01 ano (12 meses).	ISO (2014)
3	Definição de objetivo, escopo, cenários e fronteiras do sistema	Seleção do objetivo, escopo, fronteiras dos sistemas, assim como os cenários a serem desenvolvidos. Recomenda-se que os cenários a serem desenvolvidos variem as práticas circulares implementadas para avaliar seu efeito econômico-ambiental. As fronteiras do sistema devem ser condizentes com as escolhas da Fase #1.	ISO (2014)
4	Definição da unidade e fluxos reportados	Seleção da unidade reportada (expressão quantitativa do desempenho da organização em estudo para uso como referência) e fluxos reportados (medida quantitativa das saídas da organização relatora). Estas definições serão utilizadas para as três avaliações individuais a serem conduzidas.	ISO (2014)
5	Levantamento de dados e construção do ICV	O conjunto de dados deve englobar a quantidade de cada aspecto ambiental necessários para a condução de cada processo interno, além de seus custos. Recomenda-se o uso do balanço financeiro anual e documentos de gestão processual interna.	ISO (2006); ISO (2014)
6	Definição da frequência da condução das avaliações individuais	Com base no conjunto de dados levantados na Fase #4, os analistas devem decidir qual será a frequência das análises individuais (ACVO, ACCVO, CTI). Recomenda-se que a maior granularidade de dados possível a fim de gerar maior ajuste ao GLM.	Capítulo 4
7	Seleção de software, base de dados e métodos de AICV	Esta etapa é direcionada a definições de software para a condução da avaliação ambiental (ACVO). Recomenda-se o uso de bases de dados que apresentem <i>datasets</i> regionalizados para avaliação da organização reportada. A fim de facilitar as fases posteriores da avaliação, o método de AICV selecionado deve ser capaz de conduzir avaliações a nível <i>endpoint</i> .	Capítulo 4
8	Seleção de IC	Esta etapa é direcionada a definições para a condução da avaliação de circularidade. O IC a ser selecionado deve ser capaz de calcular a circularidade do sistema avaliado de forma a abranger uma fronteira do berço-ao-túmulo. Como o cálculo da circularidade ainda não é normatizado, recomenda-se que o praticante consulte artigos científicos que conduziram revisões bibliográficas de IC para a sua seleção.	Saidani et al. (2019); de Oliveira et al (2021); Rossi et al. (2021); Capítulo 4

9	Seleção de indicadores econômicos	Esta etapa é direcionada a definições de software para a condução da avaliação econômica (ACCVO). O principal indicador econômico a ser avaliado é o custo total da operação da organização durante o período reportado (soma de todos os custos). Como a ACCV e a ACCVO não são normatizadas, recomenda-se a consulta ao guia de práticas disposto na coluna à direita caso necessário. <i>Opcional:</i> o condutor da análise pode optar por avaliar outros indicadores econômicos (valor presente líquido, taxa interna de retorno, etc.). Entretanto, tais indicadores são secundários e não influenciariam no desenvolvimento do método integrado apresentado.	Swarr et al. (2011); Capítulo 4
10	Avaliação ambiental	Condução da ACVO para a organização e período reportado. Recomenda-se que os processos avaliados durante a ACVO sejam os mesmos para as Fases #11 e #12. Resultado parcial: Ao fim dessa fase o tomador de decisão encontrará os impactos ambientais potenciais da operação da organização durante o período reportado.	Capítulo 5
11	Avaliação de circularidade	Condução da avaliação da circularidade para a organização e período reportado. Resultado parcial: Ao fim dessa fase o tomador de decisão encontrará a circularidade da operação da organização durante o período reportado.	Capítulo 5
12	Avaliação econômica	Condução da ACCVO para a organização e período reportado. Resultado parcial: Ao fim dessa fase o tomador de decisão encontrará o custo total da operação da organização durante o período reportado.	Capítulo 6
13	Compilação de resultados	Recomenda-se que os resultados das três análises sejam compilados em tabelas que destaquem os resultados totais das avaliações individuais para o período reportado completo, assim como seus resultados discretizados na frequência escolhida durante a Fase #6. Como exemplo, recomenda-se a consulta aos Tabelas 6-6 a 6-9 deste texto.	Tópico 6.3
14	Seleção de software analítico	Uma vez completadas as avaliações individuais do estudo, o praticante deve definir qual software de cálculo estatístico será utilizado para a construção das equações de regressão múltipla. Exemplos de software são: <i>Statistica, Stata, Excel, etc.</i>	Tópico 4.3.5
15	Transposição dos resultados compilados para o software analítico	Os encontrados nas tabelas de resultados compilados definidos na Fase #13 devem ser transpostos para o software selecionado na Fase #14. Os dados das três análises (ACVO, ACCVO e IC) para cada cenário avaliado são dispostos em colunas no software (três colunas para cada cenário, sendo que as linhas são os resultados das análises para a frequência desejada).	Tópico 4.3.5
16	Seleção das variáveis desfecho e variáveis preditoras	Nessa etapa o praticante deve selecionar qual será a variável desfecho (y) da equação, assim como as variáveis preditoras (x), conforme disposto na Eq. 6. Recomenda-se a definição da variável desfecho como a circularidade, assim a equação será construída de forma a apresentar o efeito das variações ambientais e financeiras na circularidade da organização reportada durante o período selecionado.	Tópico 4.3.5

17	Construção do GLM	Com base no conjunto de dados imputados ao software analítica, o praticante seleciona a opção de construção de um GLM por meio de uma regressão múltipla com base na definição de variáveis feita na Fase #15. O resultado é uma equação que segue o formato descrito na Eq. 6.	Tópico 6.4
18	Avaliação do comportamento entre as variáveis	Com base na equação encontrada (similar a Eq. 7 deste trabalho), o analista pode extrair informações gerais sobre a relação entre as variáveis por meio da avaliação do coeficiente de determinação (R^2), coeficientes lineares e comportamento geral da equação. Exemplos de análises similares podem ser encontradas no Tópico 6.4.	Tópico 6.4
19	Avaliação com base no período reportado anterior (Caso 01)	Com base na equação construída, o analista pode conduzir análises com base no Caso 01, direcionado a avaliações das alterações econômico-ambientais causadas pela implementação de práticas circulares em organização em um período anterior à realização da análise. Exemplos de análises similares podem ser encontradas no Tópico 6.4.1.	Tópico 5.4.1
20	<i>Opcional:</i> Construção de regressões lineares simples	Os dados compilados conforme as Fases #13 e #15 também podem ser utilizados para a construção de regressões simples entre apenas duas das três variáveis principais avaliadas nessa proposta. Exemplos de avaliações podem ser encontradas no Tópico 6.4.3.	Tópicos 6.4.3
21	Identificação de pontos de melhoria	Com base nos resultados das avaliações individuais (Fases #10 a #12) e a aplicação do GLM (Fases #15 a #21), analistas e tomadores de decisão podem identificar pontos de melhorias na operação da organização e propor estratégias de melhoria por meio da avaliação do comportamento entre as variáveis ambientais, econômicas e de circularidade de uma organização reportada durante um determinado período.	Capítulo 6
22	<i>Opcional:</i> Condução de simulações futuras (Caso 02)	Com base na equação construída, o analista pode conduzir análises com base no Caso 02, que visa fornecer subsídios a tomadores de decisão que tem a intenção de planejar previamente as possíveis repercussões financeiras e ambientais de práticas ambientais que venham a ser empregadas em um período futuro. Como disposto no Tópico 6.4.2, esse caso requer que todas as avaliações sejam refeitas e que uma outra equação de regressão seja desenvolvida. Ressalta-se que assimulações devem ocorrer com base em mudanças no ICV levantado para o período reportado. Tais alterações devem ser feitas por meio de um analista especializado a fim de manter a coerência dos fluxos de massa e energia a serem analisados.	Tópico 6.4.2

Fonte: O autor (2023).

Entretanto, com base nas informações ilustradas pela Figura 4-2 e nos resultados do estudo de caso apresentado previamente, é importante que algumas ressalvas sejam levantadas.

Devido à grande variabilidade de IC que se encontra na literatura (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021; ROSSI et al., 2020), o método foi desenvolvido para abarcar qualquer tipo de IC que apresente resultados quantitativos de organizações. Dentre outros fatores, o autor recomenda o uso de CTI devido, principalmente, a seu alinhamento ao Pensamento do Ciclo de Vida e apresentação de uma métrica direta para a circularidade do sistema avaliado (%).

Como apresentado no Capítulo 5, os resultados do CTI devem ser tratados com cuidado, especialmente quando o sistema analisado é relacionado ao ciclo biológico. Por exemplo, nota-se que o CTI recompensa sistemas onde haja o consumo de produtos alimentares com níveis de circularidade máximos para o processo analisado, que influencia diretamente nos resultados gerais da organização estudada, especialmente quando ela é do setor agroalimentício como no estudo de caso avaliado. O mesmo é verdade para a avaliação da compostagem pelo CTI, que considera a uma circularidade máxima para tal método de gestão de resíduos. Destaca-se que cada IC tem sua particularidade, e que os entendimentos de seus detalhes metodológicos devem ser levados em conta pelo executor antes da sua inclusão na proposta descrita pela Figura 4-2. Como argumentado no Capítulo 4, é importante salientar que caso outro IC além do CTI seja escolhido para a inclusão nessa proposta, o mesmo deve atender aos requisitos mínimos apresentados na fase “definição de escopo” do *framework* apresentado.

Outra limitação que pode ser levantada sobre a abordagem proposta se relaciona ao “Caso 2: simulação futura”, apresentado no Tópico 6.4.2. É importante mais uma vez frisar que simulações não devem ser conduzidas com a alteração direta da equação de regressão múltipla (passo #18 do Quadro 6.1), exemplificada no estudo de caso apresentado pela Eq. #7. Não é possível essa alteração direta da regressão múltipla pois ela é criada com base em um inventário específico de aspectos ambientais e financeiros, sendo que a variação direta da equação olharia somente para os resultados finais, sem respeitar a necessária alteração os insumos e serviços que baseiam a operação da organização durante tal período. Caso tomadores de decisão estejam interessados em desenvolver tal tipo de análise, é necessário que os resultados do Caso 1 sejam utilizados como base para a identificação de pontos de mudança nos resultados do sistema. Nessa situação, o analista/time responsável pela condução da análise deve recorrer ao ICV desenvolvido

(passo #5 do Quadro 6-1), de construir um sistema paralelo ao já estudado, o que, por fim, resultará em uma nova equação de regressão múltipla.

Por fim, para o melhor uso prático da estratégia de análise apresentada, recomenda-se que o analista (ou time) aplica que o método integrado descrito por essa tese, caso opere dentro de uma organização, seja também a pessoa responsável pela coleta e controle dos dados analisados. Dessa forma, caso a organização opte por trabalhar com planejamentos futuros relacionados aos resultados da avaliação decorrida, o analista teria o conhecimento necessário para a condução das três sub-avaliações (ACVO, ACCVO, IC), além de poder conduzir simulações com base nos dados já coletados para o atendimento de metas futuras da organização no que tange às áreas avaliadas. Ademais, devido ao grande volume de informações necessários para a realização dessa avaliação integrada, uma gestão centralizada dos dados facilitaria que o trabalho ocorra de forma mais eficiente.

7 CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de uma metodologia única para avaliar a relação entre a circularidade e os custos e impactos ambientais de organizações é fundamental para o melhor entendimento e difusão da EC no âmbito empresarial. E ainda, além de ampliar as discussões e atenção dadas ao tema, tal procedimento tornaria a gestão econômico-ambiental de organizações mais eficiente, uma vez que, munidos de uma base de dados central que abranja os itens necessários para o funcionamento da organização e seus respectivos custos, executores de tais projetos poderiam desenvolver uma avaliação tripla de um determinado período reportado.

Esta avaliação é capaz de avaliar a circularidade, custos totais e impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de uma organização e suas interações, reduzindo assim o tempo, recursos e esforços necessários para o desenvolvimento de tais análises. A análise em questão foca prioritariamente em um período reportado anterior ao momento de análise. Entretanto, com base em tais resultados e com a vasta base de dados criada durante o processo de análise, a organização pode então desenvolver simulações para o planejamento futuro da organização no intuito de encontrar um melhor balanço entre as três variáveis estudadas e atingir suas metas corporativas internas.

A construção do método começou com a escolha das metodologias capazes de conduzir conjuntamente tais análises (Capítulo 4). Posteriormente, tal proposta foi aplicada a um estudo de caso real para o desenvolvimento e refinamento do método proposto (Capítulos 5 e 6). Este capítulo as principais limitações do trabalho, descritas no tópico abaixo, além de dicorrer sobre o atendimento do aos objetivos da tese, e principais conclusões tiradas do trabalho.

7.1 ANÁLISE CRÍTICA E LIMITAÇÕES

O método integrado é o primeiro estudo publicado (nesta data) que visa aliar a avaliação dos impactos ambientais potenciais de uma organização, sua circularidade, e os custos totais associados à sua operação. Essa abordagem holística é baseada em metodologias de Pensamento de Ciclo de Vida e pelas normas que as regem, além da inclusão de IC seguem o estado da arte em termos de cálculo da circularidade de corporações. A estratégia aqui enunciada apresenta,

portanto, um paço inicial na evolução da quantificação dos benefícios (se existentes) da implementação de práticas circulares por organizações.

Ainda que os objetivos propostos tenham sido contemplados, algumas limitações puderam ser identificadas no desenvolver da presente tese. Estas limitações devem ser entendidas como possibilidades para o aperfeiçoamento da abordagem metodológica proposta, bem como para pesquisas futuras. Uma vez que a proposta apresentada por essa tese é composta pela aplicação concomitante de algumas metodologias, os parágrafos a seguir foram divididos de forma a enunciar as limitações condizentes com cada parte dessa forma de avaliação.

A principal limitação ligada à ACVO ressalta os pontos de inovação trazidos pela pesquisa aqui apresentada: ainda há uma quantidade muito pequena de pesquisas e projetos que utilizam a ACVO. A necessidade de conduzir estudos de ACV a escopos que abranjam organizações inteiras somente recebeu uma estruturação metodológica por meio da ISO 14072 (2014) e do relatório publicado pela UNEP (2015). Entretanto, essa abordagem ainda não recebeu grande atenção por parte da comunidade científica, limitando assim o número de exemplos e estudos de casos que demonstram sua aplicação. O trabalho de Martínez-blanco et al. (2020), que discorre sobre os desafios encontrados pela aplicação da ACVO a 12 organizações é o principal recurso atualmente encontrado em literatura. Portanto, a novidade dessa abordagem é contribuição com exemplos práticos para a execução de uma ACVO e sua possível integração com outras metodologias de avaliação corporativa.

A falta de normatização foi a principal limitação encontrada em relação às avaliações econômicas (ACCVO). Por mais que existam guias práticos como a publicação de Swarr et al. (2011), poucas diretrizes e estudos de caso podem ser encontrados para o tema. Além disso, todos os exemplos encontrados são direcionados a produtos e/ou serviços, sendo que a aplicação dessa metodologia a nível organizacional e a terminologia “ACCVO” foi proposta nessa tese para os fins aqui intencionados.

Poucos são os estudos que apresentam IC capazes de avaliar a circularidade de organizações “nível meso”, sendo que a definição de um IC para a inclusão no método a ser aplicado no método integrado apresentado levou em conta o universo de IC divulgados até o momento de uma publicação prévia do autor e colaboradores, que conduziu uma revisão bibliográfica de IC voltados a produtos e organizações (DE OLIVEIRA; DANTAS; SOARES, 2021). Como disposto nos Capítulos 5 e 6, o indicador escolhido para o estudo de caso apresentado

nessa tese (CTI) apresenta suas próprias limitações (ex: altos *scores* para o consumo de produtos alimentícios), sendo que IC futuros possivelmente poderiam realizar as análises aqui realizadas com maior confiabilidade.

No que tange ao estudo de caso desenvolvido, pode-se levantar a disponibilidade de dados como uma das principais limitações. O estudo de caso foi conduzido durante o ano de 2020, devido à pandemia de COVID-19, houve dificuldades em encontrar organizações dispostas a compartilhar os seus dados de suas operações para um período reportado relativamente longo (mínimo de 1 ano). Ademais, o aumento do período reportado potencialmente melhoraria o espaço amostral dos dados analisados pelo GLM, provendo assim melhores análises da correlação entre os indicadores analisados. Entretanto, devido a tal situação adversa, não foi possível a aquisição de uma base de dados que abranja mais do que um ano durante o período de desenvolvimento dessa tese.

Ressalta-se que, como enunciado no Capítulo 6 e ilustrado pela Figura 4-1, o método desenvolvido pode ser utilizado como uma ferramenta para análise de um período reportado passado, ou simular projeções. Entretanto, essa abordagem tem seu melhor uso no primeiro caso, que compreende a análise das alterações econômico-ambientais causadas pela implementação de práticas circulares em sua organização em um período posterior à realização análise. Seu uso para o segundo caso só é recomendado caso possível quantificar previamente quais seriam as alterações ambientais e financeiras (mudanças no ICV) causadas pela implementação de possíveis práticas circulares. Nesse contexto, o melhor proveito dessa abordagem pode ser obtido quando analistas puderem dispor de dados consistentes de mais de um período reportado (ex: dados de mais de dois ou três anos seguidos). Dessa forma, por meio do uso desse maior conjunto de dados, uma equação geral mais para essa determinada organização poderia ser desenvolvida.

Uma limitação principal desse trabalho se refere a sua usabilidade. Devido à complexidade e particularidades das diferentes análises que compõe o método descrito por essa tese, destaca-se que o mesmo é direcionado ao uso de profissionais com bom entendimento e especialidade na área da gestão ambiental e pensamento do ciclo de vida. Tais analistas seriam responsáveis pela condução e interpretação dos resultados provenientes das análises descritas, que por meio da devida estruturação de resultados, poderiam ser levados a tomadores de decisão envolvidos na gestão econômico-ambiental da organização.

Ainda, ressalta-se que devido ao grande volume e especificidade dos dados necessários para a condução de todas as análises descritas nos tópicos anteriores, o método integrado

encontraria meu melhor uso por organizações que já apresentassem certa maturidade financeira e ambiental. Nesse contexto, organizações que já tem prévio conhecimento e contato com a aplicação de metodologias baseadas no Pensamento do Ciclo de Vida seriam as que mais se beneficiariam dessa abordagem, uma vez que menos recursos e tempo seriam necessários para a aplicação das análises, e ainda, caso possível, dados e análises anteriores poderiam ser utilizadas pelos analistas especializados durante a condução das avaliações.

Por fim, destaca-se que essa pesquisa inova ao apresentar a primeira tentativa de conciliar e avaliar de forma simultânea e integrada as variáveis ambientais, financeiras e de circularidade relacionadas a operação de organizações. O tratamento estatístico a qual os dados foram submetidos (GLM) foi escolhido devido a sua ampla aplicação do meio científico e facilidade de condução da análise, estruturada sob uma abordagem que já contava com várias subfases. Assim, esse trabalho cumpre seu objetivo de desenvolver uma abordagem para a avaliação integrada de tais fatores, sendo que trabalhos futuros poderiam explorar, dentre outros aspectos, outras metodologias estatísticas ou computacionais para avaliar os impactos econômico-ambientais da implementação de práticas circulares.

7.2 RESPOSTA A PERGUNTA DE PESQUISA

P: É possível avaliar a influência da implementação de práticas circulares nos custos e impactos ambientais potenciais de uma organização?

Com base na abordagem metodológica apresentada por essa tese, a resposta é **sim**. Para avaliarmos a influência que a implementação de práticas circulares pode causar sobre os custos e impactos ambientais potenciais de organizações deve-se primeiro conduzir tais avaliações individualmente. Em um estágio seguinte, os resultados dessas análises podem ser aplicados a uma avaliação estatística para o melhor entendimento da correlação entre tais fatores. A proposta aqui apresentada, ilustrada pela Figura 4-2, aponta o GLM como uma metodologia estatística relativamente simples e direta que pode ser aplicada a esse caso. Por meio do GLM, o executor do projeto pode avaliar a influência das variáveis preditoras (nesse caso, os custos do ciclo de vida e impactos ambientais potenciais da organização) no comportamento da variável desfecho (nesse caso, a circularidade da organização).

7.3 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

O objetivo central desta tese, definido como “**desenvolver um método para a avaliar a influência de práticas circulares nos custos e impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de organizações**”, foi alcançado com o apoio de um estudo de caso que possibilitou o desenvolvimento de um *framework* processual para análise tríplice do sistema, que culmina na avaliação da correlação entre os resultados da aplicação individual da IC, ACVO e ACCVO. Por sua vez, em relação ao atendimento aos objetivos específicos, tem-se:

(i) Estruturação um método integrado para a avaliar a relação entre a circularidade, impactos ambientais potenciais e custos do ciclo de vida de organizações: O primeiro objetivo específico dessa tese foi alcançado por meio da identificação de processos e critérios mínimos que todas as metodologias incluídas devem cumprir, sendo que os principais critérios são: atendimento ao Pensamento do Ciclo de Vida, definição de um único objetivo e escopo de análise, e possibilidade do uso dos dados de um mesmo ICV para todas as metodologias.

(ii) Construção um *framework* processual para a avaliação integrada proposta: Esse objetivo foi alcançado por meio do desenvolvimento do *framework* processual ilustrado pela Figura 4-2, que apresenta todas as fases e possíveis recomendações para o desenvolvimento de avaliações similares. Esse *framework* foi construído por meio a tentativa de conduzir tais análises simultaneamente em uma organização, ilustrando, portanto, as fases necessárias para a condução dessas avaliações com base em uma experiência real.

(iii) Avaliar a aplicabilidade do modelo por meio de um estudo de caso: O terceiro objetivo específico dessa tese foi alcançado por meio da aplicação do método proposto a uma empresa do setor agroalimentar, levando em conta um período reportado de Janeiro a Dezembro de 2020.

7.4 CONCLUSÃO GERAL

Com base na integração metodológica entre ACVO, ACCVO e IC, foi desenvolvido um *framework* processual para auxiliar executores de projetos similares. **Desta forma, esta tese cumpre seu papel ao contribuir com o avanço científico ligado à EC e a métodos de avaliação**

organizacional baseados no Pensamento do Ciclo de Vida. Assim sendo, esse trabalho apresenta uma ferramenta para tomadores de decisão interessados na avaliação individual da circularidade, custos e impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de organizações, além de também proporcionar a análise da relação entre tais fatores dentro de um período reportado.

Ademais, outras conclusões puderam ser tecidas a partir do desenvolvimento dessa tese. Primeiro, destaca-se a falta de maturidade da ACVO em literatura. Por mais que essa metodologia seja guiada pela ISO 14072 (2014) e pelo guia desenvolvido pela UNEP (2015) a cerca de uma década antes do momento de escrita desta tese, poucos estudos que a empregaram podem ser encontrados em literatura. Possivelmente, a maior barreira para popularização é a grande quantidade de dados que uma empresa precisa aganriar para sua aplicação. Além disso, o processo da ACVO, por mais que minucioso e capaz de apontar os principais pontos críticos do perfil ambiental da organização, requer ainda grande expertise no analista em sua condução. Nota-se, porantanto, que tomadores de decisão comumente utilizam outras metodologias de contabilidade ambiental para a avaliação dos impactos ambientais a nível organizacional, mesmo que estas sejam como detalhistas, como por exemplo o Greenhouse Gas Protocol Corporate Standards (GHG protocol, 2015).

Durante o curso desse trabalho notou-se também que o processo de seleção de IC pode ser desafiador. Por mais que existam uma grande variedade de IC em literatura, a maioria foi desenvolvida para casos e setores específicos, dificultando sua utilização em uma aplicação generalista, a principalmente a nível organizacional. Como demonstrado em um trabalho prévio do autor e colaboradores (de Oliveira et al., 2021), grande atenção ainda é dada a circularidade de produtos, sendo que o desenvolvimento de IC nível organizacional ainda pode ser destacado como um gap científico da área de pesquisa que envolve a EC.

Por último, destaca-se que o desenvolvimento de métodos e estratégias que unifiquem ou simplifiquem o processo de avaliação econômico-ambiental e de circularidade de organizações, como o descrito por essa tese, seriam fundamentais para o melhor entendimento e difusão da EC no âmbito empresarial. Entretanto, para tal, as organizações alvo deveriam contar com um certo grau de maturidade ambiental e financeira, a fim de certificar que os dados necessários para a análise estejam disponíveis, e que a mesmas contribuiriam para melhoria da gestão ambiental de circularidade da organização.

7.5 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível identificar algumas lacunas que possivelmente podem contribuir com a evolução dos temas de pesquisa associados a esta tese. Além das sugestões brevemente apresentadas nas conclusões dos Capítulos 5 e 6, outras possibilidades para estudos e trabalhos futuros são indicadas a seguir:

- Revisitar o estudo de caso apresentado nos Capítulos 5 e 6 a fim de ampliar o período reportado analisado no intuito de avaliar possíveis alterações na correlação entre as variáveis analisadas.
- Aplicar o método integrado desenvolvido nessa tese em outras organizações, preferencialmente aquelas de partes de outros setores industriais.
- Aplicar o método integrado a um novo estudo de caso, porém, utilizando algum outro IC (ressalta-se que o IC escolhido, assim como o CTI, deve cumprir os critérios mínimos de inclusão descritos nessa tese).
- Explorar outros métodos estatísticos capazes de integrar os resultados das avaliações individuais a fim de avaliar os impactos econômico-ambientais da implementação de práticas circulares.
- Automatizar a proposta aqui enunciada por meio de um aplicativo ou software para gestão ambiental e de sustentabilidade de organizações.

8. REFERÊNCIAS

ALEJANDRINO, C.; MERCANTE, I.; BOVEA, M. D. Life cycle sustainability assessment: Lessons learned from case studies. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, p. 106517, 1 mar. 2021.

ALEXOPOULOS, E. C. Introduction to Multivariate Regression Analysis. *Hippokratia*, v. 14, n. Suppl 1, p. 23–28, dez. 2010.

ALFAIA, R. G. DE S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 1 dez. 2017.

AMMAR, M.; ZAYED, T.; MOSELHI, O. Fuzzy-Based Life-Cycle Cost Model for Decision Making under Subjectivity. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 5, p. 556–563, 1 maio 2013.

ARNOLD, K. F. et al. Reflection on modern methods: generalized linear models for prognosis and intervention—theory, practice and implications for machine learning. **International Journal of Epidemiology**, v. 49, n. 6, p. 2074–2082, 1 dez. 2020.

BALANAY, R.; HALOG, A. Charting Policy Directions for Mining’s Sustainability with Circular Economy. **Recycling**, v. 1, n. 2, p. 219–231, set. 2016.

BIBER-FREUDENBERGER, L. et al. Bioeconomy futures: Expectation patterns of scientists and practitioners on the sustainability of bio-based transformation. **Sustainable Development**, 2020.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 603–614, 1 jun. 2017.

BOKU (University of Natural Resources and Life Sciences of Vienna), 2019. Boku databases. Disponível em: <https://boku.ac.at/en/bib/literatursuche/digitale-bibliothek/datenbanken>. Acesso em abr. 14 2021.

BRANDÃO, A. S.; GONÇALVES, A.; SANTOS, J. M. R. C. A. Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126407, 1 maio 2021.

BRITISH STANDARDIZATION INSTITUTE (BSI). **Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations – Guide**, BSI Standards Limited 2017, 2017.

BRUNO, M. et al. The carbon footprint of Danish diets. **Climatic Change**, v. 156, n. 4, p. 489–507, 1 out. 2019.

CASA ORIGEM. **Sobre nós**. 2021. Available at: <https://casaorigem.com/aobre-nos/> Accessed May 11, 2021.

CHAI, B. C. et al. Which Diet Has the Least Environmental Impact on Our Planet? A Systematic Review of Vegan, Vegetarian and Omnivorous Diets. **Sustainability**, v. 11, n. 15, p. 4110, jan. 2019.

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

CIROTH, A. e SROCKA, M. How to obtain a precise and representative estimate for parameters in LCA - A case study for the functional unit. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 13, pp 265-277. 2008.

CREMER, A. et al. A framework for environmental decision support in cities incorporating organizational LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 11, p. 2204–2216, 1 nov. 2020.

CROWE, S. et al. The case study approach. **BMC Medical Research Methodology**, v. 11, n. 1, p. 100, 27 jun. 2011.

DAGEVOS, H.; LAUWERE, C. DE. Circular Business Models and Circular Agriculture: Perceptions and Practices of Dutch Farmers. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1282, jan. 2021.

D'AMATO, D.; VEIJONAHONEN, S.; TOPPINEN, A. Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. **Forest Policy and Economics**, v. 110, 2020.

DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 213–227, 1 abr. 2021.

DE CAMARGO, A. M. et al. The implementation of organizational LCA to internally manage the environmental impacts of a broad product portfolio: an example for a cosmetics, fragrances, and toiletry provider. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 1, p. 104–116, 1 jan. 2019.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS (DEFRA). **Guidance on applying the Waste Hierarchy**. 2011. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69403/pb13530-waste-hierarchy-guidance.pdf. Acesso em 15 Ago., 2022.

DE MENNA, F. et al. Life cycle costing of food waste: A review of methodological approaches. **Waste Management**, v. 73, p. 1–13, 1 mar. 2018.

DE OLIVEIRA, C. T.; DANTAS, T. E. T.; SOARES, S. R. Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 455–468, 1 abr. 2021.

DE SOUZA JUNIOR, H. R. A. et al. Environmental impacts of the Brazilian energy mix – A LCA approach of the past, present, and future scenarios. **Simpósio Mundial de Sustentabilidade - Conferência Internacional BRIDGE 2019**, p. 244–253, 2019.

DE SOUZA JUNIOR, H. R. A. et al. Measuring the environmental performance of a circular system: Emergy and LCA approach on a recycle polystyrene system. **Science of The Total Environment**, v. 726, p. 138111, 15 jul. 2020.

D'EUSANIO, M. et al. Social Organizational Life Cycle Assessment: an approach for identification of relevant subcategories for wine production in Italy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 6, p. 1119–1132, 1 jun. 2020.

DEV, N. K.; SHANKAR, R.; QAISER, F. H. Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, 2020.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2741–2751, 20 jan. 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Circularity Indicators: An Approach to Measure Circularity**. Methodology & Project Overview, Cowes, UK. 2015. Disponível em: . Acesso em 15 Ago. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Completing the picture: How the circular economy tackles climate change**. 2019. Ellen MacArthur Foundation Publishing. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>. Acesso em 15 Ago. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Cities and Circular Economy for Food**. 2019. Ellen MacArthur Foundation Publishing. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/cities-and-circular-economy-for-food>. Acesso em 15 Ago. 2022.

ESPOSITO et al. Towards circular economy in the Agri-food sector. A systematic literature review. **Sustainability**, 12(18), 7401. 2020.

EUROPEAN PARLIAMENT. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. **Official Journal of the European Union**, 312, 3-30. 2008.

FABIANI, C., LONGO, S., PISELLO, A., CELLURA, M. Sustainable production and consumption in remote working conditions due to COVID-19 lockdown in Italy: An environmental and user acceptance investigation. **Sustainable Production and Consumption**. v. 28, pp1757-1771. 2021.

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**, v. 7, n. 3, p. 43, set. 2019.

FIGGE, F. et al. Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. **Ecological Economics**, v. 150, p. 297–306, 1 ago. 2018.

FORIN, S.; MARTÍNEZ-BLANCO, J.; FINKBEINER, M. Facts and figures from road testing the guidance on organizational life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 5, p. 866–880, 1 maio 2019.

FRANÇA, W. T. et al. Integrating life cycle assessment and life cycle cost: a review of environmental-economic studies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 2, p. 244–274, 1 fev. 2021.

FUSI et al. Evaluation of environmental impacts in the catering sector: the case of pasta. **Journal of Cleaner Production**, 132, 146-160. 2016.

FUSO NERINI, F. et al. Connecting climate action with other Sustainable Development Goals. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 8, p. 674–680, ago. 2019.

GARZA-REYES, J. A. et al. A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7319–7343, 2 dez. 2019.

GALLOPÍN, G. C. Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A system approach. **Environmental Modelling & Assessment**, v. 1, pp. 101-117.

GATTO, F.; RE, I. Circular Bioeconomy Business Models to Overcome the Valley of Death. A Systematic Statistical Analysis of Studies and Projects in Emerging Bio-Based Technologies and Trends Linked to the SME Instrument Support. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 1899, jan. 2021.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 1 fev. 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016.

GIORGI, S.; LAVAGNA, M.; CAMPIOLI, A. LCA and LCC as decision-making tools for a sustainable circular building process. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 296, p. 012027, jul. 2019.

GLOGIC, E.; SONNEMANN, G.; YOUNG, S. B. Environmental Trade-Offs of Downcycling in Circular Economy: Combining Life Cycle Assessment and Material Circularity Indicator to Inform Circularity Strategies for Alkaline Batteries. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1040, jan. 2021.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Carbon footprint and nutritional quality of different human dietary choices. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 77–94, 2018.

GUOGANG, Jiang; JING, Chen. Research on evaluation of circular economy development. **Proceedings of the 8th International Conference on Innovation & Management**. Kitakyushu, Japan. p. 153-157, 2011.

GHG Protocol. Greenhouse Gas Protocol: Corporate Standards. Washington, EUA. 2015. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em 7 de jun. de 2023.

HAHLADAKIS, H. e IACOVIDOU, E. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. **Journal of Hazardous Materials**, v.380, pp. 120887. 2019.

HARDIN, J. W. et al. **Generalized Linear Models and Extensions, Second Edition**. [s.l.] Stata Press, 2007.

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**, v. 26, p. 172–186, 1 abr. 2021.

HAUPT, M.; ZSCHOKKE, M. How can LCA support the circular economy?—63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 5, p. 832–837, 1 maio 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 1 fev. 2017.

HEIJUNGS, R.; SETTANNI, E.; GUINÉE, J. Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 9, p. 1722–1733, nov. 2013.

HOLZER, D. et al. Mind the gap: Towards a systematic circular economy encouragement of small and medium-sized companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126696, 20 maio 2021.

HOMRICH, A. S. et al. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525–543, 20 fev. 2018.

HOSSAIN, MD. U. et al. Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, p. 109948, 1 set. 2020.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 1 fev. 2017.

HUPPES, G. et al. Weighting environmental effects: Analytic survey with operational evaluation methods and a meta-method. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 7, p. 876–891, 1 ago. 2012.

ILYAS, M.; KASSA, F. M.; DARUN, M. R. Life cycle cost analysis of wastewater treatment: A systematic review of literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 310, p. 127549, 10 ago. 2021.

INGHELIS, D. et al. Towards optimal trade-offs between material and energy recovery for green waste. **Waste Management**, v. 93, p. 100–111, 15 jun. 2019.

INOUE, M. et al. A modular design strategy considering sustainability and supplier selection. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing**, v. 14, n. 2, 2020.

INSTITUTO LIXO ZERO BRASIL (ILZB), 2022a. Insitututo Lixo Zero Brasil – Sobre nós. Disponível em: <https://certificacaolixozero.com.br/sobre-nos/>. Acesso em Ago 2022.

INSTITUTO LIXO ZERO BRASIL (ILZB), 2022b. Insitututo Lixo Zero Brasil – Certificação Lixo Zero. Disponível em <https://certificacaolixozero.com.br/certificacao-lixo-zero/>. Acesso em Ago 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040:** Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14044:** E Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland, 2006b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14072:** Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines for Organizational Life Cycle Assessment. Geneva, Switzerland, 2014.

JAKHAR et al. When stakeholder pressure drives the circular economy: Measuring the mediating role of innovation capabilities. **Management Decision** 57, 904–920. 2019.

JUNGBLUTH, N.; KELLER, R.; KÖNIG, A. ONE TWO WE—life cycle management in canteens together with suppliers, customers and guests. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 5, p. 646–653, 1 maio 2016.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 190–201, 1 ago. 2018.

KHAN, S. A.; MUBARIK, M. S.; PAUL, S. K. Analyzing cause and effect relationships among drivers and barriers to circular economy implementation in the context of an emerging economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, p. 132618, 1 set. 2022.

KHARRAZI, A. et al. Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination energy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. **Ecological Indicators**, v. 37, p. 81–89, 1 fev. 2014.

KRAVCHENKO, M., MACALOONE, T., e PIGOSSO, D. To what extent do circular economy indicators capture sustainability? **Procedia CIRP**, v. 90, pp 31-60. 2020.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, 1 jan. 2018.

KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118531, 10 jan. 2020.

LAURIN, L. et al. Life cycle assessment capacity roadmap (section 1): decision-making support using LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 4, p. 443–447, 1 abr. 2016.

LI, T.; ROSKILLY, A. P.; WANG, Y. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. **Applied Energy**, v. 227, p. 465–479, 2018.

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** (Switzerland), v. 12, n. 12, 2020.

LINDSEY, J. K. **Applying Generalized Linear Models**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2008.

LÜSCHER, G., NEMECEK, T., ARNDORFER, M., BALÁZS, K., DENNIS, P., FJELLSTAD, W., FRIEDEL, J., GAILLARD, G., HERZOG, F., SARTHOU, J., STOYANOVA, S., WOLFRUM, S., JEANNERET, P. Biodiversity assessment in LCA: a validation at field and farm

scale in eight European regions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. v.22, pp 1483-1492. 2017.

MANNINEN, K. et al. Do circular economy business models capture intended environmental value propositions? ***Journal of Cleaner Production***, v. 171, p. 413–422, 10 jan. 2018.

MARTÍNEZ-BLANCO, J.; FORIN, S.; FINKBEINER, M. Challenges of organizational LCA: lessons learned from road testing the guidance on organizational life cycle assessment. ***The International Journal of Life Cycle Assessment***, v. 25, n. 2, p. 311–331, 1 fev. 2020.

MARTÍNEZ-BLANCO, J.; INABA, A.; FINKBEINER, M. Scoping organizational LCA—challenges and solutions. ***The International Journal of Life Cycle Assessment***, v. 20, n. 6, p. 829–841, 1 jun. 2015.

MCCULLOUGH, P., NELDER, J. A. *Generalized Linear Models*, 2nd ed., Chapman and Hall, New York, NY. 1989.

MCDOWALL, W. et al. Circular Economy Policies in China and Europe. ***Journal of Industrial Ecology***, v. 21, n. 3, p. 651–661, 1 jun. 2017.

MISTRETTA et al. Energy and environmental life cycle assessment of an institutional catering service: An Italian case study. ***Science of the Total Environment***, 657, 1150-1160. 2019.

MOEN, R., NORMAN, C. The History of the PDCA Cycle. Proceedings of the 7th ANQ Congress. 2009.

MORAGA, G. et al. Circular economy indicators: What do they measure? ***Resources, Conservation and Recycling***, v. 146, p. 452–461, 1 jul. 2019.

MORANDINI, N., PETROUDI, E., MOBASSER, H., DASTAN, S. Life Cycle Assessment of Crop Rotation Systems on Rice Cultivars in Northern Iran. *International Journal of Plant Production* volume. V. 14, pp 531-548. 2020.

NASPETTI et al. Consumer perception of sustainable practices in dairy production. ***Agricultural and Food Economics***, 9, 1-26. 2021.

NESS, D. Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 15, n. 4, p. 288–301, 2008.

NELDER, J. A., WEDDERBURN, R. W. M. “Generalized Linear Models”. *Journal of the Royal Statistical Society A* 132, pp. 370–384. 1972.

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**, v. 140, p. 305–312, 1 jan. 2019.

NIERO, M.; RIVERA, X. C. S. The Role of Life Cycle Sustainability Assessment in the Implementation of Circular Economy Principles in Organizations. **Procedia CIRP**, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April – 2 May 2018, Copenhagen, Denmark. v. 69, p. 793–798, 1 jan. 2018.

OLIVEIRA, M. et al. Circular Economy and the Transition to a Sustainable Society: Integrated Assessment Methods for a New Paradigm. **Circular Economy and Sustainability**, 22 mar. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/#goal_section Acesso em 15 Ago. 2022.

OTTONI, M.; DIAS, P.; XAVIER, L. H. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, 2020.

PADILLA-RIVERA, A.; RUSSO-GARRIDO, S.; MERVEILLE, N. Addressing the Social Aspects of a Circular Economy: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 7912, jan. 2020.

PALOMARES-RODRÍGUEZ, C. et al. Environmental, Technical, and Economic Evaluation of a New Treatment for Wastewater from Slaughterhouses. **International Journal of Environmental Research**, v. 11, n. 4, p. 535–545, 1 out. 2017.

PARCHOMENKO, A. et al. Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. **Journal of Cleaner Production**, 5 nov. 2018.

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**, v. 129, p. 81–92, 1 fev. 2018.

PEÑA, C. et al. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, pp.215–220, 2021.

PETERS, K. Methodological issues in life cycle assessment for remanufactured products: a critical review of existing studies and an illustrative case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 21–37, 10 jul. 2016.

PIRES, A.; MARTINHO, G. Waste hierarchy index for circular economy in waste management. **Waste Management**, v. 95, p. 298–305, 15 jul. 2019.

PRADO-LOPEZ, V. et al. Tradeoff Evaluation Improves Comparative Life Cycle Assessment: A Photovoltaic Case Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 4, p. 710–718, 1 ago. 2016.

PRIETO-SANDOVAL, V. et al. Key elements in assessing circular economy implementation in small and medium-sized enterprises. **Business Strategy and the Environment**, v. 27, n. 8, p. 1525–1534, 2018.

QING, Y.; QIONGQIONG, G.; MINGYUE, C.. Study and integrative evaluation on the development of circular economy of Shaanxi province. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1568-1578, 2011.

RABTA, B. An Economic Order Quantity inventory model for a product with a circular economy indicator. **Computers and Industrial Engineering**, v. 140, 2020.

RASHED, A. H.; SHAH, A. The role of private sector in the implementation of sustainable development goals. **Environment, Development and Sustainability**, 15 abr. 2020.

RASHIDI, J. et al. Life Cycle and Economic Assessments of Key Emerging Energy Efficient Wastewater Treatment Processes for Climate Change Adaptation. **International Journal of Environmental Research**, v. 12, n. 6, p. 815–827, 1 dez. 2018.

RAYMOND, H., MONTGOMERY, D. A Tutorial on Generalized Linear Models. *Journal of Quality Technology*. V. 29, pp274-291. 2018.

REAP, J. et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 5, p. 374, 1 ago. 2008.

RITZÉN, S.; SANDSTRÖM, G. Ö. Barriers to the Circular Economy – Integration of Perspectives and Domains. **Procedia CIRP**, 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on PSS. v. 64, p. 7–12, 1 jan. 2017.

RODRIGUEZ-ANTON, J. M. et al. Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 26, n. 8, p. 708–720, 17 nov. 2019.

ROSENBOOM, J., LANGER, R. e TRAVERSO, G. Bioplastics for a circular economy. **Nature Reviews Materials**. v. 7, pp. 117–137. 2022.

ROSSI, E. et al. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro–electronic cases. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, 2020.

RUFÍ-SALÍS, M. et al. Combining LCA and circularity assessments in complex production systems: the case of urban agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, p. 105359, 1 mar. 2021b.

SADHUKHAN, J. et al. Perspectives on “Game Changer” Global Challenges for Sustainable 21st Century: Plant-Based Diet, Unavoidable Food Waste Biorefining, and Circular Economy. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 1976, jan. 2020.

SAIDANI, M. et al. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542–559, 10 jan. 2019.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, v. 17, p. 48–56, 1 jan. 2016.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77–95, 2019.

SCHULTE, A.; MAGA, D.; THONEMANN, N. Combining Life Cycle Assessment and Circularity Assessment to Analyze Environmental Impacts of the Medical Remanufacturing of Electrophysiology Catheters. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 898, jan. 2021.

SMOL, M.; KULCZYCKA, J.; AVDIUSHCHENKO, A. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 669–678, 1 abr. 2017.

STANKEVIČIUS, A. et al. EU waste regulation in the context of the circular economy: peculiarities of interaction. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, v. 8, n. 2, p. 533–545, 2020.

SWARR, T. E. et al. Environmental life-cycle costing: a code of practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 5, p. 389–391, 1 jun. 2011.

TEERIOJA, N. et al. Pneumatic vs. door-to-door waste collection systems in existing urban areas: a comparison of economic performance. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1782–1791, 1 out. 2012.

UBANDO, A. T.; FELIX, C. B.; CHEN, W.-H. Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. **Bioresource Technology**, v. 299, p. 122585, 1 mar. 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM (UNEP). **Guidance on Organizational Life Cycle Assessment**. Paris, France. 2015. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/11256/166026/1>. Acesso em 15 Ago. 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM (UNEP). **Road testing organizational life cycle assessment around the world**. Paris, France. 2017. Disponível em: https://www.espacoeco.org.br/wp-content/uploads/2019/05/UNEP_Guia-de-Avaliac%CC%A7a%CC%83o-de-Ciclo-de-Vida-Organizacional-2017.pdf. Acesso em 15 Ago. 2022.

URAIN, I.; EGUREN, J. A.; JUSTEL, D. Development and validation of a tool for the integration of the circular economy in industrial companies: Case study of 30 companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 370, p. 133318, 10 out. 2022.

VALENTE, C. et al. Life cycle sustainability assessment of a novel slaughter concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122651, 1 nov. 2020.

VAN BELLEN, H. **Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

VAN HOOFF, G. et al. Indicator selection in life cycle assessment to enable decision making: issues and solutions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 8, p. 1568–1580, 1 set. 2013.

VERBENE, J. **Building Circularity indicators: an Approach For Measuring Circularity of a Building**. Dissertação de Mestrado. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Países Baixos. 2016

VISENTIN, C. et al. Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122509, 10 out. 2020.

VOGT GWERDER, Y. et al. Life beyond the grid: A Life-Cycle Sustainability Assessment of household energy needs. **Applied Energy**, v. 255, p. 113881, dez. 2019.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Circular Transition Indicators Case Studies** (2020a). Disponível em: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/ctitool.com/CTI+Case+Studies.pdf>. Acesso em 15 ago. 2021.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Circular Transition Indicators v2.0. Metrics for business, by business** (2020b). Disponível em: <https://www.wbcd.org/contentwbc/download/8240/127985/1>. Acesso em 15 ago. 2021.

WEN, Z.; MENG, X. Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: a case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New District. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 211-219, 2015.

WULF, C. et al. Review of Sustainability Assessment Approaches Based on Life Cycles. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5717, jan. 2019.

WUNI, I. Y. Mapping the barriers to circular economy adoption in the construction industry: A systematic review, Pareto analysis, and mitigation strategy map. **Building and Environment**, v. 223, p. 109453, 1 set. 2022.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J. Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126570, 15 maio 2021.

ZARTE, M.; PECHMANN, A.; NUNES, I. L. Decision support systems for sustainable manufacturing surrounding the product and production life cycle – A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 336–349, 10 maio 2019.

ZIMEK, M. et al. The Third Wave of LCA as the “Decade of Consolidation”. **Sustainability**, v. 11, n. 12, p. 3283, 14 jun. 2019.

ZERO WASTE INTERNATIONAL ALLIANCE (ZWIA). Zero Waste Definition. 2022. Disponível em: <https://zwia.org/zero-waste-definition/>. Acesso em: Ago. 2022.

APÊNDICE A

A tabela abaixo apresenta a lista de indicadores de circularidade direcionados a produtos (nano) e organização micro) revisados e analisados pelo autor e colaboradores na publicação “Nano and Micro Level Circular Economy Indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments” (de Oliveira et al., 2020).

#	Indicador	Escala de circularidade	Autores
1	Global Resource Indicator (GRI)	Nano	Adibi et al. (2017)
2	BIM-based Whole-life Performance Estimator (BWPE)	Nano	Akanbi et al. (2018)
3	Product Recovery Multi-Criteria Decision Tool (PR-MCDT)	Nano	Alamerew and Brissaud (2019)
4	Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies (MCEM-PLCS)	Nano	Alamerew et al. (2020)
5	Resource Efficiency Assessment of Products (REAPro)	Nano	Ardente and Mathieux (2014)
6	Sustainable Circular Index (SCI)	Micro	Azevedo et al. (2017)
7	Circular Building Assessment Prototype (CBA)	Nano	BAMB (2020)
8	Material Efficiency in Supply Chains Spreadsheets (MESCS)	Micro	Braun et al. (2018)
9	Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)	Nano	Cayzer et al. (2017)
10	Circular Gap (CG)	Nano and Micro	Circle Economy (2018)
11	Product Circularity Improvement Program (PCIP)	Nano	Circularity IQ and KPMG (2020)
12	C2C Indicators	Nano	C2C (2014)
13	Circularity Index (CI)	Nano	Cullen (2017)
14	Circular Economy Index (CEI)	Nano	Di Maio and Rem (2015)
15	Circularity Check (Check)	Nano and Micro	Ecopreneur (2019)
16	Material Circularity Indicator (MCI)	Nano and Micro	EMF and Granta (2015)
17	Circulytics (CYT)	Micro	EMF (2020)
18	Circular Economy Toolkit (CET)	Nano	Evans and Bocken (2013)
19	EoL indices (EoLi)	Nano	Favi et al. (2017)
20	Longevity and Circularity (L&C)	Nano	Figge et al. (2018)

21	Circular Economic Value (CEV)	Nano	Fogarassy et al. (2017)
22	Resource Duration Indicator (RDI)	Nano	Franklin-Johnson et al. (2016)
23	Economic-environmental Indicators (EEI)	Nano	Fregonara (2017)
24	Circularity Measurement Toolkit (CMT)	Micro	Garza-Reyes et al. (2019)
25	Circularity Assessment Model (CAM)	Micro	Giacomelli et al. (2018)
26	Set of Indicators to Assess Sustainability (SIAS)	Micro	Golinska et al. (2015)
27	Circular Economy Performance Indicator (CPI)	Nano	Huysman et al. (2017)
28	Circular Economy Benefit Indicators (CEBI)	Nano	Huysveld et al. (2019)
29	End of Life Best Practice Indicators (BPI)	Nano	Jiménez-Rivero and García-Navarro (2016)
30	Closed Loop Calculator (CLC)	Nano	Kingfisher (2014)
31	Mine site MFA Indicator (MI)	Micro	Lèbre et al. (2017)
32	End-of-Life Index	Nano	Lee et al. (2014)
33	Evaluation Index System of CE for PCFs (CE-PCF)	Micro	Liang et al. (2018)
34	Product-Level Circularity Metric (PCM)	Nano	Linder et al. (2017)
35	Input-Output Balance Sheet (IOBS)	Nano	MarcoCapellini (2017)
36	Sustainability Performance Indicators (SPI)	Nano	Mesa et al. (2018)
51	Product Recycling Desirability Index (PRDI)	Nano	Mohamed Sultan et al. (2017)
37	Multidimensional Indicator Set (MIS)	Nano	Nelen et al. (2014)
38	Assessment of Circular Economy Strategies at the Product Level (APL)	Nano	Niero and Kalbar (2019)
39	Circular Economy Measurement Scale (CEMS)	Micro	Nuñez-Cacho et al. (2018)
40	Reuse Potential Indicator (RPI)	Nano	Park & Chertow (2014)
41	Environmental Sustainability of Food Packaging indicators (FPI)	Nano	Pauer et al. (2019)
42	Circ(T)	Nano	Pauliuk et al. (2017)
43	Systems Indicators for Circular Economy Dashboard (SICED)	Nano and Micro	Pauliuk (2018)
44	PRP Circular e-Procurement Tool (PRP) and The ReNtry®-module	Nano	Rendemint (2016)
45	Circular Pathfinder (CP)	Micro	ResCoM (2017)

46	Circularity Calculator (CC)	Nano	ResCoM (2017)
47	Material Input Per Service Delivered (MIPS)	Nano and Micro	Ritthoff et al. (2002)
48	Circular Business Model Set of Indicators based on Sustainability (CBM-IS)	Nano and Micro	Rossi et al. (2020)
49	Improved Water Circularity Index (WCI)	Micro	Sartal et al. (2020)
50	Circularity of Material Quality (QC)	Nano	Steinmann et al. (2019)
52	Ease of Disassembly Metric (eDiM)	Nano	Vanegas et al. (2018)
53	Economic-Environmental Remanufacturing (EER)	Nano	van Loon and van Wassenhove (2018)
54	Recycling Indices (RIs) for the CE	Nano	Van Schaik and Reuter (2016)
55	Expended Zero Waste Practice Model (ZWP)	Micro	Veleva et al. (2017)
56	Building Circularity Indicators (BCI)	Nano	Verbene (2016)
57	Circularity Transition Indicators (CTI)	Micro	WBCSD (2020)
58	Material and Energy Circularity Indicators (MECI)	Micro	Zore et al. (2018)

APÊNDICE B

MATERIAL SUPLEMENTAR DO ARTIGO APRESENTADO NO CAPÍTULO 5

Assim como o artigo científico apresentado o Capítulo 5, o material suplementar relacionado a essa publicação foi mantido em língua inglesa, uma vez que foi retirado do artigo publicado.

ASSUMPTIONS

1.1 OLCA

- All systems have the same technical performance to the referring flux;
- Whenever possible, regionalized datasets were to model de foreground processes;
- Transportation of goods was modelled through the dataset transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | Cutoff, U – RoW; Transportation of employees was modelled through the dataset transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 | Cutoff, U – GLO or transport, regular bus | Cutoff, U – GLO;
- Transport was calculated based on distance from production site/retailer to the restaurant. When that information lacked, distance from the supplier site to the restaurant was used.
- Whenever information was not available, monthly averages or invoices were used.
- The weight of some items were not available by the reported organization or the supplier, in these cases, products and similar items were weighed or approximations were made according to data from other suppliers.
- The weight of some vegetables and greenery was approximated using a national weight/unit database of these items.
- Substitutions in Scenario 2: Coconut oil substituted for Butter, from cow milk; Coconut milk substituted for Cow milk; Tofu substituted for Pork, chop, raw; Soybean, Soybean meal substituted for Chicken, breast, raw; Chickpea substituted for fish, marine; Tabbuleh (substitution for local similar dish) substituted for Beef, steak or beef steak; Proportions used in the substitution followed the advice of a third party professional experienced in the food service sector.

- Substitutions in Scenario 3: All substitutions applied to Scenario 2; decrease of 2/3 *packaging glass, white*; 1/3 of *packaging glass, white* substituted for *packaging film*; 1/3 of *packaging glass, white* substituted for *kraft paper*; *packaging film* and *waste packaging paper* (sent to recycling) now sent to sanitary landfill; EoL of all solid waste substituted for *municipal solid waste, sanitary landfill* // exclusion of transports to composting and recycling sites.
- Recycling was modelled following the recycling rates provided by the CTI (BoKU database). The percentage of actual recovery of materials was estimated using the BOKU database. Actual recovery rate as 29% for plastic and 62% for paper. Recovery potential of paper and plastic was considered 90% (10% of the waste stream sent to recycling was not recyclable).

1.2 CTI

- Inflows were either considered 100% circular or 100% linear.
- Most of the materials of the biological cycle entered as a circular inflow, while the materials of the technical cycle (since they are not recovered) entered as a linear inflow.
- Renewable inflow of the biological cycle is considered only for materials from the regenerative production system, meat, despite being from the biological cycle, does not enter as regenerative.
- The percentage of actual recovery of materials was estimated using the BOKU database. Actual recovery rate as 29% for plastic and 62% for paper.
- Recovery potential of paper and plastic was considered 90% (10% of the waste stream sent to recycling was not recyclable).
- The mass of one meal served was considered as 0.4 kg.
- The meals served were considered as a 100% recovery potential, as indicated by the cascading hierarchy for edible products in the manual.
- The materials that were intended for reuse are the *packaging glass, white*.
- Substitutions in Scenario 2: mass of vegetable protein (circular inflow) replaced by animal protein (linear inflow). Proportions used in the substitution followed the advice of a third party professional experienced in the food service sector.

- Substitutions in Scenario 3: same substations applied to Scenario 2; decrease of 2/3 *packaging glass, white*; 1/3 of *packaging glass, white* substituted for *packaging film*; 1/3 of *packaging glass, white* substituted for *kraft paper*; *packaging film* and *waste packaging paper* (sent to recycling) now sent to sanitary landfill; EoL of all solid waste substituted for *municipal solid waste, sanitary landfill*.

1.3 WHI

- 100% of the waste reaches the final disposal (regardless of the technique used)
- All glass containers, both food inputs and meal packaging, were considered as preparation for reuse
- Substitutions in Scenario 2: none.
- Substitutions in Scenario 3: decrease of 2/3 of mass of waste intended for preparation for reuse; all mass of waste previously recycled or composted now sent sanitary landfill.

- 2. LCIA MAIN DRIVERS

Table SM 01 – Main drivers of the scenario 1.

Impact category	Production	Operations	L&T	EoL
ALOP	97,45%	1,95%	0,00%	0,6%
GWP	83,93%	13,59%	1,16%	1,32%
FDP	57,31%	36,11%	6,21%	0,37%
FEP	83,40%	15,76%	0,49%	0,35%
HTP	79,11%	16,53%	0,95%	3,36%
MEP	93,82%	4,30%	0,58%	1,30%
NLTP	97,00%	2,95%	0,05%	0,00%
TAP	85,64%	12,57%	0,91%	0,88%
WDP	97,42%	0,00%	0,00%	2,58%

Table SM 02 – Main drivers of the scenario 2.

Impact category	Production	Operations	L&T	EoL
ALOP	99,65%	0,35%	0,00%	0,00%
GWP	95,67%	3,66%	0,30%	0,37%
FDP	79,15%	19,23%	1,44%	0,18%
FEP	96,57%	3,27%	0,10%	0,06%
HTP	86,81%	10,34%	0,63%	2,22%
MEP	98,30%	1,06%	0,28%	0,36%
NLTP	97,10%	2,60%	0,30%	0,00%
TAP	96,88%	2,96%	0,02%	0,14%
WDP	97,42%	0,00%	0,00%	2,58%

Table SM 03 – Main drivers of the scenario 3.

Impact category	P&P	Operations	L&T	EoL
ALOP	99,44%	0,56%	0,00%	0,00%
GWP	95,14%	3,39%	0,94%	0,53%
FDP	83,39%	15,25%	1,15%	0,21%
FEP	97,89%	2,00%	0,02%	0,09%
HTP	83,39%	9,00%	0,47%	7,14%
MEP	98,04%	0,97%	0,17%	0,82%
NLTP	97,43%	2,52%	0,05%	0,00%
TAP	97,60%	1,82%	0,58%	0,00%
WDP	72,99%	0,00%	0,00%	27,01%

3. LCIA MAIN DRIVERS PER MONTH

Table SM 04 – Main drivers per month of the scenario 1.

Impact category	Month	Main driver	Secondary driver
ALOP	Set	chickpea production (05.77%)	kraft paper (1.82%)
	Jul	chocolate croissant (2.30%)	dark chocolate (1.98%)
	Nov	dark chocolate (2,14%)	tabbouleh (2.09%)
GWP	Set	chickpea production (04.36%)	dark chocolate (1.78%)
	Jul	dark chocolate (3,30%)	chocolate croissant (2,38%)
	Nov	dark chocolate (5.08%)	chocolate croissant (1.05%)
FDP	Set	chickpea production (4.46%)	liquefied petroleum gas (2.06%)
	Nov	liquefied petroleum gas (1.89%)	tabbouleh (1.70%)
	Jul	liquefied petroleum gas (1.83%)	tabbouleh (1.27%)
FEP	Jul	fibre, cotton, organic (3.79%)	soap (2.15%)
	Set	chickpea production (3.39%)	kraft paper (2.29%)
	Jan	soap (2.02%)	fibre, cotton, organic (1.90%)
HTP	Set	chickpea production (10.40%)	rice production (2.25%)
	Jul	rice production (2.41%)	kraft paper (2.04%)
	Nov	rice production (2.58%)	electricity (1.24%)
MEP	Set	chickpea production (12.33%)	tabbouleh (1.26%)
	Jul	chocolate croissant (2.13%)	dark chocolate (2.08%)
	Nov	dark chocolate (2.24%)	tabbouleh (1.69%)
NLTP	Jul	dark chocolate (12.29%)	chocolate croissant (1.42%)
	Nov	dark chocolate (12.29%)	chocolate croissant (0,63%)
	Fev	dark chocolate (11.42%)	chocolate croissant (0,88%)
TAP	Set	chickpea production (16.81%)	tabbouleh (1.53%)
	Jul	dark chocolate (2.78%)	tabbouleh (1.53%)
	Nov	tabbouleh (2.04%)	chocolate croissant (1.23%)
WDP	Set	tabbouleh (6.95%)	mushroom (1.81%)
	Nov	tabbouleh (9.26%)	pumpkin (1.68%)
	Out	tabbouleh (6.95%)	mushroom (0,88%)

Table SM 05 – Main drivers per month for the scenario 2.

Impact category	Month	Main driver	Secondary driver
ALOP	Nov	beef (10.28%)	pork (0,93%)
	Set	beef (10.28%)	fish (1.16%)
	Jul	beef (7.71%)	pork (0,67%)
GWP	Set	beef (7.09%)	fish (3.41%)
	Nov	beef (9.45%)	dark chocolate (0.96%)
	Jul	beef (7.09%)	dark chocolate (0.89%)
FDP	Set	fish (8.08%)	beef (3.71%)
	Nov	beef (4.94%)	pork (1.10%)
	Jul	beef (3.71%)	pork (0.78%)
FEP	Set	fish (64.77%)	beef (1.37%)
	Jul	beef (1.37%)	fibre, cotton (0.78%)
	Nov	beef (1.83%)	pork (0.37%)
HTP	Set	fish (5.43%)	beef (3.44%)
	Nov	beef (4.58%)	rice production (1.63%)
	Jul	beef (3.44%)	rice production (1.52%)
MEP	Set	fish (21.08%)	beef (5.15%)
	Nov	beef (6.87%)	pork (1.13%)
	Jul	beef (5.15%)	pork (0.81%)
NLTP	Jul	dark chocolate (11.4%)	chocolate croissant (1.32%)
	Nov	dark chocolate (11.4%)	chocolate croissant (0.58%)
	Fev	dark chocolate (10.67%)	chocolate croissant (0.81%)
TAP	Nov	beef (10.83%)	pork (1.09%)
	Set	beef (8.12%)	fish (1.57%)
	Jul	beef (8.12%)	pork (0.78%)
WDP	Set	beef (5.70%)	chicken (4.38%)
	Nov	beef (7.60%)	pork (2.21%)
	Out	beef (5.70%)	pork (2.05%)

Table SM 06 – Main drivers per month for the scenario 3.

Impact category	Month	Main driver	Secondary driver
ALOP	Nov	beef (10.43%)	pork (0.95%)
	Set	beef (7.82%)	fish (2.35%)
	Jul	beef (7.82%)	pork (0.68%)
GWP	Set	beef (6.70%)	fish (6.45%)
	Nov	beef (8.94%)	dark chocolate (0,91%)
	Jul	beef (6.70%)	dark chocolate (0,84%)
FDP	Set	fish (25,55%)	beef (2.94%)
	Nov	beef (3.91%)	pork (0.87%)
	Out	beef (2.94%)	pork (0.81%)
FEP	Set	fish (78.04%)	beef (0.82%)
	Jul	beef (0.82%)	fibre, cotton (0.47%)
	Nov	beef (1.10%)	pork (0.22%)
HTP	Set	fish (12.94%)	beef (3%)
	Nov	beef (4%)	rice production (1.42%)
	Jul	beef (4%)	rice production (1.32%)
MEP	Set	fish (38,01%)	beef (4,11%)
	Nov	beef (5.48%)	pork (0.90%)
	Jul	beef (4.11%)	pork (0.65%)
NLTP	Set	fish (9,17%)	dark chocolate (3.78%)
	Jul	dark chocolate (10,79%)	chocolate croissant (1.25%)
	Nov	dark chocolate (10,79%)	chocolate croissant (0.55%)
TAP	Set	beef (7.78%)	fish (6.01%)
	Nov	beef (10.37%)	pork (1.04%)
	Jul	beef (7.78%)	pork (0.74%)
WDP	Set	beef (5.87%)	chicken (4.51%)
	Nov	beef (7.83%)	pork (2.28%)
	Out	beef (5.87%)	pork (2.12%)

4. LCIA results per month

Table SM 07 – LCIA results per month.

Abbreviation	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Set	Oct	Nov	Dec
Scenario 1												
ALOP	2599,771	2768,473	1819,160	1894,644	1995,989	2240,083	4285,878	2756,414	5256,547	3062,125	3379,511	909,751
GWP	2424,824	2874,190	1943,998	1789,583	1943,565	1718,553	3305,158	2155,511	3391,016	2797,175	3088,381	739,728
FDP	359,931	403,859	371,274	378,739	331,505	381,204	438,060	383,742	635,557	416,427	454,907	254,523
FEP	0,774	0,646	0,607	0,570	0,605	0,534	0,969	0,580	0,894	0,699	0,620	0,404
HTP	503,980	614,949	468,374	549,578	448,365	499,705	881,273	613,337	1494,464	710,753	747,214	252,958
MEP	10,384	11,856	8,567	7,749	9,268	9,102	17,587	11,692	31,955	14,491	16,644	3,965
NLTP	16,179	16,354	9,969	6,961	9,876	3,374	17,764	6,956	7,046	14,178	16,931	0,615
TAP	11,546	15,624	11,074	11,235	11,973	14,707	20,935	16,699	51,960	18,040	19,911	6,382
WDP	20,521	22,270	22,040	20,758	22,652	21,615	22,542	21,751	26,310	23,219	25,918	17,137
Scenario 2												
ALOP	7764,364	15506,974	9243,338	12643,178	14856,176	17161,376	19521,475	10073,676	21276,474	18754,474	2378,574	6600,288
GWP	4921,257	9519,305	5512,819	7280,396	8547,895	9431,303	11085,384	5650,383	13882,181	10674,981	13567,581	3553,767
FDP	502,459	710,866	546,856	618,988	615,120	714,311	782,662	595,672	1531,742	764,733	941,648	404,394
FEP	0,926	0,986	0,812	0,842	0,935	0,916	1,359	0,802	17,550	1,108	1,163	0,565
HTP	687,645	1035,904	713,704	882,660	851,502	967,132	1318,230	876,553	1923,461	1210,006	1399,641	447,374
MEP	21,065	38,341	23,574	29,187	35,179	39,530	48,370	27,355	160,338	46,241	58,590	15,785
NLTP	16,304	16,621	10,118	7,125	10,162	3,600	18,435	7,274	13,881	14,545	17,459	0,750
TAP	45,867	104,363	59,860	84,236	99,809	117,480	124,625	65,617	146,364	123,840	159,328	44,947
WDP	28,304	38,164	31,595	31,897	35,734	36,725	37,822	33,821	51,695	39,779	47,303	25,198
Scenario 3												
ALOP	7907,102	15580,400	9457,757	12361,800	14952,000	17281,900	19614,700	10147,000	23350,900	18639,700	23859,500	901,543
GWP	5053,954	9636,565	5681,589	7313,220	8591,783	9491,258	11114,800	5689,748	21505,200	10753,100	13651,900	752,791
FDP	519,974	709,960	584,950	595,333	619,187	725,465	778,050	593,212	3546,844	785,890	941,783	288,621
FEP	0,750	0,793	0,658	0,620	0,744	0,733	1,159	0,605	33,831	0,936	0,969	0,182
HTP	805,574	1154,753	850,594	935,159	893,838	1020,183	1389,386	919,242	3108,432	1273,639	1483,765	287,411

MEP	21,431	38,725	24,036	29,184	35,090	39,502	48,241	27,272	303,321	46,270	58,763	3,848
NLTP	16,181	16,496	9,992	7,008	10,048	3,493	18,321	7,158	21,696	14,428	17,339	0,500
TAP	45,263	103,651	59,280	83,684	99,421	117,078	124,202	65,198	237,852	123,441	158,764	5,859
WDP	14,304	24,164	17,595	17,879	21,734	22,725	23,822	19,821	37,695	25,779	33,303	3,137

5. Complete LCI

- Table SM 08 – Complete LCI.

Product	Quantity	Unit	Dataset
almonds flour	52.68	Kg	almond production almond Cutoff, U - RoW
almonds flour	21.34	Kg	market for almond almond Cutoff, U - GLO
amaranth flour	10	Kg	Amaranth, consumption mix - FR
arborio rice	321.11	Kg	rice production, basmati rice, basmati Cutoff, U - RoW
balsamic vinegar	1.00	Kg	Vinegar, balsamic, processed in FR Ambient (average) Already packed - Glass at distribution - FR
balsamic vinegar glass packaging	0.38	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
balsamic vinegar glass packaging	0.38	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
bamboo toothbrush	2.285	Kg	wood chips, at farm/kg - FR
banana	4.77	Kg	banana production banana Cutoff, U - RoW
bean	269.97	Kg	Red kidney bean, consumption mix - FR
beer	31.16	Kg	Beer, special (5-6° alcohol), processed in FR Chilled Glass at distribution - FR
biological yeast	0.50	Kg	Baking powder or raising agent, processed in FR Ambient (long) Paper at distribution - FR
biological yeast	1.000	Kg	Baking powder or raising agent, processed in FR Ambient (long) Paper at distribution - FR
black olive	1.80	Kg	Olives, consumption mix - FR
black olives	5.40	Kg	Mix of 4 spices, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
black popcorn	14.27	Kg	Pop-corn or oil popped maize, salted, processed in FR Ambient (long) Cardboard at distribution - FR
black sesame	2.00	Kg	sesame seed production sesame seed Cutoff, U - RoW
boat freight of paper packaging	16.80	TKm	market for transport, freight, sea, container ship transport, freight, sea, container ship Cutoff, U

bread stuffed pizza	15.40	Kg	Pizza, vegetables or pizza 4 seasons, at plant - FR
brioche	0.11	Kg	Brioche or Vienna bread, processed in FR Ambient (short) LDPE at distribution - FR
broccoli	2.01	Kg	broccoli production broccoli Cutoff, U - GLO
brocolis snack	0.90	Kg	broccoli production broccoli Cutoff, U - GLO
brown rice	14.00	Kg	rice production, basmati rice, basmati Cutoff, U - RoW
brown rice	10.000	Kg	rice production, basmati rice, basmati Cutoff, U - IN
brown sugar	6.000	Kg	sugarcane processing, modern annexed plant sugar, from sugarcane Cutoff, U - BR
cabbage	21.47	Kg	Green cabbage, raw, processed in FR Ambient (average) No packaging at distribution - FR
cabbage	145.33	Kg	Green cabbage, consumption mix - FR
carrot	72.87	Kg	carrot production carrot Cutoff, U - RoW
cashew nut	24.130	Kg	Cashew nut, consumption mix - FR
cassava	176.56	Kg	Cassava or manioc, roots, raw, processed in FR Chilled No packaging at distribution - FR
cassava flour extra fine 1kg	5.000	Kg	Cassava, consumption mix - FR
tupa	5.000	Kg	Cassava, consumption mix - FR
chickpea	1595.00	Kg	chickpea production chickpea Cutoff, U - RoW
chickpeas	10.00	Kg	market for chickpea chickpea Cutoff, U - GLO
chimichurri	1.26	Kg	Turmeric, powder, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
chimichurri seasoning	10.09	Kg	Mix of 4 spices, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
chinese broccoli	135.78	Kg	broccoli production broccoli Cutoff, U - GLO
chives seasoning	4.10	Kg	Mix of 4 spices, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
chocolate (50% cocoa)	11.00	Kg	Dark chocolate bar, more than 40% cocoa, for cooking, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
chocolate (70% cocoa)	11.00	Kg	Dark chocolate bar, more than 70% cocoa, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
chocolate 50% cocoa	16.50	Kg	Dark chocolate bar, more than 40% cocoa, for cooking, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR

chocolate 70% cocoa	92.47	Kg	Dark chocolate bar, less than 70% cocoa, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
chocolate chip 50% cocoa diet	23.10	Kg	Dark chocolate bar, more than 40% cocoa, for cooking, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
chocolate croissant	28.08	Kg	Chocolate croissant, puff pastry, from bakery, processed in FR Ambient (short) PS at distribution - FR
chocolate croissant	6.12	Kg	Chocolate croissant, prepacked, processed in FR Ambient (short) PS at distribution - FR
coconut milk	28.20	Kg	Coconut milk or coconut cream, processed in FR Chilled Cardboard at distribution - FR
coconut milk	520.00	Kg	Coconut milk or coconut cream, processed in FR Chilled Cardboard at distribution - FR
coconut milk glass packaging	21.000	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
coconut oil	25.00	Kg	coconut oil production, crude coconut oil, crude Cutoff, U - RoW
coconut oil extra virgin	25.00	Kg	Crude coconut oil, from Philippines, at feed plant, FR U/kg - GLO
coconut soap	19.80	Kg	market for soap soap Cutoff, U - GLO
coconut soap	1.00	Kg	soap production soap Cutoff, U - RoW
coffee	3.00	Kg	coffee green bean production, arabica coffee, green bean Cutoff, U - BR
corn meal	10,00	Kg	Maize/corn starch, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
cornflour	15.73	Kg	Wheat flour, type 110, processed in FR Ambient (average) Already packed - LDPE at distribution - FR
cornflour	0.25	Kg	Maize/corn starch, processed in FR Ambient (average) Cardboard at distribution - FR
cornflour	0.851	Kg	Maize/corn flour, processed in FR Ambient (average) Paper at distribution - FR
cornflour maize flour	1.00	Kg	market for maize flour maize flour Cutoff, U - RoW
croissant	6.92	Kg	Croissant, ordinary, from bakery, processed in FR Ambient (short) PS at distribution - FR
curly lettuce	5.72	Kg	lettuce361 production lettuce Cutoff, U - GLO
date	5.00	Kg	Date, pulp and peel, dried, processed in FR Ambient (average) LDPE at distribution - FR

dehydrated garlic	0.25	Kg	Garlic, consumption mix - FR
disinfectant detergent	110.00	Kg	Generic detergent-disinfectant, at plant - RER
electricity	23,022.36	kWh	electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid
employee transport	5.80	Km	market for transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 Cutoff, U - GLO
employee transport	61.70	PKm	market for transport, regular bus transport, regular bus Cutoff, U - GLO
extra virgin olive oil	45.00	Kg	Olive oil, extra virgin, processed in FR Ambient (long) PET at distribution - FR
fishing nets sponge (nylon)	0.500	Kg	Culture rope, Nylon
freight of beer	2.11	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of bread and various flours	0.03	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of chestnuts	25.67	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of chocolates	1.76	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of cleaning products	97.95	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of coopafre	5.680	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of dishwashing loofah and products	0.04	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of fried kebab	21.22	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of grains	228.81	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of kombucha	1.86	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of kombucha	0.08	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW

freight of kombucha and tonic soda	66.97	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of menstrual collector	0.70	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of mushrooms	13.43	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of mushrooms	19.140	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of organic fruits and vegetables	28.01	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of organic vegetables and greens	3.79	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of packaging	85.82	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of packaging	31.34	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of packaging	0.68	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of packaging and others	0.49	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of peanuts	20.12	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of snacks	1.90	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of tofu	0.64	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of toothbrush	3.62	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of vegan snacks	2.99	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
freight of vegetable, greens and others	39.41	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW

freight of vegetables and greens	58.36	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
gas	319.53	m ³	market for liquefied petroleum gas liquefied petroleum gas Cutoff, U - BR
glass jar	79.25	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
glass jar - packaging	197.57	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
glass jar and bowl - packaging	63.39	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
glass packaging coconut milk	84.60	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
glass packaging coconut milk	16.92	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
glass packaging kombucha	64.51	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
glass packaging olive oil	12.54	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
glass packaging organic tonic soda	15.87	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
granulated soybean	10.00	Kg	market for soybean meal soybean meal Cutoff, U - BR
grape juice full glass packaging	1.80	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
grated coconut dehydrated	6.00	Kg	market for coconut, dehusked coconut, dehusked Cutoff, U - GLO
green cabbage	11.20	Kg	cabbage white production cabbage white Cutoff, U - RoW
green parsley seasoning	11.10	Kg	Mix of 4 spices, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
guava croissant	6.72	Kg	Croissant, butter, from bakery, processed in FR Ambient (short) PS at distribution - FR
guava paste croissant	2.76	Kg	Chocolate croissant, puff pastry, from bakery, processed in FR Ambient (short) PS at distribution - FR
ipa beer	10.38	Kg	Beer, strong (>8° alcohol), processed in FR Chilled Glass at distribution - FR

jaca snack	0.90	Kg	Fruits puree, without sugar added, processed in FR Chilled PS at distribution - FR
kebab from zucchini curd filling of vegan	72.00	Kg	Vegetables (3-4 types), mashed, at plant/FR U
kebab from zucchini vegan	2,136.00	Kg	Tabbouleh, prepacked, processed in FR Chilled PS at distribution - FR
kombucha	41.94	Kg	Rice-based drink, plain, processed in FR Chilled Cardboard at distribution/FR
kombucha packaging glass	31.48	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
landfill waste	600.00	Kg	treatment of municipal solid waste, sanitary landfill municipal solid waste Cutoff, U - RoW
leek	7.18	Kg	Leek, raw, processed in FR Ambient (average) No packaging No preparation at consumer - FR
leek	110.94	Kg	Leek, raw, processed in FR Ambient (average) No packaging at distribution - FR
lemon	9.14	Kg	lemon production - ES
lemon	4.81	Kg	lemon production lemon Cutoff, U - RoW
lemon	37.62	Kg	lemon production lemon Cutoff, U - RoW
lentils	6.00	Kg	Lentils, consumption mix - FR
loofah sponge	24.69	Kg	market for fibre, cotton, organic fibre, cotton, organic Cutoff, U - GLO
maize flour	1.70	Kg	market for maize flour maize flour Cutoff, U - RoW
menstrual collector	0.15	Kg	market for silicone product silicone product Cutoff, U - RER
mix ready for bread	5.42	Kg	Bread, wholemeal or integral bread (made with flour type 150), processed in FR Ambient (short) Paper at distribution - FR
molasses	9.35	Kg	Molasses, from sugarcane, from Brazil, at feed plant, FR U/kg - GLO
multipurpose brush	0.20	Kg	market for polystyrene, general purpose polystyrene, general purpose Cutoff, U - GLO
mustard	18.00	Kg	Mustard sauce prepacked, processed in FR Chilled PVC at distribution - FR
napkin	17.40	Kg	market for tissue paper tissue paper Cutoff, U - GLO
natural loofah sponge	8.23	Kg	fibre production, cotton, organic, ginning fibre, cotton, organic Cutoff, U - RoW
nylon sponge	1.00	Kg	nylon 6 production nylon 6 Cutoff, U - RoW

oat grain	10.00	Kg	market for oat grain oat grain Cutoff, U - GLO
olive black without core	3.60	Kg	olive production olive Cutoff, U - RoW
olive oil	273.09	Kg	Olive oil, extra virgin, processed in FR Ambient (long) PET at distribution - FR
olive oil extra virgin	30.00	Kg	Olive oil, extra virgin, processed in FR Ambient (long) PET at distribution - FR
onion	51.49	Kg	onion production onion Cutoff, U - RoW
onion	7.90	Kg	onion production onion Cutoff, U - RoW
organic avocado	1.28	Kg	avocado production avocado Cutoff, U - GLO
organic beetroot	17.060	Kg	Beetroot, consumption mix - FR
organic cabbage	62.000	Kg	cabbage red production cabbage red Cutoff, U - GLO
organic cauliflower	45.000	Kg	cauliflower production cauliflower Cutoff, U - GLO
organic corn flour	1.07	Kg	Maize flour, at industrial mill - FR
organic curly lettuce	1.66	Kg	lettuce361 production lettuce Cutoff, U - GLO
organic eggplant	3.00	Kg	Eggplant, consumption mix - FR
organic garlic	4.00	Kg	Garlic, consumption mix - FR
organic ginger	6.23	Kg	Ginger, consumption mix - FR
organic green bell pepper	1.04	Kg	bell pepper production, open field bell pepper Cutoff, U - RoW
organic lemon	2.98	Kg	market for lemon lemon Cutoff, U - GLO
organic mango	1.35	Kg	mango production mango Cutoff, U - BR
organic melon	4.42	Kg	melon production melon Cutoff, U - GLO
organic orange	9.22	Kg	orange production, fresh grade orange, fresh grade Cutoff, U - RoW
organic papaya	7.43	Kg	papaya production papaya Cutoff, U - GLO
organic pineapple	5,10	Kg	pineapple production pineapple Cutoff, U - GLO
organic potato	117.92	Kg	potato production, organic potato, organic Cutoff, U - RoW
organic rice flour white	80.00	Kg	Rice flour, processed in FR Ambient (average) Paper at distribution - FR
organic tomato	100.05	Kg	tomato production, fresh grade, open field tomato, fresh grade Cutoff, U - RoW
organic waste	875.90	Kg	treatment of biowaste, industrial composting biowaste Cutoff, U - RoW
organic wheat flour	2.00	Kg	market for wheat flour wheat flour Cutoff, U - RoW

organic yam	9.02	Kg	Yam, consumption mix - FR
organica soybean	30.00	Kg	soybean production soybean Cutoff, U - BR-PR
palm heart	24.03	Kg	Palm heart, canned, drained, processed in FR Ambient (average) Steel at distribution - FR
palm heart packaging glass	2.57	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
palm packaging glass	3.86	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
paper 500ml pot + cover pot 500ml	0.69	Kg	kraft paper production kraft paper Cutoff, U - RoW
paper bag	148.61	Kg	packaging film, PVC, at plant Paper bag, 1 kg capacity, at plant (ACYVIA) - RER
paper bag	65.04	Kg	market for paper, woodcontaining, lightweight coated paper, woodcontaining, lightweight coated Cutoff, U - RoW
paper bag and packaging	135.49	Kg	market for kraft paper, unbleached - GLO
paper lunch box packaging	18.72	Kg	kraft paper production kraft paper Cutoff, U - RER
paper packaging	320.09	Kg	market for kraft paper kraft paper Cutoff, U - RoW
paris mushroom	208.15	Kg	Mushroom, consumption mix - FR
peanut butter	153.75	Kg	Peanut butter or peanut paste, processed in FR Ambient (long) PVC at distribution - FR
pinto beans	11.22	Kg	fava bean production, organic fava bean, organic Cutoff, U - RoW
pizza bread	1.76	Kg	Pizza base, cooked, processed in FR Chilled LDPE at distribution - FR
plastic bag	1.00	Kg	Plastic bag (15kg)
popcorn	4.23	Kg	Pop-corn or popped maize, with caramel, processed in FR Ambient (long) Cardboard at distribution - FR
potato	23.51	Kg	potato production, organic potato, organic Cutoff, U - RoW
potato bread	3.30	Kg	market for potato starch - GLO
potato bread	14.19	Kg	Bread, wholemeal or integral bread (made with flour type 150), at plant - FR
potato bread and croissant	3.96	Kg	Bread, home-made, with flour for home-made bread preparation, at plant - FR
potato starch	25.00	Kg	market for potato starch potato starch Cutoff, U - GLO

pumpkin cabotia	130.86	Kg	Pumpkin (cucurbita moschata), consumption mix - FR
raw golden flaxseed flour	12.00	Kg	Flaxseed, brown, processed in FR Ambient (long) LDPE at distribution - FR
raw sugar	65.00	Kg	market for sugar, from sugarcane sugar, from sugarcane Cutoff, U - GLO
rice	1.12	Kg	market for rice, basmati rice, basmati Cutoff, U - GLO
rice	2.61	Kg	market for rice, basmati rice, basmati Cutoff, U - GLO
rice	0.96	Kg	rice production, basmati rice, basmati Cutoff, U - RoW
rice noodle	1.00	Kg	Dried pasta, wholemeal, raw, processed in FR Chilled LDPE at distribution - FR
roasted peanuts	8.00	Kg	peanut production peanut Cutoff, U - RoW
sanitary water	5.00	Kg	market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state Cutoff, U - RoW
sauce tabasco pepper	0.06	Kg	Sauce, pepper, prepacked, at plant/FR U
sea salt refined	40.00	Kg	market for salt salt Cutoff, U - GLO
sea salt refined	20.00	Kg	salt production from seawater, evaporation pond salt Cutoff, U - GLO
sesame white peeled	1.50	Kg	market for sesame seed sesame seed Cutoff, U - GLO
shipping to composting	2.49	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
shipping to landfill	26.40	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
shipping to recycling	1.54	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
shoestring potatoes	1.00	Kg	Potato crisps, processed in FR Ambient (long) LDPE at distribution - FR
smoked paprika	3.00	Kg	Paprika, processed in FR Ambient (long) Glass at distribution - FR
soy sauce	16.00	Kg	Soy sauce, prepacked, processed in FR Chilled PVC at supermarket - FR
soybean smoked bacon	40.00	Kg	market for soybean meal soybean meal Cutoff, U - BR
sponge	8.23	Kg	market for fibre, cotton, organic fibre, cotton, organic Cutoff, U - GLO
stainless sponge	8.23	Kg	market for steel, unalloyed steel, unalloyed Cutoff, U - GLO
stuffed brocolis bread	4.44	Kg	broccoli production broccoli Cutoff, U - GLO

sugar	56.00	Kg	sugarcane processing, modern annexed plant sugar, from sugarcane Cutoff, U - BR
sun dried tomato	21.00	Kg	Tomato, dried, in oil, processed in FR Ambient (average) Glass at supermarket - FR
sun dried tomato packing glass	3.86	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
sun dried tomato packing glass	1.29	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
sweet corn	2.00	Kg	Sweet corn, canned, drained, processed in FR Ambient (average) Steel at distribution - FR
sweet potato	41.72	Kg	Sweet potato, consumption mix - FR
tahini	15.00	Kg	Tahini (sesame paste), processed in FR Ambient (long) LDPE at distribution - FR
tahini sesame paste	0.32	Kg	Tahini (sesame paste), processed in FR Ambient (long) LDPE at distribution - FR
tahini sesame paste glass packaging	0.20	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
thyme	0.75	Kg	Thyme, dried, consumption mix - FR
tofu	559.00	Kg	tofu production tofu Cutoff, U - RoW
toilet paper	11.40	Kg	tissue paper production tissue paper Cutoff, U - RoW
toilet paper	3.00	Kg	market for tissue paper tissue paper Cutoff, U - GLO
tomato	148.19	Kg	Tomato, organic, greenhouse production, national average, at greenhouse - FR
tomato sauce	0.32	Kg	Tomato sauce, with onions, prepacked, processed in FR Chilled PVC at distribution - FR
tonic soda	205.64	Kg	Fruit soft drink, carbonated (10-50% of fruit juice), with sugar, at plant - FR
tonic soda glass packaging	43.10	Kg	packaging glass production, white packaging glass, white Cutoff, U - RoW
traditional coffee	1.00	Kg	coffee green bean production, arabica coffee, green bean Cutoff, U - BR
truck freight of paper packaging	0.48	TKm	market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RoW
turmeric	0.50	Kg	Turmeric, consumption mix - FR

vanilla extract	14.40	Kg	Vanilla, aqueous extract, processed in FR Ambient (long) PVC at distribution - FR
vegan bacon	26.70	Kg	soybean meal and crude oil production soybean meal Cutoff, U - BR
vegan smoked bacon	32.00	Kg	soybean meal and crude oil production soybean meal Cutoff, U - BR
vienna bread	0.22	Kg	Brioche or Vienna bread, at plant - FR
vinegar	5.40	Kg	Vinegar, processed in FR Ambient (average) Already packed - Glass at distribution - FR
water	142.67	m ³	water, BR
white banana	56.59	Kg	banana production banana Cutoff, U - RoW
white cassava flour	0.56	Kg	wheat production, organic wheat grain, organic Cutoff, U - RoW
white cassava flour	77.54	Kg	Cassava or manioc, roots, raw, processed in FR Chilled No packaging at distribution - FR
white wine	0.75	Kg	White wine, consumption mix - FR
white wine glass packaging	0.40	Kg	market for packaging glass, white packaging glass, white Cutoff, U - GLO
whole grape juice	3.00	Kg	Mixed fruits juice, pure juice, processed in FR Chilled HDPE at distribution - FR
yellow mustard sauce	3.60	Kg	Mustard sauce prepacked, at plant - FR
yellow mustard sauce	3.60	Kg	Mustard sauce prepacked, processed in FR Chilled PVC at packaging - FR

6. Detailed CTI results

Table SM 09 – CTI detailed results.

Indicator group	Indicator	Scenario 1 (%)	Scenario 2 (%)	Scenario 3 (%)
Close the loop	Circularity	91	67	62
	Circular Inflow	92	48	50
	Linear Inflow	8	52	50
	Recovery Potential	93	93	77
	Actual Recovery	89	89	77
	Circular Outflow	89	89	77
	Lost Potential	4	4	0
	Potential Linear Outflow	7	7	23
	Linear Outflow	11	11	23

7. CTI terms definitions

Table SM 10 – CTI terms definitions.

Term	Definition
Inflow	Resources that enter the company, including materials, parts or products (depending on a company's position within the supply chain). Not included are water and energy, which are part of the specific water and energy indicators
Linear inflow	Virgin, non-renewable resources.
Circular inflow	Inflow that is renewable inflow and used at a rate in line with natural cycles of renewability or non-virgin.
Outflow	Material flows that leave the company, including materials, parts, products, by-products and waste streams (depending on a company's position within the supply chain)
Linear outflow	Outflow that is not classifiable as circular. This means that the outflow is not circular in design/ consists of materials treated in a manner that they have no recovery potential or neither demonstrably recovered nor flowing back into the economy
Circular outflow	Outflow that is designed and treated in a manner that ensures products and materials have a full recovery potential and extend their economic lifetime after their technical lifetime and demonstrably recovered
Renewable inflow	Sustainably managed resources, most often demonstrated by internationally recognized certification schemes that, after extraction, return to their previous stock levels by natural growth or replenishment processes at a rate in line with use cycles.
Recovery	The technically feasible and economically viable recovery of nutrients, compounds, materials, parts, components or even products (depending on the organization) at the same level of functional equivalence through reuse, repair, refurbishment, repurposing, remanufacturing, recycling or biodegrading (including composting)
Actual recovery	How much of the outflow does the company actually recover through waste treatment processes.
Recovery potential	How an organization designs its products to ensure the technical recovery of components and materials at a functional equivalence

Recycle	To reduce a product back to its material level, thereby allowing the use of those materials in new products
Reuse	To extend a product's lifetime beyond its intentional designed life span, without changes made to the product or its functionality
Regenerative	The ability to restore material resources and improve ecosystem health to ensure productivity and other benefits (e.g., carbon capture, biodiversity, and other ecosystem services).
Biodegrade	Microbial (bacteria and fungi) breakdown of organic matter in the presence of oxygen to produce soil with high organic (humus) content.
% Circularity	The weighted average of the % circular inflow and % circular outflow for a given product (group or portfolio), business unit or company
% of circular inflow	% non-virgin content and % renewable content (sustainably grown bio-based sources). Circular inflow total is calculated through by the sum of % of circular inflow of each material times it's mass, divided by the total mass of all materials.
% of circular outflow	% recovery potential (which is focused on design) and the % actual recovery. Circular outflow total is calculated through by the sum of % of circular inflow of each material times it's mass, divided by the total mass of all materials.
% recovery potential	Reflects the ability of the company to design its outflow to ensure it is technically recoverable through either the technical or biological cycles
% actual recovery	Amount of outflow recovered at the end of its initial life cycle (actual data)

8. WHI terms definitions

Table SM 11 – WHI terms definitions.

Term	Definition
Preparing for reuse	Cleaning or repairing recovery operations, but which products or components of products have become waste are prepared so that they can be reused without any other pre-processing.
Recycling	Defined as any recovery operation by which waste materials are reprocessed into products, materials or substances whether for the original or other purposes
Composting	Biological process that submits biodegradable waste to anaerobic or aerobic decomposition and that results in a product used on land or for the production of growing media or substrate
Incineration	Method of waste disposal that involves the combustion of waste. It may refer to incineration on land or at sea. Incineration with energy recovery refers to incineration processes where the energy created in the combustion process is harnessed for re-use, for example for power generation. Incineration without energy recovery means the heat generated by combustion is dissipated in the environment
Landfill	Deposit of waste into or onto land. It includes specially engineered landfill sites and temporary storage of over one year on permanent sites. The definition covers both landfill in internal sites, i.e., where a generator of waste is carrying out its own waste disposal at the place of generation, and in external sites. Landfill is often simply referred to as deposit

APÊNDICE C



AUTORIZAÇÃO DE CONCESSÃO DE DADOS

Eu, Joana Wosgrau Câmara, sócia-proprietária da Casa Origem, **confirmando** a concessão voluntária e gratuita dos dados organizacionais e financeiros relacionados à operação da empresa durante o ano de 2020 para Thales Eduardo Tavares Dantas, membro do Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG) e doutorando em engenharia ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina, para uso na condução das pesquisas relacionadas à tese de doutorado intitulada “*Desenvolvimento de um modelo integrado para a avaliação da circularidade e impactos econômico-ambientais do ciclo de vida de organizações*”, a ser apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental, sob a orientação do prof. Dr. Sebastião Roberto Soares.

Documento assinado digitalmente
 THALES EDUARDO TAVARES DANTAS
 Data: 20/11/2022 15:12:41-0300
 Verifique em <https://verificador.itl.br>

Thales Eduardo Tavares Dantas
Doutorando em Engenharia Ambiental
Universidade Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 JOANA WOSGRAU CAMARA
 Data: 22/11/2022 20:57:22-0300
 Verifique em <https://verificador.itl.br>

Joana Wosgrau Câmara
Sócia-proprietária
Casa Origem