

RESSALVA

Atendendo a solicitação
do autor, o texto completo
desta tese será
disponibilizado a partir de
23/05/2025.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

RICARDO GABBAY DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DE
RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

2023

RICARDO GABBAY DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS NO BRASIL**

Tese apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de LIVRE-DOCENTE, nas disciplinas de “GESTÃO E GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS”, “MATERIAIS E RECICLAGEM” e “TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS”, junto ao Departamento de ENGENHARIA AMBIENTAL.

São José dos Campos

2023

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese, e a conquista a ela associada, à alma e Luz de meu Pai,
Rui Pereira de Souza.

" A universidade deve ser um lugar onde as máscaras caem, onde a verdade é buscada, não importa quão dolorosa possa ser". F. Nietzsche

RESUMO

SOUZA, R.G. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida de Resíduos Sólidos no Brasil. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2023.

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) são resíduos sólidos amplamente gerados no mundo, provocando significativos impactos ambientais, sociais e econômicos. Os impactos de sustentabilidade associados aos RSU e REEE não se restringem às etapas após o fim da vida útil dos respectivos bens; em uma visão de ciclo de vida, os impactos compreendem também aqueles provocados pelas etapas da cadeia produtiva, logística direta e reversa dos bens que lhes deram origem – ou daqueles que podem ser beneficiados pela sua reciclagem. Avaliar os impactos ao longo do ciclo de vida de produtos e resíduos é essencial para identificar os pontos críticos que requerem maior controle, e assim avaliar soluções alternativas, dando suporte à tomada de decisões. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é atualmente a metodologia mais robusta para avaliação de impactos ambientais, pois mapeia os processos do ciclo de vida delimitados em um sistema de produto, seus respectivos fluxos de entrada e saída de materiais, substâncias, e energia, e associa a esses fluxos diversas categorias de impactos ambientais. A robustez da ACV levou à necessidade de adaptá-la para também contemplar impactos sociais e econômicos, e de forma integrada, avaliar a sustentabilidade de produtos e sistemas, dando origem à Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA). No desenvolvimento e aplicação da LCSA, tem-se dado ênfase à avaliação de sistemas de resíduos sólidos, pois apresentam problemas complexos de sustentabilidade, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. O histórico de publicações do candidato demonstra uma atuação científica consistente, desenvolvendo estudos relacionados a este assunto, com temas que contemplam: a modelagem de ACV (ambiental) para avaliar sistemas de resíduos sólidos no Brasil; a importância da ACV Consequencial (CLCA), para identificar e avaliar impactos em processos marginais afetados por mudanças no gerenciamento de resíduos sólidos; adoção de Métodos de Estruturação de Problemas (PSM) combinada com revisão sistemática da literatura e consulta a *stakeholders*, para determinar categorias de impacto social e econômico do ciclo de vida; aplicação da ACV social (SLCA) e da CLCA a problemas de resíduos sólidos, apresentando o estado-da-arte e diretrizes metodológicas para futuros estudos; e geração de dados primários e regionalizados, que são um dos principais gargalos para estudos de ACV e LCSA. Compreende-se que o próximo ciclo de estudos deste candidato deve não somente aprofundar-se na modelagem de CLCA e SLCA para resíduos, mas contemplar temas associados como: LCSA consequencial, *ecodesign*, função das cadeias de resíduos para a economia circular e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e análises químicas para geração de dados primários relevantes.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos. Avaliação do Ciclo de Vida. Gestão do Ciclo de Vida. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

SOUZA, R.G. Solid Waste Life Cycle Sustainability Assessment in Brazil. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2023.

Municipal Solid Waste (MSW) and Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) are waste streams widely produced worldwide, provoking significant environmental, social and economic impacts. The sustainability impacts related to MSW and WEEE are not restricted to the end-of-life stages of respective goods; in a life cycle perspective, the impacts also comprehend those provoked by production stages, direct and reverse logistics of the original goods – or of those that can be affected by their recycling. Assessing life cycle impacts of products and wastes is essential to identifying hotspots that require more control, and thus assess alternative solutions, supporting decision-making. Life Cycle Assessment (LCA) is currently the most robust methodology for environmental impacts assessment, as it maps the life cycle processes within a product system, their respective input-output flows of materials, substances and energy, and associates to these flows several environmental impact categories. LCA robustness led to the need of adapting it to also comprehend social and economic impacts, and integrated, to assess the sustainability of products and systems, giving rise to Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). In developing and applying LCSA, there is much emphasis to assessing waste management systems, as they present complex sustainability issues, especially in developing countries like Brazil. The publications history of the candidate shows a consistent scientific performance, developing studies related to this subject, in themes that involve: LCA modelling to assess waste management in Brazil; the relevance of Consequential LCA (CLCA) to identify and evaluate impacts to marginal processes affected by changes in waste management; adoption of Problem Structuring Methods (PSM) combined with systematic literature review and stakeholders consultation, to determine social and economic life cycle impact categories; application of Social LCA (SLCA) and CLCA to waste management problems, presenting the state-of-art and methodological guidelines for further studies; and generation of primary and regionalised data, one of the key bottlenecks for LCA and LCSA studies. The candidate understands that his next cycle of studies must not only delve into CLCA and SLCA modelling for waste management, but comprehend related themes like: Consequential LCSA, ecodesign, role of waste streams to circular economy and Sustainable Development Goals (SDG), and chemical analyses to produce relevant primary data.

Keywords: Solid Waste. Life Cycle Assessment. Life Cycle Management. Life Cycle Sustainability Assessment.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
BSC	Balanced Scorecard
CCV	Custeio do Ciclo de Vida
CLCA	Consequential Life Cycle Assessment
CPP	Composição Probabilística de Preferências
E-waste	Electronic Waste
LCA	Life Cycle Assessment
LCD	Liquid Crystal Display
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
MCDA	Multicriteria Decision Aid/Analysis
MSW	Municipal Solid Waste
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PSM	Problem Structuring Methods
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SLCA	Social Life Cycle Assessment
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 PROPOSIÇÃO	13
3 ARTIGOS.....	15
3.1 Artigo 1 – Mapeamento cognitivo e Balanced Scorecard na gestão estratégica de resíduos sólidos urbanos	15
3.2 Artigo 2 – Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives.....	30
3.3 Artigo 3 – Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil.....	42
3.4 Artigo 4 – Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach	54
3.5 Artigo 5 – Consequential lifecycle modelling of solid waste management systems – Reviewing choices and exploring their consequences.....	65
3.6 Artigo 6 – Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil	75
3.7 Artigo 7 – Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil.....	87
3.8 Artigo 8 – Social evaluation of municipal solid waste management systems from a life cycle perspective: a systematic literature review ..	110
3.9 Artigo 9 – Life cycle sustainability impact categories for sustainable procurement.....	132
3.10 Artigo 10 – Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) framework for Lithium-Ion batteries (LIBs) based on the Sustainable Development Goals (SDGs).....	145
3.11 Artigo 11 – Leachate analysis of Waste electrical and electronic equipment disposal in landfills and open dumps – context of a Brazilian city	193
3.12 Artigo 12 – Indium recovery from end-of-life e-waste: chemical determination and recycling viability.....	211
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	234
REFERÊNCIAS.....	242

1 INTRODUÇÃO

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) são tipos de resíduos sólidos amplamente gerados pela população mundial, o que provoca significativos impactos ambientais, sociais e econômicos. Ao fim da vida útil, quando os bens de consumo se tornam resíduos, seguem-se etapas de coleta e destinação final que podem provocar impactos diversos, como: contaminação da água, ar e solo, emissão de gases de efeito estufa, acidentes de trabalho, desperdício de materiais com valor econômico, dentre muitos outros (Beula & Sureshkumar, 2021; Gómez-Sanabria et al, 2022).

Os impactos de sustentabilidade associados aos RSU e REEE não se restringem apenas às etapas após o fim da vida útil dos respectivos bens; em uma perspectiva de ciclo de vida, os impactos destes resíduos compreendem também aqueles provocados pelas etapas da cadeia produtiva, logística direta e reversa dos bens que lhes deram origem – ou daqueles que podem ser afetados pela sua reciclagem. Por exemplo, os impactos ambientais de um resíduo de bateria de íons de lítio não se limitam aos provocados pela sua destinação final, em aterros, lixões, incineradores ou mesmo sua reciclagem. A produção deste produto para consumo também gera intensos impactos ambientais, desde a extração das matérias-primas, gerando depleção de recursos naturais, emissão de materiais particulados e efluentes tóxicos; a produção industrial das baterias, que também gera emissões e resíduos; o transporte de insumos, subcomponentes e produtos finalizados, muito associado à emissão de material particulado e gases de efeito estufa; e até mesmo a fase de uso, que pode gerar acidentes e vazamentos (Herrerias-Martínez et al., 2021; Mrozik et al., 2021). Assim, quando os resíduos não são reciclados, os insumos necessários para a produção de novos produtos devem necessariamente ser supridos por fontes primárias; inversamente, quando há o crescimento da reciclagem e recuperação de recursos a partir de resíduos, há menor dependência de insumos primários (virgens), evitando-se ao menos parcialmente os impactos associados à sua obtenção (Ducoli et al., 2022; Fahimi et al., 2022).

Avaliar os impactos ao longo do ciclo de vida de produtos e resíduos é

essencial para identificar os pontos críticos que requerem maior controle ambiental, e desta forma buscar e comparar soluções alternativas, dando suporte à tomada de decisões e políticas públicas. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV; LCA em inglês) é atualmente a metodologia mais robusta para esta avaliação de impactos ambientais, pois mapeia todos os processos do ciclo de vida delimitados em um sistema de produto, seus respectivos fluxos de entrada e saída de materiais, substâncias, insumos e energia, e associa a esses fluxos diversas categorias de impactos ambientais, como: aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção de recursos naturais, toxicidade humana e ecotoxicidade, dentre outras. Ao quantificar, classificar e caracterizar os impactos associados a cada um dos fluxos de entrada e saída de cada processo (ex. emissões atmosféricas, recursos naturais, energia), a ACV calcula um indicador para cada categoria de impacto, e permite assim mensurar os impactos totais de um sistema, e identificar os processos e fluxos críticos para cada impacto (ABNT, 2009). Em uma abordagem mais abrangente, a ACV Consequencial (CLCA em inglês), é possível avaliar os impactos de uma decisão tomada em um sistema de produto (ex. nova tecnologia de reciclagem) propagados ao longo de toda a cadeia de sistemas interligados a este, até a fronteira de processos marginais – aqueles que são afetados em no mínimo 1% de impacto pela decisão. Desta forma, a CLCA tem o potencial de modelar e avaliar problemas complexos de sustentabilidade, como as cadeias produtivas e ambientais associadas a sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos (Bernstad Saraiva et al, 2018).

A robustez metodológica e extensiva aplicação da ACV para avaliar impactos ambientais ao longo do ciclo de vida levou à necessidade de adaptá-la para também contemplar impactos sociais e econômicos, e de forma integrada, poder avaliar a sustentabilidade de produtos e sistemas. Nos últimos anos, especialistas têm se esforçado em desenvolver bases metodológicas para a Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-LCA em inglês), a Avaliação Econômica do Ciclo de Vida (que tem sido geralmente resumida ao Custeio do Ciclo de Vida – CCV), e a integração das três dimensões na Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA em inglês) (UNEP/SETAC, 2011, Souza et al, 2016).

No âmbito do desenvolvimento e aplicação da LCSA e seus componentes metodológicos, tem-se dado ênfase na avaliação de sistemas de resíduos sólidos.

Estes sistemas apresentam problemas complexos de sustentabilidade, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil. Diante de cenários de expressiva disposição final inadequada em lixões e aterros controlados, intensa atividade do setor informal na coleta e processamento de resíduos, amplo mercado formal e informal de reciclagem, complexa cadeia logística nacional e internacional, e carência de dados sobre grande parte das etapas do ciclo de vida, o desenvolvimento de abordagens de LCSA que sejam capazes de avaliar a sustentabilidade destes sistemas torna-se essencial (Sala et al, 2013; Souza et al, 2016; Berardocco et al, 2022). Visando expressar a complexidade destes sistemas e seus aspectos de sustentabilidade, tem-se tornado necessário desenvolver uma abordagem Consequencial da LCSA (ex. Voss et al, 2022). Ainda, devido à necessidade de uma robusta avaliação e integração entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos, muitos dos quais não podem ser avaliados de forma quantitativa ou não possuem dados disponíveis (especialmente em países em desenvolvimento), o desenvolvimento da LCSA vem progressivamente integrando métodos de apoio à tomada de decisão, como métodos de estruturação de problemas sociais complexos (PSM) e métodos de análise multicritério (MCDA) (e.g. Souza et al, 2015; Souza et al, 2016; Ren et al, 2018; Angelo & Marujo, 2019; Oliveira & Souza, 2023).

A importância da LCSA para sistemas de resíduos também abrange a crescente necessidade de desenvolver e selecionar produtos mais sustentáveis, de expandir a reciclagem e reduzir a dependência de matérias primas virgens. Em um país como o Brasil, é essencial compreender os impactos de sustentabilidade das práticas comumente adotadas, como por exemplo, a disposição final irregular de resíduos eletroeletrônicos, seu processamento inadequado por atores informais (ex. lixiviação ácida para obtenção de ouro), e num pensamento de ciclo de vida, a própria obtenção de matérias primas (haja vista a tragédia ambiental e humanitária associada à extração de ouro na Amazônia, e os problemas socioambientais das minas de Cobalto no Congo e de Lítio na América Latina), que poderia ser evitada com a ampla reciclagem (Souza et al, 2016; Amnesty International, 2017; Schüller et al, 2018; Harper et al, 2019).

Dentre os principais desafios para a realização de estudos robustos de LCSA aplicados ao gerenciamento de resíduos, particularmente em países em

desenvolvimento, está a necessidade de coleta e geração de dados primários e regionalizados – aqueles que expressam com maior fidelidade o contexto regional sendo estudado. Os dados coletados de fontes primárias e regionais permitem uma percepção mais transparente da realidade, reduzindo incertezas e facilitando a tomada de decisão (Ripa et al, 2017). A forma de obtenção destes dados envolve a consulta a partes interessadas e respectiva documentação (indústrias, empresas de gerenciamento de resíduos, prefeituras, órgãos ambientais etc.), questionários para avaliações qualitativas, amostragem de resíduos, emissões e efluentes, e análises em escala de laboratório (e.g. Souza et al, 2016; Jiang et al, 2020; Erakca et al, 2022).

Esta Tese contempla 12 artigos. O texto foi preparado de acordo com o Artigo 6o da Resolução UNESP número 27 de 14 de abril de 2009, que prevê a defesa de uma tese ou texto que sistematize criticamente parte da obra do candidato, como cumprimento dos requisitos para obtenção do título de Livre-docente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta Tese sistematizou as principais publicações científicas produzidas ao longo da minha carreira acadêmica, dentro do assunto de avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida (LCSA) de resíduos sólidos. A LCSA é uma metodologia em pleno desenvolvimento pela comunidade científica, pois deve permitir a estruturação e modelagem de sistemas complexos, integrando os aspectos sociais, ambientais e econômicos, e uma perspectiva de ciclo de vida. Por sua vez, a LCSA pode ser considerada um dos elementos necessários para a Gestão do Ciclo de Vida (GCV) de produtos e resíduos, uma vez que esta Gestão deve contemplar não somente a avaliação de desempenho de sustentabilidade, como processos de governança e engajamento de *stakeholders*, *design* de produtos, gestão estratégica, compras sustentáveis e outros (UNEP/SETAC, 2007). Apesar de a minha carreira ter se dedicado centralmente ao problema da avaliação da sustentabilidade usando a LCSA e suas componentes metodológicas, também expandi minha contribuição para as intersecções entre este assunto e a GCV de resíduos e produtos (especialmente observando os Artigos 1 e 9).

O Artigo 1 foi a minha primeira produção acadêmica neste assunto. Sua principal contribuição foi apresentar uma adaptação do Balanced Scorecard (BSC), respeitado método de gestão da estratégia, para o problema da gestão da sustentabilidade de RSU. Uma das principais vantagens do BSC é a integração dos objetivos gerais de uma organização em um mapa estratégico, que é um diagrama de causa-efeito que conecta os objetivos, permitindo detectar aqueles que são de curto, médio e longo-prazos, bem como caminhos críticos para o alcance da visão corporativa. Ao simular um potencial consórcio entre dois municípios, consultando os principais decisores envolvidos na gestão de RSU nestes locais, e com base nos princípios da sustentabilidade de resíduos identificados a literatura, foi possível definir potenciais objetivos estratégicos deste consórcio, e estruturar seu mapa estratégico. Também foi possível determinar objetivos específicos de cada setor que comporia o consórcio (e.g. gerência operacional, jurídico etc.), pela derivação dos objetivos gerais em consulta com especialistas envolvidos. Seguindo a metodologia do BSC, os objetivos estratégicos foram desdobrados em possíveis ações e indicadores de desempenho. Assim, este artigo trouxe elementos metodológicos que

foram aprofundados nos próximos estudos, como a consulta a *stakeholders*, estruturação de mapas de causa-efeito (um PSM), e definição de critérios e indicadores para avaliar a sustentabilidade em gestão de resíduos.

O Artigo 2 expressa um aprofundamento e maturidade metodológica neste processo de consulta a stakeholders e estruturação de mapas causais (mapas cognitivos), com vistas a identificar potenciais objetivos estratégicos, e particularmente, categorias de impacto da sustentabilidade do ciclo de vida de REEE. Neste estudo, foram consultados diversos especialistas no problema dos REEE no Brasil, representando a visão de diferentes setores, como: indústria de eletroeletrônicos, logística reversa, serviço municipal de gerenciamento de resíduos, catadores, dentre outros. A visão destes atores foi descrita nos mapas cognitivos, os quais foram integrados em um mapa geral unificado, de onde, observando a topologia das relações de causa-efeito, foi possível identificar potenciais categorias *midpoint* e *endpoint* para avaliação da sustentabilidade da logística reversa de REEE no Brasil. Este estudo foi inovador, não somente pela sua abordagem metodológica, como ao relevar categorias de impacto não destacadas pela literatura disponível até então, como a competição entre setor formal e informal, condições psicossociais de catadores, inovação para reciclagem, dentre outros. O artigo concentrou-se na identificação das categorias de impactos sociais e econômicos, pois a dimensão ambiental da LCSA já é contemplada de forma robusta pela ACV e suas categorias já consolidadas (e.g. aquecimento global, acidificação, toxicidade humana etc.).

O Artigo 3 é uma continuação do Artigo anterior, concentrado em dois problemas: a falta de dados para avaliação dos indicadores sociais e econômicos, o que é muito comum para os problemas de gerenciamento de resíduos, especialmente em países em desenvolvimento; e a necessidade de métodos multicritério para a integração entre as categorias sociais, ambientais e econômicas quali-quantitativas. Neste Artigo, foram simulados cenários de implementação da logística reversa de REEE no Brasil, que variavam segundo a localização dos pontos de entrega dos REEE, e das unidades de reciclagem de suas partes (exterior ou Brasil). A dimensão ambiental foi avaliada por um modelo de ACV, com base em dados da literatura e bases de ACV. As categorias sociais e econômicas foram medidas por consulta a especialistas, usando uma escala visual em que eles faziam uma comparação do desempenho relativo entre os cenários, para cada categoria. A

partir desta escala, foram medidos os desempenhos relativos dos cenários nas categorias, e aplicou-se um método multicritério chamado Composição Probabilística de Preferências, de forma que a resposta da integração das dimensões não fosse um índice adimensional de sustentabilidade, mas a probabilidade de um cenário ser preferível ao outro. Desta forma, buscou-se evitar a agregação das diferentes categorias na abordagem metodologicamente fraca de soma ponderada, o que permite a compensação entre as categorias. A análise probabilística permite uma melhor consideração sobre as incertezas na avaliação das categorias e na sua integração na abordagem multicritério para sustentabilidade.

O Artigo 4 concentra-se na dimensão ambiental da gestão de RSU, avaliando e discutindo a diferença entre os resultados da modelagem atribucional e consequential de ACV (em que a atribucional, mais difundida, limita os fluxos de entrada e saída aos processos dentro de um delimitado sistema de produtos). O estudo comparou três cenários para gerenciamento da fração orgânica dos RSU do Rio de Janeiro, que expressam: 1) sua completa destinação a aterros, misturados aos RSU (cenário de base); 2) separação de 50% da fração orgânica na fonte, com digestão anaeróbia e recuperação energética pelo biogás; e 3) separação mecânica posterior da fração orgânica mistura aos RSU, com digestão anaeróbia e recuperação energética do biogás. Em concordância com estudos anteriores, o Artigo detectou que a abordagem adotada para modelagem da ACV pode interferir na ordem de prioridade dos cenários analisados. A CLCA pode apresentar resultados melhores ou piores que a ACV atribucional, dependendo do método adotado para identificar os processos marginais afetados pela destinação dos resíduos orgânicos. Considerando que a recuperação energética do biogás pode substituir parcialmente o fornecimento de energia a partir da matriz energética brasileira, a magnitude do impacto evitado por este tratamento depende da magnitude dos impactos gerados pelo processo que é substituído. Quando são incluídos como processos marginais a expansão da vida útil de aterros, e a produção de fertilizantes minerais (substituído pelo orgânico), por exemplo, a magnitude dos impactos evitados pelo tratamento biológico com recuperação energética é maximizada.

O Artigo 5 aprofunda-se no problema de identificação de processos marginais em estudos de CLCA aplicados ao gerenciamento de resíduos sólidos. A

partir de uma revisão sistemática da literatura, identificaram-se as abordagens adotadas para identificação de tecnologias (de energia e materiais) afetadas pela reciclagem e tratamento de resíduos, e os critérios adotados para delimitação da fronteira de sistema. Do ponto de vista de tecnologias de produção de energia que são afetadas pela recuperação energética a partir de resíduos, a maioria dos estudos adotavam uma única tecnologia, mas também é comum que se adote a matriz energética nacional (mix de tecnologias), e até mesmo as redes fornecedoras de calefação, comuns no hemisfério norte. A substituição de materiais pela reciclagem pode enviesar os resultados da CLCA, quando se adotam dados médios da indústria nacional ou internacional, em estudos que comparam reciclagem com recuperação energética de resíduos. É necessário dedicar atenção para as incertezas relacionadas à identificação dos fluxos de materiais que são afetados pelas decisões estudadas. Com relação à delimitação da fronteira de sistema em CLCA, foram identificadas quatro abordagens, cuja escolha pode afetar os resultados da avaliação de impactos: i) consideração de alternativas perdidas, ou seja, processos que são evitados pela implementação da decisão em questão (ex. mais reciclagem, menos incineração); ii) efeitos indiretos da reciclagem, como a menor demanda por produtos de origem primária e de nutrientes minerais; iii) efeitos cascata do excesso de capacidade tecnológica: quando cria-se uma nova indústria de reciclagem, a capacidade anteriormente disponível (ex. incineradores) pode ser usada para processar outros materiais além de resíduos; e iv) efeitos rebote, como por exemplo a mudança nos padrões de consumo (processo marginal) em função da mudança nos preços entre produtos primários e reciclados. O Artigo destaca que os futuros estudos de CLCA de resíduos devem ter maior atenção ao nível de modelagem de sistemas (não somente processos unitários), e devem contemplar a consulta a especialistas, como economistas, para compreender melhor os processos afetados por mudanças nas cadeias de reciclagem e recuperação energética.

O Artigo 6 concentra-se em um outro problema da gestão de REEE, que pode afetar sua posterior avaliação da sustentabilidade: a estimativa do perfil qualitativo da geração destes resíduos, expressando o total de REEE que potencialmente segue pelas cadeias de processamento e destinação de resíduos. Muitos estudos científicos e técnicos adotam estimativas de vida útil de equipamentos que são defasadas, representam outros países, e quase sempre são

médias discretas que não contemplam variações nos padrões de consumo dos aparelhos. A partir de estudos anteriores, este Artigo considerou como referência o método de estimativa de REEE “*market supply*”, que adota um perfil probabilístico para a vida útil dos equipamentos. Este Artigo estimou o perfil probabilístico da vida útil de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) a partir de uma survey com uma amostra representativa da população de São José dos Campos-SP. O estudo observou que, neste município, os valores médios de vida útil tendem a ser menores que os anteriormente praticados na literatura, o que pode representar um subdimensionamento da logística reversa de REEE quando tomando em conta estes estudos anteriores. O Artigo também notou que os padrões de vida útil variam de acordo com as Zonas do município, podendo expressar uma correlação com os diferentes padrões socioeconômicos da população. Embora haja incertezas associadas às respostas dadas nas entrevistas, essa abordagem por *surveys* é recomendada para obter dados locais, quando não houver um rastreamento dos REEE gerados, o que é o cenário comum no Brasil e na maioria dos países.

O Artigo 7 é uma revisão teórica sobre os desafios e oportunidades da contribuição do gerenciamento de resíduos sólidos para a economia circular no Brasil. O Artigo discute a forte relação entre estes dois assuntos, demonstrando que as cadeias de resíduos sólidos podem contribuir para a economia circular tanto nos ciclos biológicos como técnicos e tecnológicos. Por outro lado, destaca os desafios do Brasil enquanto um país continental, evidenciando a diferença entre as regiões do país com relação ao gerenciamento de resíduos e capacidade industrial, bem como as limitações logísticas para melhorar estas cadeias. Ademais, o artigo discute os problemas nacionais com relação a resíduos de setores específicos, como a mineração, agricultura e indústria tecnológica.

O Artigo 8 apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre as soluções atualmente adotadas para estudos de ACV Social (SLCA) aplicados ao gerenciamento de resíduos sólidos. Observou-se que estes estudos são mais frequentes em países em desenvolvimentos, evidenciando os problemas sociais relacionados aos seus sistemas de resíduos, como a informalidade e riscos de contaminações, especialmente com foco na disposição final, que em muitos casos são lixões a céu aberto. Por este motivo, os trabalhadores e comunidades locais foram os stakeholders mais enfocados, sendo avaliadas principalmente as

categorias de impacto relacionadas às condições de trabalho, saúde e segurança. O estudo constatou que ainda há grande necessidade de evolução da metodologia de SLCA, que apresenta desafios para se alinhar ao método já bem estabelecido e normatizado para a ACV (ambiental), que deve servir de referência para as demais componentes da LCSA.

Já o Artigo 9 concentra-se em outra etapa do ciclo de vida dos produtos, antes de se tornarem resíduos: a compra sustentável. A partir de uma revisão sistemática da literatura, complementada pela consulta a especialistas, e adotando o mapeamento cognitivo (de forma semelhante ao Artigo 2), este Artigo estabeleceu um conjunto de critérios de sustentabilidade para a compra de produtos sustentáveis. A partir deste mapeamento, observou-se, além das três dimensões clássicas da sustentabilidade, uma quarta dimensão relevante para a decisão sobre as compras, que consiste em critérios de Governança e *Compliance* do Fornecedor. Esta dimensão compreende categorias de impactos associadas aos *endpoints* “maturidade do sistema de gestão”, “auditoria externa” e “legitimidade (legalidade)”. A contribuição dos especialistas permitiu não somente validar categorias bem estabelecidas na literatura, como revelou outras categorias de sustentabilidade inovadoras, como: “estímulo a movimentos e questões sociais”, “custos durante o uso” e “custos pós-uso do produto”.

O Artigo 10, na mesma linha dos Artigos 2 e 9, adota PSM em combinação com a revisão de literatura e consulta a stakeholders, para determinar categorias de impacto de LCSA – neste caso, específicas para as baterias de íons de lítio (LIBs), e tendo como eixo teórico os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e suas respectivas metas. O estudo observou que as etapas do ciclo de vida de LIBs com maior potencial para afetar os ODS são a extração de matéria prima, produção de materiais e células, e o fim-de-vida (resíduo). Estes problemas são maximizados quando estas etapas ocorrem em países em desenvolvimento, o que é mais crítico na extração de matéria prima (intensificada no Congo e América Latina).

Os Artigos 11 e 12 concentram-se no problema de geração de dados primários, que podem subsidiar estudos de ACV mais robustos e regionalizados no Brasil. O Artigo 11 simulou cenários de disposição final de REEE em aterros e lixões no Brasil, misturados aos RSU. Ao coletar e analisar quimicamente os lixiviados gerados, observou-se maior concentração de metais pesados nos tanques que

continham REEE. O método de preparação das amostras de lixiviados para análise também interferiu nos resultados. O Artigo 12, por sua vez, apresenta o desempenho e a caracterização química de uma tecnologia nacional para reciclagem do índio de resíduos de telas de cristal líquido (LCD). O estudo também detalha o fluxo de insumos (substâncias, energia) necessários para a aplicação desta reciclagem e obtenção de seu produto final (concentrado de In).

Este histórico de publicações demonstra uma atuação científica consistente deste candidato, desenvolvendo estudos e conhecimento em assuntos relacionados à sustentabilidade do ciclo de vida de produtos. Alguns destes estudos contemplam a modelagem de ACV (ambiental) para avaliar sistemas de resíduos sólidos no Brasil (Artigo 3 e Artigo 4). Ainda sobre a ACV ambiental, os Artigos 4 e 5 aprofundam-se na importância da abordagem Consequencial (CLCA), de forma a identificar e avaliar impactos em processos marginais afetados por mudanças nos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos. Os Artigos 2, 9 e 10 concentram-se na adoção de PSM combinada com revisão sistemática da literatura e consulta a especialistas, visando determinar categorias de impacto social e ambiental do ciclo de vida de produtos e resíduos. O Artigo 8 aprofunda-se na forma como a ACV social (SLCA) tem sido aplicada a problemas de resíduos sólidos, apresentando o estado-da-arte e diretrizes metodológicas para futuros estudos, da mesma forma que o Artigo 5 o faz para estudos de CLCA aplicados a resíduos. O Artigo 6 procura solucionar um dos problemas associados à geração de dados primários e regionalizados em ACV/LCSA, que são um dos principais gargalos para estudos de ACV e LCSA: neste caso, o perfil quantitativo e qualitativo da geração de REEE pela população Brasileira, que seguem diferentes cadeias de processamento de resíduos no país. A geração de dados primários para potenciais estudos de ACV e LCSA também foi o objetivo dos Artigos 11 e 12, que visam melhorar a confiabilidade e reduzir a incerteza de futuros estudos de ACV: o Artigo 11 analisou o teor de metais em lixiviados de simulações de aterros e lixões contendo REEE e RSU; e o Artigo 12 apresenta a caracterização química dos fluxos de insumos necessários e produtos gerados (concentrado de In) em um processo de reciclagem de Índio de telas de cristal líquido (LCD). Dados primários como estes permitem modelos de ACV muito confiáveis, detalhados em nível de processos unitários, e representando a situação nacional, seja na disposição final de resíduos, como potenciais tecnologias de

reciclagem atualmente desenvolvidas no Brasil.

Expandindo-se para a Gestão do Ciclo de Vida, o Artigo 1 abordou a gestão estratégica de resíduos sólidos, adotando uma metodologia que foi aprofundada e aperfeiçoada nos Artigos 2 e 9. O Artigo 9 expandiu a preocupação com a sustentabilidade do ciclo de vida para a fase pré-uso dos produtos (compra), enquanto os resíduos se caracterizam como tal no pós-uso.

Em uma perspectiva maior, observa-se que não há como diferenciar o ciclo de vida do produto e do resíduo, pois as etapas de seus ciclos de vida se sobrepõem. Nestes casos, a única limitação é a delimitação do escopo para o estudo de LCSA, que conforme as normas de ACV, deve ser definida em função do objetivo do estudo. Observando a complexidade envolvida na sustentabilidade do ciclo de vida de produtos e resíduos, e considerando o aprofundamento teórico permitido por estes estudos, considera-se que as fronteiras de sistemas de ciclo de vida devem ser o mais amplas possíveis. Assim como na CLCA, isto permite ter uma visão mais abrangente das cadeias de causa e efeito associadas a cada determinada etapa do gerenciamento de resíduos ou do ciclo de vida, e todos os processos e mercados que são significativamente afetados por alterações nestas etapas. Assim, compreende-se que o próximo ciclo de estudos deste candidato deve não somente aprofundar-se na modelagem de ACV e SLCA, mas contemplar temas associados como: LCSA consequencial, desenvolvimento de produtos sustentáveis, função das cadeias de resíduos para a economia circular e ODS, e análises químicas para geração de dados primários relevantes. Esta tendência tem se demonstrado pelo tema dos Artigos 10 a 12, em revisão por periódicos indexados internacionais, representando o próximo ciclo de possíveis publicações do candidato.

Por fim, destaca-se que esta Tese não é exaustiva da produção acadêmica deste candidato, pois não contempla outras produções como: livros e capítulos de livro, orientações de TCC que não geraram artigos indexados, artigos em desenvolvimento, artigos publicados em eventos científicos, e orientações de Mestrado e Doutorado em andamento. Esta atuação complementar tem explorado temas associados aos assuntos destacados acima, reforçando os potenciais eixos condutores para futuras publicações científicas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 14040: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 21 p
- Amnesty International. Democratic Republic of the Congo: Time to recharge: Corporate action and inaction to tackle abuses in the cobalt supply chain. Amnesty International, 2017. Available at: <https://www.amnesty.org/en/documents/afr62/7395/2017/en/>
- Angelo A.C.M., Marujo L.G. Chapter 12 - Life cycle sustainability assessment and decision-making under uncertainties, in: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making. Editor(s): Ren, J., Toniolo, S. Elsevier, Pages 253-268, 2020. ISBN 9780128183557. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00012-9>.
- Berardocco C, Delawter H, Putzu T, Wolfe LC, Zhang H. Life Cycle Sustainability Assessment of Single Stream and Multi-Stream Waste Recycling Systems. *Sustain.*, 14(24):16747, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142416747>.
- Bernstad Saraiva, A., Souza, R. G., Mahler, C. F., Valle, R. A. B. Consequential lifecycle modelling of solid waste management systems – Reviewing choices and exploring their consequences. *J. Cleaner Prod.* 2018; 202: 488–496. doi: n°. 10.1016/j.jclepro.2018.08.038
- Beula D., Sureshkumar M. A review on the toxic E-waste killing health and environment – Today's global scenario. *Mater. Today: Proceedings*, 2021.
- Ducoli S., Fahimi A., Mousa, E., Ye, G., Federici, S., Frontera, P., & Bontempi, E. ESCAPE approach for the sustainability evaluation of spent lithium-ion batteries recovery: Dataset of 33 available technologies. *Data in Brief*, 42, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2022.108018>
- Erakca, M.; Bautista, S.P.; Moghaddas, S.; Baumann, M.; Bauer, W.; Leuthner, L.; Weil, M. Closing gaps in LCA of lithium-ion batteries: LCA of lab-scale cell production with new primary data. *J. Clean. Prod.*, 384, 135510, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135510>
- Fahimi A., Ducoli S., Federici S., Ye G., Mousa E., Frontera P., & Bontempi E. Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint. *J. Cleaner Prod.*, 338, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130493>.
- Gómez-Sanabria A. et al. Potential for future reductions of global GHG and air pollutants from circular waste management systems. *Nature Communications* 2022 13:1, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2022.
- Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R., Walton A., Christensen P., Heidrich O., Lambert S., Abbott A., Ryder K., Gaines L., & Anderson P. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575:7781, 575(7781), 75–86, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
- Herreras-Martínez L., Anta M., Bountis R. et al. (2021). Recommendations for tackling fires caused by lithium batteries in WEEE- A report of the Batteries Roundtable. Available at: <https://weee-forum.org/wp->

<content/uploads/2021/07/Tackling-fires-caused-by-batteries-in-e-waste.pdf>.

Accessed in: 05 December 2022.

Jiang S., Zhang L., Li F., Hua H., Liu X., Yuan Z., Wu H. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *J. Environ. Manag.*, 262, Article 110253, 2020. Doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110253

Mrozik W., Rajaeifar M. A., Heidrich O., & Christensen P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environ. Sci.*, 14(12), 6099–6121. <https://doi.org/10.1039/D1EE00691F>

Oliveira D.F., Souza R.G. Life cycle sustainability impact categories for sustainable procurement, *J. Cleaner Prod.*, V. 383, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135448>.

Ren J., Ren X., Dong L., Manzardo A., He C. & Pan M. Multiactor multicriteria decision making for life cycle sustainability assessment under uncertainties. *AIChE J.*, 64: 2103-2112, 2018. <https://doi.org/10.1002/aic.16149>

Ripa A., Fiorentino G., Vacca V., Ulgiati S. The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). *J. Clean. Prod.*, 142, pp. 445-460, 2017. Doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.149

Sala S., Farioli F. & Zamagni A. Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2). *Int J Life Cycle Assess* 18, 1686–1697, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0509-5>

Schüler D., Dolega P., & Degreif S. Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector. In European Policy Brief. Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE), 2018.

Souza R.G., Rosenhead J., Salhofer S.P., Valle R.A.B., Lins M.P.E. Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. *J. Clean. Prod.*, 105, pp. 41-51, 2015. Doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.051

Souza, R.G., Clímaco, J.C.N., Sant'Anna, A.P., Rocha, T.B., Valle, R.A.B., Quelhas, O.L.G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Manag.* 57, 46–56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.034>.

UNEP/SETAC. Life Cycle Management: A Business Guide to Sustainability. UNEP. 2007. Available at: <https://www.unep.org/resources/report/life-cycle-management-business-guide-sustainability>. Accessed in: 17 February 2023.

UNEP/SETAC. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. UNEP, 2011. Available at: www.unep.org/resources/report/towards-life-cycle-sustainability-assessment-making-informed-choices-products. Accessed in: 17 February 2023.

Voss, R., Lee, R. P., & Fröhling, M. A consequential approach to life cycle sustainability assessment with an agent-based model to determine the potential contribution of chemical recycling to UN Sustainable Development Goals. *J Indust Ecol*, 00, 1– 20, 2022. <https://doi.org/10.1111/jiec.13303>