



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

MATHEUS REISEN DE ALBUQUERQUE - matheus.albuquerque@ufes.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES

RICARDO ISHIMURA - ricardo.ishimura@edu.ufes.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES

LOURENÇO COSTA - lourenco.costa@ifes.edu.br
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

ROQUEMAR DE LIMA BALDAM - roquemar@ifes.edu.br
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

THALMO DE PAIVA COELHO JÚNIOR - thalmo@ifes.edu.br
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - IFES

ÁREA: 9. ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE

SUBÁREA: 9.1 - GESTÃO AMBIENTAL

RESUMO: O OBJETIVO DESTA ESTUDO É APROFUNDAR A COMPREENSÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) E IMPULSIONAR O AVANÇO INTELECTUAL NESSE CAMPO ESPECÍFICO. PARA ALCANÇAR ESSA META, UMA REVISÃO SISTEMÁTICA FOI CONDUZIDA, FOCALIZANDO A AVALIAÇÃO E CERTIFICAÇÃO DO CICLO DE VIDA NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR. ESSE PROCESSO ENVOLVEU UMA BUSCA CRITERIOSA EM BASES DE DADOS RENOMADAS, COMO SCOPUS E WEB OF SCIENCE, COM FOCO NA IDENTIFICAÇÃO DE ARTIGOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS ENTRE 2019 E 2023 E COM UM FATOR DE IMPACTO JCR (JOURNAL CITATION REPORTS) IGUAL OU SUPERIOR A 10. A REVISÃO SISTEMÁTICA BUSCOU IDENTIFICAR E ANALISAR CONTRIBUIÇÕES SIGNIFICATIVAS PROVENIENTES DE PESQUISAS RECENTES RELACIONADAS À AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA. ESSA ABORDAGEM VISA DESTACAR ESTUDOS QUE SEJAM PARADIGMÁTICOS NO TRATAMENTO DESSE TEMA ESPECÍFICO, OFERECENDO UMA PERSPECTIVA CONSOLIDADA E RELEVANTE SOBRE A ACV NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR. AO MAPEAR E SINTETIZAR ESSAS CONTRIBUIÇÕES, O ESTUDO BUSCOU NÃO APENAS OFERECER UMA VISÃO ABRANGENTE DAS PESQUISAS RECENTES, MAS TAMBÉM ESTABELECEER UMA BASE SÓLIDA PARA O AVANÇO DO CONHECIMENTO NESSA ÁREA, CONTRIBUINDO PARA SEU DESENVOLVIMENTO E REFINAMENTO INTELECTUAL. OS RESULTADOS OBTIDOS INDICAM UMA CRESCENTE ADOÇÃO DA ACV EM VÁRIAS INDÚSTRIAS E SETORES. NO ENTANTO, RESSALTA-SE A IMPORTÂNCIA CONTÍNUA DE MELHORAR AS METODOLOGIAS DA ACV PARA UMA ABORDAGEM MAIS ABRANGENTE E PRECISA DOS IMPACTOS AO LONGO DO CICLO DE VIDA DOS PRODUTOS.

PALAVRAS-CHAVES: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA; ACV; AVALIAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE; CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL.

LIFE CYCLE ASSESSMENT – A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT: THE PURPOSE OF THIS STUDY IS TO DEEPEN UNDERSTANDING OF LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) AND DRIVE INTELLECTUAL ADVANCEMENT IN THIS SPECIFIC FIELD. TO ACHIEVE THIS GOAL, A SYSTEMATIC REVIEW WAS CONDUCTED, FOCUSING ON LIFE CYCLE ASSESSMENT AND CERTIFICATION IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY. THIS PROCESS INVOLVED A CRITERIOUS SEARCH IN RENOWNED DATABASES, SUCH AS SCOPUS AND WEB OF SCIENCE, WITH A FOCUS ON IDENTIFYING SCIENTIFIC ARTICLES PUBLISHED BETWEEN 2019 AND 2023 AND WITH A JCR (JOURNAL CITATION REPORTS) IMPACT FACTOR EQUAL OR GREATER THAN 10. SYSTEMATIC REVIEW SEEKED TO IDENTIFY AND ANALYZE SIGNIFICANT CONTRIBUTIONS FROM RECENT RESEARCH RELATED TO LIFE CYCLE ASSESSMENT. THIS APPROACH AIMS TO HIGHLIGHT STUDIES THAT ARE PARADIGMATIC IN THE TREATMENT OF THIS SPECIFIC TOPIC, OFFERING A CONSOLIDATED AND RELEVANT PERSPECTIVE ON LCA IN THE CONTEXT OF THE CIRCULAR ECONOMY. BY MAPPING AND SYNTHESIZING THESE CONTRIBUTIONS, THE STUDY SEEKED NOT ONLY TO OFFER A COMPREHENSIVE VIEW OF RECENT RESEARCH, BUT ALSO TO ESTABLISH A SOLID BASIS FOR THE ADVANCEMENT OF KNOWLEDGE IN THIS AREA, CONTRIBUTING TO ITS INTELLECTUAL DEVELOPMENT AND REFINEMENT. THE RESULTS OBTAINED INDICATE A GROWING ADOPTION OF LCA IN VARIOUS INDUSTRIES AND SECTORS. HOWEVER, THE CONTINUED IMPORTANCE OF IMPROVING LCA METHODOLOGIES FOR A MORE COMPREHENSIVE AND ACCURATE APPROACH OF IMPACTS THROUGHOUT THE LIFE CYCLE OF PRODUCTS IS EMPHASIZED.

KEYWORDS: LIFE CYCLE ASSESSMENT; ACV; SUSTAINABILITY ASSESSMENT; ENVIRONMENTAL CERTIFICATION.

1. INTRODUÇÃO

O contexto mundial atual demonstra a fragilidade das indústrias e cadeias de abastecimento globais, considerando a recessão econômica advinda da pandemia de Covid-19 e a crise energética amplificada pela guerra russo-ucraniana. Observa-se, com isso, um cenário de crescimento econômico limitado e a dependência de fluxos constantes e confiáveis de produtos e serviços, o que evidencia a necessidade de procurar soluções técnicas de baixo impacto para a produção de bens de consumo. Nesta lógica, verifica-se que a economia circular se tornou um veículo significativo de grande parte do esforço atual de pesquisa em sustentabilidade, havendo mais de 18.000 registros na Scopus e uma taxa média anual de crescimento de artigos publicados de cerca de 33% nos últimos 10 anos (Borrello *et al.*, 2023).

Além de ser um tópico de grande interesse no meio acadêmico, observa-se a mesma tendência no mercado consumidor, pois tem crescido a preocupação dos consumidores com a produção sustentável de bens e serviços e as empresas têm sido compelidas a investir na melhoria da sustentabilidade das suas práticas de gestão de resíduos. Neste cenário, o reaproveitamento de resíduos tem o duplo benefício de aumentar os lucros dos produtores e, ao mesmo tempo, mitigar o impacto ambiental (Haq; Alam, 2023).

Um modelo de negócios baseado na economia circular implica em uma reavaliação detalhada da estrutura e das operações de uma organização, bem como de toda a sua cadeia de valor. Assim, a inovação contínua deve ser o foco principal, à medida que as empresas exploram como os materiais, produtos e processos biológicos podem aprimorar a eficiência dos recursos e gerar novos produtos, energia e serviços. Durante esse processo, o modelo de negócios da empresa é redesenhado de forma a se concentrar na promoção de uma economia circular, não apenas minimizando o desperdício e otimizando o uso de recursos, mas também se esforçando para integrar princípios e práticas como o uso de materiais renováveis e a regeneração de ecossistemas, como parte central de seu funcionamento (Marshall *et al.*, 2023).

Considerando este cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta poderosa que possibilita uma análise abrangente dos impactos ambientais associados aos materiais durante todo seu processo de vida, perpassando pela extração da matéria-prima, fabricação, transporte, uso e descarte. Essa abordagem proporciona uma visão completa e metódica para avaliar o desempenho ambiental dos materiais, além de identificar

oportunidades de aprimoramento, auxiliar na tomada de decisões esclarecidas e contribuir para práticas mais sustentáveis na indústria (Barbhuiya; Das, 2023).

Tendo em vista a relevância do tema, buscou-se, no presente artigo, identificar e resumir o estado atual do conhecimento, numa tentativa de compilar e resumir as informações disponíveis sobre este tópico de sustentabilidade específico, permitindo, assim, uma melhor compreensão do que está bem estabelecido e o que permanece em aberto.

Com este objetivo, procedeu-se, como método de pesquisa, a uma busca abrangente em bases de dados, utilizando palavras-chave e estratégias de busca para garantir a abrangência almejada. Deste modo, ao analisar a literatura existente, a presente revisão sistemática investigou como os estudos recentes observam a relevância da Avaliação do Ciclo de Vida para a transição para uma economia circular.

Além dessa introdução, o presente artigo contempla o método de pesquisa utilizado, seguido pela seção de resultados e discussões e, por fim, apresenta a conclusão.

2. MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa desenvolvida foi uma busca sistemática em base de dados relevantes. Para isso, realizou-se, por meio do Portal de Periódicos da Capes, uma busca nas bases de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science - WoS (*Clarivate Analytics*), nas quais foram selecionados artigos científicos escritos em inglês, de livre acesso (“*open access*”) e dos últimos cinco anos. A pesquisa foi conduzida em novembro de 2023, utilizando os campos de pesquisa disponíveis. Como estratégia de busca, foi realizada a associação entre os descritores, utilizando operadores booleanos.

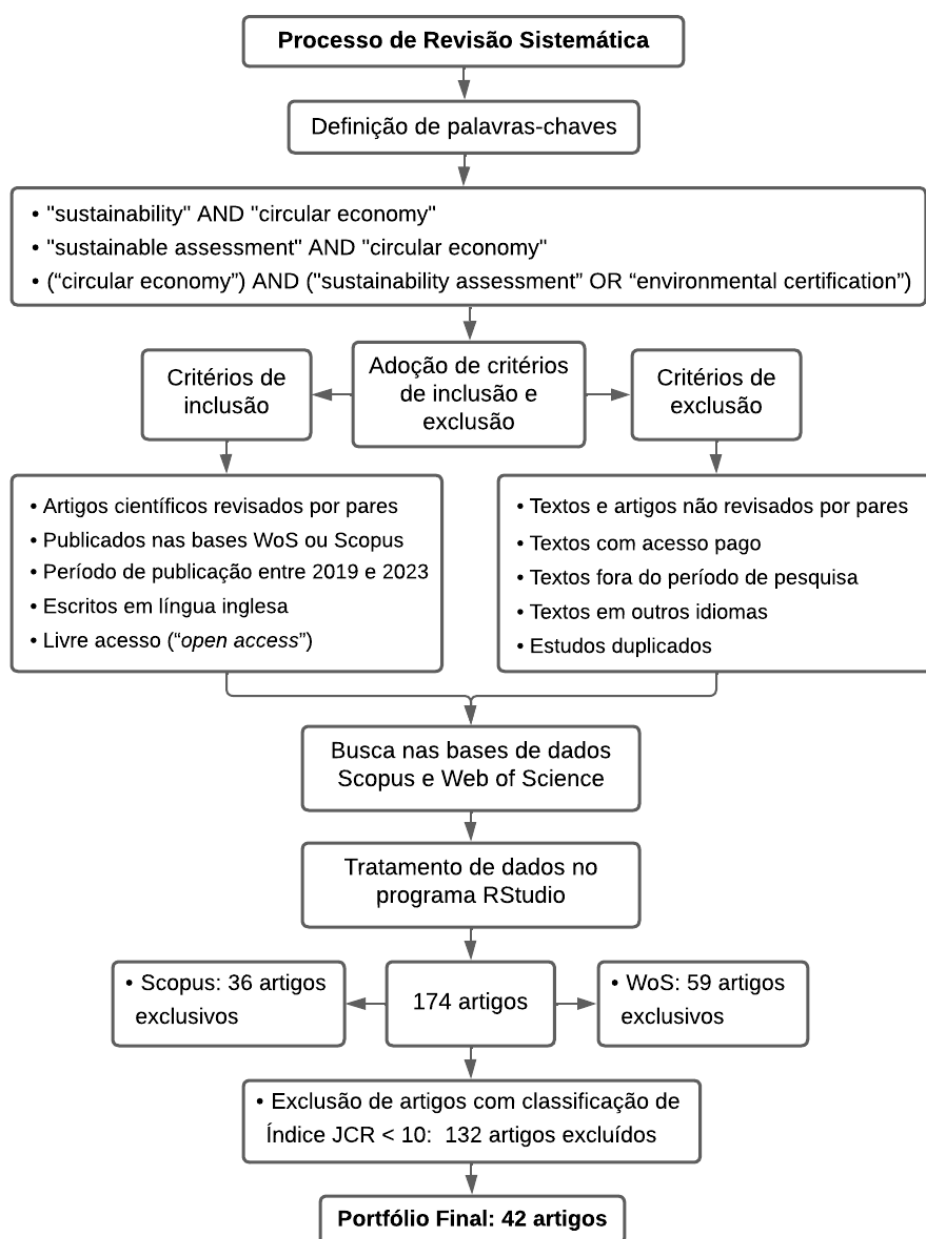
Foram utilizadas três *strings* de busca para ampliar o escopo da pesquisa e garantir uma cobertura mais abrangente dos estudos relacionados à temática, incorporando uma variedade de termos-chave, aumentando a abrangência dos resultados, reduzindo o viés de seleção e capturando diferentes aspectos da interseção entre os temas, garantindo uma análise mais abrangente e equilibrada dos estudos relevantes. As *strings* de busca utilizadas nas bases de dados selecionadas foram as seguintes: (i) *sustainability AND "circular economy"*; (ii) *"sustainable assessment" AND "circular economy"* e (iii) (*"circular economy"*) *AND (sustainability assessment) OR "environmental certification"*.

Os resultados obtidos da pesquisa nas bases de dados foram combinados e processados utilizando o pacote Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017). Os dados resultantes dessa análise foram exportados para uma planilha eletrônica e classificados utilizando o *Methodi Ordinatio*

(Pagani *et al.*, 2015), que por sua vez pondera a relevância dos artigos, com base em três fatores de classificação: fator de impacto, número de citações e o ano de publicação.

Numa revisão sistemática, os critérios de inclusão e exclusão são fundamentais para definir quais estudos serão considerados na análise. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de revisão sistemática utilizado, bem como os critérios utilizados para a seleção do portfólio final de artigos.

FIGURA 1 – Fluxograma do processo de busca e inclusão de estudos.



Fonte: Elaboração própria.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca resultou em um conjunto de 174 artigos, sendo que 36 dos artigos coletados estão presentes exclusivamente na base Scopus, enquanto 59 estão presentes exclusivamente na base Web of Science e 79 estão presentes em ambas as bases de dados (tanto na Scopus quanto na Web of Science).

A partir dos 174 artigos coletados, optou-se por excluir os artigos dos periódicos que possuem a classificação no índice JCR (*Journal Citation Report*) inferior a 10, restando 42 artigos que atendem a esse critério de fator de impacto e que formaram o portfólio final da revisão sistemática.

A leitura completa dos artigos que compuseram o portfólio final proporcionou uma visão abrangente do estado atual de como é avaliado o ciclo de vida. Se antes a ideia do ciclo de vida era do berço ao túmulo, a ideia agora é do berço ao berço. Para tanto, esses métodos avaliam os impactos para a produção de cada material utilizado como insumo e os seus ciclos de vida, a energia utilizada na etapa de produção e o transporte dos materiais. Um *framework* muito comum é o *Life Cycle Analysis* (LCA), que pode ser aplicado no contexto da construção civil (Gaibor *et al.*, 2023). Outro *framework* bastante utilizado é Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost* - LCC), que é utilizado para avaliar a sustentabilidade econômica do ciclo de vida de um produto ou processo.

Especificamente no caso de desenvolvimento de produtos, utiliza-se o *framework* chamado *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA). O LCSA é utilizado para avaliar todos os impactos e benefícios de um produto, relacionando-os aos três pilares da sustentabilidade (ambiental, social e econômico). Ele visa dar suporte à tomada de decisão, no sentido de tornar os produtos mais sustentáveis ao longo do seu ciclo de vida. Outro *framework* encontrado foi desenvolvido por Taelman (2018), que através da coleta de dados locais, permite quantificar indicadores ambientais, econômicos e sociais.

Quando o foco é o impacto, existe o método *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), que avalia quantitativamente as etapas pelo tipo e extensão dos impactos ambientais que podem surgir com base nos dados coletados no Ciclo de Vida. Outros métodos semelhantes são o *Life Cycle Sustainability Impact Assessment* (LCSIA) e *Comprehensive Assessment*.

O método *Solution-focused Sustainability Assessment framework* (SfSA) é uma abordagem para gerar, explorar e decidir sobre soluções sustentáveis para problemas graves.

A estrutura do SfSA é melhorada com uma “abordagem em cadeia”, que visa envolver as partes interessadas de toda uma cadeia de produtos de interesse (desde designers a recicladores) para explorar o “espaço de soluções”, a partir de diferentes perspectivas. Isso dá uma visão ampla dos aspectos científicos e práticos do problema e das soluções potenciais. Envolver as partes interessadas para explorar os riscos, bem como selecionar e implementar de forma colaborativa oportunidades de redução de riscos tem sido aplicado com sucesso à poluição química no ciclo da água (van Bruggen *et al.*, 2022).

Há também a metodologia *Absolute Environmental Sustainability Assessments* (AESA) que foi desenvolvida para determinar quantitativamente o impacto ambiental de uma atividade, por exemplo, o cultivo de tomate, ou os hábitos da população, por exemplo, a lavagem de roupas (Sherwood, Gongora, Velenturf, 2022). Nesse aspecto, tem-se o método *Performance-weighted abiotic Resource Depletion* (PwRD), esgotamento de recursos abióticos ponderados pelo desempenho. Ao aplicar essa metodologia para avaliar uma atividade de geração de energia utilizando energia eólica, que utiliza o material poluente neodímio, verificou-se a existência da mesma quantidade deste material em turbinas eólicas instaladas nos Filipinas, no Paquistão e nos Estados Unidos, o que sugere que a utilização de gerador eólico tem aceitabilidade em termos de sustentabilidade tanto em países com baixo consumo energético per capita, como em países com alto consumo per capita (Sherwood, Gongora, Velenturf, 2022).

Para avaliar os aspectos técnico-econômicos e o potencial ambiental de iniciativas de recuperação de recursos foi desenvolvido um framework sistemático assistido por computador (Silk *et al.*, 2020). A aplicação foi demonstrada em um estudo de caso de refino de trigo, especificamente na recuperação de monossacarídeos de licor de palha de trigo. Ela foi empregada para identificar e desenvolver soluções na presença de múltiplos recursos-alvo e facilitar a geração de alternativas lucrativas e tecnicamente viáveis.

Entre os modelos de negócios para inovação, e inovação sustentável, mais especificamente, tem sido amplamente reconhecido na literatura os *Sustainable Business Models* (SBMs), ou Modelos de Negócios Sustentáveis.

Os estudos destacados pela presente revisão sistemática de literatura apresentam uma variedade de abordagens e contextos nos quais a Avaliação do Ciclo de Vida é aplicada. Tais estudos abrangem setores diversos, desde recursos naturais até estratégias logísticas e reciclagem, evidenciando um amplo espectro de preocupações e contribuições para a sustentabilidade. No Quadro 1, apresenta-se um recorte dos principais artigos do portfólio.

QUADRO 1 – Abordagens e contextos nos quais a Avaliação do Ciclo de Vida é aplicada.

Autor	Abordagem utilizada
Klemenzen <i>et al.</i> (2021)	<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) – framework</i> aplicado ao desenvolvimento de catalizador para eletrólise da água.
Bhambhani, van der Hoek, Kapelan (2022)	<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) – framework</i> para avaliar o setor de saneamento que para tratar a água. Usou novo composto biológico (obtido através da recuperação de recursos) e comparou com o tradicional que é feito de madeira.
Tonini <i>et al.</i> (2020)	<i>Framework</i> desenvolvido por Taelman (2018) para avaliar o lixo de Amsterdã e envolvendo as partes interessadas locais na definição do <i>framework</i> de sustentabilidade.
Santillán-Saldivar <i>et al.</i> (2021)	<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) –</i> usado para avaliar o potencial reciclagem doméstica de mitigar riscos. Redução nas importações totais (o “efeito de redução”) e uma potencial redistribuição do mix de oferta de importações (o “efeito de redistribuição”). Incorporação da avaliação de risco de fornecimento de matérias-primas críticas como um complemento à ACV.
André & Ljunggren (2021)	Mapeamento focado no impacto do ciclo de vida. Métodos LCIA, CA e LCSIA numa estrutura comum de cadeia de causa-efeito permite uma maior compreensão de como as metodologias podem complementar-se umas às outras. Esses métodos foram aplicados para avaliar os minerais. Funções complementares do ciclo de vida, sustentabilidade do ciclo de vida e avaliações de criticidade. Tentativa de Incluir informação do mercado financeiro ações, fundos e cotações.
Melkonyan <i>et al.</i> (2020)	Avaliação de sustentabilidade de estratégias de distribuição e logística.
Walker <i>et al.</i> (2021)	<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)</i> para desenvolver um <i>framework</i> envolvendo a ecologia industrial e gestão da cadeia de suprimento.
van Bruggen <i>et al.</i> (2022)	<i>Solution-focused Sustainability Assessment framework (SfSA)</i> é uma abordagem para gerar, explorar e decidir sobre soluções sustentáveis para problemas graves. A estrutura do SfSA é melhorada com uma “abordagem em cadeia”, que visa envolver as partes interessadas de toda uma cadeia de produtos de interesse (desde designers a recicladores) para explorar o “espaço de soluções” a partir de diferentes perspectivas. Isso dá uma visão ampla dos aspectos científicos e práticos do problema e das soluções potenciais.
Sherwood, Gongora, Velenturf (2022)	A metodologia <i>Absolute Environmental Sustainability Assessment (AESA)</i> , Esgotamento de recursos abióticos ponderados pelo desempenho (PwRD), permite comparar

	diretamente o uso de recursos de diferentes produtos. Em regiões com baixa procura de eletricidade <i>per capita</i> , como as Filipinas e o Paquistão, a mesma quantidade de neodímio utilizada numa turbina eólica instalada nos EUA foi considerada aceitável para sustentar uma economia circular.
Rodrigues <i>et al.</i> (2021)	<i>Absolute Environmental Sustainability Assessment</i> (AESA) – gestão de resíduos, usando Grand Lyon como um estudo de caso simplificado. O impacto, as economias de recursos permitidas pelos produtos secundários resultantes da valorização dos materiais reciclados, calor e eletricidade superam os impactos negativos gerados pelo transporte e tratamento de resíduos.
Silk <i>et al.</i> (2020)	<i>Framework</i> sistemático assistido por computador aplicado ao refino de trigo. Permitiu a viabilidade da recuperação de monossacarídeos de licor de palha de trigo.
Maher <i>et al.</i> (2018)	Integrando o <i>Design Thinking</i> com a ciência da sustentabilidade para ajudar a alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
Papo & Corona (2022)	<i>Life Cycle Sustainability Assessment</i> (LCSA) para avaliar o impacto da reciclagem de garrafas de não-bebidas de polietileno de alta densidade
Gaibor <i>et al.</i> (2023)	Avalia a construção sustentável com as convencionais utilizando o método <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA).
Bhatnagar <i>et al.</i> (2022)	Faz revisão de vários métodos de avaliação de ciclo de vida aplicado aos modelos de inovação de negócios.
Harris <i>et al.</i> (2021)	Aplica os métodos LCA e LCC para os estágios iniciais do tratamento de água.
Ng & To (2020)	Uso do <i>Life Cycle Sustainability Assessment</i> (LCSA) para examinar os <i>trade-offs</i> entre os impactos econômicos, ambientais e sociais do fornecimento das necessidades de eletricidade e aquecimento em dois agregados familiares fora da rede na zona rural de Portugal.
Jiménez-Benítez <i>et al.</i> (2020)	Equilíbrio econômico ao utilizar biodigestor par água de reuso.
Bhatt, Ghuman, Dhir (2020)	Artigo de revisão que relaciona os principais artigos.
Bianchi <i>et al.</i> (2023)	Aplicou a metodologia LCA para realizar uma análise detalhada dos impactos ambientais associados aos freios carbono-cerâmicos obtidos a partir da sucata.
Pasciucco, Pecorini, Iannelli (2022)	Usou o método <i>Life Cycle-Assessment</i> (LCA) nos sistemas de tratamento de águas residuais, que presumivelmente irão melhorar a sustentabilidade econômica, social e ambiental, para alcançar o desenvolvimento urbano no contexto do nexo água-energia-segurança alimentar.
Kubler <i>et al.</i> (2019)	Usou os métodos <i>Life Cycle-Assessment</i> (LCA) e <i>Cost-Benefit Analysis</i> (CBA) para avaliar datacenter sob perspectiva biomimética.

Fonte: Elaboração própria.

A seguir, fez-se um recorte dos sete primeiros artigos do portfólio, que possuem uma classificação JCR mais elevada, abrangendo uma série de iniciativas e estudos que demonstram a aplicação prática da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e abordagens de certificação/avaliação em diferentes contextos (Quadro 2).

QUADRO 2 – Aplicações práticas da abordagem do Ciclo de Vida.

Certificação/Avaliação	Exemplo prático
<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) framework</i> . Conceito de que o desenvolvimento de novos materiais precisa adotar critério sustentável. Avaliação da química do material.	Materiais verdes
<i>Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) framework</i> para avaliar o setor de saneamento que para tratar a água usou novo composto biológico (obtido através da recuperação de recursos) e comparou com o tradicional que é feito de madeira.	Tratamento de água
Avaliação holística de sustentabilidade, abrangendo os pilares ambiental, econômico e social do lixo alimentar doméstico.	Lixo doméstico
A reciclagem doméstica pode afetar o risco de abastecimento: uma redução nas importações totais (efeito de redução) e uma potencial redistribuição do mix de abastecimento de importações (efeito de redistribuição).	Critérios sociais
Avaliação quantitativa da sustentabilidade da gestão do desperdício alimentar doméstico na área metropolitana de Amsterdã.	Coleta seletiva seguida de digestão anaeróbica
Método Geopolítico <i>Supply Risk</i> – Extensão da metodologia de risco geopolítico de abastecimento aplicada às tecnologias de informação e comunicação na União Europeia.	Incorporação da avaliação de risco de fornecimento de matérias-primas críticas como um complemento à ACV
Rumo a uma avaliação abrangente da disponibilidade de recursos minerais. Funções complementares do ciclo de	Avaliação da disponibilidade de recursos minerais - escassez,

vida, sustentabilidade do ciclo de vida e avaliações de criticidade.	raridade, criticidade e esgotamento
--	-------------------------------------

Fonte: Elaboração própria.

Esses estudos demonstram a aplicação prática e a evolução da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em diversas áreas, desde o desenvolvimento de materiais sustentáveis até a gestão de recursos e análise de riscos de suprimento em contextos nacionais e regionais. Essas abordagens forneceram lições valiosas para a compreensão mais ampla da sustentabilidade em várias indústrias e setores.

Após esta exposição, alerta-se para as limitações do presente artigo de revisão sistemática de literatura, que são, principalmente, de natureza metodológica, sendo relevante o viés de seleção de estudos, eis que, a partir dos critérios de inclusão e exclusão definidos, alguns estudos relevantes podem ter sido inadvertidamente excluídos. Salienta-se também as restrições no acesso a estudos em diferentes idiomas, o que pode resultar em uma visão parcial dos resultados, afetando a completude da revisão. Quanto ao portfólio alcançado, a qualidade heterogênea dos estudos incluídos pode afetar a validade das conclusões da revisão, sendo que a heterogeneidade nos métodos, populações e resultados dos estudos incluídos pode tornar desafiadora a síntese e interpretação dos dados.

Neste ponto, é interessante notar que a temática pesquisada encontra muitos desafios na literatura e é um campo em constante transformação. Certamente, há várias direções de interesse para pesquisas futuras na interseção entre Economia Circular e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), entre elas a avaliação de impactos socioeconômicos, a análise de viabilidade e implementação e o estudo de estratégias educacionais e de conscientização para incentivar a adoção de práticas mais circulares tanto por consumidores quanto por empresas, incluindo a adoção da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Outrossim, a originalidade do presente artigo se concentra no fato de que não terem sido observadas revisões sistemáticas de literatura semelhantes a esta, havendo, ainda, valor em produzir futuras revisões sistemáticas com um maior recorte temático.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise aprofundada da literatura por meio da revisão sistemática evidencia a variedade de métodos em constante evolução na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Diferentes autores têm contribuído significativamente para a ampliação e aprimoramento

desses métodos, aplicando-os de maneira específica aos produtos inseridos no contexto dinâmico da economia circular.

Um ponto notável é a emergência de abordagens inovadoras que visam atender às demandas específicas de cada item avaliado. Um exemplo marcante é o trabalho de Klemenž *et al.* (2021), que, ao buscar o desenvolvimento de um novo produto, fortaleceu consideravelmente o método de ACV ao introduzir automação no processo de avaliação.

Concluindo, destaca-se a percepção da complexidade anteriormente subestimada, atribuída à falta de consideração adequada das externalidades. A avaliação na economia circular revela-se complexa devido à representação fiel da intrincada cadeia de valor e suas implicações não apenas ambientais, mas também sociais e econômicas.

Esta compreensão mais profunda enfatiza a necessidade contínua de aprimoramento das metodologias de ACV para capturar de maneira mais abrangente e precisa os impactos ao longo do ciclo de vida dos produtos. A complexidade inerente a esse processo demanda uma abordagem integrada e holística, reconhecendo as interconexões entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos na avaliação de produtos na economia circular.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, H.; LJUNGGREN, M. Towards comprehensive assessment of mineral resource availability? Complementary roles of life cycle, life cycle sustainability and criticality assessments. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105396, 2021.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- BARBHUIYA, S.; BHUSAN DAS B. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, 2023.
- BHAMBHANI, A.; VAN DER HOEK, J. P.; KAPELAN, Z. Life cycle sustainability assessment framework for water sector resource recovery solutions: strengths and weaknesses. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106151, 2022.
- BHATNAGAR, R.; KESKIN, D.; KIRKELS, A.; ROMME, A. G. L.; HUIJBEN, J. C. C. M. Design principles for sustainability assessments in the business model innovation process. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, p. 134313, 2022.
- BHATT, Y.; GHUMAN, K.; DHIR, A. Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 120988, 2020.
- BIANCHI, I.; FORCELLESE, A.; SIMONCINI, M.; VITA, A.; DELLEDONNE, L.; CASTORANI, V. Life cycle assessment of carbon ceramic matrix composite brake discs containing reclaimed prepreg scraps. **Journal of Cleaner Production**, v. 413, p. 137537, 2023.
- BORRELLO, M.; CEMBALO, L.; D'AMICO, V. Narratives to revert overconsumption:

human-nature interdependence and Circular Economy. **Agricultural and Food Economics**, v. 11, n. 19, 2023.

GAIBOR, N.; MATEUS, R.; LEITAO, D.; CRISTELO, N.; MIRANDA, T.; PEREIRA, E. N.; CUNHA, V. M. Sustainability assessment of half-sandwich panels based on alkali-activated ceramic/slag wastes cement versus conventional building solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 136108, 2023.

HAQ, U. N.; ALAM, S. M. R. Implementing circular economy principles in the apparel production process: Reusing pre-consumer waste for sustainability of environment and economy. **Cleaner Waste Systems**, v. 6, p. 100108, 2023.

HARRIS, S.; TSALIDIS, G.; CORBERA, J. B.; GALLART, J. J. E.; TEGSTEDT, F. Application of LCA and LCC in the early stages of wastewater treatment design: A multiple case study of brine effluents. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127298, 2021.

JIMÉNEZ-BENÍTEZ, A.; FERRER, F. J.; GRESES, S.; RUIZ-MARTÍNEZ, A.; FATONE, F.; EUSEBI, A. L.; SECO, A. An MBR, reclaimed water and fertigation: Two case studies in Italy and Spain to assess economic and technological feasibility and CO₂ emissions within the EU Innovation Deal initiative. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122398, 2020.

KLEMENZ, S.; STEGMÜLLER, A. YOON, S.; FELSER, C.; TÜYSÜZ, H.; WEIDENKAFF, A. Holistic View on Materials Development: Water Electrolysis as a Case Study. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 60, n. 37, p. 20094-20100, 2021.

KUBLER, S.; RONDEAU, E.; GEORGES, J. P.; MUTUA, P. L.; CHINNICI, M. Benefit-cost model for comparing data center performance from a biomimicry perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 817-834, 2019.

MAHER, R.; MAHER, M.; MANN, S.; MCALPINE, C. A. Integrating design thinking with sustainability science: a Research through Design approach. **Sustainability science**, v. 13, p. 1565-1587, 2018.

MARSHALL, D.; O'DOCHARTAIGH, A.; PROTHERO, A.; REYNOLDS, O.; SECCHI, E. Are you ready for the sustainable, biocircular economy? **Business Horizons**, v. 66, n. 6, p. 805-816, 2023.

MELKONYAN, A.; GRUCHMANN, T.; LOHMAR, F.; KAMATH, V.; SPINLER, S. Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks. **International Journal of Production Economics**, v. 228, p. 107746, 2020.

NG, K. S.; TO, L. S. A systems thinking approach to stimulating and enhancing resource efficiency and circularity in households. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123038, 2020.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 2015.

PAPO, M.; CORONA, B. Life cycle sustainability assessment of non-beverage bottles made of recycled High-Density Polyethylene. **Journal of Cleaner Production**, v. 378, p. 134442, 2022.

PASCIUCCO, F.; PECORINI, I.; IANNELLI, R. Planning the centralization level in wastewater collection and treatment: A review of assessment methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134092, 2022.

RODRIGUES, J.; GONDRAN, N.; BEZIAT, A.; LAFOREST, V. Application of the absolute

environmental sustainability assessment framework to multifunctional systems – The case of municipal solid waste management. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, p. 129034, 2021.

SANTILLÁN-SALDIVAR, J.; CIMPRICH, A.; SHAIKH, N.; LARATTE, B.; YOUNG, S. B.; SONNEMANN, G. How recycling mitigates supply risks of critical raw materials: Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105108, 2021.

SHERWOOD, J.; GONGORA, G. T.; VELENTURF, A. P. A circular economy metric to determine sustainable resource use illustrated with neodymium for wind turbines. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, p. 134305, 2022.

SILK, D.; MAZZALI, B.; GARGALO, C. L.; PINELO, M.; UDUGAMA, I. A.; MANSOURI, S. S. A decision-support framework for techno-economic-sustainability assessment of resource recovery alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121854, 2020.

Taelman, S. E.; Tonini, D.; Wandl, A.; Dewulf, J. A holistic sustainability framework for waste management in European cities: Concept development. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2184, 2018.

VAN BRUGGEN, A. R.; ZONNEVELD, M.; ZIJP, M. C.; POSTHUMA, L. Solution-focused sustainability assessments for the transition to the circular economy: The case of plastics in the automotive industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131606, 2022.

WALKER, A. M.; VERMEULEN, W. J.; SIMBOLI, A.; RAGGI, A. Sustainability assessment in circular inter-firm networks: An integrated framework of industrial ecology and circular supply chain management approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125457, 2021.