

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GIOVANNA ROLIM RIBEIRO DE MELLO**

**RELAÇÕES E OPORTUNIDADES ENTRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
(ACV) E A ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
SISTEMÁTICA APLICADA AO CICLO DE VIDA DA CERVEJA**

**PONTA GROSSA**

**2022**

**GIOVANNA ROLIM RIBEIRO DE MELLO**

**RELAÇÕES E OPORTUNIDADES ENTRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
(ACV) E A ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
SISTEMÁTICA APLICADA AO CICLO DE VIDA DA CERVEJA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri.

**PONTA GROSSA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GIOVANNA ROLIM RIBEIRO DE MELLO**

**RELAÇÕES E OPORTUNIDADES ENTRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
(ACV) E A ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
SISTEMÁTICA APLICADA AO CICLO DE VIDA DA CERVEJA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação como  
requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/junho/2022

---

Diego Alexis Ramos Huarachi  
Mestre em Engenharia de Produção  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fabio Neves Puglieri  
Doutor em Engenharia de Produção  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli  
Doutora em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha avó Yolanda, por ter me ensinado que conhecimento é o nosso bem mais valioso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Juscilene e Elias, e às minhas tias Edneia, Inácia e Jarlene por todo o apoio e cuidado comigo e com aqueles que amo durante o período em que estive na universidade.

Ao meu orientador, Fabio Neves Puglieri, pelo suporte e dedicação à realização desse trabalho, bem como ao modelo inovador de ensino e docência que me fez criar interesse pelo tema deste trabalho durante as aulas da disciplina de Gestão Ambiental.

Às minhas amigas Ana Karina, Andressa, Beatriz, Clara e Pollyane por estarem presentes mesmo com a distância, prestando apoio emocional durante a realização desse trabalho.

Aos demais amigos e colegas com quem convivi durante a graduação, muitos com quem tive o prazer de trabalhar em projetos ou na mesma empresa, fica a minha gratidão e o desejo de que trilhem um caminho de sucesso.

À Prof<sup>a</sup> Juliana M. T. de Abreu Peitrobelli pelo excelente trabalho como professora e como coordenadora do curso de Engenharia Química, exercendo sua gestão com muita empatia e carinho para com os alunos.

Agradeço aos meus amigos de Ponta Grossa que surgiram em minha vida durante a graduação, seja pelos estágios, trabalho ou por amigos em comum.

Aos colegas de trabalho da DAF Caminhões, pelo incentivo e motivação para concluir esse trabalho, em especial à minha gestora, Elmira Roberts, pela compreensão, apoio e confiança. Рәхмәт, начар мәче.

E por fim, muito obrigada a todos que contribuíram para que a conclusão desse trabalho fosse possível.

## RESUMO

O crescimento econômico desenfreado, ocasionado pelo aumento do consumo, tem agravado o cenário atual de depleção do meio ambiente por meio da geração de resíduos e emissões. A principal consequência disso é o esgotamento dos recursos naturais, despertando o interesse de acadêmicos, governos e industriais para a pauta sustentável. Nesse contexto, surgiu a Economia Circular como um modelo econômico capaz de promover a regeneração dos sistemas naturais, por meio de soluções criativas e tecnológicas capazes de identificar oportunidades de redução dos resíduos e poluição, mantendo produtos e materiais em uso constante. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta comumente utilizada na literatura para apontar os principais focos de geração de impacto na cadeia produtiva, além de evidenciar oportunidades de melhoria do desempenho ambiental, auxiliando na seleção de indicadores e assistindo com informações para a tomada de decisão por meio de gestores, tanto em nível industrial quanto governamental. Apesar de a ACV e da Economia Circular serem ambas associadas à redução de impacto ambiental, ainda existem oportunidades no que se refere à quantidade de trabalhos publicados que abordam as relações entre as duas áreas. Assim, o objetivo do presente trabalho é identificar as relações e oportunidades em se utilizar a Avaliação do Ciclo de Vida como uma ferramenta para identificar pontos críticos ambientais ao longo do ciclo de vida de obtenção da cerveja, propondo soluções para esses impactos potenciais que estejam alinhadas com a Economia Circular. Para atingir esse objetivo, este estudo utilizou da Revisão Sistemática da Literatura aplicada à identificação de relações e oportunidades entre a ACV e a Economia Circular, além de estudos de ACV realizados para avaliar o desempenho ambiental da produção de cerveja. Como resultado, foi identificado que os principais *hotspots* são causados pela produção de matéria-prima, principalmente de cevada, além da etapa de transporte e processamento da cerveja. Esses três pontos críticos foram unânimes em todos os estudos de ACV realizados no setor cervejeiro, selecionados para compor a RBS desse trabalho. As alternativas propostas para redução desses impactos foram: reaproveitamento de coprodutos gerados a partir do processamento de cerveja para aumentar o valor nutricional da alimentação de animais, além de utilizá-lo como matéria-prima para geração de biogás por meio da digestão anaeróbica; proposta de implementação de um programa de logística reversa para reaproveitamento de embalagens de vidro e, também, sugestão de colaboração entre empresas locais para compartilhamento de recursos logísticos. Por fim, fica como sugestão para trabalhos futuros, a realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada, por meio de um estudo de caso de uma micro cervejaria localizada nos Campos Gerais, PR com objetivo de validar e enriquecer a revisão bibliográfica sistemática realizada sobre esse setor.

Palavras-chave: economia circular, avaliação do ciclo de vida, gestão de resíduos, indústria cervejeira.

## ABSTRACT

Unbridled economic growth, caused by increased consumption, has aggravated the current scenario of depletion of the environment through the generation of waste and emissions. The main consequence of this is the depletion of natural resources, arousing the interest of academics, governments, and industrialists for the sustainable agenda. In this context, the Circular Economy emerged as an economic model capable of promoting the regeneration of natural systems, through creative and technological solutions capable of identifying opportunities to reduce waste and pollution, keeping products and materials in constant use. The Life Cycle Assessment (LCA) is a tool commonly used in the literature to point out the main focuses of impact generation in the production chain, in addition to highlighting opportunities for improving environmental performance, assisting in the selection of indicators, and assisting with information for the decision-making through managers, both at industrial and governmental levels. Although LCA and Circular Economy are both associated with reducing environmental impact, there are still opportunities in terms of the amount of published works that address the relationship between the two areas. Thus, the objective of the present work is to identify the relationships and opportunities in using the Life Cycle Assessment as a tool to identify environmental critical points throughout the beer production life cycle, proposing solutions for these potential impacts that are aligned with the agenda of a Circular Economy. To achieve this objective, this study used the Systematic Review of Literature applied to the identification of relationships and opportunities between LCA and Circular Economy, in addition to LCA studies carried out to evaluate the environmental performance of beer production. As a result, it was identified that the main hotspots are caused by the production of raw material, mainly barley, in addition to the stage of transport and processing of beer. These three critical points were unanimous in all LCA studies carried out in the brewing sector, selected to compose the RBS of this work. The alternatives proposed to reduce these impacts were: reuse of co-products generated from beer processing to increase the nutritional value of animal feed, in addition to using it as a raw material for generating biogas through anaerobic digestion; proposal to implement a reverse logistics program for the reuse of glass packaging, considering that the distribution of this product is local and, also, suggestion of collaboration between local companies to share logistical resources. Finally, a suggestion for future work is to carry out a Life Cycle Assessment, through a case study of a microbrewery located in Campos Gerais, PR in order to validate and enrich the systematic literature review carried out on this sector.

Keywords: circular economy, life cycle assessment, waste management, brewery industry.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |   |
|------------------|---|
| ABNT             | Associação Brasileira de Normas Técnicas        |
| ACV              | Avaliação do Ciclo de Vida                      |
| AFM              | Análise de Fluxos Materiais                     |
| AICV             | Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida           |
| CBA              | Cost Benefit Analysis                           |
| CF <sub>CG</sub> | Cradle-to-Grave Carbon Footprint                |
| COD              | Carbono Orgânico Dissolvido                     |
| DA               | Digestão Anaeróbica                             |
| EC               | Economia Circular                               |
| ECPI             | Environmental Circularity Performance Indicator |
| EI               | Ecologia Industrial                             |
| ETAR             | Estação de Tratamento de Água Residual          |
| GEE              | Gases de Efeito Estufa                          |
| GWP              | Potencial de Aquecimento Global                 |
| hL               | Hecto Litro (100 L)                             |
| ICV              | Análise de Inventário do Ciclo de Vida          |
| LCSA             | Life Cycle Sustainability Assessment            |
| MCPI             | Material Circularity Performance Indicator      |
| NBR              | Norma Brasileira                                |
| PMEs             | Pequenas e Médias Empresas                      |
| PP               | Polipropileno                                   |
| RBS              | Revisão Bibliográfica Sistemática               |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |                    |
|------------------|--------------------|
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de carbono |
| CH <sub>4</sub>  | Metano             |
| N <sub>2</sub> O | Óxido nitroso      |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>Problema</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivo Geral</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivos Específicos</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>1.4</b> | <b>Justificativa</b> .....   | <b>4</b>  |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Economia Circular</b> .....   | <b>5</b>  |
| 2.1.1      | Outros conceitos associados à Economia Circular .....                                | 8         |
| <b>2.2</b> | <b>Avaliação do Ciclo De Vida (ACV)</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>2.3</b> | <b>Avaliação do Ciclo De Vida e a Economia Circular</b> .....                        | <b>11</b> |
| 2.3.1      | Gestão de Resíduos .....   | 12        |
| 2.3.2      | Suprimento e Produção .....  | 13        |
| <b>2.4</b> | <b>ACV no setor de produção de cerveja</b> .....                                     | <b>16</b> |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA</b> .....   | <b>20</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Etapa 1</b> .....   | <b>20</b> |
| 3.1.1      | Entrada .....  | 22        |
| 3.1.2      | Processamento .....  | 22        |
| 3.1.3      | Saída .....  | 24        |
| <b>3.2</b> | <b>ETAPA 2</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>3.3</b> | <b>ETAPA 3</b> .....   | <b>24</b> |
| <b>3.4</b> | <b>ETAPA 4</b> .....   | <b>25</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Etapa 1 – Relações existentes entre ACV e EC</b> .....                            | <b>26</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Etapa 2 – Estudos de ACV na produção de cerveja</b> .....                         | <b>29</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Etapa 3 – mapeamento dos <i>hotspots</i> no ciclo de vida da cerveja</b> ...      | <b>33</b> |
| 4.3.1      | Principais <i>hotspots</i> encontrados no ciclo de vida da cerveja .....             | 34        |
| <b>4.4</b> | <b>Etapa 4 – Oportunidades de circularidade no ciclo de vida esquematizado</b> ..... | <b>36</b> |
| 4.4.1      | Produção de matéria-prima .....  | 36        |
| 4.4.2      | Transporte .....   | 37        |
| 4.4.3      | Processamento da cerveja .....   | 37        |
| 4.4.4      | Tipo de embalagem selecionada para envase .....                                      | 38        |

|          |                         |           |
|----------|-------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS.....</b> | <b>40</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Anualmente, o indicador conhecido como Dia da Sobrecarga da Terra marca a data em que a demanda da humanidade por recursos biológicos excede o que o planeta é capaz de regenerar no período de um ano. Atualmente, a humanidade tem utilizado mais de 60% do que pode ser renovado de acordo com dados fornecidos pela Global Footprint Network (2020).

Lieder e Rashid (2016) reforçam que o crescimento econômico desenfreado moldado pelo atual padrão de consumo, agrava o aumento da depleção ambiental e da geração de resíduos sólidos, multiplicando a quantidade de aterros sanitários. Conseqüentemente, a exaustão de recursos naturais necessários para suprir a demanda da humanidade tem gerado questionamento por meio de acadêmicos, governos e industriais à cerca da adoção de práticas mais sustentáveis.

A crítica ao atual modelo de produção linear, conhecido por “take-make—use-waste”, já não faz mais sentido e, devido à isso, despontava a necessidade de um modelo disruptivo de produção e consumo. Foi nesse contexto que surgiu a Economia Circular (EC), um modelo “baseado nos princípios da redução de resíduos e poluição, manutenção de produtos e materiais em uso e regeneração de sistemas naturais”, segundo a Ellen MacArthur Foundation (2020).

No ambiente industrial, as práticas circulares mais comuns estão relacionadas à produção mais limpa, almejando a redução do impacto ambiental e a geração de resíduos ao longo da cadeia produtiva, melhorando o desempenho e a eficiência dos processos (MERLI et al., 2018).

Já na esfera social, observou-se o desenvolvimento de políticas públicas almejando a implementação da economia circular, como é o caso da China que em 2009 a incorporou como um de seus objetivos nos planos quinquenais para o Desenvolvimento Econômico e Social Nacional, emitindo e regulamentando a “Lei de Promoção da Economia Circular”, em todo o território nacional (SU et al., 2013).

Cinco anos após a lei chinesa, a União Europeia comunicou suas propostas referentes a Economia Circular, a desse ano “um programa de resíduos zero para a Europa” e mais tarde, em 2015, “um plano de ação visando o fechamento dos ciclos produtivos”, conforme constam na European Commission (2015, 2014).

A China, apesar de seu passado ambientalmente insustentável, foi um dos primeiros locais a planejar uma economia fundamentada em ciclos fechados, objetivando crescimento econômico alinhado a sustentabilidade conforme Zink e Geyer (2017). Os estudos chineses são influenciados, principalmente, pela Ecologia Industrial.

Conforme Hobson e Lynch (2016), a economia circular tem apresentado certa independência acadêmica, apesar da conexão inicial com o conceito de Ecologia Industrial. No entanto, é um consenso de Blomsma e Brennan (2017) que o leque de oportunidades de estudos em EC é bastante vasto, por isso, vários trabalhos acadêmicos têm buscado identificar relação entre EC e outros conceitos, como ética e responsabilidade social e na gestão estratégica.

Conforme conclui Merli et al. (2018), uma quantidade significativa de trabalhos em Economia Circular tem uma abordagem prática, fazendo uso de métodos e ferramentas para delimitação de processos e apoio à implementação da circularidade. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um desses métodos.

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta de suporte na Gestão Ambiental, cujo objetivo principal é tornar o consumo e a produção mais sustentável. De acordo com a NBR 14040 (2009), a ACV pode auxiliar “a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos de seus ciclos de vida”, além de ajudar na “seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo técnicas de medição”, além de colaborar com “o nível de informação dos tomadores de decisão na indústria e nas organizações governamentais ou não governamentais”.

A ACV pode também contribuir para o marketing, como em casos de rotulagem ambiental e elaboração de uma declaração ambiental para produtos. Conforme regulamenta a norma NBR 14040 (2009), a ACV ocorre em quatro etapas, sendo essas: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos; e interpretação. O estudo de ACV leva em consideração todas as fases do ciclo de vida de um produto ou serviço, ou seja, desde a produção de matéria-prima até à disposição final dos resíduos gerados no pós-uso.

## 1.1 Problema

Devido aos conflitos ideológicos presentes em literatura prévia quanto ao uso da Avaliação do Ciclo de Vida como uma ferramenta para pautar ações e medidas de Economia Circular, além da pouca quantidade de trabalhos publicados sobre a integração entre essas duas temáticas, especialmente no Brasil, esse estudo busca preencher essa a lacuna.

Deste modo, esta pesquisa busca responder a seguinte pergunta problema: quais são as relações e oportunidades relacionadas ao uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma ferramenta de implementação da Economia Circular na indústria cervejeira?

## 1.2 Objetivo Geral

Esse estudo busca identificar as relações e oportunidades relacionadas ao uso da Avaliação do Ciclo de Vida como uma ferramenta de implementação e da Economia Circular na indústria cervejeira.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que compõe o estado da arte desse estudo são:

- Definir o que é Avaliação do Ciclo de Vida e a Economia Circular e as relações entre esses dois conceitos;
- Identificar estudos de ACV no setor cervejeiro;
- Analisar os *hotspots*<sup>1</sup> evidenciados nos estudos de ACV encontrados por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS);
- Mapear práticas alinhadas ao conceito de uma Economia Circular que podem auxiliar na redução dos *hotspots* evidenciados pela RBS.
- Verificar relações e oportunidades entre a ACV e a Economia Circular para o setor cervejeiro.

---

<sup>1</sup> *Hotspot*: área com crítico desempenho ambiental.

## 1.4 Justificativa

Ambos os estudos sobre Avaliação de Ciclo de Vida e Economia Circular tem sido próspero por apresentarem uma motivação em comum: a redução dos impactos ambientais, tornando o consumo e a produção mais sustentáveis.

Apesar da relevância dos conceitos, esses possuem uma divergência ideológica, ou seja, alguns acadêmicos em EC defendem a implementação de uma mudança sistêmica, que deve ocorrer independentemente dos resultados levantados a partir de uma ACV. Já outros estudos de caso aplicando a ACV como ferramenta, muitas vezes, concluem que a circularidade é vista como ineficiente na resolução da causa raiz de certos problemas ambientais.

De acordo com Haupt e Zschokke (2017), no entanto, se as metas estabelecidas conforme os conceitos de Economia Circular fossem estipulados com base apenas no desempenho ambiental, a ACV poderia ser aplicada não só como um indicador do nível de progresso da empresa, mas também do progresso social.

Assim sendo, estudos que levam em consideração essas duas temáticas muito têm a acrescentar ao repertório acadêmico almejando a redução de impactos ambientais e otimização de processos produtivos. A circularidade, muitas vezes, é aplicável devido a saídas tecnológicas que podem ser economicamente viáveis.

Além disso, o estudo de ACV e da circularidade convergem no que se refere ao embasamento necessário para promover mudanças sistêmicas não apenas no modelo produtivo adotado majoritariamente na atualidade, mas também em alterações em grande escala na economia e sociedade futuras.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Esse capítulo busca apresentar os conceitos de Economia Circular e Avaliação do Ciclo de Vida, além de entregar uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) abordando as relações entre esses dois temas, focando no uso da ACV como uma ferramenta para pontuar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto e/ou sistema, utilizando-se de oportunidades em alinhamento com a Economia Circular como solução para esses pontos de impacto evidenciados.

### 2.1 Economia Circular

Com a invenção do motor a vapor em 1684 e o início da Revolução Industrial, profundas transformações foram geradas na sociedade visto que a disponibilidade de matéria-prima e energia eram fartas, fazendo com que esses recursos aparentassem ser inesgotáveis. O ser humano era capaz de produzir em larga escala pela primeira vez na história, fundamentando a forma como a economia opera até os dias atuais (EMF, 2020a).

No entanto, é errônea a percepção de que os recursos necessários para a manutenção desse sistema de produção são infinitos. O consumo de água, energia e outras suprlmentos têm aumentado a cada ano, fazendo com que o atual modelo produtivo seja insustentável, tanto para o meio ambiente como para a sociedade (EMF, 2020a).

De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (2020b), esse modelo linear de produção, conhecido por *“take-make-waste”* precisa ser alterado e substituído por um sistema disruptivo, que leva em consideração como os recursos são gerenciados, como os produtos são manufaturados e usados e, também, o que é feito com esses materiais após serem consumidos.

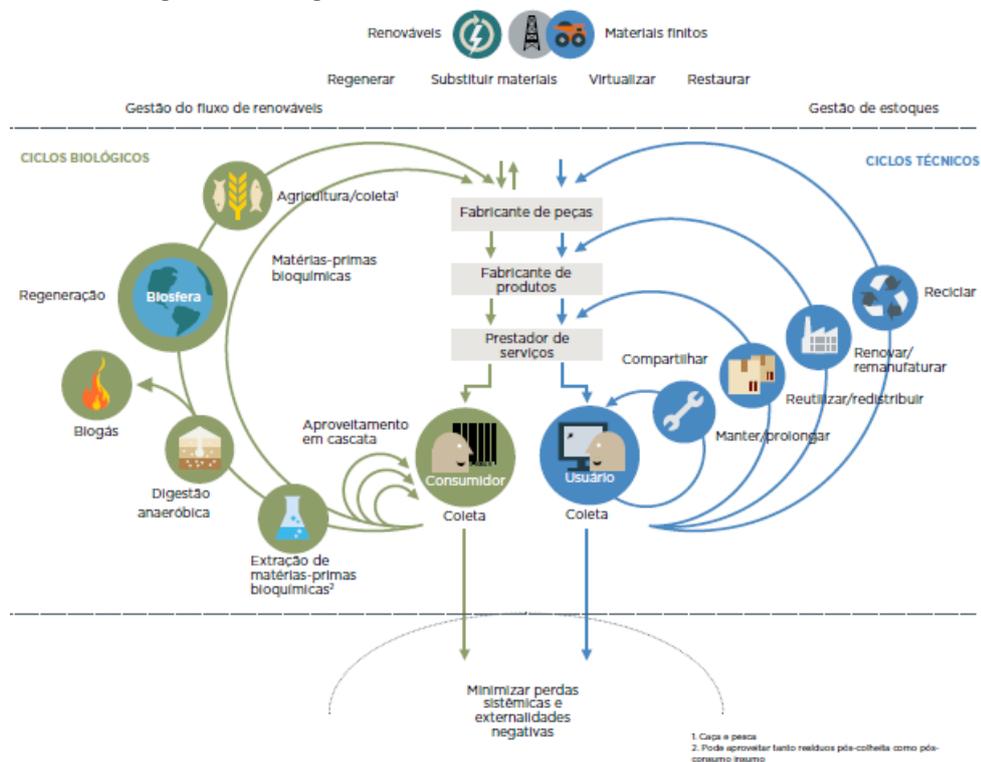
Sob a ótica da Primeira Lei da Termodinâmica, o fluxo material e a energia total se mantém constantes em um sistema fechado. Assim, um sistema aberto poderia e deveria se transformar em um sistema circular, quando se considera a relação entre o uso de recursos e os resíduos gerados. Tendo em vista os existentes problemas ambientais e a carência de recursos, todo o planeta deve ser considerado um sistema

fechado, no qual a economia e o meio ambiente estão conectados por uma relação circular (SU et al., 2013).

A transição para um modelo de economia circular, não tem como único objetivo a redução dos impactos causados pelo modelo linear, mas sim abrange uma mudança sistêmica capaz de construir resiliência a longo prazo, gerando negócios e oportunidades econômicas, além de estimular benefícios sociais e ambientais (EMF, 2020b).

Segundo Webster (2016), a Economia Circular pode ser definida como “as possibilidades de atender às necessidades das pessoas eliminando resíduos e recriando o tipo de opulência elegante tão evidente nos sistemas vivos”. Para a Ellen MacArthur Foundation (2020a), os três principais fundamentos de uma economia circular são: a eliminação da poluição e dos resíduos ainda na fase inicial de desenvolvimento do produto ou serviço; a manutenção de produtos e materiais em uso, ou seja, desenvolvimento de produtos que podem ser reusados, reparados e remanufaturados; e, por fim, a recuperação dos sistemas naturais, conforme pode ser visto na Figura 1.

**Figura 1 – Diagrama Borboleta de uma Economia Circular**



Fonte: Adaptado de EMF (2017)

Em uma economia circular, o pós-uso de um material deixa de ser associado exclusivamente ao gerenciamento de resíduos, sendo uma responsabilidade da etapa de design de produtos e sistemas (WEBSTER, 2016). Com isso, os recursos que já estão sendo usados no processo de produção podem ser reaproveitados o que viabiliza a independência do processo de consumo de novos recursos (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

Assim, se fosse representado por um diagrama, a economia circular seria um ciclo fechado, cujos fluxos se dividem em materiais biológicos e técnicos. Os materiais do ciclo biológico são aqueles que podem reentrar com segurança no ecossistema, já que são biodegradáveis e passaram por mais de um ciclo de uso. Já os materiais técnicos, como metais, plásticos e produtos químicos sintéticos, devem percolar continuamente pelo sistema para que seu valor possa ser aproveitado e reaproveitado. Dessa forma, apenas os materiais biológicos podem ser consumidos, enquanto os técnicos podem apenas ser usados (EMF, 2020a).

Por apresentar benefícios interdisciplinares, a economia circular tem sido um campo bastante atrativo tanto para indústrias, quanto para governos e acadêmicos. Para o meio industrial, o principal motivo de interesse são os lucros obtidos pela redução de custos ocasionados pelo gerenciamento eficiente dos recursos utilizados. A isso, soma-se a redução da exposição ao custo volátil de matéria-prima, já que em um ciclo fechado há uma menor necessidade de material virgem (EMF, 2020a).

Já as vantagens para a sociedade e meio ambiente, que podem ser garantidas tanto por governos quanto pela publicação de novos estudos, são principalmente referentes à redução nas emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e ao consumo de matéria-prima, além do aumento da produtividade e saúde do solo (EMF, 2020a).

De acordo com Shenem e Pereira (2019), o contexto vigente do aumento dos custos materiais e mudanças climáticas, fez com que a economia circular se tornasse, principalmente, uma meta política.

Apesar de ganhar um foco maior nos últimos anos, o ponto de partida para a implementação de práticas circulares ocorreu em 1996 na Alemanha devido a promulgação de uma lei de gerenciamento de resíduos e substâncias tóxicas em ciclo fechado, seguida pelo governo do Japão que, em 2002, desenvolveu uma estrutura legal que abrangia uma sociedade que desse foco a reciclagem (SU et al., 2013). Assim, a maneira como esses dois países apresentaram a economia circular, foi com

foco na redução da depleção ambiental mediante uma gestão eficiente de resíduos sólidos (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

Em contrapartida, no ano de 2009, a China incorporou a economia circular como um dos principais focos de seu 11º e 12º planos quinquenais de Desenvolvimento Econômico e Social Nacional, adotando uma definição mais apurada para o conceito original de EC, sendo este, a ampla eficiência dos fluxos materiais em ciclo fechado, abrangendo todas as etapas de produção, distribuição e consumo, diferentemente dos casos anteriores que tinham como cerne a reciclagem de resíduos (MERLI et al., 2018; SU et al., 2013).

Mais tarde, entre 2014 e 2015, a União Europeia (UE) publicou dois comunicados tendo em vista uma política de resíduos zero e, também, um plano de ação em economia circular para toda a UE (MERLI et al., 2018 apud EUROPEAN COMMISSION, 2015a; 2014).

### 2.1.1 Outros conceitos associados à Economia Circular

Segundo Geissdoerfer et al. (2016), o interesse em se estudar a economia circular se deve, por sua conceituação teórica, mas também por suas estratégias viáveis de implementação. Isso, somado ao fato de a EC ser, relativamente, uma área de estudo recente, faz com que a terminologia “economia circular” apareça associada a diversos outros conceitos, sendo o mais comum deles, a Ecologia Industrial (EI).

A Ecologia Industrial almeja a criação de ciclos fechados, aderindo uma perspectiva sistêmica na qual os processos produtivos são projetados para operar de forma semelhante aos sistemas vivos, por meio de restrições ecológicas locais e pela observação dos impactos globais da operação desde seu estágio inicial (EMF, 2020b).

Outro conceito que aparece alinhado ao de economia circular na literatura é o de Simbiose Industrial, cuja definição segundo Boons et al. (2011) apud Chertow (2007) é o envolvimento de diferentes indústrias em uma “abordagem coletiva para se obter vantagem competitiva na troca física de materiais, energia, água e subprodutos”.

Essa interdisciplinaridade associada à economia circular faz com que Blomsma e Brennan (2017) a considerem um conceito “guarda-chuva”, ou seja, definindo-a como uma ideia que abrange diversas outras, visto que a circularidade desempenha um papel importante em várias estruturas cujas principais estratégias são estender a vida útil dos recursos.

De acordo com a revisão sistemática feita por Merli et al. (2018), a EC também aparece aprofundada no estudo de propostas em circularidade na Engenharia de Processos, bem como na implementação de práticas, criação e análise de indicadores de circularidade a níveis macro, meso e micro da cadeia de suprimentos. Com essas informações, nota-se que ainda há uma lacuna a ser preenchida no que se refere a estabelecer métricas e metodologias, como a Análise de Fluxos Materiais (AFM) e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para avaliar o progresso e a eficiência de tais práticas.

No entanto, de acordo com Haupt e Zschokke (2017), o levantamento de diferentes concepções sobre EC, destaca que a ACV é uma ferramenta quantitativa e mensurável, enquanto a economia circular seria uma alternativa ao modelo linear de produção, visando uma transformação sistêmica na sociedade e economia globais.

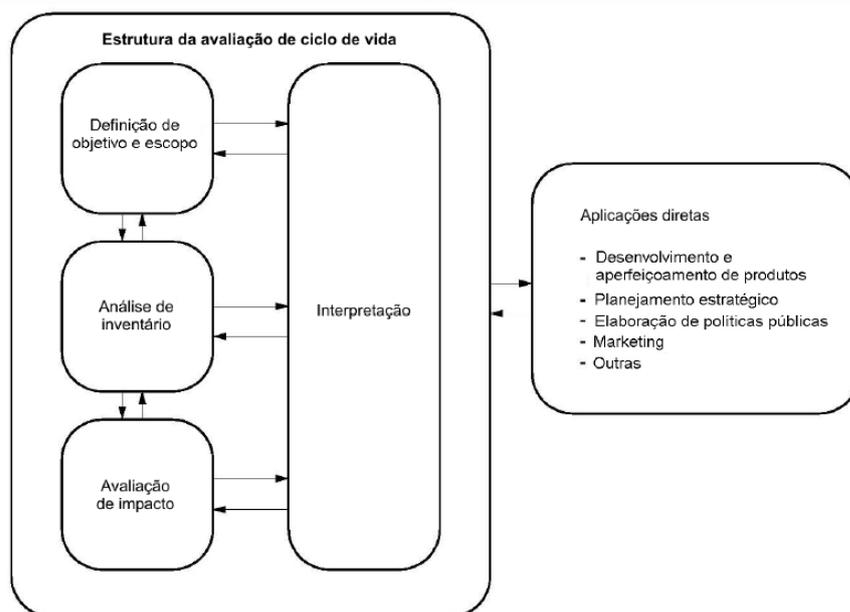
Apesar dessa diferença, a ACV pode ser considerada uma metodologia pertinente na avaliação de projetos de produtos circulares sendo, também, capaz de mensurar transformações em grande escala, como a busca por uma economia mais regenerativa. Dessa forma, pode-se afirmar que o objetivo final de se minimizar impactos ambientais é comum aos conceitos de ACV e economia circular (HAUPT; ZSCHOKKE, 2017).

## **2.2 Avaliação do Ciclo De Vida (ACV)**

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser definida como a união sistemática de procedimentos para reunir e analisar as entradas e saídas de energia e materiais, bem como as consequências ambientais ou relacionadas à saúde, associadas a produção de um produto ou sistema de serviço ao longo de todo seu ciclo de vida, ou seja, desde a obtenção de matéria-prima até a sua disposição final no pós-consumo (GDRC, 2017).

Os estudos de ACV no Brasil são regulamentados pela norma ISO 14040 (ABNT, 2009), que estabelece que a ACV deve ocorrer em quatro etapas, sendo essas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário (ICV), avaliação de impacto (AICV) e interpretação de resultados. A maneira como essas fases iterativas se conectam está representada na Figura 2.

**Figura 2 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida**



**Fonte: ABNT (2009)**

Conforme consta na norma ISO 14040 (2009), a ACV pode ser aplicada na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos em diferentes etapas de seu processo; pode, também, auxiliar na tomada de decisão, visando planejamento estratégico, projeto ou reprojeção de produtos ou processos; na definição de indicadores que são relevantes para o desempenho ambiental; e, por fim, no marketing devido a implementação de rotulagem ambiental ou declaração ambiental de produto.

A primeira fase do estudo de ACV, sendo esta, de definição do objetivo e escopo, abrange a aplicação pretendida, o sistema de produto a ser estudado e a unidade funcional e fronteira do sistema, bem como as categorias de impacto selecionadas e a metodologia de avaliação das mesmas. A ACV é uma técnica iterativa, tendo sua complexidade e abrangência variando conforme o objetivo do estudo. A próxima fase é a de análise de inventário do ciclo de vida (ICV), compreendendo a obtenção dos dados, entradas e saídas dos fluxos materiais e de energia, além dos procedimentos necessários para quantificar essas informações. Assim como a primeira fase, a segunda também é um processo iterativo (NBR ISO 14040, 2009).

De acordo com a NBR ISO 14040 (2009), em sua terceira fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), objetiva-se providenciar informações adicionais

para ajudar na avaliação dos resultados da ICV, estudando a relevância dos impactos ambientais potenciais, por meio da relação dos dados do inventário com as categorias de impacto e indicadores de categoria. Essa etapa busca ressaltar apenas as questões ambientais alinhadas ao objetivo e escopo do estudo, sendo iterativa tal qual as duas anteriores.

A fase de interpretação é a última da ACV, na qual considera-se os dados levantados em ambas as etapas de ICV e AICV. Recomenda-se que a apuração desses dados seja feita na forma de conclusões e recomendações, refletindo os resultados do sistema de produto avaliado. Cabe ressaltar que, as consequências da fase de AICV devem se basear em uma abordagem relativa, indicando potenciais efeitos ambientais, mas nunca fornecendo uma previsão sobre impactos reais e extrapolações nas categorias de impacto selecionadas (NBR ISO 14040, 2009).

### 2.3 Avaliação do Ciclo De Vida e a Economia Circular

Com o objetivo de fornecer argumentos coerentes para salientar a importância da abordagem de ciclo de vida para pavimentar o caminho em direção a uma economia circular, essa sessão constitui de uma coletânea de artigos obtidos por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) em que a ACV foi aplicada com o intuito de mensurar as vantagens ambientais geradas pelas decisões estratégicas tomadas. Para facilitar a compreensão, a RBS foi pautada nas três grandes áreas e pilares de uma EC, conforme consta na Figura 3.

Figura 3 – As áreas e os respectivos pilares de uma Economia Circular



Fonte: Ponter e Angelo (2019)

### 2.3.1 Gestão de Resíduos

Laso et al. (2016) utilizou a ACV para avaliar o desempenho ambiental de duas alternativas de recuperação dos resíduos gerados pela indústria espanhola de anchovas. Essas alternativas circulares foram comparadas com as alternativas de incineração e deposição em aterro. Como resultado, observou-se que as alternativas em que se consideravam a recuperação de resíduos, sejam elas a utilização de cabeça e espinha de anchova para produção de farinha e óleo e peixe, bem como a valorização da carne para produção de pasta de anchova, são as opções mais viáveis considerando os encargos associados a esse processo industrial.

Para os estudos referente ao aumento da reciclagem de materiais, Niero e Olsen (2016) recomendam a inclusão de múltiplas funções na definição da unidade funcional em um estudo de ACV que busca avaliar se o ciclo fechado (“*can-to-can*”) na produção e reciclagem de latas de alumínio é ambientalmente viável, levando em consideração todos os metais componentes da liga de alumínio. Como conclusão, a ACV apontou que a opção que se considera o ciclo fechado de sucata de lata de bebidas usadas gera menor impacto do que a reciclagem de sucata de liga de alumínio mista.

Já Lonca et al. (2020), propõe a avaliação da eficiência material e ambiental no uso de PET reciclável para a produção de garrafas plásticas no mercado estadunidense, por meio da integração entre as ferramentas AFM e ACV, concluindo ser essencial a combinação de ambas as metodologias para identificar conflito de interesses mercadológicos entre a circularidade do material e seu desempenho ambiental.

De maneira similar, Stanchev et al. (2020), baseando-se nas metodologias de AFM e ACV, propôs uma abordagem capaz de mensurar o desempenho ambiental do tratamento anaeróbico de efluentes gerados no processamento de laticínios, por meio de dois indicadores que expressam o desempenho de circularidade material (MCPI) e ambiental (ECPI). A energia recuperada por meio da Digestão Anaeróbica (DA) supre 20% da energia requerida pela instalação industrial, reduzindo a pegada de carbono em 13% se comparado ao modelo linear de tratamento de efluentes da indústria de laticínios.

Para finalizar os artigos que se encaixam no primeiro pilar da EC, Horodytska (2020) elaborou uma ACV com o objetivo de avaliar os impactos ambientais causados pelo processo de *upcycling*<sup>2</sup> de sucata de plástico impresso. Processo esse no qual o plástico é removido antes da extrusão, obtendo-se *pallets* transparentes que podem ser utilizados em embalagens. Embora esse processo de *upcycling* seja considerado o mais coerente em termos de circularidade, os autores concluíram que a carência de uniformidade e consenso na modelagem de ACV pode levar ao entendimento que a incineração segue sendo a melhor opção, por causar menores danos ambientais, considerando-se o grau de impacto para determinadas categorias.

### 2.3.2 Suprimento e Produção

Compondo a segunda grande área da EC, Civancik-Uslu et al. (2019b) conduziu um estudo de caso de *ecodesign*<sup>3</sup> de embalagens alinhado à estratégia de economia circular ao longo da cadeia produtiva. A ACV foi utilizada para identificar os estágios do ciclo de vida do produto onde a aplicação de estratégias de *ecodesign* seria mais eficiente, sendo, neste caso, produção de matéria-prima a partir de petroquímicos virgens.

Também englobando o pilar de *ecodesign*, Civancik-Uslu et al. (2019a), analisou a substituição de lâminas de madeira de eucalipto, cuja função é separar paletes carregados evitando a sua danificação durante o armazenamento, por alternativas de compostos plásticos de polipropileno (PP) virgem, PP reciclado e PP adicionado de minerais. Os resultados da ACV mostraram que as folhas de compostos plásticos, constituídas por 54,6% de PP virgem, 23,5% de PP reciclado e 21,9% de PP com minerais, geram menos impactos do que folhas de madeira de eucalipto na maioria das categorias de impacto avaliadas, exceto esgotamento de água e depleção de recursos minerais, fósseis e renováveis, seja qual for a metodologia usada para creditar o sistema.

Com o objetivo de enriquecer a literatura com uma eco avaliação quantitativa de estratégias de design comuns para economia circular por meio da ACV, Spreafico

---

<sup>2</sup> De acordo com Sehnem e Pereira (2019), “*upcycling* é o processo de transformar resíduos ou produtos inúteis e descartáveis em novos materiais ou produtos de maior valor, uso ou qualidade”.

<sup>3</sup> *Ecodesign*: Todo processo cujo objetivo principal é a redução de impacto ambiental, por meio do desenvolvimento de produtos e execução de serviços que utilizem poucos recursos (MMA, 2020).

(2022) fornece uma revisão bibliográfica na qual 156 artigos científicos foram analisados com o objetivo de comparar os impactos ambientais causados por soluções circulares de design em contraste com outras soluções nas quais os resíduos não são explorados. Como conclusão para o estudo, considerando a média de todas as categorias de impacto analisadas na ACV, o Design para Remanufatura se apresentou como a melhor opção para redução de impacto (53%), já a pior opção foi o Design para Recuperação de Resíduos, acrescentando em 83% os impactos.

No que se refere ao pilar de Eficiência Energética, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Gallagher et al. (2019) que aplicou a ACV para observar o perfil de depleção ambiental comparando três tecnologias de energia renovável à geração elétrica por meio de combustíveis fósseis. Foram consideradas duas oportunidades de circularidade para a melhoria dos *hotspots* no ciclo de vida, sendo elas: aumento do índice de reciclagem e implementação de *ecodesign*. Contudo, a eficiência dessas duas medidas de circularidade depende se o foco se mantém na redução da pegada de carbono ou se prioriza o esgotamento de recursos.

Solis et al. (2021) introduziu um modelo de otimização multiobjetivo para uma biorrefinaria de algas sob o olhar da economia circular, maximizando a recirculação dos fluxos de recursos, almejando o aumento do lucro e a redução dos impactos ambientais. A ACV foi utilizada para pontuar os impactos dentro das unidades de processo envolvidas na fronteira do sistema para esse modelo e, então, foi conduzido um estudo de caso em uma biorrefinaria de algas com o objetivo de validar esse modelo. Para a conclusão da análise, dois cenários foram considerados, sendo eles: a eficiência das operações unitárias e a flutuação da demanda de produção. Dessa maneira, olhar apenas para os objetivos de lucro e impacto ambiental não foi suficiente. Foi necessário considerar a relação entre os dois cenários que impactam na produção mencionados acima. Dessa maneira, uma menor eficiência das unidades de processo impacta na redução do lucro e, conseqüentemente, na geração de impactos ambientais devido a menor quantidade de produto gerado.

Bimpizas-Pinis et al. (2022) buscou avaliar o desempenho ambiental em uma indústria de processamento de alimentos especializada na produção de aditivos para carne, objetivando identificar os principais focos de impacto por meio de uma ACV, além de identificar boas práticas de economia circular já empregadas e seu impacto num contexto gerencial. Os resultados da ACV mostraram que os principais impactos

estão associados às matérias-primas necessárias para produção e, como solução, foram propostas novas práticas para reduzir o excedente de matéria-prima e produto. Com relação às rotinas adotadas em alinhamento com a economia circular, após passar pela inspeção de autoridade estadual, que leva em consideração a data de validade, além de análises microbiológicas e físico-químicas para decidir a classificação do produto: em não conforme ou vencido. A partir disso, é emitido um protocolo de descarte de resíduos determinando o método de descarte, que pode ser de 3 tipos: neutralização química, incineração ou direcionamento para aterro.

Ingrao et al. (2021) conseguiu abordar dois assuntos importantes num conceito de economia circular em um único estudo. Utilizando-se de um processo químico de escala laboratorial, avaliou a dimensão dos impactos ambientais para a reciclagem química de caco de vidro por meio de uma solução aquosa de silicato de sódio. Além disso, aplicou uma ACV para identificar oportunidades nos *hotspots* gerados por esse processo, identificando que os maiores pontos de impacto recaem sobre a produção de eletricidade e de hidróxido de sódio, dois recursos essenciais para o desenvolvimento da reação química. Dessa forma, o autor pode concluir que logo na fase inicial de um projeto em pequena escala, é possível identificar oportunidades em alinhamento com o modelo de negócio circular para a fase de pós uso de um produto.

No campo de estudo em Simbiose Industrial, Morsy et al. (2020) avaliou os impactos ocasionados pela transição das Estações De Tratamento De Águas Residuais (ETARs) de tratamento primário para secundário, incluindo uma abordagem de economia circular. Observou-se água tratada e lodo limpo de melhor qualidade, provando que a ACV é, de fato, uma ferramenta eficaz na avaliação dos impactos ambientais em ETARs. Como solução para o significativa demanda energética do tratamento, foram propostas abordagens circulares de recuperação de energia, como a troca da utilização de biogás por biometano, além do reuso da energia local que é gerada pelo processo.

De forma parecida, a ACV também foi utilizada por Navarro et al. (2020) para avaliar o desempenho ambiental de uma ETAR de um *cluster*<sup>4</sup> de tingimento, adaptada também ao tratamento águas residuais de outras indústrias com alto teor de

---

<sup>4</sup>*Cluster*: Aglomerado industrial.

COD (Carbono Orgânico Dissolvido), como empresas que produzem cerveja e presunto. A otimização foi efetivada com um investimento mínimo, utilizando tanques já existentes na planta, sendo alteradas apenas suas funções. O estudo conclui que os princípios da EC podem ser úteis para a modernização de indústrias tradicionais, bem como o compartilhamento de serviços e instalações entre Pequenas e Médias Empresas (PMEs).

Em contrapartida aos acadêmicos que conduziram uma ACV para a identificação dos principais *hotspots* e sugeriram saídas circulares para esses impactos gerados no processo, coexistem estudos que discordam que as ferramentas, como a ACV, LCSA (*Life Cycle Sustainability Assessment*) e CBA (*Cost Benefit Analysis*) são metodologias robustas o suficiente para tomada de decisão e para a abordagem de um valor sistêmico que engloba os domínios social, ambiental, econômico e técnico, como é o caso do estudo de Iacovidou et al. (2017).

Pôde-se concluir que há uma ascendência de publicações que associam a condução de uma ACV como uma metodologia eficaz para mensurar os principais pontos de impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida de um produto ou sistema, auxiliando no processo de tomada de decisão quando objetiva-se inserir estratégias circulares buscando a redução desses impactos. Assim sendo, Pontes e Angelo (2019) argumentam que a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida num contexto de economia circular, mostra que elas se complementam e geram resultados positivos ao meio ambiente, além de colaborar para mudanças que caminhem para a construção de uma economia regenerativa.

## **2.4 ACV no setor de produção de cerveja**

Para concluir esse capítulo e fornecer uma base teórica que atenda aos itens apresentados como objetivos específicos para esse trabalho, uma segunda RBS foi realizada para identificar estudos em que a ACV foi utilizada para mapear pontos críticos ambientais ao longo do ciclo de vida da produção de cerveja.

Cimini e Moresi (2018) utilizou um modelo de ACV para avaliar oportunidades de redução da pegada de carbono, considerando uma abordagem do “berço ao túmulo” de 1 hL de cerveja produzida em cervejarias de grande, médio e pequeno porte, envasadas em garrafas de vidro ou PET. Uma vez identificados os principais *hotspots* do ciclo de vida da cerveja, ou seja, fabricação de materiais de embalagem,

transporte e produção de matérias-primas e auxiliares de processamento, algumas medidas de mitigação foram testadas para avaliar sua eficácia relativa na redução da pegada de carbono. A produção de materiais de embalagem (garrafas de vidro e embalagens cartonadas) foi identificada como um dos principais *hotspots*, respondendo por 70% e 20% da contribuição do impacto, respectivamente. O segundo e terceiro principais *hotspots* são o transporte, a produção e o processamento de matérias-primas. Um quarto ponto importante para as micro cervejarias é o estágio de fabricação e engarrafamento da cerveja, já que a produção artesanal é muitas vezes ineficiente em termos de uso de malte de cevada e energia total.

Cimini e Moresi (2019) realizaram um estudo de caso para identificar a pegada de carbono do “berço ao túmulo” ( $CF_{CG}$ ) a partir dos dados da ACV realizada por Cimini e Moresi (2016; 2018), considerando como unidade funcional a produção de 1hL de cerveja lager produzida em uma cervejaria de grande porte com capacidade anual de cerveja de 3 milhões hL e acondicionada em garrafas de vidro de 660 ml. Os resultados da ACV indicaram que as fases do ciclo de vida que apresentaram maiores valores para a pegada de carbono foi, em ordem decrescente, a fabricação dos materiais para envase (56 kgCO<sub>2e</sub>/hL), etapa total de transporte (29 kgCO<sub>2e</sub>/hL), produção da cevada maltada e auxiliares de processamento (23 kgCO<sub>2e</sub>/hL), uso do consumidor (19 kgCO<sub>2e</sub>/hL), produção e envase de cerveja (12 kgCO<sub>2e</sub>/hL) e, por fim, descarte dos resíduos (1,2 kgCO<sub>2e</sub>/hL).

Também com o objetivo de avaliar a pegada de carbono, Zheng et al. (2019) utilizou a ACV para a obtenção dos melhores parâmetros de projeto de baixa emissão de carbono em um estudo de caso considerando o cilindro de fermentação de cerveja. Essa é uma excelente referência no que se refere ao uso do método ACV aplicado à uma etapa específica do ciclo de vida da produção de cerveja, responsável por gerar gases de efeito estufa em quantidades consideráveis.

Iolanda et al. (2016) comparou os impactos ambientais entre a produção de cerveja do tipo Ale (alta fermentação) e Lager (baixa fermentação), por meio de uma abordagem “*gate-to-gate*” de ciclo de vida, ou seja, a fronteira do sistema foi focada nas fases industriais da produção de cerveja. O estudo considerou sete principais etapas de produção, além de engarrafamento, distribuição e disposição dos resíduos. Entre as etapas de fabricação, para a cerveja do tipo Ale, os impactos mais notáveis foram nos processos de filtração, fervura e lupulação para a maioria das categorias

de impacto, já a etapa de mosturação foi significativa para as categorias: radiações ionizantes, ecotoxicidade aquática, extração mineral e potencial de aquecimento global, enquanto as etapas de moagem e fermentação apresentaram menor importância. Para a cerveja do tipo Lager, a contribuição da etapa de filtração é maior, seguida da etapa de fervura e lupulação. Apesar do impacto para a etapa de mosturação ser semelhante ao da cerveja do tipo Ale, as categorias afetadas são: inorgânicos respiratórios, acidificação/nitrificação terrestre, acidificação e consumo de energia não renovável, isso se deve ao processo de fermentação que é diferente para essa cerveja. Os autores concluíram que, para mitigar os impactos na produção de cerveja do tipo Lager, as temperaturas de ativação da levedura na fase fermentativa deveriam ser as mais altas dentro dos limites que permitem classificá-la como cerveja de baixa fermentação.

Amienyo e Azapagic (2016) considerou os impactos do ciclo de vida e os custos da produção de cerveja no Reino Unido, considerando uma abordagem “*cradle to grave*”, ou seja, desde a obtenção das matérias-primas até a etapa de pós uso para duas unidades funcionais: (i) produção e consumo de 1 L de cerveja em casa e (ii) produção e consumo anual de cerveja no Reino Unido. Os dados primários foram obtidos de uma cervejaria e os dados secundários pelas bases de dados dos softwares CCaLC, Ecoinvent e GaBi. Os resultados gerados no estudo de caso demonstram que o tipo de embalagem utilizada no envase de cerveja tem influência direta, acrescentando de 19 a 46% aos impactos. A cerveja em latas de aço tem os menores impactos para cinco das 12 categorias de impacto consideradas: demanda de energia primária, esgotamento de recursos abióticos, acidificação, toxicidade marinha e de água doce. A cerveja engarrafada é a pior opção para nove categorias de impacto, incluindo aquecimento global e demanda de energia primária, mas tem o menor potencial de toxicidade humana. A cerveja em latas de alumínio é a melhor opção para a destruição da camada de ozônio e a poluição fotoquímica, mas tem os maiores potenciais de toxicidade humana e marinha. Apesar disso, os autores concluem que a produção de matéria-prima é o maior *hotspot*, contribuindo de 47 a 63% para os impactos avaliados.

Mattila et al. (2012) testou nove diferentes indicadores de AICV, representando três categorias de impacto em um estudo de caso de produção de cerveja, sendo esses: esgotamento de recursos, qualidade do solo e biodiversidade.

Os resultados evidenciaram que boa parte dos impactos causados ao solo, ocorreram na fase de cultivo do malte, além de, posteriormente ser gerados menores níveis pela cadeia de suprimentos. No entanto, os autores citam que um grande desafio para um maior grau de acuracidade do estudo é a falta de fatores de caracterização regionais, concluindo que nenhum dos indicadores avaliados preenche todos os critérios para ser considerado um indicador ecológico eficaz.

Cordella et al. (2008) detectou e quantificou os impactos ambientais decorrentes do ciclo de vida de uma cerveja Lager italiana, utilizando-se o método Eco-Indicator 99 para etapa de AICV, considerando a produção de 1 L de cerveja envasada em garrafas de vidro de 330 mL e em barris de aço inoxidável retornável de 20L. A fronteira do sistema considerado nesse estudo incluiu: produção e aquisição de materiais e energia, processo de fabricação de cerveja, embalagem, transportes, consumo de cerveja e descarte de resíduos. Dos resultados obtidos, pode-se citar as emissões de componentes inorgânicos, o uso da terra e o consumo de combustíveis fósseis como as questões ambientais mais críticas. A cerveja em garrafa de vidro apresentou resultados mais danosos do que a cerveja em barril, devido às elevadas emissões e maiores consumos de energia associadas às garrafas de vidro. Por fim, os autores concluíram que a fase de consumo, produção da garrafa de vidro e o cultivo da cevada foram os estágios críticos do ciclo de vida da cerveja.

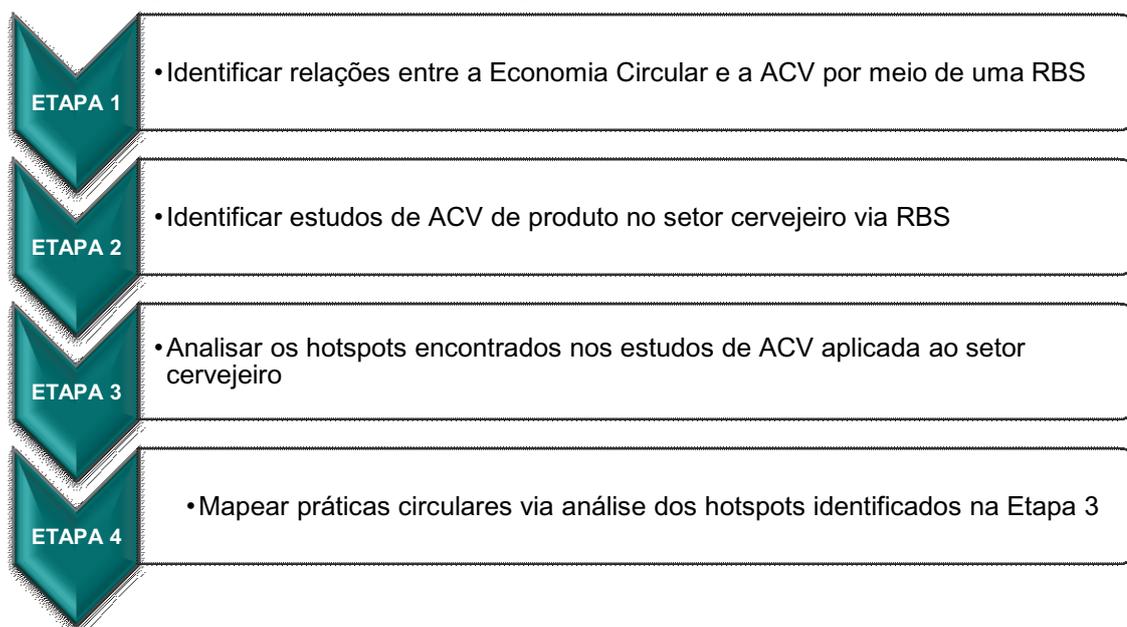
No trabalho realizado por Salazar et al. (2021), foi feita uma comparação entre os impactos gerados pela produção de cerveja num modelo artesanal (1000 – 10.000 L/ano) com um modelo de produção padrão (10.000 – 100.000 L/ano), concluindo que a artesanal gera um custo de utilidades 53% maior que o modelo convencional.

No que se refere à informações relacionadas à etapa de consumo considerando o ciclo de vida de cerveja, Hallström et al. (2018) retratou por meio de uma ACV os impactos ambientais causados pelo consumo de bebidas alcólicas na Suécia, dentre eles o de cerveja. Os resultados da análise mostraram que bebidas geram Gases de Efeito Estufa (GEE) na faixa de 0,73-2,38 kg de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq) por litro de bebida. Entre as bebidas alcólicas averiguadas, a cerveja despontou como responsável por 33% das emissões de GEE.

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será abordado os procedimentos metodológicos necessários para o cumprimento dos objetivos específicos desse trabalho. Para facilitar o entendimento, a metodologia foi dividida em quatro etapas, conforme a Figura 4 e detalhada a seguir.

**Figura 4 – Etapas da metodologia de acordo com o objetivo específico**



**Fonte: Autoria Própria (2022)**

#### 3.1 Etapa 1

Conforme Amaral e Silva (2011), uma RBS é o processo de “coletar, conhecer, compreender, analisar e avaliar um conjunto de artigos científicos com o propósito de criar um embasamento teórico-científico sobre um determinado assunto”.

A partir de uma revisão sistemática bem conduzida, é possível obter resultados com maior rigor de credibilidade, minimizando equívocos e permitindo que esses resultados possam ser replicados posteriormente, reduzindo o trabalho do pesquisador ao compilar e analisar dados. De acordo com Amaral e Silva (2011), “é possível encontrar padrões semelhantes de quantidade e diversidade de informações na área de gestão de operações, especialmente desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos”.

A revisão sistemática é descrita por meio de um processo iterativo, composto por três fases, conforme ilustrado pelas Figuras 5 e 6: entrada, processamento e saída. A

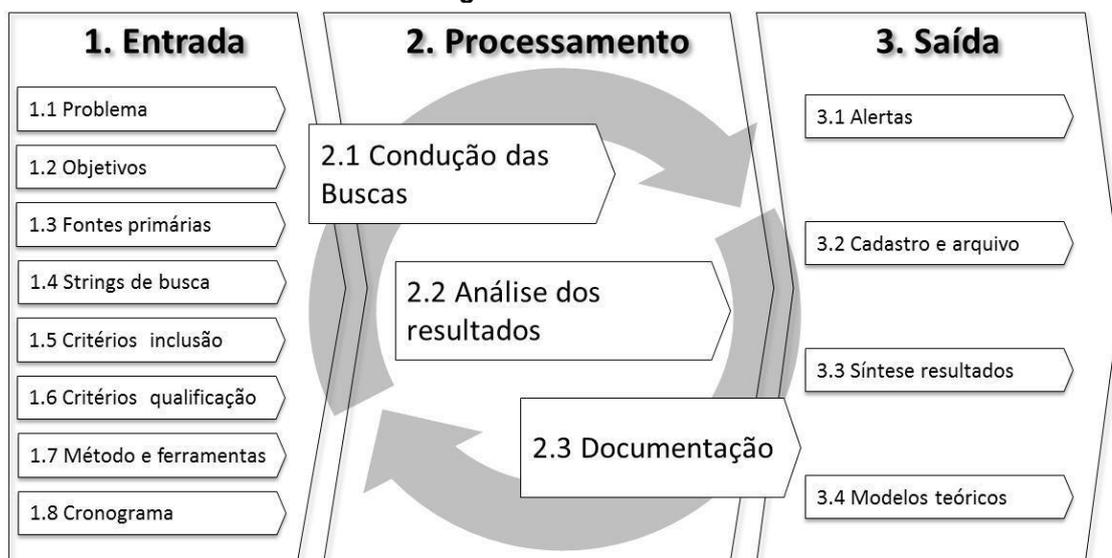
primeira fase, concentra o conteúdo prévio que será processado como, por exemplo, artigos e livros clássicos relacionados a área estudada. Também engloba um esboço de como a revisão será conduzida, ou seja, processos, técnicas e ferramentas que serão úteis para a fase de processamento (LEVY; ELLIS, 2006 apud AMARAL; SILVA, 2011).

**Figura 5 – Fases a serem seguidas durante a elaboração de uma RBS**



Fonte: Amaral e Silva (2011)

**Figura 6 – RBS Roadmap: fases e etapas a serem seguidas na condução de uma revisão bibliográfica sistemática**



Fonte: Amaral e Silva (2011)

A fim de compreender os dois principais conceitos expandidos nesse trabalho, ou seja, a Avaliação do Ciclo de Vida e a Economia Circular, foi feita uma Revisão Bibliográfica Sistemática com objetivo de conferir maior grau de confiabilidade

científica a esse estudo bem como contribuir para a manutenção do estado da arte. Essa revisão sistemática seguiu com rigor todas as três fases descritas nessa seção.

### 3.1.1 Entrada

Estágio em que se define a problemática da pesquisa bem como as lacunas que o trabalho pretende preencher, após, são elaborados os objetivos que se propõe alcançar, devendo esses ser tangíveis e claros. Parte-se, então, para a escolha das fontes primárias, ou seja, das bases de dados que serão utilizadas para inserção das palavras-chave (*string*) de busca. A próxima etapa é a escolha das *strings* de busca, ou seja, os termos que se referem à pesquisa. Então, são definidos os critérios de inclusão a fim de que se mantenha o rigor inerente à RBS, seguido pelos critérios de qualificação que medem o quão relevante é o artigo para a pesquisa. Por fim, são definidos os métodos e ferramentas para condução da revisão, ou seja, definição do passo a passo que será seguido para realizar pesquisa, bem como o cronograma que será seguido para atingir esse objetivo.

Na primeira fase, definiu-se a pergunta principal que esse estudo almeja responder: ‘como um estudo de ACV pode melhorar a circularidade de um produto?’ com o objetivo de discutir oportunidades e barreiras com o uso da ACV como ferramenta para a identificação de *hotspots* nos quais pode ser utilizadas alternativas em alinhamento com as boas práticas de uma Economia Circular.

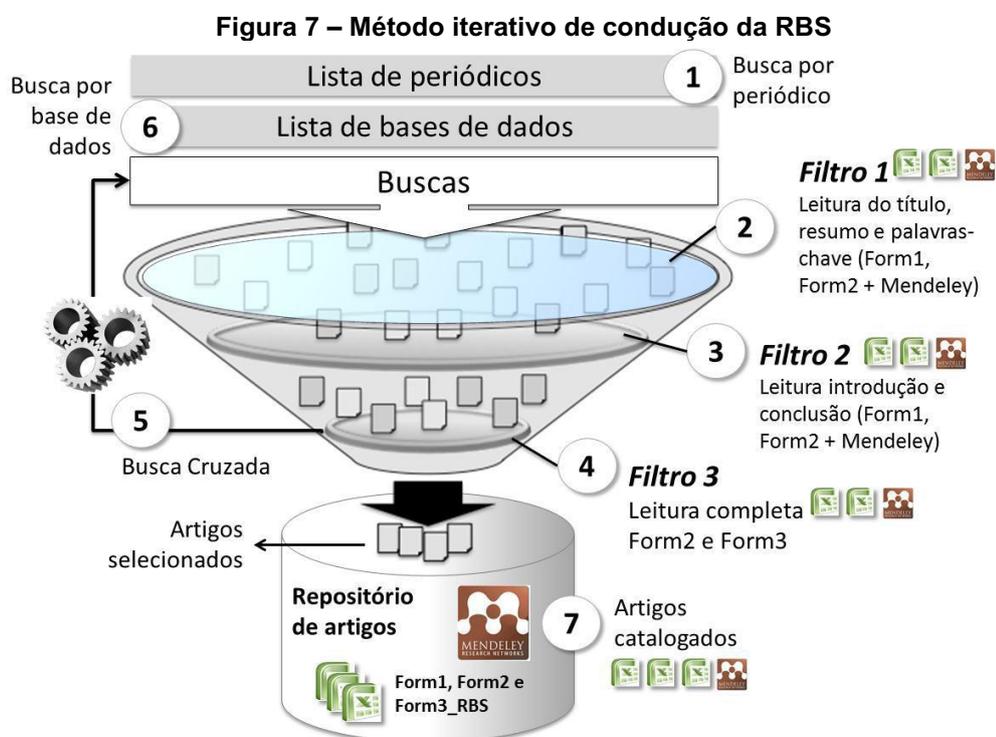
Para isso, foram utilizadas duas bases de dados para a condução da pesquisa: SCOPUS e Web of Science, por meio da *string* de busca (“*circular economy*” AND (“*life cycle assessment*” OR “*LCA*”)).

Os critérios de inclusão adotados foram: selecionar apenas artigos publicados em periódicos, possuir os termos ACV e EC no título, resumo ou palavra-chave e ter sido publicado entre 2010 e 15 de março de 2022. Como critério de qualificação, considerou-se se os termos apareciam com destaque nos capítulos de discussão e conclusão dos artigos, após sua leitura completa.

### 3.1.2 Processamento

A segunda fase da elaboração da revisão sistemática, consiste em um procedimento de busca, análise e documentação dos resultados encontrados. É

preferível que a busca seja feita por base de dados, facilitando o processo de filtragem dos artigos. A leitura dos artigos deve ser conduzida seguindo o esquema de funil da Figura 7, sendo sempre aplicado os critérios de inclusão e qualificação a cada iteração.



Fonte: Amaral e Silva (2011)

Para dar continuidade ao processo iterativo por meio dos filtros de leitura bem como catalogação dos artigos escolhidos para compor a revisão sistemática, utilizou-se planilhas do software Excel.

Após a consolidação dos resultados da RBS da Etapa 1, pode-se afirmar que foram identificados ao todo 1378 artigos publicados entre 2010 e 2021, para das duas bases de dados utilizadas. No entanto, foi identificado arquivos duplicados entre as bases. Após a eliminação das duplicidades restaram 900 artigos. Na Tabela 1, consta as métricas de cada um dos filtros para cada banco de dados utilizado.

Seguindo o modelo de revisão sistemática proposto por Amaral e Silva (2011), após a seleção dos artigos no filtro 3, esses foram sintetizados e compõem o referencial desse estudo. Após essa etapa, os artigos que chegaram ao fundo do funil foram documentados e arquivados. Conforme Amaral e Silva (2011), nessa etapa deve ser documentada a quantia de artigos encontrados na busca e a parcela destes

que foi excluída da RBS. O total percentual de artigos que compõem a RBS da primeira etapa consta na Tabela 2.

### 3.1.3 Saída

Na última fase da revisão sistemática, os artigos chegaram ao último filtro de leitura devem ser adicionados à lista de referências que irão compor a pesquisa científica. Então, é elaborado um relatório conclusivo com um compêndio dos principais pontos de destaque da bibliografia consultada.

## 3.2 ETAPA 2

A segunda etapa foi feita por meio de uma revisão bibliográfica a fim de encontrar artigos em que a Avaliação de Ciclo de Vida foi utilizada para determinar pontos de impacto considerando o ciclo de vida da produção de cerveja. Essa revisão foi conduzida utilizando-se do mesmo rigor científico da RBS realizada na etapa 1 apresentada anteriormente nesse capítulo.

Pode-se destacar como principal diferença a escolha da *string* de busca para o processamento dos artigos da segunda etapa, contudo, foi utilizada novamente duas bases de dados (*Scopus* e *Web of Science*) com o objetivo de aumentar o leque de oportunidades de referências bibliográficas, já que se almeja identificar trabalhos de ACV em um setor específico.

Nessa etapa, foi utilizada a *string* (“*life cycle assessment*” AND (“*brewery*” OR “*beer*”). Os critérios de inclusão foram: artigos publicados em periódicos até 19 de março de 2022 que possuíssem os termos “Avaliação do Ciclo de Vida” e “Cerveja” em qualquer parte da sua composição. Já os critérios de qualificação foram a presença dos termos em destaque no resumo e nos capítulos de metodologia e discussão dos artigos. O total percentual de artigos que compõem a RBS da segunda etapa consta na Tabela 3.

## 3.3 ETAPA 3

Com o resultado do levantamento descrito na Etapa 2 e, levando em consideração que o ciclo de vida da cerveja é bastante similar na maior parte dos estudos analisados, foi possível mapear os principais *hotspots* ao longo do ciclo de

vida da produção de cerveja. Essa análise foi possível devido a síntese dos resultados evidenciados pelos artigos selecionados na Etapa 2, no qual a ACV foi utilizada para avaliar o desempenho ambiental da obtenção desse produto.

Está disponível no capítulo de Resultados e Discussões, as considerações que foram feitas a respeito das fronteiras do sistema analisado, bem como observações sobre o que causou esses impactos e em qual etapa do ciclo de vida da cerveja ele é mais significativo para as respectivas categorias de impacto analisadas.

### **3.4 ETAPA 4**

A quarta e última etapa da metodologia utilizada para realizar esse trabalho traz soluções alinhadas com os conceitos de Economia Circular, abordados anteriormente no capítulo 2, para os principais pontos de impacto que surgiram a partir da análise realizada na Etapa 3.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Etapa 1 – Relações existentes entre ACV e EC

Nessa seção do quarto capítulo dessa pesquisa, é mostrado o resultado da primeira RBS conduzida com o objetivo de encontrar relações entre estudos que se utilizaram da ACV como uma metodologia capaz de mensurar os impactos ambientais causados ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo, que muitas vezes, podem ser contornados fechando o ciclo produtivo por meio da adoção de práticas alinhadas com os princípios da economia circular.

Dessa forma, foram analisados cerca de 900 artigos provenientes de duas bases de dados, o *Scopus* e o *Web of Science*. A Tabela 1 evidencia a quantidade total de artigos provenientes das *strings* de busca definidas no capítulo de metodologia para a Etapa 1.

**Tabela 1 – Total de artigos obtidos da RBS Etapa 1**

| <b>Total RBS 1</b>                |              |
|-----------------------------------|--------------|
| <b>Pesquisa Primária</b>          | <b>1.377</b> |
| <i>Scopus</i>                     | 569          |
| <i>Web of Science</i>             | 808          |
| <b>Duplicados</b>                 | <b>477</b>   |
| Total após remoção dos duplicados | 900          |

Fonte: Autoria própria (2022)

A Tabela 2 traz um relatório dos resultados do processo de filtragem realizados para chegar ao total de trabalhos que, efetivamente, foram utilizados como referência para essa etapa do estudo.

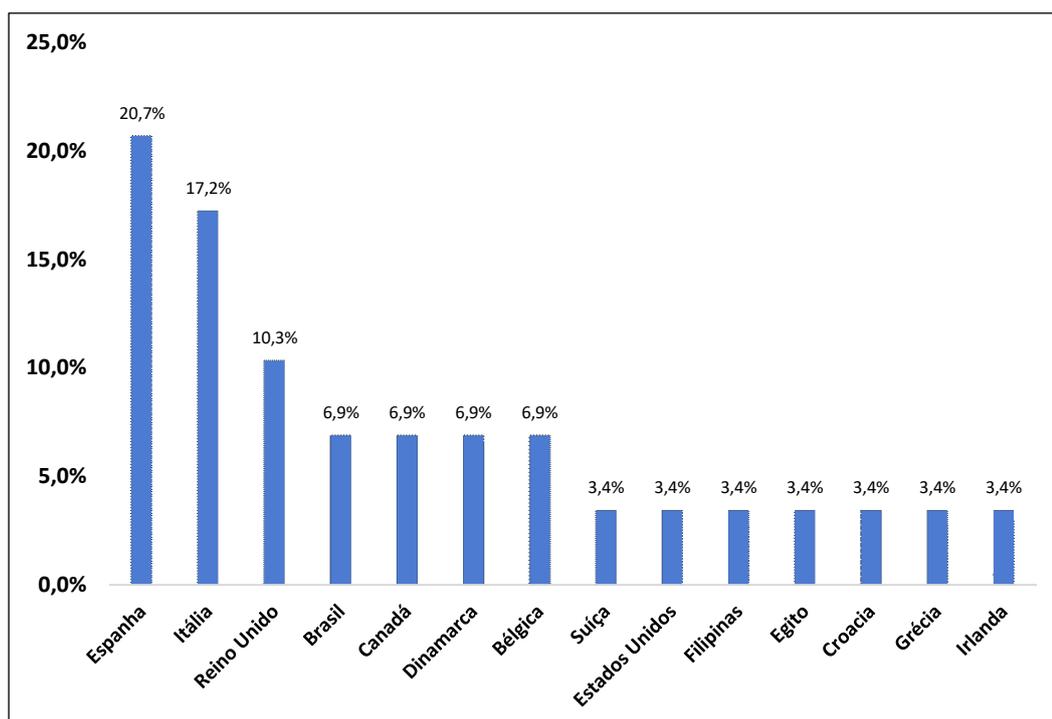
**Tabela 2 – Relatório do processo de filtragem da RBS**

|          | Scopus | Web of Science | Total de Artigos |
|----------|--------|----------------|------------------|
| Filtro 1 | 59     | 46             | 105              |
| Filtro 2 | 32     | 25             | 57               |
| Filtro 3 | 19     | 11             | 30               |

Fonte: Autoria própria (2022)

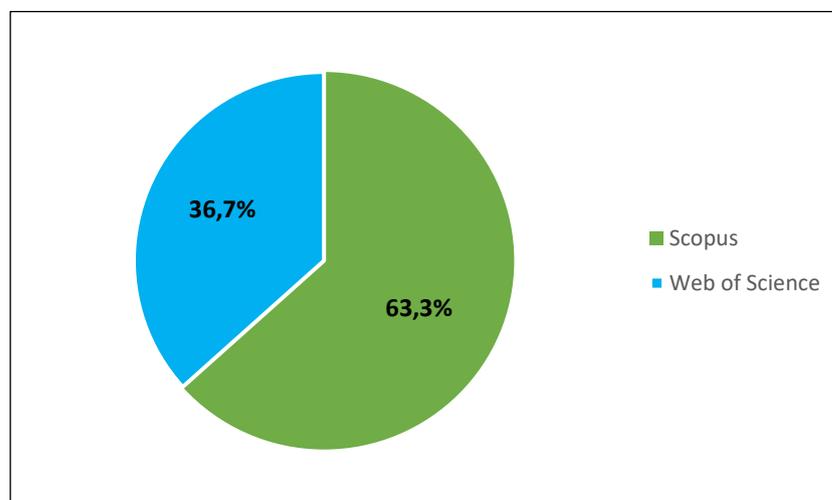
Dessa forma, foram selecionados 30 artigos para compor a RBS após aplicação de critérios de inclusão, utilizando-se as bases de dados *Web of Science* e *Scopus* como fonte de busca, cerca de 63% dos trabalhos que foram designados para compor a RBS vieram dessa base. A maioria dos artigos considerados advém dos países europeus, com destaque para Espanha e Itália.

**Figura 8 – RBS 1: Quantidade de artigos por país de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

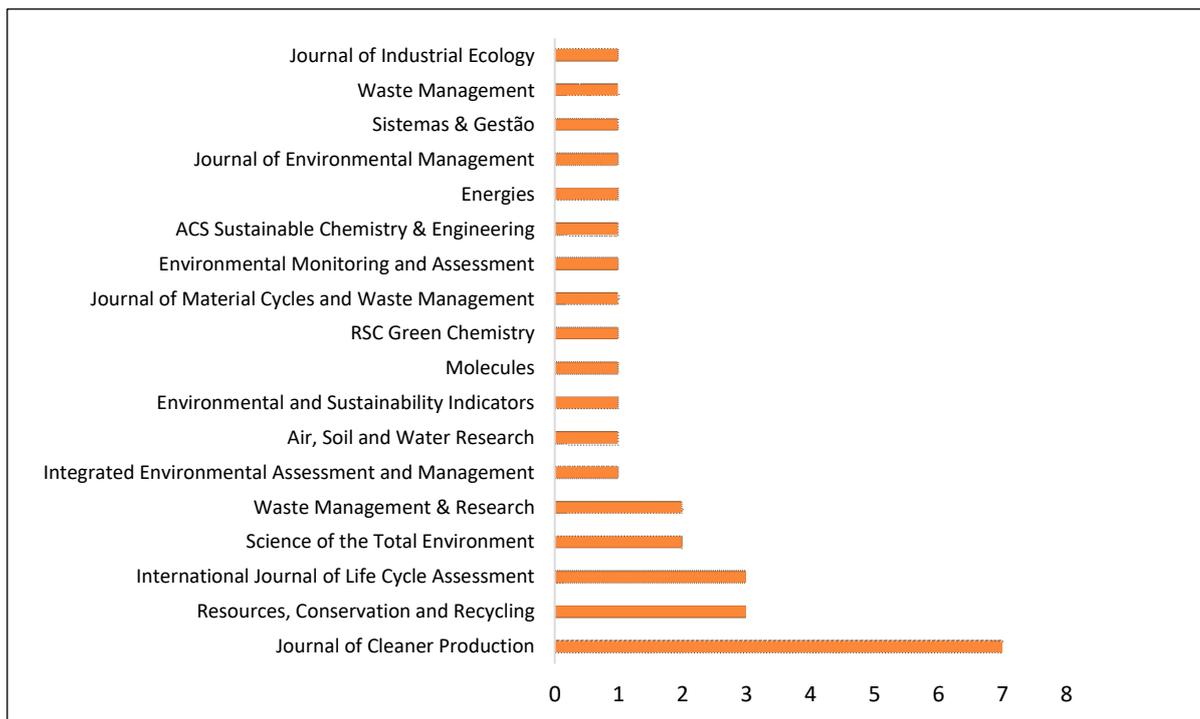
**Figura 9 – Quantidade de artigos por base de dados**



Fonte: Autoria própria (2022)

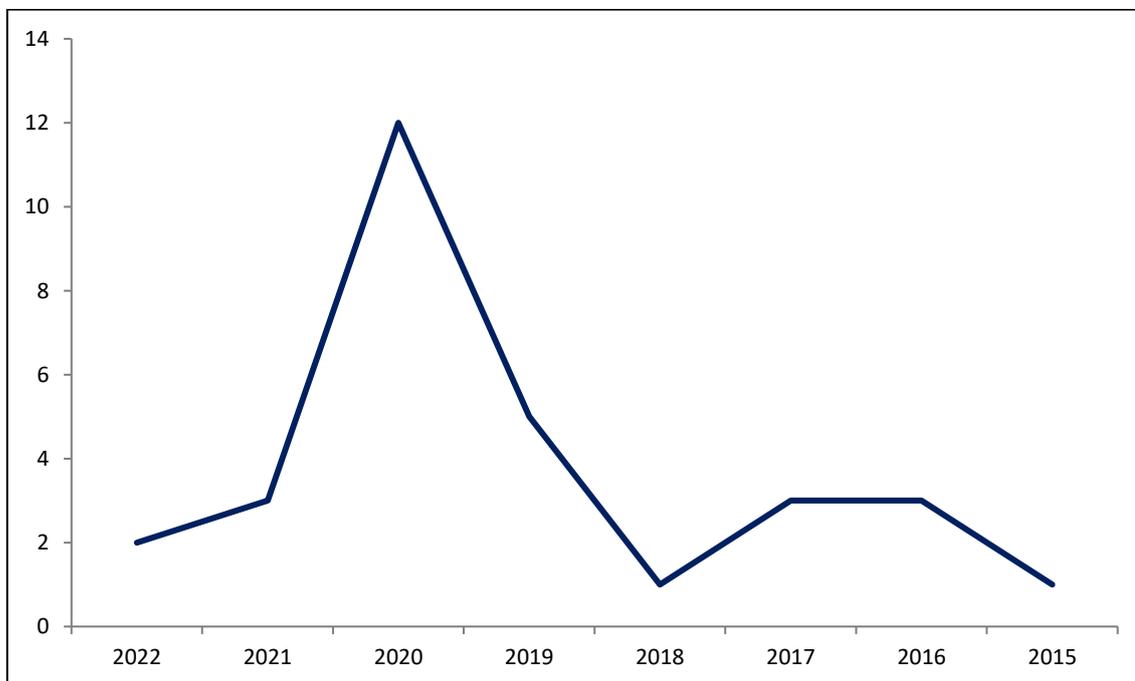
Os trabalhos foram veiculados em 18 periódicos diferentes, com destaque para o *Journal of Cleaner Production* por apresentar a maioria das publicações. Observou-se que a maioria dos trabalhos que compõem o capítulo 2.3 deste trabalho foram publicados entre 2019 e 2020.

**Figura 10 – RBS1: Quantidade de artigos por periódico de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 11 – RBS 1: Quantidade de artigos por ano de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

## 4.2 Etapa 2 – Estudos de ACV na produção de cerveja

A partir da *string* de busca definida na metodologia desse estudo para a segunda RBS, obteve-se um total de 81 artigos sendo utilizado, novamente, duas bases de busca para aumentar a variedade de estudos a fim de suprir a necessidade teórica dessa etapa que pode ser considerada deveras específica. Na Tabela 3, tem-se um resumo dos valores encontrados na primeira parte da pesquisa e, na Tabela 4, tem-se o relatório do processo de filtragem realizado para chegar ao total percentual final de artigos que compõem esse trabalho.

**Tabela 3 – Total de artigos obtidos da RBS Etapa 2**

| Total RBS 2                          |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>Pesquisa Primária</b>             | <b>81</b> |
| <i>Scopus</i>                        | 61        |
| <i>Web of Science</i>                | 20        |
| <b>Duplicados</b>                    | <b>16</b> |
| <i>Total após remoção duplicados</i> | 65        |

Fonte: Autoria própria (2022)

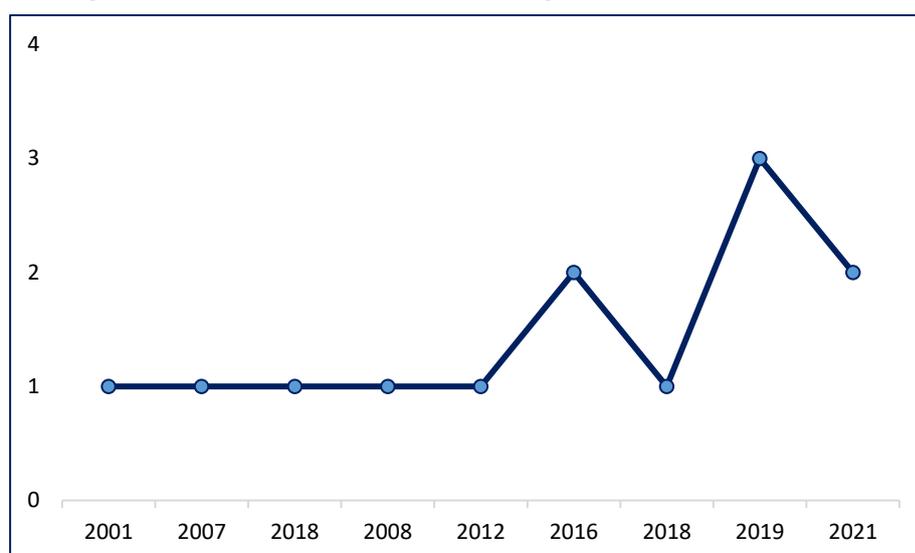
**Tabela 4 – Relatório percentual do processo de filtragem da RBS 2**

| Total RBS 2           |              |
|-----------------------|--------------|
| <b>Filtro 1</b>       | <b>55,4%</b> |
| <i>Scopus</i>         | 36,9%        |
| <i>Web of Science</i> | 21,5%        |
| <b>Filtro 2</b>       | <b>35,4%</b> |
| <i>Scopus</i>         | 23,1%        |
| <i>Web of Science</i> | 12,3%        |
| <b>Filtro 3</b>       | <b>20,0%</b> |
| <i>Scopus</i>         | 13,8%        |
| <i>Web of Science</i> | 6,2%         |

Fonte: Autoria própria (2022)

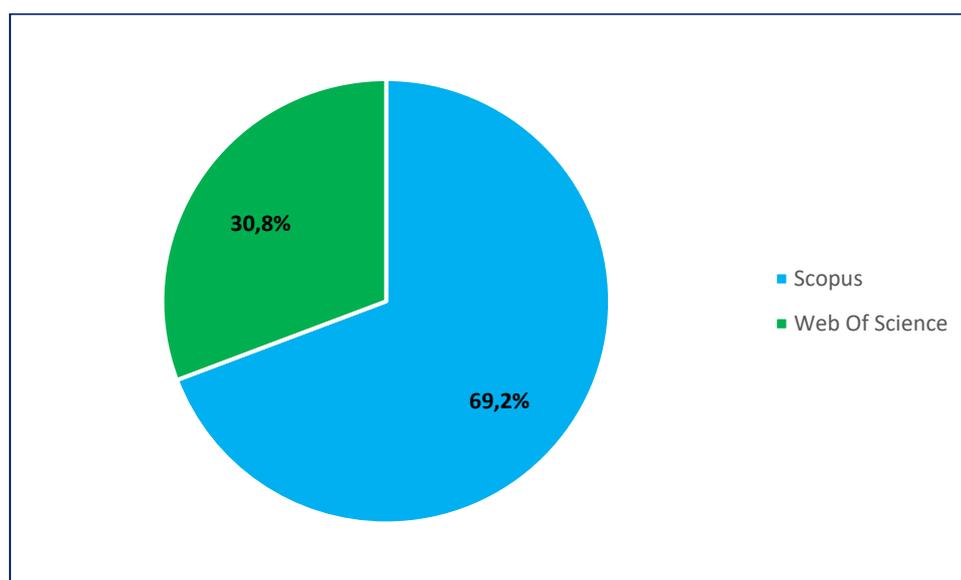
Para a segunda RBS, cujo objetivo era identificar estudos de ACV realizados no setor cervejeiro, foram selecionados 13 artigos para compor o capítulo 2.4 desse trabalho. De maneira análoga à primeira RBS realizada, foram consideradas as bases de dados *Web of Science* e *Scopus* como fonte de busca para a pesquisa, a maior parte dos artigos selecionados vieram da última. Por se tratar de uma pesquisa com um objetivo muito específico, não foi considerada uma data inicial limite para o estudo. Dessa forma, foi encontrado artigos publicados desde o início dos anos 2000.

**Figura 12 – RBS 2: Quantidade de artigos por ano de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

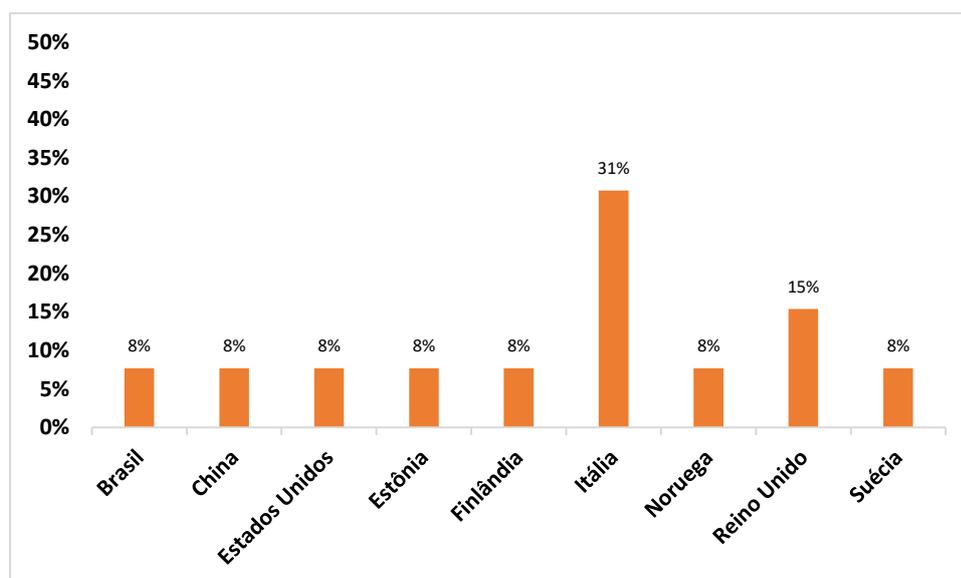
**Figura 13 – RBS 2: Quantidade de artigos por base de dados**



Fonte: Autoria própria (2022)

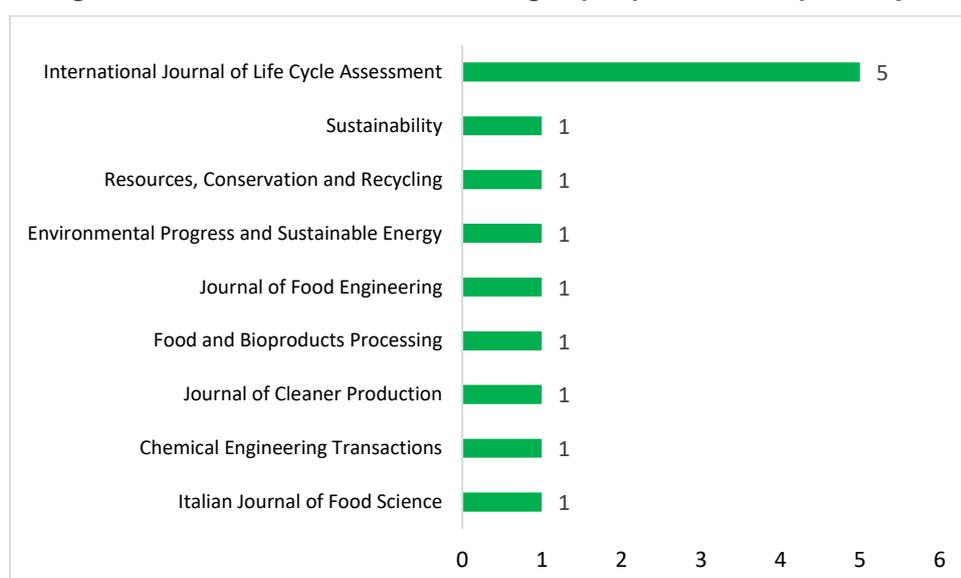
Também foi mapeado o país em que o estudo de ACV foi realizado e, em qual periódico o estudo foi publicado. De forma análoga à primeira RBS, a Itália despontou como o país com maior número publicações, correspondendo a aproximadamente 31% do total. Já com relação aos principais periódicos, o *International Journal of Life Cycle Assessment* foi responsável pela veiculação de 38% dos artigos selecionados para essa segunda RBS.

**Figura 14 – RBS 2: Porcentagem de artigos por país de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

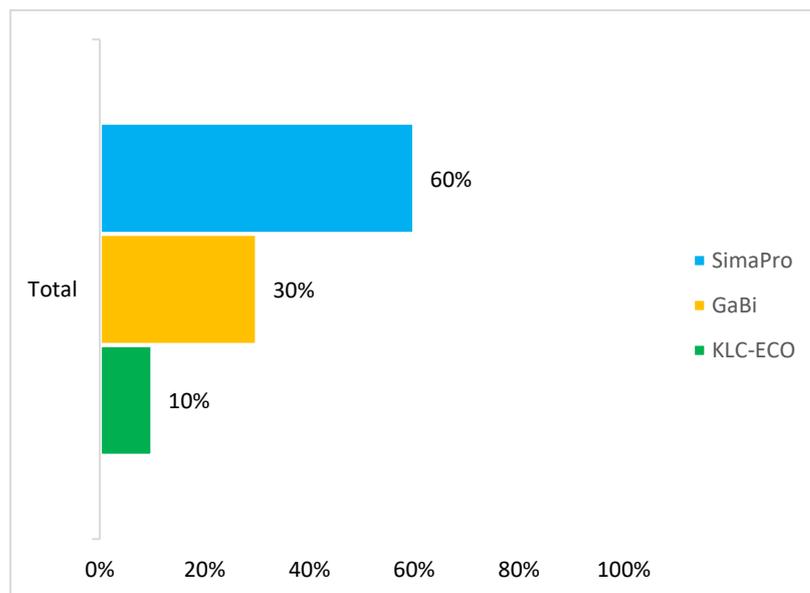
**Figura 15 – RBS 2: Quantidade de artigos por periódico de publicação**



Fonte: Autoria própria (2022)

Além disso, foi verificado quais foram os softwares utilizados para a condução da ACV, visto que é necessário o uso de programas computacionais para a análise dos dados primário e secundários durante a segunda e terceira fase da ACV. De todos os 13 artigos selecionados para compor a RBS, apenas 3 não especificaram qual o software usado, pois as conclusões dos estudos remetiam utilizaram-se de dados provenientes da literatura. O *software* mais utilizado foi o *GaBi* (60%) seguido do *SimaPro* (30%).

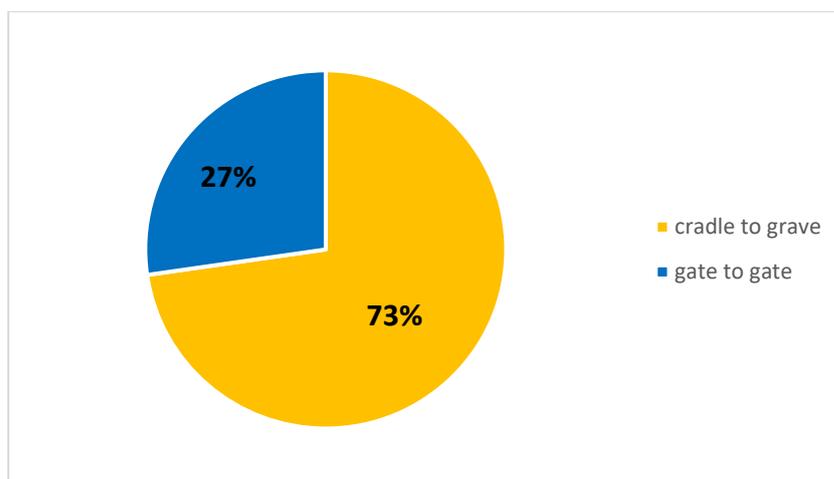
**Figura 16 – RBS 2: Software utilizado por estudo de ACV**



Fonte: Autoria própria (2022)

Com relação à fronteira do sistema adotado para o estudo, 73% dos autores consideraram uma abordagem “*cradle-to-grave*”, enquanto os outros 27% utilizaram a abordagem “*gate-to-gate*”, focada principalmente nos limites da etapa de processamento de malte para produção de cerveja, excluindo-se etapas como obtenção de matéria-prima para fabricação do produto e de auxiliares de processo, bem como a etapa de consumo e disposição final da embalagem utilizada para envase.

**Figura 17 – RBS 2: Fronteira do sistema de ACV por artigo**



Fonte: Autoria própria (2022)

As unidades funcionais utilizadas por cada autor para mensurar os impactos ambientais durante a condução da ACV estão descritas no Quadro 1.

**Quadro 1 – Unidade Funcional utilizada para conduzir a ACV**

| Referência                | Unidade funcional considerada na ACV                                     |
|---------------------------|--|
| Amienyo e Azapagic (2016) | Produção e consumo de 1L de cerveja no Reino Unido                       |
| Cimini e Moresi (2018)    | 660 mL de cerveja envasada em garrafas de vidro ou PET                   |
| Cimini e Moresi (2019)    | 660 mL de cerveja envasada em garrafas de vidro ou PET                   |
| Cordella et al. (2008)    | 1 L de cerveja e a fração de embalagem necessária para envasar tal litro |
| De Marco et al. (2016)    | 330 mL de cerveja envasada em garrafa de vidro                           |
| Diniz et al. (2021)       | Consumo de 1 kWh de calor de processo pela micro cervejaria artesanal    |
| Hallström et al. (2018)   | 1 kg de CO <sub>2eq</sub> emitido para cada 1 L de bebida produzida      |
| Hanssen et al. (2007)     | Quantidade de bebida consumida <i>per capita</i> na Noruega no ano 2000  |
| Mattila et al. (2012)     | 330 mL de cerveja servida em um restaurante finlandês                    |
| Salazar et al. (2021)     | Produção de 1 barril de cerveja envasada                                 |
| Talve (2001)              | 10 hL de cerveja engarrafada em 505 <i>multipacks</i>                    |
| Zheng et al. (2019)       | 1 cilindro de fermentação com vida útil de 25 anos                       |

Fonte: Autoria Própria (2022)

### 4.3 Etapa 3 – mapeamento dos *hotspots* no ciclo de vida da cerveja

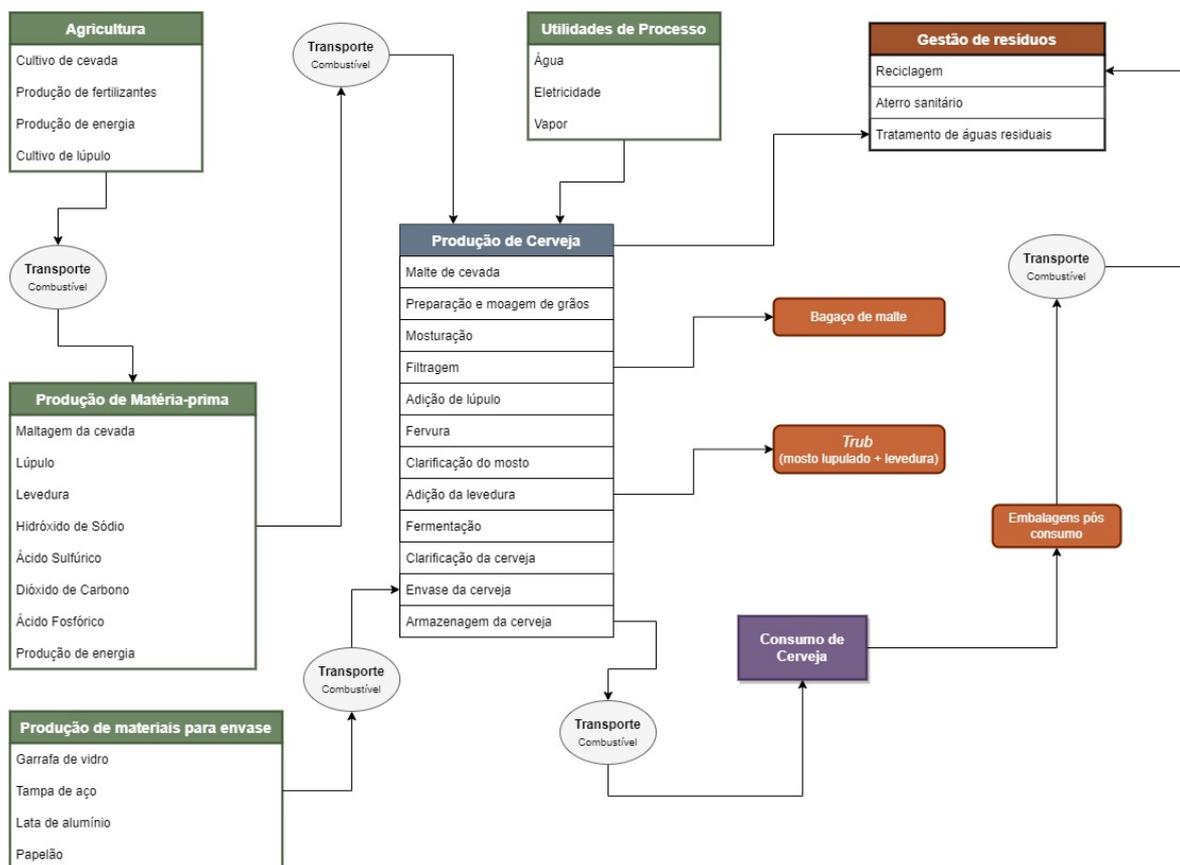
Após a leitura dos artigos selecionados para compor a etapa 2, foi possível esquematizar o ciclo de vida da cerveja, considerando uma produção de pequena escala tal qual a de uma instalação industrial de processamento de cerveja artesanal para poder ilustrar os principais *hotspots* identificados por meio da análise dos capítulos de resultados dos artigos da RBS 2.

As fronteiras do sistema analisado seguem um modelo semelhante ao proposto por Cordella et al. (2008), Talve (2001) e Amienyo e Azapagic (2016), levando em consideração a etapa de obtenção de matéria-prima para produção de cerveja bem como para produção dos auxiliares de processo, além de considerar a obtenção dos materiais utilizados para envase de cerveja.

Para esse estudo foi considerado a produção de 1 L de cerveja puro malte Lager, ou seja, sem adjuntos de outros cereais além de cevada, envasada em garrafas de vidro de 660 mL em latas de alumínio de 350 mL com o objetivo de comparar os diferentes impactos ao ciclo de vida quando se leva em consideração o tipo de material escolhido para envasar o produto. Para ambos os tipos de embalagem, foi considerado o uso de caixas de papelão como embalagem secundária. Uma

representação do sistema de produto de berço ao túmulo da produção de cerveja está esquematizada na Figura 18.

**Figura 18 – Sistema de produto do “berço ao túmulo” da produção de cerveja**



Fonte: Autoria Própria (2022)

#### 4.3.1 Principais *hotspots* encontrados no ciclo de vida da cerveja

A partir da análise dos principais *hotspots* levantados pela literatura e contidos na Tabela 6, foi possível identificar no ciclo de vida da cerveja quais são os principais pontos críticos ambientais. É evidente que, na maioria dos estudos de referência, os autores chegaram a um mesmo consenso sobre qual etapa do ciclo de vida desse produto é mais agressiva para o meio ambiente, levando em consideração diversas categorias de impacto.

No Quadro 2, está um resumo dos principais *hotspots* levando em consideração o Potencial de Aquecimento Global (GWP) dada que essa categoria de impacto é comum a todos os artigos analisados.

**Quadro 2 – Relação dos principais *hotspots* listados pela RBS 2**

| Referência                | Principal <i>hotspot</i> para Potencial de Aquecimento Global   |
|---------------------------|---|
| Talve (2001)              | Emissões de CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O e CO <sub>2</sub> no processamento de cerveja devido à demanda energética.   |
| Amienyo e Azapagic (2016) | Envase garrafas de vidro (55%) e latas de alumínio (25%);<br>Produção de matéria-prima cevada maltada (57%), lata de alumínio (39%), garrafa de vidro (24%) e dióxido de carbono liquefeito (11%).<br>Gestão de resíduos 9-10%<br>Transporte 2-3% |
| De Marco et al. (2016)    | Processamento de cerveja – etapa de fervura do mosto, lupulação e fermentação.  |
| Cimini e Moresi (2018)    | Produção de garrafas de vidro, transporte (matéria-prima e produto final) e a produção de cevada maltada.   |
| Hallström et al. (2018)   | Processamento de cerveja (43,8%) e Produção de matéria-prima agrícola (36,9%)   |
| Salazar et al. (2021)     | Processamento de cerveja (52,4%) e produção de matéria-prima (22,4%)  |

Fonte: Autoria Própria (2022)

No Quadro 2 não foram listados os demais pontos críticos para diferentes categorias de impacto, mas cabe ressaltar as considerações feitas por Talve (2001) a respeito das categorias DQO, formação de smog, geração de resíduos sólidos, eutrofização e acidificação do solo. Além disso, Mattila et al. (2012) fez considerações interessantes a respeito do uso e depleção do solo causados pelo ciclo de vida da cerveja. Um resumo das considerações feitas por esses autores está pontuado no Quadro 3.

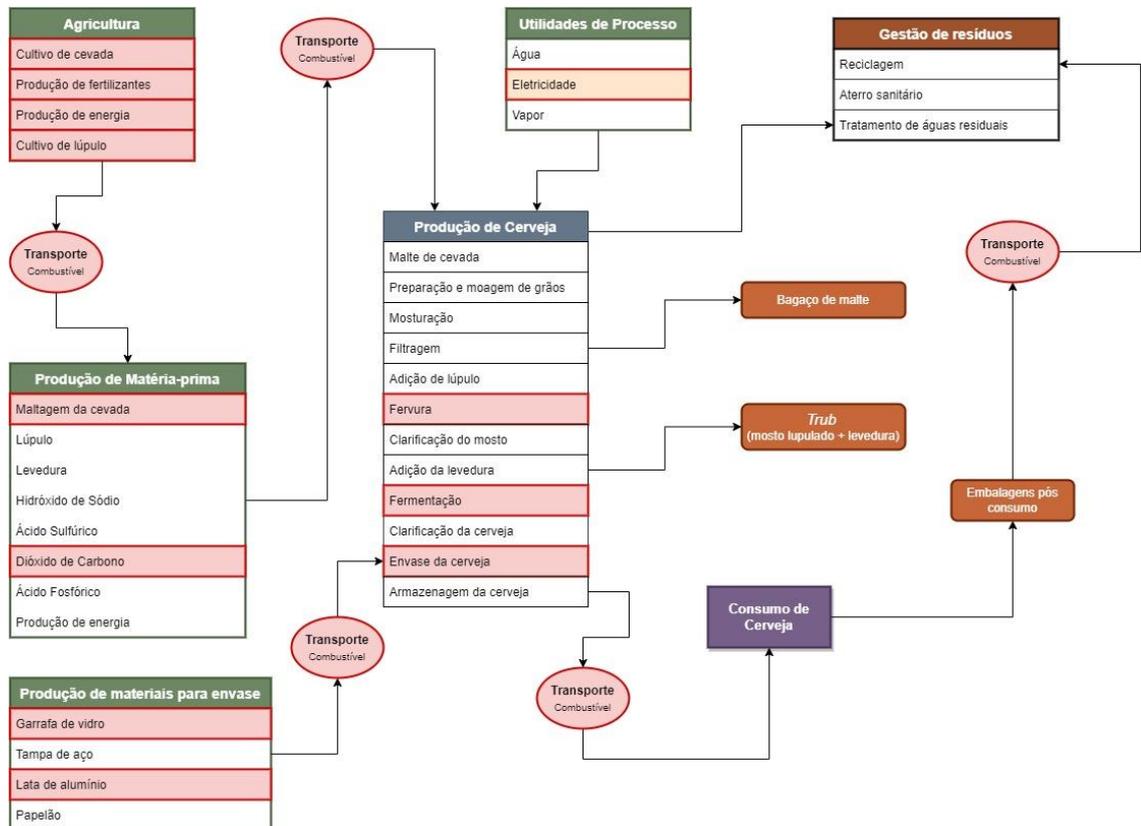
**Quadro 3 – Demais *hotspots* listados para outras categorias de impacto**

| Referência            | Categoria de impacto         | Principais <i>hotspots</i>  |
|-----------------------|------------------------------|---|
| Talve (2001)          | DQO                          | Produção de matéria-prima – produtos químicos para etapa de limpeza e produção de papel para engradado.                         |
|                       | Formação de <i>smog</i>      | Distribuição do produto para os pontos de venda.  |
|                       | Eutrofização                 | Agricultura – emissões de fósforo e nitrogênio da etapa de produção de cevada e fertilizantes necessários para seu cultivo.     |
|                       | Acidificação                 | Emissões de dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio originados pela etapa de transporte de matéria-prima, cerveja e resíduos. |
|                       | Resíduos Sólidos             | Principalmente resíduos de vidro quando este é escolhido como embalagem primária.   |
| Mattila et al. (2012) | Depleção do solo             | Cultivo de cevada.  |
|                       | Depleção de áreas florestais | Produção de garrafas de vidro, devido a necessidade de paletes de madeira para o transporte das garrafas.                       |

Fonte: Autoria Própria (2022)

Na Figura 19, está identificado em vermelho os principais pontos críticos do ciclo de vida considerando todas as categorias de impacto apontadas nos estudos encontrados na RBS.

**Figura 19 – Principais hotspots do sistema de produto analisado**



Fonte: Autoria Própria (2022)

#### 4.4 Etapa 4 – Oportunidades de circularidade no ciclo de vida esquematizado

Essa seção tem como objetivo propor alternativas para os principais pontos críticos ambientais mapeados que estejam alinhadas aos princípios de uma economia circular.

##### 4.4.1 Produção de matéria-prima

Cerca de 63% dos autores apontaram a etapa de cultivo da cevada com o maior ponto de impacto para o ciclo de vida da cerveja, visto que essa etapa abrange um vasto leque de categorias de impacto (por exemplo, depleção do solo, potencial de acidificação, eutrofização e potencial de aquecimento global).

Para esse *hotspot*, uma possível solução capaz de gerar créditos positivos para essa fase do ciclo de vida, é a destinação de bagaço de malte, principal coproduto da etapa de processamento de cerveja, para fazendas de criação de animais com o objetivo de introduzir esse resíduo na alimentação dos animais, dado seu rico valor nutricional. Uma outra opção seria a escolha de fornecedores mais próximos da unidade produtora, visto que a etapa de transporte de matéria-prima também é uma grande contribuinte para GWP.

#### 4.4.2 Transporte

O meio de transporte é um dos pontos críticos que apresentam maior dificuldade em se propor soluções circulares, no entanto, uma sugestão seria o uso de veículos maiores e que sejam, pelo menos, modelo EURO 5 para padrão de emissões atmosféricas. Essa pode ser uma opção de mitigação altamente eficaz para esse *hotspot*, mas exigiria o transporte de maior volume, potencialmente alcançáveis apenas por meio da colaboração com outras empresas da região.

O compartilhamento de recursos logísticos entre produtores próximos é, também, uma medida circular. Além disso, sabe-se que a utilização de veículos elétricos já é uma realidade no Brasil, sendo essa mais uma alternativa para redução desse *hotspot*.

Outra consideração a ser feita é sobre a etapa de transporte da cerveja envasada para o ponto de varejo, dado o volume total de cerveja produzida já que a fronteira do sistema consiste em uma cervejaria de pequeno porte. Dessa forma, pressupõe-se que a distribuição do produto seja realizada para curtas distâncias.

#### 4.4.3 Processamento da cerveja

Para a etapa de produção da cerveja, é incontestável apontar que a demanda energética para suprir a capacidade produtiva é de uma dimensão considerável, mesmo ponderando uma produção em pequena escala. Uma oportunidade de fechar o ciclo para essa etapa seria utilizar sua principal “saída” como uma nova “entrada”, ou seja, aproveitando os resíduos sólidos de bagaço de malte descartados após a etapa de filtragem do mosto para a geração de biogás, por meio de um processo de

digestão anaeróbica, sendo essa uma maneira de se reinserir energia renovável no ciclo produtivo, ao invés de consumir recursos não renováveis.

Cabe ressaltar que a água residual da cervejaria também pode ser processada por digestão anaeróbica para reduzir o teor de matéria orgânica e contribuir para a quantidade de biogás produzido.

A depender da localização da instalação industrial, a presença de um biodigestor pode ser estratégica e interessante, principalmente se houver outros produtores que tenham como resíduos matéria orgânica, já que o custo de manutenção do biodigestor pode ser compartilhado, bem como o recurso energético produzido.

#### 4.4.4 Tipo de embalagem selecionada para envase

A literatura aponta a opção de envase em latas de alumínio como a opção mais ecologicamente sustentável dada a alta percentagem de reciclagem de alumínio, por se tratar de um material leve, capaz de se diminuir, sendo assim, fácil de se transportar. No entanto, essa opção peca em outras categorias de impacto, como ecotoxicidade aquática e humana.

Já a opção de envase em garrafas de vidro é, de fato, a pior escolha visto que o processo de reciclagem de vidro demanda muita energia e outros recursos, além de ser difícil de se transportar dado seu peso. Essa opção de envase pode ser interessante se vier associada com uma boa estrutura de logística reversa realizada pela unidade produtora em conjunto com os pontos de venda e distribuição, principalmente se esses forem bares regionais. Essa é uma alternativa interessante, visto que 100% do material pode ser aproveitado, passando apenas por uma etapa de higienização.

## 5 CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo criar uma robusta base literária capaz de fundamentar o mapeamento do ciclo de vida de produção da cerveja considerando uma abordagem do “berço ao túmulo”, possibilitando identificar quais são as etapas causadoras de maior impacto ambiental dentro da fronteira desse sistema.

Por meio da análise de trabalhos de Avaliação do Ciclo de Vida realizados no setor cervejeiro, foi possível pontuar esses pontos críticos com maior grau de assertividade, além de propor sugestões para a mitigação desses impactos, alinhadas aos princípios de uma economia circular.

O principal desafio encontrado durante a realização desse trabalho foi, justamente, a falta de estudos de ACV realizados com o objetivo de avaliar o desempenho ambiental, considerando-se um cenário que esteja alinhado com a promoção de uma economia circular.

A partir disso, constatou-se como uma possível sugestão para pesquisas futuras a realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida em parceria com indústrias cervejeiras brasileiras, utilizando-se da robusta revisão sistemática da literatura realizada no presente trabalho.

Com a realização de um estudo de caso no setor cervejeiro é possível obter dados primários fornecidos pela unidade produtora que, em conjunto com os dados secundários disponíveis em bases de dados podem fornecer os dados necessários para a condução da etapa de avaliação das categorias de impacto. Dessa forma, a avaliação do desempenho ambiental da produção da cerveja pode ser mensurada e, a partir disso, podem ser propostas soluções circulares para esses pontos de impacto.

## 6 REFERÊNCIAS

AMIENYO, D.; AZAPAGIC, A. Life Cycle Environmental Impacts and Costs of Beer Production and Consumption in the UK. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.l.], v. 21, n. 4, p. 492-509, 2016. Acesso em: 30 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040/2009**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

BIMPIZAS-PINIS, M.; SANTAGATA, R.; KAISER, S.; LIU, Y.; LYU, Y. Additives in the food supply chain: Environmental assessment and circular economy implications. **Environmental and Sustainability Indicators**, [S.l.], v.14, 2022. Acesso em: 19 mar. 2022.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. **Journal of Industrial Ecology**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 603-614, 2017. Acesso em: 17 ago. 2020.

BOONS, F.; SPEKKINK, W.; MOUZAKITIS, Y. The Dynamics of Industrial Symbiosis: A Proposal for a Conceptual Framework Based Upon a Comprehensive Literature Review. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 19, p. 905-911, 2011. Acesso em: 04 set. 2020.

CIMINI A., MORESI M. Carbon Footprint of a pale lager packed in different formats: assessment and sensitivity analysis based on transparent data. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 112, ed. 5, p. 4196-4213, 2016. Acesso em: 01 abr. 2022.

CIMINI A.; MORESI M. Effect of brewery size on the main process parameters and cradle-to-grave carbon footprint of lager beer. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, ed. 5, p. 11-39, 2018a. Acesso em: 01 abr. 2022.

CIMINI, A; MORESI, M. Mitigation measures to minimize the cradle-to-grave beer carbon footprint as related to the brewery size and primary packaging materials. **Journal of Food Engineering**, v. 236, p. 1-8. 2018b. Acesso em: 01 abr. 2022.

CIMINI, A; MORESI, M. Product Carbon Footprint: Still A Proper Method to Start Improving the Sustainability of Food and Beverage Enterprises. **Italian Journal of Food Science**, [S.l.], v. 31, n. 4, p. 808-826, 2019. Acesso em: 28 set. 2020.

CIVANCIK-USLU, D.; PUIG, R.; FERRER, L.; FULLANA-I-PALMER, P. Influence of End-Of-Life Allocation, Credits and Other Methodological Issues in LCA of Compounds: An In-Company Circular Economy Case Study on Packaging. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 212, n. 1, 925-940, 2019a. Acesso em: 02 out. 2020.

CIVANCIK-USLU, D.; PUIG, R.; VOIGT, S.; WALTER, D.; FULLANA-I-PALMER, P. Improving the Production Chain with LCA and Eco-Design: Application to Cosmetic

Packaging. **Resources, Conservation & Recycling**, [S.l.], v. 151, p. 104-475, 2019b. Acesso em: 05 out. 2020.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **CBGDP**, 2011. Acesso em: 21 set. 2020.

CORDELLA, M.; TUGNOLI, A.; SPADONI, G.; SANTARELLI, F.; ZANGRANDO, T. LCA of an Italian Lager Beer. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 133-139, 2008. Acesso em: 30 set. 2020.

DE ANDRADE JR., M. A. U.; ZANGHELINI, G. M.; SOARES, S. R. Using Life Cycle Assessment to Address Stakeholders' Potential for Improving Municipal Solid Waste Management. **Waste Management & Research**, [S.l.], v. 35, n. 5, 541-550, 2017. Acesso em: 02 out. 2020.

DE MARCO, I.; MIRANDA, S.; RIEMMA, S.; IANNONE, R. Life Cycle Assessment of Ale and Lager Beers Production. **Chemical Engineering Transactions**, [S.l.], v. 49, pp. 337-342, 2016. Acesso em: 30 set. 2020.

DINIZ, D.D.; CARVALHO, M.; ABRAHAO, R. Greenhouse gas accounting for the energy transition in a brewery. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, v. 40, ed. 2, p. 1944-7442, 2021. Acesso em: 09 abr. 2022.

EARTH OVERSHOOT DAY. **How the date of Earth Overshoot Day 2020 was calculated**. 2020. Disponível em: <https://www.overshootday.org/2020-calculation/> Acesso em: 17 ago. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **The Circular Economy in Details**. 2020b. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>. Acesso em: 27 ago. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial**. 2017. Disponível em: <[https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Uma-Economia-Circular-no-Brasil\\_Uma-Exploracao-Inicial.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf)>. Acesso em 21 out. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (EMF). **What is the Circular Economy?** 2020a. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>. Acesso em: 27 ago. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **An EU action plan for the circular economy**. COM 614, 21, 2015. Acesso em: 17 ago. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe**. COM 398, Final 1–14, 2014. Acesso em: 17 ago. 2020.

GALLAGHER, J.; BASU, B.; BROWNE, M.; KENNA, A.; MCCORMACK, S.; PILLA, F.; STYLES, D. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular

Economy through Eco-Design and Recycling. **Journal of Industrial Ecology**, [S.I.], v. 23, ed. 1, p. 133-140, 2017. Acesso em: 02 out. 2020.

GARCIA-GARCIA, G.; RAHIMIFARD, S. Life-cycle environmental impacts of barley straw valorisation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 1-11, 2019. Acesso em: 09 abr. 2022.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy: A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 143, p. 757-768, 2017. Acesso em 04 set. 2020.

GHASEMI, S.; SIBI, M.P.; ULVEN, C.A.; WEBSTER, D.C.; POURHASHEM, G. A preliminary environmental assessment of epoxidized sucrose soyate (ESS)-Based biocomposite. **Molecules**, v. 25, ed. 12, 2021. Acesso em: 19 mar. 2022.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **About Earth Overshoot Day**. 2020. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>. Acesso em: 17 ago. 2020.

HALLSTRÖM, E.; HÅKANSSON, N.; ÅKESSON, A.; WOLK, A.; SONESSON, U. Climate Impact of Alcohol Consumption in Sweden. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 201, p. 287-294, 2018. Acesso em: 29 set. 2020.

HANSEN, O.J.; RUKKE, E.O.; SAUGEN, B.; KOLSTAD, J.; HAFROM, P.; VON KROGH, L.; RAADAL, H.L.; RONNING, A.; WIGUM, K.S. The environmental effectiveness of the beverage sector in Norway in a factor 10 perspective. **International Journal Life Cycle Assessment**, [S.I.], v.12, ed. 257, 2007. Acesso em: 11 abr. 2022.

HAUPT, M.; ZSCHOKKE, M. How can LCA support the circular economy? – 63<sup>rd</sup> discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. **International Journal Life Cycle Assessment**, [S.I.], v. 22, p. 832–837, 2017. Acesso em: 12 ago. 2020.

HOBSON, K.; LYNCH, N. Diversifying and de-growing the circular economy: radical social transformation in a resource-scarce world. **Futures**, [S.I.], v. 82, p. 15–25, 2016. Acesso em: 17 ago. 2020.

HORODYTSKA, O.; KIRITSIS, D.; FULLANA, A. Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 268, p. 122-138, 2020. Acesso em: 7 set. 2020.

IACOVIDOU, E.; MILLWARD-HOPKINS, J.; BUSCH, J.; PURNELL, P.; VELIS, C. A.; HAHLADAKIS, J. N.; ZWIRNER, O.; BROWN, A. A Pathway to Circular Economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 168, p. 1279-1288, 2017. Acesso em: 02 out. 2020.

INGRAO, C.; SAJA, C.; PRIMERANO, P. Application of Life Cycle Assessment to chemical recycling of post-use glass containers on the laboratory scale towards circular economy implementation. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 307, 2021. Acesso em: 19 mar. 2022.

LANER, D.; RECHBERGER, H. Treatment of cooling appliances: interrelations between environmental protection, resource conservation, and recovery rates. **Resources Conservation and Recycling**, [S.l.], v. 52, n. 1, p. 136–155, 2007. Acesso em: 17 ago. 2020.

LASO, J.; MARGALLO, M.; CELAYA, J.; FULLANA, P.; BALA, A.; GAZULLA, C.; IRABIEN, Á.; ALDACO, R. Waste Management Under a Life Cycle Approach as a Tool for a Circular Economy in the Canned Anchovy Industry. **Waste Management & Research**, [S.l.], v. 37, n. 8, p. 724-733, 2016. Acesso em: 05 out. 2020.

LIEDER, M.; RASHID, A. Towards Circular Economy Implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 115, p. 36–51. 2016. Acesso em: 14 ago. 2020.

LONCA, G.; LESAGE, P.; MAJEAU-BETTEZ, G.; BERNARD, S.; MARGNI, M. Assessing Scaling Effects of Circular Economy Strategies: A Case Study on Plastic Bottle Closed-Loop Recycling in the USA PET Market. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.l.], v. 162, 2020. Acesso em: 10 set. 2020.

MATTILA, T.; HELIN, T.; ANTIKAINEN, R. Land Use Indicators in Life Cycle Assessment a Case Study on Beer Production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 277-286, 2012. Acesso em: 30 set. 2020.

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How Do Scholars Approach the Circular Economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 178, p. 703–722, 2018. Acesso em: 13 ago. 2020.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de Caso na Engenharia de Produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Prod.**, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007. Acesso em: 16 set. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Ecodesign**. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/7654-ecodesign.html>>. Acesso em: 22 out. 2020.

MORSY, K. M.; MOSTAFA, M. K.; ABDALLA, K. Z.; GALAL, M. M. Life Cycle Assessment of Upgrading Primary Wastewater Treatment Plants to Secondary Treatment Including a Circular Economy Approach. **Air, Soil and Water Research**, [S.l.], v. 13, p. 1-13, 2020. Acesso em: 02 out. 2020.

NAVARRO, D.; CANTERO, R.; VALLS, E.; PUIG, R. Circular Economy: The Case of a Shared Wastewater Treatment Plant and Its Adaptation to Changes of the Industrial Zone Over Time. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 261, 121-242, 2020. Acesso em: 01 out. 2020.

NIERO, M.; OLSEN, S. I. Circular Economy: to Be or Not to Be in a Closed Product Loop? A Life Cycle Assessment of Aluminium Cans with Inclusion of Alloying Elements. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.I.], v. 114, p. 18-31, 2016. Acesso em: 02 out. 2020.

PENA, C.; CIVIT, B.; GALLEGOS-SCHMID, A.; DRUCKMAN, A.; CALDEIRA-PIRES, A.; WEIDEMA, B.; MIERAS, E.; WANG, F.; FAVA, J.; CANALS, L.M.I.; CORDELLA, M.; ARBUCKLE, P.; VALDIVIA, S.; FALLAHA, S.; MOTTA, W. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.I.], v. 26, p. 215-220, 2021. Acesso em: 29 mar. 2022.

PETIT, G.; KORBEL, E.; JURY, V.; AIDER, M.; ROUSSELIERE, S.; AUDEBRAND, L.K.; TURGEON, S.L.; MIKHAYLIN, S. Environmental Evaluation of New Brewer's Spent Grain Preservation Pathways for Further Valorization in Human Nutrition. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, ed. 47, p. 17335-17344, 2020. Acesso em: 20 mar. 2022.

SALAZAR, T.M.B.; SAN MARTIN-GONZALEZ, M.F.; CAI, H.; HUANG, J.Y. Economic and environmental performance of instantaneous water heating system for craft beer production. **Food and Bioproducts Processing**, v. 127, p. 472-481, 2021. Acesso em: 09 abr. 2022.

SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à Economia Circular: Sinergia Existente entre as Definições Conceituais Correlatas e Apropriação para a Literatura Brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, [S.I.], v. 18, n. 1, p. 35-62, 2019. Acesso em: 17 ago. 2020.

SOLIS, C.M.A.; SAN JUAN, J.L.G.; MAYOL, A.P.; SY, C.L.; UBANDO, A.T.; CULABA, A.B. A Multi-Objective Life Cycle Optimization Model of an Integrated Algal Biorefinery toward a Sustainable Circular Bioeconomy Considering Resource Recirculation. **Energies**, v. 14, n. 5, 2021. Acesso em: 01 mai. 2022

SPREAFICO, C. An analysis of design strategies for circular economy through life cycle assessment. **Environmental Monitoring And Assessment**, ed. 194, n. 180, 2022. Acesso em: 19 mar. 2022.

STANCHEV, P.; VASILAKI, V.; EGAS, D.; COLON, J.; PONSÁ, S.; KATSOU, E. Multilevel Environmental Assessment of The Anaerobic Treatment of Dairy Processing Effluents in The Context of Circular Economy. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 261, p. 121-139, 2020. Acesso em: 01 out. 2020.

SU, B.; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. A Review of the Circular Economy in China: Moving from Rhetoric to Implementation. **Journal of Cleaner Production**, [S.I.], v. 42, p. 215-227, 2013. Acesso em: 17 ago. 2020.

TALVE, S. Life Cycle Assessment of a Basic Lager Beer. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, ed. 5, p. 293-298, 2001. Acesso em: 30 abr. 2022.

THE GLOBAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTER (GDRC). **Defining Life Cycle Assessment**. 2017. Disponível em: <http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>. Acesso em 04 set. 2020.

VALENTI, F.; LIAO, W.; PORTO, SMC. Life cycle assessment of agro-industrial by-product reuse: a comparison between anaerobic digestion and conventional disposal treatments. **Green Chemistry**, ed. 22, p. 7119-7139, 2020. Acesso em: 26 mar. 2022.

VENTURA, M. M. O Estudo de Caso como Modalidade de Pesquisa. **Rev SOCERJ**, [S.l.], v. 5, n. 20, p. 383-386, 2007. Acesso em: 16 set. 2020.

WEBSTER, K. **The Circular Economy – A Wealth of Flows**. 2 ed, 200 p., 2016.

WEBSTER, K. What Might We Say about Circular Economy? Some Temptations to Avoid if Possible. **World Futures**, [S.l.], v. 69, p. 542-554, 2013. Acesso em 03 set. 2020.

ZHENG, H.; XING, M.; CAO, T.; ZHANG, J. Uncertainty Study and Parameter Optimization of Carbon Footprint Analysis for Fermentation Cylinder. **Sustainability (Switzerland)**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 661, 2019. Acesso em: 28 set. 2020.

ZINK, T.; GEYER, R. Circular Economy Rebound. **Journal of Industrial Ecology**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 593–602, 2017. Acesso em 17 ago. 2020.