



UTILIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NO CONTEXTO DA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Andre Teixeira Pontes

atpontes@id.uff.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

Ana Carolina Maia Angelo

angeloana@id.uff.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO

A Economia Circular (EC) é atualmente um conceito popular promovido por empresas, países e pela União Europeia, e representa uma racionalidade de maior eficiência no uso dos recursos, oposta à racionalidade linear de extrair-produzir-consumir-descartar. A literatura relata diversas iniciativas relacionadas à EC e à necessidade de quantificar o real benefício destas iniciativas. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite quantificar o impacto ambiental de produtos e serviços, podendo contribuir para a comprovação dos benefícios da EC. O objetivo deste artigo é analisar a utilização da ACV no contexto da EC. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura nas bases de dados SCOPUS e *Web of Science*, utilizando o termo “*life cycle*” AND “*circular economy*”. Foram considerados todos os artigos publicados até 2017. Observou-se uma prevalência de estudos realizados no continente europeu, especialmente na Espanha, e de estudos relacionados ao gerenciamento de resíduos. A pesquisa exploratória ressaltou a importância da ACV para a promoção da EC, uma vez que permite quantificar os benefícios ambientais de suas estratégias – no âmbito do suprimento e produção, consumo sustentável e gestão de resíduos -, fortalecendo as proposições da EC. Além disso, observou-se a EC utilizada como base na definição de cenários alternativos que foram analisados com a ACV.

Palavras-chave: Economia circular, avaliação do ciclo de vida, revisão de literatura.



1. INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) apresenta-se como uma alternativa ao modelo econômico atual, o qual baseia-se em um sistema linear de produção-consumo-descarte de bens e serviços, onde cada vez mais recursos naturais são extraídos para produção de novas matérias primas utilizadas na produção de novos produtos que, ao final de sua vida útil, são descartados. Embora existam estudos dedicados ao entendimento deste modelo (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017; Prieto-Sandoval et al., 2018), o consenso existe quando se trata da mudança de paradigma que está atrelada à EC, pois requer novas formas de produzir e consumir os produtos. Isso implica em uma mudança de racionalidade que permeia todas as etapas do ciclo de vida, desde o design dos produtos e obtenção das matérias primas até o tratamento e disposição final dos resíduos. Além disso, há a necessidade de uma abordagem multidirecionada com vistas ao Desenvolvimento Sustentável, a recirculação de recursos e energia, a minimização da demanda pelos recursos e a valorização dos resíduos (Prieto-Sandoval et al., 2018). A economia circular limita o fluxo de produção a um nível que a natureza tolera e utiliza os ciclos do ecossistema nos ciclos econômicos, respeitando suas taxas de reprodução natural (Korhonen et al., 2018).

O conceito de EC origina-se de diversas escolas e linhas de pensamento consideradas base da discussão do Desenvolvimento Sustentável, como a Ecologia Industrial, Gestão do Ciclo de Vida, dentre outros. Por esta razão, são encontrados inúmeros conceitos de EC na literatura recente. Kirchherr et al. (2017), por exemplo, conceituam EC como um sistema econômico baseado em modelos de negócio que substituem o conceito de “fim de vida” por reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar materiais nos processos de produção, distribuição e consumo, operando no nível micro (produtos, empresas e consumidores), nível meso (parques eco-industriais) e nível macro (cidades, regiões e países), com o objetivo de alcançar o Desenvolvimento Sustentável. Geissdoerfer et al. (2017) consideram EC como um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e a saída de resíduos, emissões e energia, são minimizados pelo estreitamento dos fluxos materiais e energéticos, através do design duradouro de produtos, manutenção, reparação, reutilização, remanufatura e reciclagem. Stahel (2016) diz que a EC transforma bens que estão no fim de sua vida útil em recursos para outros, fechando *loops* e minimizando desperdícios. Isso significa uma mudança na lógica econômica, porque substitui a produção pela suficiência: “reutilize o que você puder, recicle o que não pode ser reutilizado, repare o que está quebrado e reconstrua o que não pode ser consertado”. Tal diversidade de conceitos, no entanto, não prejudica o entendimento de que a EC está diretamente associada à integração equilibrada entre desempenho econômico, inclusão social e resiliência ambiental, ou seja, à sustentabilidade.

Segundo Ellen Macarthur Foundation (2015), a EC baseia-se em três princípios: (i) preservar e aprimorar o capital natural, através do controle do estoque dos recursos naturais finitos e equilíbrio do fluxo de utilização dos recursos renováveis; (ii) otimizar o rendimento dos recursos, de maneira a maximizar o valor e utilidade de produtos, componentes e materiais; e (iii) estimular a efetividade do sistema, através da identificação e remoção de externalidades negativas da economia.

Na ausência de um indicador único para medir a circularidade da economia, a Agência Francesa de Energia e Ambiente (ADEME), estabeleceu dez indicadores chave a fim de medir o progresso realizado no sentido de uma economia circular. Buscou-se abranger as múltiplas dimensões em todas as etapas do ciclo de vida dos recursos, produtos e serviços. Os indicadores definidos foram: (i) consumo de material per capita, (ii) produtividade de recursos, (iii) selos ambientais, (iv) número de projetos ecológicos industriais e territoriais, (v) taxa de compartilhamento de veículos, (vi) geração de resíduos, (vii) gastos domésticos com manutenção e reparação de produtos, (viii) quantidade de resíduos encaminhados para aterro sanitário, (ix) uso de materiais secundários e (x) empregos na EC (reparação, reutilização, reciclagem de resíduos, serviços de aluguel de bens, etc.). Tais indicadores são agrupados em três áreas de ação e sete pilares estabelecidos pela ADEME (SOeS, 2017) (Figura 1).



Figura 1. Áreas e pilares da Economia Circular

Fonte: Adaptado de SOeS (2017).

Instruções que auxiliam no monitoramento mais detalhado da EC pode ser encontrada nos requisitos da norma britânica BS 8001:2017. Esta norma se configura como o primeiro guia padronizado do mundo a fim de implementar os princí-



pios da economia circular nas organizações, baseando-se no pensamento sistêmico, inovação, administração, colaboração, otimização do valor e transparência (BSI Group, 2017).

A importância da EC tem aumentado substancialmente nos últimos anos, tanto pelo reconhecimento dos países quanto a sua relevância (Korhonen, Honkasalo e Seppälä, 2018), como pelo aumento da utilização desse termo em trabalhos acadêmicos (Homrich *et al.*, 2018). A despeito dessas iniciativas, revisões recentes sobre a EC mostram que, apesar do crescente interesse de pesquisadores e profissionais em relação à esse tema, a pesquisa sobre indicadores e metodologias para medir a aplicação das estratégias de EC ainda está em sua fase inicial (Elia *et al.*, 2017) the circular economy (CE).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta valiosa para quantificar e reportar os benefícios da EC (Strothman; Sonnemann, 2017). Nesse contexto, este trabalho analisou artigos publicados até o ano 2017 que abordaram a Economia Circular e utilizaram a ACV, para apresentar um perfil dessas publicações e analisar de que maneira a ACV está sendo utilizada em estudos de EC, tendo como referência os pilares da EC definidos pela Agência Francesa de Energia e Ambiente (ADEME) (SOeS, 2017).

2. METODOLOGIA

A questão de pesquisa desse trabalho é: como a Avaliação de Ciclo de Vida tem sido utilizada nos artigos relacionados à Economia Circular? Para responder a essa questão, foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados SCOPUS e *Web of Science*, utilizando os termos “*Life Cycle*” AND “*Circular Economy*”. A pesquisa identificou os artigos que continham esses termos nos campos do título, resumo ou palavras chave

Foram utilizados os seguintes critérios de inclusão: (i) artigos publicados até o final de 2017; (ii) artigos que apresentem uma aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida e utilizem o termo Economia Circular em destaque. O destaque do termo “Economia Circular” foi observado inicialmente pela presença do termo no título, resumo ou palavra-chave e, posteriormente, durante a leitura completa dos artigos, pela utilização do termo no texto, especialmente na discussão e conclusão. Foram excluídos os artigos de revisão, estudos não indexados, artigos de conferência, capítulos de livros, relatório etc. Além disso, há estudos sem texto completo disponível e artigos duplicados.

Os estudos selecionados foram analisados e classificados de acordo com as áreas de ação e os pilares da EC definidos pela Agência Francesa de Energia e Ambiente (ADEME), a qual considera a EC como um sistema econômico de troca

e produção em todas as fases do ciclo de vida (SOeS 2017). A ADEME definiu sete pilares, agrupados em três áreas de ação (SOeS 2017), os quais auxiliam no monitoramento da circularidade da economia (LCiP 2016): (i) fornecimento sustentável, (ii) ecodesign, (iii) promoção da eficiência energética e de recursos e (iv) simbiose industrial no âmbito na área “suprimento e produção”; (v) consumo e utilização sustentável dos produtos; (vi) aumento da durabilidade (considerando a reutilização, reparo ou conserto dos produtos), na área “demanda e comportamento de consumidor”; e (vii) reciclagem, recuperação orgânica ou recuperação energética, na área eixo “gerenciamento de resíduos”. Isto posto, a revisão dos estudos foi pautada na identificação da estratégia de EC abordada, com base na classificação da ADEME, e na análise da contribuição da ACV para promoção da EC.

Os artigos selecionados foram compilados em planilha eletrônica e as seguintes informações foram extraídas: o setor de aplicação; as áreas de atuação e os pilares definidos pela ADEME; país onde o estudo foi realizado; periódico que publicou o estudo; software utilizado e as fronteiras definidas nos estudos.

3. RESULTADOS DA PESQUISA

Seleção dos artigos

A execução da pesquisa bibliográfica permitiu identificar 437 artigos nas duas bases pesquisadas, dos quais 124 estavam presentes em ambas as bases (Figura 2). Foram selecionados 31 artigos, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Alguns artigos excluídos aplicavam outras ferramentas como Material Flow Analysis (Diener; Tillman, 2016; Sadhukhan; Martinez-Hernandez 2017; Sun *et al.* 2017), Global Resource Indicator (Adibi *et al.* 2017) e Gaia Refiner Indicator Framework (Rönnlund *et al.* 2016).

O quadro 1 apresenta uma breve descrição dos artigos analisados e a respectiva classificação segundo o setor de aplicação.

Em relação ao local onde foram realizados os estudos publicados nos artigos selecionados, observou-se uma considerável prevalência de países europeus, com destaque para a Espanha, com 7 artigos. Pode-se observar também, na Figura 3, a presença de 4 artigos na classe “Europa”, que se refere a estudos desenvolvidos em mais de um país do continente europeu. Destacam-se, também, a Itália e a China com 3 artigos cada.

Os estudos selecionados foram provenientes de 19 periódicos diferentes, com destaque para o *Journal of Cleaner Production*, com aproximadamente 23% dos artigos, *seguir*

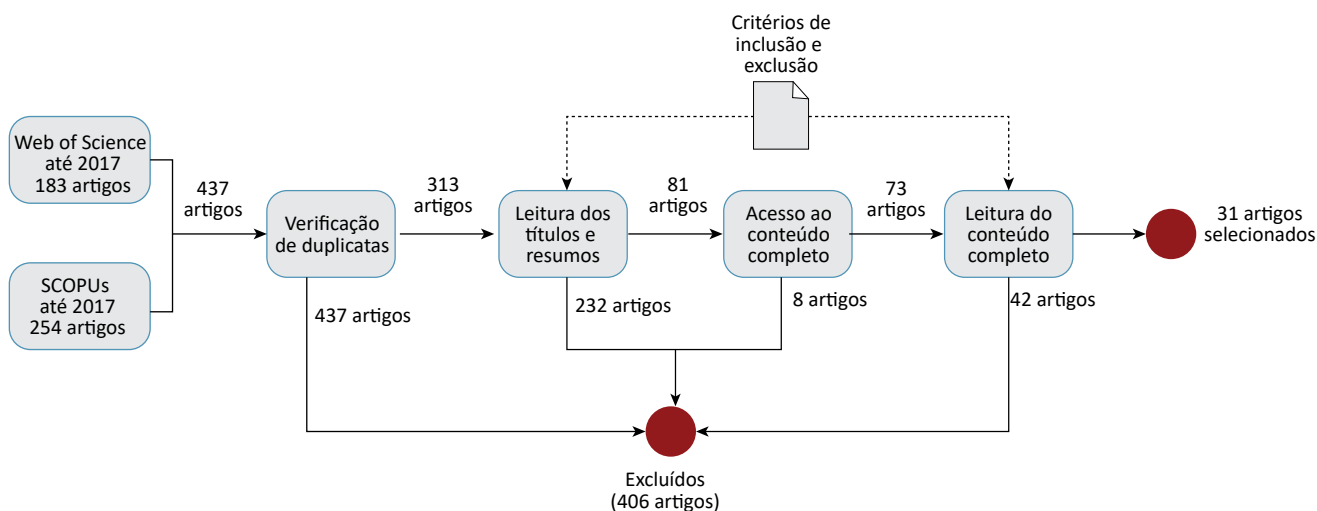


Figura 2. Seleção dos artigos

Fonte: os autores.

Quadro 1. Lista dos artigos selecionados com respectivos setores de aplicação

x	Referência	Setor de aplicação	Nº	Referência	Setor de aplicação
1	Angelis-Dimakis et al., 2016	Sistema de uso de água	17	Lausset et al., 2017	Resíduos Sólidos Urbanos
2	Broadbent, 2016	Reciclagem de aço	18	Niero et al., 2017	Indústria manufatureira (embalagens)
3	Castellani et al., 2015	Reuso de bens de consumo	19	Niero; Olsen, 2016	Indústria manufatureira (embalagens)
4	Catalán et al., 2017	Indústria de couro	20	Noya et al., 2017	Agropecuária
5	Daddi et al., 2017	Cluster de Curtumes	21	Oldfield et al., 2016	Gerenciamento de resíduos alimentares
6	Delgado-Aguilar et al., 2015	Indústria de papel e celulose	22	Pan et al., 2017	Resíduos Sólidos Alcalinos
7	Dominguez et al., 2017	Reuso de águas cinzas	23	Ren, et al., 2017	Indústria manufatureira (cimento)
8	Edwards et al., 2017	Resíduos Sólidos Urbanos	24	Rigamonti et al., 2017	Resíduos Eletroeletrônicos
9	Garcia-Herrero et al., 2017	Indústria manufatureira (Cloro-Álcalis)	25	Roest et al., 2016	Sistema de uso de água
10	Ghisellini et al., 2014	Agropecuária	26	Seghetta, et al., 2016	Biorrefinaria de macroalga
11	Hadzic et al., 2017	Resíduos Sólidos Urbanos	27	Strazza et al., 2015	Resíduos alimentares
12	Husgafvel, et al., 2016	Resíduos Florestais	28	Tran et al., 2017	Reciclagem de baterias
13	Iraldo et al., 2017	Equipamentos eletrodomésticos	29	Unger et al., 2017	Resíduos Eletro Eletrônico
14	Krystofik et al., 2017	Indústria manufatureira (móveis de escritório)	30	Yu et al., 2015	Produção de alumínio
15	Laso et al., 2016a	Indústria de pescado	31	Zhang et al., 2017	Biocombustível
16	Laso et al., 2016b	Indústria de pescado	-	-	-

Fonte: os autores.

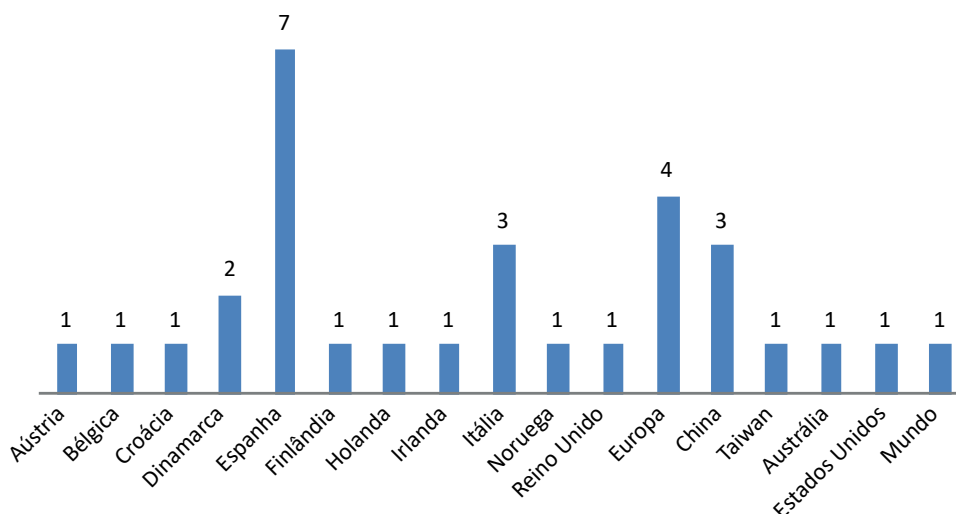


Figura 3. Países onde foram realizados os estudos dos artigos selecionados

Fonte: os autores.

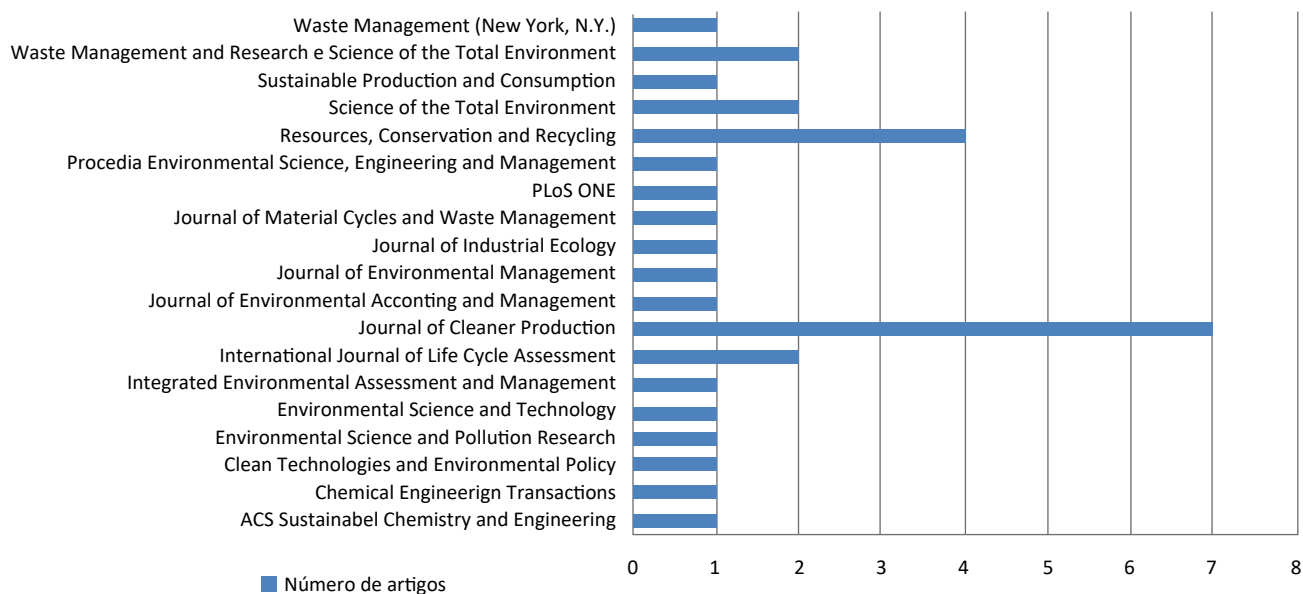


Figura 4. Periódicos científicos nos quais foram publicados os artigos selecionados

Fonte: os autores.

do do *Resources, Conservation and Recycling* com 12,9%. Os periódicos *Waste Management and Research, Science of the Total Environment* e *The International Journal of Life Cycle Assessment* publicaram dois artigos cada, dentre os 31 selecionados. Os demais periódicos publicaram apenas 1 artigo (Figura 4).

Normalmente os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida são desenvolvidos com o auxílio de algum software, embora 11 artigos não tenham explicitado o software utilizado. A Figura 5 apresenta os softwares identificados em 20 artigos dos estudos selecionados. Os softwares SimaPro (50%) e GaBi (40%) destacam-se.

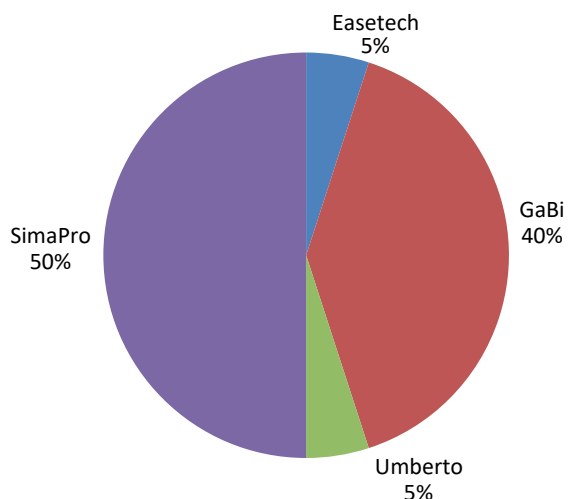


Figura 5. Softwares utilizados na aplicação da ACV nos artigos selecionados
 Fonte: os autores.

Os estudos foram classificados segundo o escopo adotado, conforme apresentado na Figura 6.

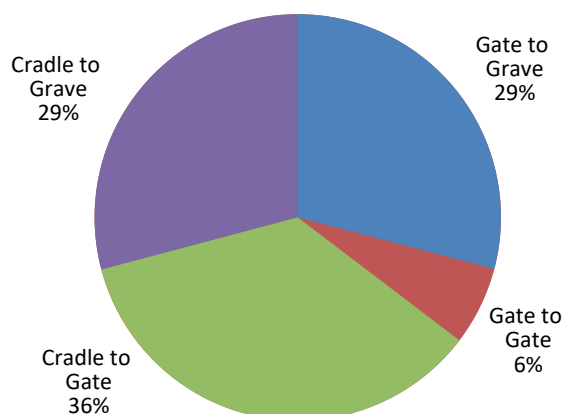


Figura 6. Fronteiras do sistema utilizadas na aplicação da ACV nos artigos selecionados
 Fonte: os autores.

A classificação dos estudos segundo as áreas de ação e os pilares de EC definidos pela ADEME está presente no Quadro 2.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação ao perfil dos artigos selecionados, observou-se uma prevalência de estudos com foco no gerenciamento de resíduos. Estes estudos abrangeram diferentes resíduos como resíduos sólidos urbanos coletados por um sistema municipal de gerenciamento (Hadzic et al., 2017; Lausset et al., 2017), resíduos eletrônicos (Rigamonti et al., 2017;

Unger et al., 2017) recovery of secondary resources (materials and energy, resíduos orgânicos (Edwards et al. 2017; Oldfield et al., 2016; Strazza et al., 2015)(a, resíduos da produção de couro (Catalán et al., 2017) e ainda um estudo tratando de revenda de produtos usados (Castellani et al, 2015). Estudos nessa temática destacam-se pela relevância no contexto da EC que procura “fechar ciclos” (SOeS 2017) e pelos riscos associados (Moura et al., 2015).

Observaram-se estudos com foco na produção industrial de Alumínio (Niero; Hauschild, 2017; Niero; Olsen, 2016) representing the second largest source of aluminium scrap at global level, deserves a key role in the transition towards the circular economy. Life Cycle Assessment (LCA, de cloreto de potássio (Garcia-Herrero et al., 2017) as valuable materials are lost as waste. Moving towards a circular economy and supporting efficient resource utilisation is essential for protecting the environment. The chlor-alkali industry is one of the largest consumers of salt, and efforts have been made to reduce its electricity use. Furthermore, KCl mining wastes have received increasing attention because they can be transformed into value-added resources. This work studies the influence of using different salt sources on the environmental sustainability of the chlor-alkali industry to identify further improvement opportunities. Rock salt, solar salt, KCl waste salt, vacuum salt and solution-mined salt were studied. Membrane cells in both bipolar and monopolar configurations were studied and compared to the emergent oxygen-depolarised cathode (ODC, na produção de clínquer para a indústria de cimento (Ren et al., 2017) e na remanufatura de mobília de escritório (Krystofik et al., 2017). Além de dois artigos que abordam a produção industrial no contexto de um Arranjo Produtivo Local (APL), trabalhando também o conceito de simbiose industrial (Daddi et al., 2017; Yu et al., 2015).

Estudos relacionados à gestão hídrica também estavam presentes em três artigos, dos quais, dois tratavam da análise de diferentes sistemas para água de abastecimento (Angelis-Dimakis et al., 2016; Roest et al., 2016), e um abordava a análise de cenários para tratamento e reuso de águas cinzas (Dominguez et al., 2017).

Não estavam presentes na seleção os estudos desenvolvidos em países sul-americanos. Observou-se uma prevalência de estudos desenvolvidos na Europa, com destaque para a Espanha, com 7 artigos, e para estudos desenvolvidos em mais de um país da União Europeia, classificado como “Europa”. Destacam-se, também, a Itália e a China com 3 artigos cada. Acredita-se que a presença de documentos que fomentam a economia circular tenha contribuído para esse quadro. Recentemente, a Comissão Europeia finalizou um plano de ação abrangente para a transição para uma Economia Circular na Europa, descrevendo uma série de intervenções políticas necessárias ao longo do ciclo de vida de produtos que deveriam ser consideradas no curto/médio prazo



Quadro 2. Classificação dos estudos segundo as Áreas de Ação e os Pilares de EC da ADEME (SOEs 2017)

Áreas de Ação	Pilares	Referências
Suprimento e produção	Fornecimento sustentável	Garcia-Herrero et al., 2017
		Ghisellini et al., 2014
		Seghetta et al., 2016
	Ecodesign	Delgado-Aguilar et al., 2015
		Niero et al., 2017
		Niero; Olsen, 2016
	Eficiência energética e de recursos	Angelis-Dimakis et al., 2016
		Pan et al., 2017
		Zhang et al., 2017
	Simbiose industrial	Daddi et al., 2017
		Yu et al., 2015
	Demanda e comportamento do consumidor	Consumo sustentável
Aumento da durabilidade (reuso, reparo/ conserto)		Castellani et al., 2015
		Krystofik et al., 2017
Gerenciamento de resíduos	Reciclagem, recuperação orgânica ou recuperação energética	Broa dbent, 2016;
		Catalán et al., 2017
		Dominguez et al., 2017
		Edwards et al., 2017
		Hadzic et al., 2017
		Husgafvel, et al., 2016
		Laso et al., 2016a
		Laso et al., 2016b
		Lausselet et al., 2017
		Noya et al., 2017
		Oldfield et al., 2016
		Ren, et al., 2017
		Rigamonti et al., 2017
		Roest et al., 2016
		Strazza et al., 2015
Tran et al., 2017		
Unger et al., 2017		

Fonte: Os autores.

do desenvolvimento de políticas (Milius, 2017). A China, por sua vez, foi o primeiro país a adotar uma legislação sobre economia circular, em 2008 (Korhonen et al., 2018).

Ainda em relação ao país de origem dos artigos, destaca-se o estudo de Broadbent (2016) *carefully managing our finite natural resources is becoming critical. We must abandon the outdated “take, make, consume and dispose” mentality and move toward a circular economy model for optimal resource efficiency. Products must be designed for reuse and remanufacturing, which would reduce significant costs in terms of energy and natural resources. Methods: To measure progress in achieving a circular economy, we need a life cycle approach that measures the social, economic and environmental impact of a product throughout its full life cycle from raw material extraction to end-of-life (EoL, que foi enquadrado na categoria “Mundo”, por se tratar de um estudo que analisou os benefícios da reciclagem de aço*

no contexto de uma EC, utilizando dados da produção global de aço.

Em relação aos periódicos que publicaram os estudos, é interessante observar o desempenho do *The International Journal of Life Cycle Assessment*, um periódico com foco em estudos de ACV. É possível que a especificidade do periódico na ferramenta de ACV tenha contribuído para o menor destaque para o conceito de Economia Circular, embora a comunidade científica de ACV esteja cada vez mais interessada em discutir as potencialidades do uso da ACV na Economia Circular (Haupt; Zschokke, 2017).

Deve-se destacar que a utilização de apenas duas bases (*Scopus* e *Web of Science*), durante a realização da pesquisa bibliográfica, influencia diretamente nesse perfil dos periódicos e dos artigos encontrados, pois limita-se apenas àquelas indexados nessas bases.



Uma das etapas da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida é a definição do escopo do estudo. Dentre as especificações do escopo, há a definição das fronteiras do sistema, que consiste em deixar claro quais processos fazem parte do estudo. Essa definição de fronteiras é classificada considerando as fases do ciclo de vida. Uma perspectiva mais ampla considera todas as fases do ciclo de vida, desde a extração das matérias primas (*cradle*) até a destinação final ou reciclagem dos resíduos (*grave*). Pode-se optar por uma fronteira mais restrita, que considere apenas parte das etapas do ciclo de vida do produto ou serviço estudado, podendo ser: *cradle to gate*, considerando os processos da extração das matérias primas até uma determinada etapa do ciclo de vida, como, por exemplo, a finalização do processo de produção do produto; *gate to gate*, abrangendo apenas os processos de uma ou mais fase intermediária do ciclo de vida, como, por exemplo, os processos dentro da indústria; ou *gate to grave*, que, por sua vez, contém os processos de uma determinada fase intermediária do ciclo de vida até a disposição final.

A definição da fronteira depende dos objetivos do estudo. Estudos que envolvem o gerenciamento de resíduos, por exemplo, normalmente não consideram todas as etapas do ciclo de vida (*cradle to grave*). Por outro lado, estudos com foco industrial que abordem a análise de diferentes processos ou matérias primas, podem, nesse contexto, justificar um escopo também mais reduzido. Desta forma, essa análise não procurou entrar no mérito da definição do escopo definido nos estudos analisados, mas apenas apresentar o perfil, como forma de orientar estudos futuros.

De uma forma geral, pode-se esperar que estudos de ACV no contexto da EC apresentem escopos mais amplos, analisando todas as etapas necessárias para comprovar os benefícios em um contexto circular. Porém, como relatado, essa definição depende do objetivo do estudo, sendo perfeitamente aceitável um escopo mais restritivo. A despeito disso, chama a atenção para o fato de apenas 6% dos estudos apresentarem o escopo mais limitado (*gate to gate*) (Figura 6).

A classificação dos artigos de acordo com os pilares da EC está presente no Quadro 2. Observou-se que a maior parte dos artigos (55%) apresentam estudos relacionados ao gerenciamento de resíduos. De uma maneira geral, esses artigos utilizam a EC como um referencial estratégico na discussão de gerenciamento de resíduos, auxiliando na definição de cenários alternativos de tratamento com vistas a tornar o sistema mais próximo ao princípio do berço ao berço. Da mesma forma, observou-se que a ACV foi utilizada para quantificar os benefícios ambientais desses cenários e auxiliar na escolha da melhor estratégia, corroborando assim as observações de Contreras (2017), onde a ACV é considerada uma ferramenta complementar à EC. Tais estudos abrangem diferentes tipos de resíduos. Lausset et al. (2017) e

Hadzic et al. (2017) focaram no RSU. Hadzic e colaboradores aplicaram ACV para comparar cenários de gerenciamento de RSU, a fim de evidenciar as melhorias ambientais resultantes da mudança do sistema de gerenciamento de resíduos linear para a EC. Os resultados da ACV confirmaram os benefícios ambientais da digestão anaeróbica da fração orgânica, reciclagem de materiais e tratamento térmico da fração residual em comparação com a disposição em aterro sanitário. Unger et al. (2017) e Rigamonti et al. (2017) focaram na recuperação de materiais de REE, que é considerada uma importante contribuição para a EC, e a ACV permitiu quantificar os benefícios ambientais associados à reciclagem desses resíduos, corroborando a necessidade do aumento da taxa de reciclagem e da reintrodução de materiais secundários na economia como forma de aumentar a segurança no suprimento de matérias primas, podendo também auxiliar nas definições da política de EC da União Européia. Os resíduos orgânicos foram os mais abordados nos estudos (Edwards et al. 2017; Oldfield et al., 2016; Strazza et al., 2015). Strazza e colaboradores avaliaram a reciclagem dos resíduos alimentares para uso na aquicultura e a ACV foi aplicada para quantificar os potenciais benefícios da substituição de insumos tradicionais da ração para salmão pelos resíduos alimentares gerados e processados por navios de cruzeiros a partir de uma tecnologia de turbo-secagem. Tran et al. (2017) avaliaram os potenciais impactos ambientais da reciclagem de baterias portáteis e a ACV possibilitou identificar que o sistema de coleta e reciclagem de baterias estudado não apresentam benefícios em termo de energia, mas apresentam considerável benefício em termos de recuperação de metais e minerais, além de possibilitar identificar maneiras de melhorar ainda mais os processos. No âmbito dos resíduos sólidos industriais, Laso et al. (2016a; 2016b) aplicaram ACV para avaliar o desempenho ambiental de duas alternativas gerenciamento de resíduos: valorização da carne de sardinha para produzir patê e valorização da cabeça e coluna para produzir farinha de peixe e óleo de peixe. Catalán et al. (2017) focaram nos resíduos da produção de couro e os resultados da ACV indicaram o cenário de tratamento de resíduos mais adequado do ponto de vista da EC.

Destaca-se também, na relação entre ACV e EC apresentada nos artigos, o foco em pesquisas alinhadas com o eixo “Suprimentos e Produção” (11 artigos, que representam 35,5%). No âmbito do Fornecimento Sustentável, por exemplo, Garcia-Herrero et al. (2017) compararam diferentes fontes para a obtenção de Cloreto de Potássio (KCl) para a indústria de Cloro-Álcalis, demonstrando a importância de analisar cada etapa do ciclo de vida do processo químico. Os resultados da ACV comprovaram os benefícios da EC no que diz respeito ao aproveitamento dos resíduos nessa indústria, que é intensiva no uso de energia. Embora o foco tenha sido a reciclagem de papel, o estudo de Delgado-Aguilar et al. (2015) pode ser classificado no pilar do ecodesign pois aplicaram a ACV a fim de analisar a viabilidade de incorporar na-



nofibras lignocelulósicas no papel, a fim de aumentar o número de ciclos em que o papel pode ser reciclado mantendo as propriedades físicas relevantes. No âmbito da eficiência energética e de recursos, Angelis-Dimakis et al. (2016) avaliaram a eco-eficiência de oito sistemas de consumo de água e os resultados da ACV proporcionaram identificar os pontos críticos de cada sistema e, conseqüentemente, as oportunidades de melhoria para o uso mais eficiente do recurso. A eficiência de recursos foi comprovada por Pan et al. (2017), os quais avaliaram os benefícios ambientais e econômicos através da aplicação da ACV e do CCV (Custeio do Ciclo de Vida), do aproveitamento do CO₂ emitido pela indústria manufatureira de aço para tratamento dos resíduos alcalinos provenientes da indústria de aço para utilização no processo de produção de cimento. Daddi et al. (2017) avaliaram o impacto positivo das ações de simbiose industrial em um cluster de curtumes na Itália, onde a aplicação da ACV quantificou os benefícios ambientais da produção de 1 m² de couro e reutilização de água do sistema clusterizado, colocando-a como ferramenta fundamental de apoio à decisão em iniciativas ligadas ao Desenvolvimento Sustentável.

Talvez em função da dificuldade em parametrizar um consumo sustentável, apenas três artigos estão ligados ao eixo “demanda e comportamento do consumidor”. Iraldo et al. (2017) aplicaram ACV e CCV para investigar se e em quais condições a durabilidade prolongada de produtos intensivos em energia é desejável a partir de uma perspectiva ambiental e econômica. Para isso, compararam uma opção durável e outra definida como “padrão” para dois produtos diferentes – geladeira/freezer e forno elétrico domésticos. De acordo com os resultados deste estudo, se do ponto de vista econômico para o consumidor produtos mais duráveis são praticamente sempre a escolha preferida, nem sempre é o caso do ponto de vista ambiental, pois somente quando os estágios de ciclo de vida de produção e fim de vida têm impactos muito altos em comparação com a fase de uso, a opção mais durável é preferida tanto do ponto de vista econômico como ambiental. Castellani et al. (2015) aplicaram ACV para quantificar emissões evitadas da reutilização de produtos de uma loja de segunda mão, como vestuário e móveis. Já Krystofik et al. (2017), avaliaram os benefícios ambientais da remanufatura de móveis de escritório a fim maximizar o valor e utilidade dos mesmos. Esses resultados da ACV indicaram que a remanufatura é uma estratégia de negócios ambientalmente preferível, além de ser economicamente viável. Especificamente, a capacidade de atualizar, reconfigurar e personalizar produtos anteriormente obsoletos para atender às demandas atuais do mercado, permite a extensão do ciclo de vida além do que é viável com a manufatura tradicional. Nesse sentido, o estudo provou que tais técnicas de remanufatura não só expandem os potenciais benefícios ambientais, mas também aumentam a viabilidade econômica a longo prazo em mercados de produtos duráveis.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão da literatura desenvolvida permitiu identificar estudos relacionados à aplicação da ACV no contexto da EC que se enquadram em todos os pilares estratégicos da EC definidos pela ADEME, demonstrando a relevância dessa utilização conjunta.

A análise dos estudos selecionados permitiu identificar uma predominância de estudos realizados no continente europeu, o que demonstra uma maior maturidade dos países europeus no assunto.

Foram identificadas diversas áreas de aplicação dos estudos, com destaque para o gerenciamento de resíduos. Além disso, as publicações foram provenientes de 19 periódicos diferentes. Isso demonstra a diversidade de aplicações conjuntas entre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Economia Circular (EC).

Apesar da EC estar se posicionando como uma visão capaz de mobilizar estratégias de negócios e planos de governo, possibilitando evidenciar conexões, fluxos e *feedbacks* entre os sistemas, ainda permanece o desafio em se estabelecer métricas capazes de monitorar a circularidade da economia, ou seja, se as estratégias da EC estão sendo alcançadas. Nesse sentido, a revisão permitiu observar que a ACV foi utilizada como uma ferramenta para quantificar os impactos ambientais relacionados às estratégias de EC. A EC, por sua vez, apareceu como um direcionador estratégico para a definição de cenários que foram quantificados com o auxílio da ACV. Desta forma, as ferramentas mostram-se complementares e podem, conjuntamente, contribuir para uma melhoria contínua em direção à uma maior circularidade na economia, com benefícios ambientais. Destaca-se a importância da ACV na avaliação de opções de tratamento de resíduos, os quais, no contexto da economia circular, devem ser tratados como recursos com vistas a uma economia restaurativa e regenerativa.

A complementaridade da ACV à EC é potencializada quando são aplicadas, em conjunto, as outras metodologias. Por esta razão, recomenda-se estender a revisão a fim de analisar a aplicação de outros métodos no contexto da EC, não só no âmbito da esfera ambiental como nas demais dimensões da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- Adibi, N. et al. (2017), “Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, pp. 1517–1528.
- Angelis-Dimakis, A.; Arampatzis, G.; Assimacopoulos, D. (2016), “Systemic eco-efficiency assessment of meso-level water use systems”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 138, pp. 195–207.



- Broadbent, C. (2016), "Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy", *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 21, No. 11, pp. 1658–1665.
- BSI Group (2017), *Executive Briefing: BS 8001 – a Guide*, BSI Group, London.
- Castellani, V.; Sala, S.; Mirabella, N. (2015), "Beyond the throw-away society: A life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse", *Integrated Environmental Assessment and Management*, Vol. 11, No. 3, pp. 373–382.
- Catalán, E.; Komilis, D.; Sánchez, A. (2017), "Solid-state fermentation and composting as alternatives to treat hair waste: A life-cycle assessment comparative approach", *Waste Management and Research*, Vol. 35, No. 7, pp. 786–790.
- Contreras, S. (2017), *Complementing The Circular Economy With LCA*, Sustainability News. Disponível em <<https://www.pre-sustainability.com/news/complementing-the-circular-economy-with-lca>>. Acesso em 03 de julho de 2018.
- Daddi, T.; Nucci, B.; Iraldo, F. (2017), "Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs. *Journal of Cleaner Production*", Vol. 147, pp. 157–164.
- Delgado-Aguilar, M. *et al.* (2015), "Are Cellulose Nanofibers a Solution for a More Circular Economy of Paper Products?", *Environmental Science and Technology*, Vol. 49, No. 20, pp. 12206–12213.
- Diener, D. L.; Tillman, A. M. (2016), "Scrapping steel components for recycling - Isn't that good enough? Seeking improvements in automotive component end-of-life. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 110, pp. 48–60.
- Dominguez, S. *et al.* (2017), "LCA of greywater management within a water circular economy restorative thinking framework", *Science of the Total Environment*, Vol. 621, pp. 1047–1056.
- Edwards, J. *et al.* (2017), "Life cycle inventory and mass-balance of municipal food waste management systems: Decision support methods beyond the waste hierarchy", *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 69, pp. 577–591.
- Elia, V.; Gnoni, M. G.; Tornese, F. (2017), "Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, pp. 2741–2751.
- Garcia-Herrero, I. *et al.* (2017), "Connecting wastes to resources for clean technologies in the chlor-alkali industry: a life cycle approach", *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 20, pp. 1–14.
- Geissdoerfer, M. *et al.* (2017), "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, pp. 757–768.
- Ghisellini, P. *et al.* (2014), "Integrated Agricultural and Dairy Production within a Circular Economy Framework. A Comparison of Italian and Polish Farming Systems", *Journal of Environmental Accounting and Management*, Vol. 2, No. 4, pp. 367–384.
- Hadzic, A.; Voca, N.; Golubic, S. (2017), "Life-cycle assessment of solid-waste management in city of Zagreb, Croatia", *Journal of Material Cycles and Waste Management*. DOI: 10.1007/s10163-017-0693-2
- Haupt, M.; Zschokke, M. (2017), "How can LCA support the circular economy? - 63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016", *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, No. 5, pp. 832–837.
- Homrich, A. S. *et al.* (2018), "The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 175, pp. 525–543.
- Husgafvel, R. *et al.* (2016), "Recycling industrial residue streams into a potential new symbiosis product - The case of soil amelioration granules", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, pp. 90–96.
- Iraldo, F.; Facheris, C.; Nucci, B. (2017), "Is product durability better for environment and for economic efficiency? A comparative assessment applying LCA and LCC to two energy-intensive products", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 140, pp. 1353–1364.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017), "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 127, September, pp. 221–232.
- Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. (2018), "Circular Economy: The Concept and its Limitations", *Ecological Economics*, Vol. 143, pp. 37–46.
- Krystofik, M. *et al.* (2017), "Adaptive remanufacturing for multi-life cycles: A case study in office furniture", *Resources, Conservation and Recycling*. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.07.028
- Laso, J. *et al.* (2016a), "Finding the Best Available Techniques for an Environmental Sustainable Waste Management in the Fish Canned Industry", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 52, pp. 385–390.
- Laso, J. *et al.* (2016b), "Waste management under a life cycle approach as a tool for a circular economy in the canned anchovy industry", *Waste Management & Research*, Vol. 34, pp. 724–733.
- Lausset, C. *et al.* (2017), "Norwegian Waste-to-Energy: Climate change, circular economy and carbon capture and storage", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 126, July, pp. 50–61.
- LCiP (2016), "Abordagens de ciclo de vida e economia circular". Available at: http://resources.lifelcip.eu/visualize_pdf_resource.php?file=373_PT_4--life-cycle-approaches-and-the-circular-economy.pdf [Acessado 28 fev. 2018].
- Ellen Macarthur Foundation (2015), *Rumo à economia circular: o racional de negócio para acelerar a transição*, Cowes, Ellen Macarthur Foundation.
- Milios, L. (2017), "Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix", *Sustainability Science*. DOI:10.1007/s11625-017-0502-9.
- Moura, L. L. *et al.* (2015), "Avaliação de riscos ambientais em hospitais: aplicação ao tratamento quimioterápico", *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Vol. 9, No. 1, pp. 66–81.
- Niero, M. *et al.* (2017), "Combining Eco-Efficiency and Eco-Effectiveness for Continuous Loop Beverage Packaging Systems:



- Lessons from the Carlsberg Circular Community”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21, No. 3, pp. 742–753.
- Niero, M.; Hauschild, M. Z. (2017), “Closing the Loop for Packaging: Finding a Framework to Operationalize Circular Economy Strategies”, *Procedia CIRP*, Vol. 61, pp. 685–690.
- Niero, M.; Olsen, S. I. (2016), “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*, Vol. 114, pp. 18–31.
- Noya, I. *et al.* (2017), “Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy”, *Science of the Total Environment*, Vol. 589, pp. 122–129.
- Oldfield, T. L.; White, E.; Holden, N. M. (2016), “An environmental analysis of options for utilising wasted food and food residue”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 183, pp. 826–835.
- Pan, S. Y. *et al.* (2017), “Deployment of Accelerated Carbonation Using Alkaline Solid Wastes for Carbon Mineralization and Utilization Toward a Circular Economy”, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, Vol. 5, No. 8, pp. 6429–6437.
- Prieto-Sandoval, V.; Jaca, C.; Ormazabal, M. (2018), “Towards a consensus on the circular economy”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 179, pp. 605–615.
- Ren, C. *et al.* (2017), “Comparative life cycle assessment of sulfoaluminate clinker production derived from industrial solid wastes and conventional raw materials”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 167, pp. 1314–1324.
- Rigamonti, L. *et al.* (2017), “Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, No. 8, pp. 1278–1287.
- Roest, K. *et al.* (2016), “Applicability of decentralized versus centralized drinking water production and wastewater treatment in an office park as example of a sustainable circular economy in Amsterdam, The Netherlands”, *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, Vol. 3, pp. 139–148.
- Rönnlund, I. *et al.* (2016), “Eco-efficiency indicator framework implemented in the metallurgical industry: part 2—a case study from the copper industry”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 21, No. 12, pp. 1719–1748.
- Sadhukhan, J.; Martinez-Hernandez, E. (2017), “Material flow and sustainability analyses of biorefining of municipal solid waste”, *Bioresource Technology*, Vol. 243, pp. 135–146.
- Seghetta, M. *et al.* (2016), “Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers – A step towards a regenerative bioeconomy”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137, pp. 1158–1169.
- Ministry of the Environment, Energy and Marine Affairs, in charge of International Relations on Climate Change, The Monitoring and Statistics Directorate - SOEs (2017), “10 Key Indicators for Monitoring the Circular Economy”, Available at: http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0086/Temis-0086452/22978_2017_ENG.pdf [Acessado 28 fev. 2018].
- Strazza, C. *et al.* (2015), “Life Cycle Assessment from food to food: A case study of circular economy from cruise ships to aquaculture”, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 2, June, pp. 40–51.
- Strothman, P.; Sonnemann, G. (2017), “Circular economy, resource efficiency, life cycle innovation: same objectives, same impacts?”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, No. 8, pp. 1327–1328.
- Sun, L. *et al.* (2017), “Eco-benefits assessment on urban industrial symbiosis based on material flows analysis and emergy evaluation approach: A case of Liuzhou city, China”, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 119, pp. 78–88.
- Stahel, W. R. (2016), “Circular Economy”, *Nature*, Vol. 531, pp. 435–438. DOI: 10.1038/531435a.
- Tran, H. P. *et al.* (2017), “Recycling portable alkaline/ZnC batteries for a circular economy: An assessment of natural resource consumption from a life cycle and criticality perspective”, *Resources Conservation and Recycling*, No. 135, pp. 265–278.
- Unger, N. *et al.* (2017), “The greenhouse gas benefit of recycling waste electrical and electronic equipment above the legal minimum requirement: An Austrian LCA case study”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 164, pp. 1635–1644.
- Yu, F.; Han, F.; Cui, Z. (2015), “Assessment of life cycle environmental benefits of an industrial symbiosis cluster in China”, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22, No. 7, pp. 5511–5518.
- Zhang, J. *et al.* (2017), “Life cycle energy efficiency and environmental impact assessment of bioethanol production from sweet potato based on different production modes”, *PLoS ONE*, Vol. 12, No. 7, pp. 1–12.

Recebido: 08 nov. 2019

Aprovado: 26 nov. 2019

DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n4.1576

Como citar: Pontes, A. T.; Angelo, A. C. M. (2019), “Utilização da avaliação do ciclo de vida no contexto da economia circular: uma revisão de literatura”, *Sistemas & Gestão*, Vol. 14, No. 4, pp. 424-434, disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1576> (acesso dia mês abreviado. ano).