

ECOLOGIA INDUSTRIAL: EVOLUÇÃO HISTÓRICA E PRODUÇÃO CIENTÍFICA

INDUSTRIAL ECOLOGY: HISTORICAL EVOLUTION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Luis Henrique dos Santos Silva Sousa 

Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí (UFPI). Docente, curso de Engenharia de Produção, Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA) – Teresina (PI), Brasil.

Elaine Aparecida da Silva 

Orientadora, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, UFPI. Professora, Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental, UFPI – Teresina (PI), Brasil.

Endereço para correspondência:

Luis Henrique dos Santos Silva Sousa – Avenida Barão de Gurgueia, 3.601, bloco 18, ap. 301 – Tabuleta – CEP 64018-901 – Teresina (PI), Brasil – E-mail: oluisnta@hotmail.com

Recebido em: 23/10/2018

Aceito em: 12/2/2019

RESUMO

A ecologia industrial (EI) constitui conhecimento de natureza interdisciplinar que propõe a analogia entre os ecossistemas naturais e industriais, com vistas a identificar semelhanças nos processos de transformação e reaproveitamento de materiais e energia. Este trabalho apresenta a construção histórica/epistemológica da EI, o desenvolvimento da área com base em uma revisão de literatura e a cienciometria sobre o conteúdo. Para isso, foi utilizado o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a base de dados Web of Science e o *software* VOSviewer. Constatou-se que a EI começou a ser difundida na década de 1960 sem a significação atual e, posteriormente, verificou-se que ela passou a ser notada como uma estratégia para a operacionalização do desenvolvimento sustentável. A maior parte dos trabalhos sobre EI é produzida nos Estados Unidos (31,56%) e utiliza a avaliação do ciclo de vida (ACV) e a análise do fluxo de materiais (AFM). As pesquisas brasileiras, representadas pelos grupos de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), concentram-se no eixo sul-sudeste, com poucos *cases* nacionais, uma vez que existem iniciativas isoladas até então não estudadas, ou até mesmo não compreendidas como EI por parte dos gestores.

Palavras-chave: ecossistema industrial; cienciometria; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Industrial Ecology (IE) is an interdisciplinary knowledge that proposes the analogy between natural and industrial ecosystem, in order to identify similarities in the processes of transformation and reuse of materials and energy. This paper presents the historical / epistemological construction of IE, the development of the area from a literature review and the cienciometry about the content. For this purpose, the CAPES Portal of Periodicals, the Web of Science database and the VOSviewer software were used. It was verified that IE began to be diffused in the 1960's without the current significance. Later it was verified that IE started to be perceived as a strategy for the operationalization of sustainable development. Most IE papers are produced in the USA (31.56%) and use Life Cycle Assessment (LCA) and Material Flow Analysis (MFA). Brazilian researches, represented by CNPq research groups, are concentrated in the south-southeast regions, with few national cases, since there are isolated initiatives that were not studied until now, or even not understood as IE by the managers.

Keywords: industrial ecosystem; cienciometry; sustainable development.

INTRODUÇÃO

A ecologia industrial (EI), assim como a ecologia (tradicional), é um campo interdisciplinar e complexo que estuda as interações de elementos em sistemas: as indústrias, o meio ambiente e a sociedade. Aparentemente paradoxos, os termos *ecologia* e *industrial* apontam para uma nova perspectiva sob os sistemas industriais, sendo estes entendidos não apenas como um setor da economia, mas como toda atividade humana de transformação dinâmica e interdependente (KAPUR; GRAEDEL, 2004).

A EI considera os ecossistemas naturais como modelos potenciais para a realização de atividades na indústria de forma mais sustentável ambientalmente, uma vez que eles têm comportamentos e potencialidades semelhantes. Os ecossistemas industriais, assim como os naturais, consistem em um sistema com fluxo de materiais, energia e informações, dependentes e mantenedores de outros sistemas.

Ao buscar uma semelhança com os ecossistemas naturais, a EI propõe a mudança do padrão linear para o padrão cíclico de produção, em que as saídas (resíduos, por exemplo) dos sistemas produtivos não sejam descartadas, mas sejam entradas de outros processos produtivos. Admitem-se ainda sistemas intermediários que processem os *outputs* em *inputs* para sistema seguinte da rede.

Em sua maioria, os autores corroboram com algumas características comuns à ecologia industrial: a analogia com o mundo biológico, a perspectiva sistêmica e a mudança tecnológica (LIFSET; GRAEDEL, 2005; KAPUR; GRAEDEL, 2004; ERKMAN; FRANCIS; RAMASWAMY, 2005).

Lifset e Graedel (2005) apontam que a EI tem duas grandes áreas de concentração: análise dos processos produtivos e *design* dos produtos. Na primeira área

de concentração, é proposta a análise das relações de causa e efeito dos processos produtivos com relação ao meio ambiente, materiais de entrada e saída e efeitos no meio ambiente (extração, armazenamento, uso, destinação pós-uso). Nesse aspecto, a análise dos materiais acontece sob a perspectiva do ciclo de vida para realidades econômicas, ambientais e sociais. Na segunda área de concentração, a EI indica o redesenho dos produtos, embalagens e materiais utilizados para fabricação com base nos resultados da primeira área de concentração e biomimetismo.

A EI procura responder a questionamentos relacionados a como as organizações devem reorientar o funcionamento de seus processos produtivos para a utilização racional dos recursos naturais que não comprometa a sua disponibilidade futura combinando um denso marco conceitual (ecologia científica) com uma abordagem operacional da sustentabilidade. Precisam apresentar, assim, uma via para o fornecimento de soluções palpáveis que viabilizam o desenvolvimento sustentável nas perspectivas ambientais, sociais e econômicas (ERKMAN; FRANCIS; RAMASWAMY, 2005).

O esforço teórico dos autores para traçar objetivos e definições para a EI nos faz compreender que ambos funcionam como geradores de perguntas complexas sobre o campo de estudo, mas envolvem de forma comum a questão norteadora da área: a preocupação do impacto humano no ambiente biofísico, com todas as suas consequências.

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma construção histórica do conceito da EI e uma análise cienciométrica que indique as questões relacionadas à produção científica a fim de conhecer a abordagem da literatura científica ligada ao tema, além das limitações e perspectivas da EI como campo científico e de sua trajetória na indústria brasileira.

METODOLOGIA

Para a construção deste estudo, foram utilizados o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a base de dados Web of Science (WOS), para a recuperação do maior número possível de materiais referentes à EI. Nessas bases se utilizou na opção busca avançada

o termo "*industrial ecology*". No Portal de Periódicos da CAPES foram adicionados filtros com relação a trabalhos revisados por pares, visando à recuperação de pesquisas que passaram por uma análise mais rigorosa. Também, adicionaram-se filtros no tocante ao tipo de material (tipo de recurso, na termi-

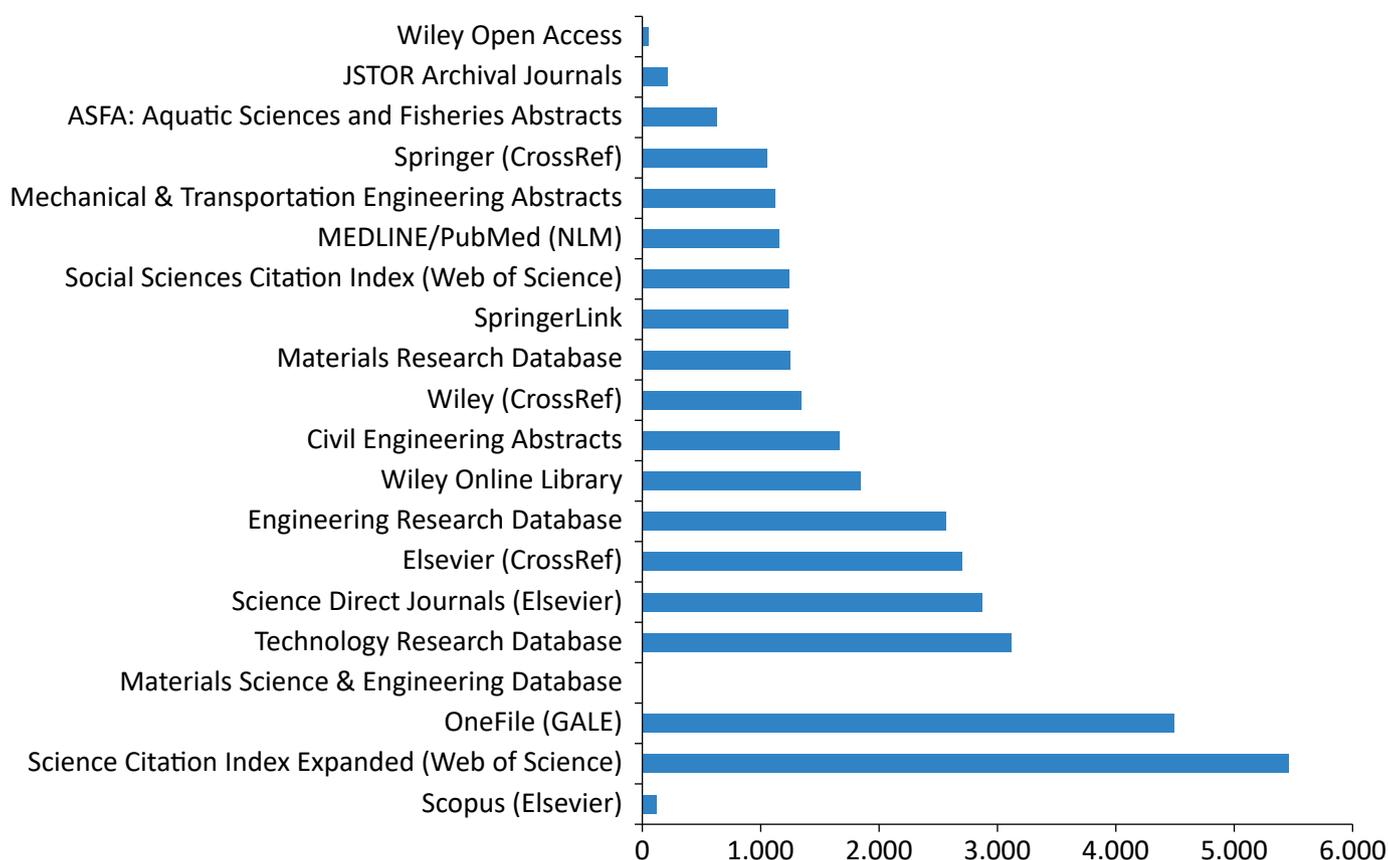
nologia do portal), tendo sido selecionados artigos de periódicos e congressos.

Com isso, obtiveram-se 10.210 trabalhos para análise. Segundo estratificação feita utilizando o Portal de Periódicos da CAPES, observou-se que a base de dados com maior número de trabalhos da amostra é a WOS, conforme apontado na Figura 1. Ademais, vale ressaltar que a soma dos trabalhos em todas as bases é de 34.197, um valor muito superior ao total da busca. Isso acontece porque um mesmo trabalho pode ter sido publicado em periódico que esteja indexado em mais de uma base de dados concomitantemente.

Por esse motivo, a análise cienciométrica foi feita utilizando o *database* fornecido pelo portal WOS, empregando-se o *software* VOSviewer para a criação dos mapas e

o estudo dos agrupamentos das localidades com aspectos comuns em suas publicações. Na análise dos *clusters* gerados pelo VOSviewer, foram utilizadas ferramentas de mixagem de buscas no WOS com termos referentes aos aspectos estudados. Para a criação dos gráficos e tabulação dos dados, usaram-se ferramentas do pacote Office.

Além disso, foi realizada uma busca no Diretório dos Grupos de Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por intermédio do termo *ecologia industrial* e seleção dos campos de busca relacionados ao título do grupo de pesquisa, temática e palavras-chave do grupo. Esses recursos foram acionados, pois a temática em questão poderia não estar explícita no nome do grupo de pesquisa,



JSTOR: Journal Storage; NLM: National Library of Medicine.

Fonte: adaptado do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2018).

Figura 1 – Quantidade de trabalhos da amostra por base de dados.

mas ter sido citada em outro campo que diz respeito às suas atividades.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Construção histórica da ecologia industrial

Frosch e Gallopoulos (1989), em “Strategies for manufacturing”, fazem a inserção da EI na literatura científica não pela utilização do termo, mas pela apresentação da viabilidade desta como resposta à necessidade da operacionalização do então recém-concebido desenvolvimento sustentável.

Em 1967, Ted Taylor, físico nuclear, criou a Corporação Internacional de Pesquisa em Tecnologia, que desenvolvia estudos relacionados com a publicação *The restoration of the Earth* (TAYLOR; HUMPSTONE, 1972), na qual Taylor em parceria com Charles Humpstone trata sobre o pensamento industrial sistêmico e a reutilização de resíduos gerados pelos processos produtivos.

Gussow e Meyers (1970) ao abordar a EI faziam alusão a um *slogan* verde associado à criação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Já Hoffman e Shapero (1971) fizeram menção ao desenvolvimento econômico regional orientado ao meio ambiente, sem necessariamente referenciar-se às práticas comumente compreendidas no campo de estudo.

Na década de 1980, alguns autores já falavam mais claramente de abordagens alternativas para um desenvolvimento econômico ambientalmente saudável, considerando produtos físicos e resíduos como alternativas tecnológicas. Nesse período, a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial e a Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa versavam sobre o balanço ambiental em complexos industriais objetivando a não emissão de poluentes (ERKMAN, 1997).

Ressalta-se, nesse período, a iniciativa belga de estudar a economia do país tendo como *input* estatísticas da produção industrial e como *output* variáveis relacionadas ao fluxo de materiais e energia (em vez de resultados em unidades monetárias). O pequeno grupo de estudos, composto de biólogos, químicos e economistas, tratava em seus trabalhos de circulação de materiais e energia sumariamente de processos produtivos envolvendo metais, vidro, chumbo, plásticos, madeira e papel e produção de alimentos (BILLEN *et al.*, 1983).

Leary (1989) argumenta que EI é combinar tecnologia, relações trabalhistas e sociologia no chão de fábrica. Trata também de aspectos que envolvem a disciplina na rotina e gestão fabril. O autor salienta que a EI traz a atenção para os locais de trabalho.

No Oriente, em meados da década de 1960, o ministro japonês de Comércio Internacional e da Indústria criou um grupo de estudos para explorar as possibilidades de desenvolvimento industrial sem a dependência das atuais taxas de consumo de matérias-primas. Em 1970, durante reunião do Conselho de Estrutura Industrial foi levada em conta a perspectiva de as atividades econômicas do país acontecerem em um contexto ecológico. Subsequentemente a esse fato, foi criado o grupo de trabalho em EI, formado por pesquisadores contratados para desenvolver a ideia de reinterpretação do sistema industrial nos moldes dos sistemas ecológicos (ERKMAN; FRANCIS; RAMASWAMY, 2005).

Em 1972, esse grupo fez sua primeira publicação, intitulada *Industry-ecology: introduction of ecology into industrial policy*. O relatório, de mais de 300 páginas, apontava e estimulava as relações entre as indústrias. No ano seguinte, o grupo publicou um segundo documento, já apresentando os estudos de caso das interações entre as indústrias. Deu prosseguimento às suas pesquisas sobre fluxo de energia e ecoeficiência permeando as décadas de 1980 e 90. O Japão foi o primeiro país onde as ideias de EI foram consideradas e postas em prática em larga escala (MORIGUCHI, 2000).

Concomitantemente aos fatos anteriores, na Rússia, o Departamento de Ecologia Industrial em parceria com o Instituto de Tecnologia Química de Mendeleev também desenvolvia trabalhos e projetos com princípios e ideias da EI (ERKMAN, 1997). A Figura 2 compreende o histórico da EI tratado neste tópico.

A visualização da EI pela academia e comunidade industrial deu-se pelo trabalho de Frosch e Gallopoulos, como mencionado anteriormente. A publicação de *Strategies of manufacturing* deu o devido respaldo às ideias do estudo do fluxo de materiais e energia para a

otimização do uso dos recursos naturais e diminuição da emissão de poluentes para o meio ambiente pela reorientação dos processos produtivos mediante uma visão sistemática entre empresas (CHERTOW, 2007).

Em seguida à publicação da *American Science*, Arthur D. Little publicou um fascículo intitulado *Industrial Ecology: a new environmental agenda for industry* (1991). Hardin Tibbs (1993) publicou novamente a obra de Little, agora com uma linguagem adaptada ao mundo dos negócios. O fascículo espalhou-se de forma rápida, disseminando ainda mais as ideias da EI no ambiente de negócios.

Por conta da repercussão do trabalho de Frosch e Gallopoulos (1989), a partir da sua publicação, observou-se um consenso no significado da utilização da expressão *EI* na literatura científica e no âmbito empresarial.

Na década de 1990, com base no que foi fundamentado pelos princípios da EI, iniciou-se a discussão da recente simbiose industrial e da criação dos *eco-industrial parks*. Em 1997, a Universidade de Yale publicou o primeiro volume do periódico *Journal of Industrial Ecology*, marco que reafirmou a identidade da área de estudo, até então bombardeada por uma desconfiança teórico-epistemológica.

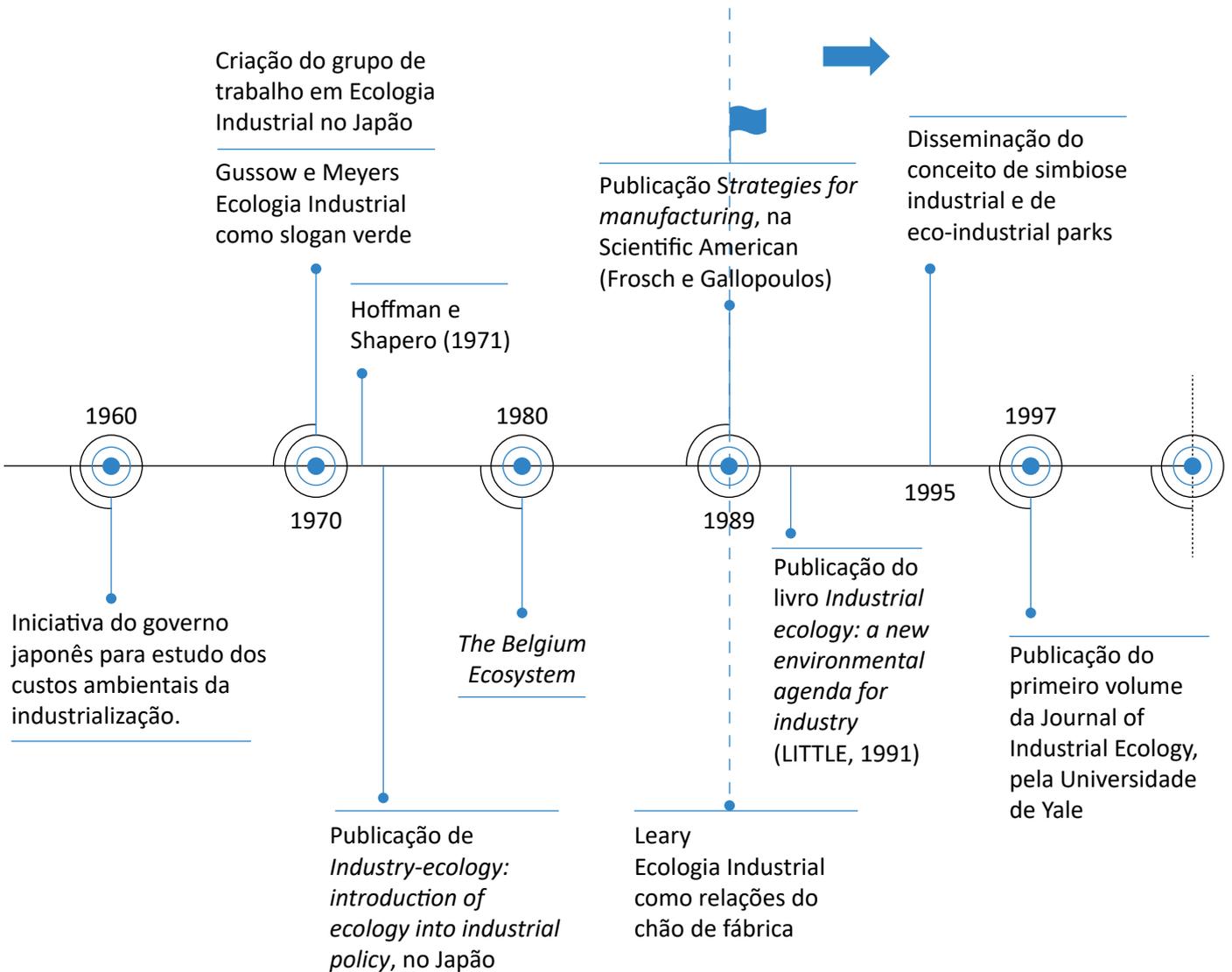


Figura 2 – Histórico da ecologia industrial.

Com a consolidação da constituição teórica do termo, nos anos 2000 em diante a EI passou a significar a analogia dos sistemas industriais com os sistemas biológicos.

Análise cienciométrica

Da amostra recuperada no Portal de Periódicos da CAPES, 98,52% dos trabalhos encontram-se em língua inglesa. As áreas predominantes são relacionadas à engenharia e, principalmente, a aspectos concernentes à sustentabilidade, como: gestão ambiental, energia, ciclo de vida, controle de poluição, entre outros (Figura 3).

Ainda, acerca da amostra recuperada no Portal de Periódicos da CAPES, constatou-se que, dos periódicos nos quais os trabalhos estão publicados, se destacam o *Journal of Industrial Ecology* e o *Journal of Cleaner Production*. As bases em que esses trabalhos estão indexados, conforme apresentado na Figura 1, têm maior número de indexações na WoS.

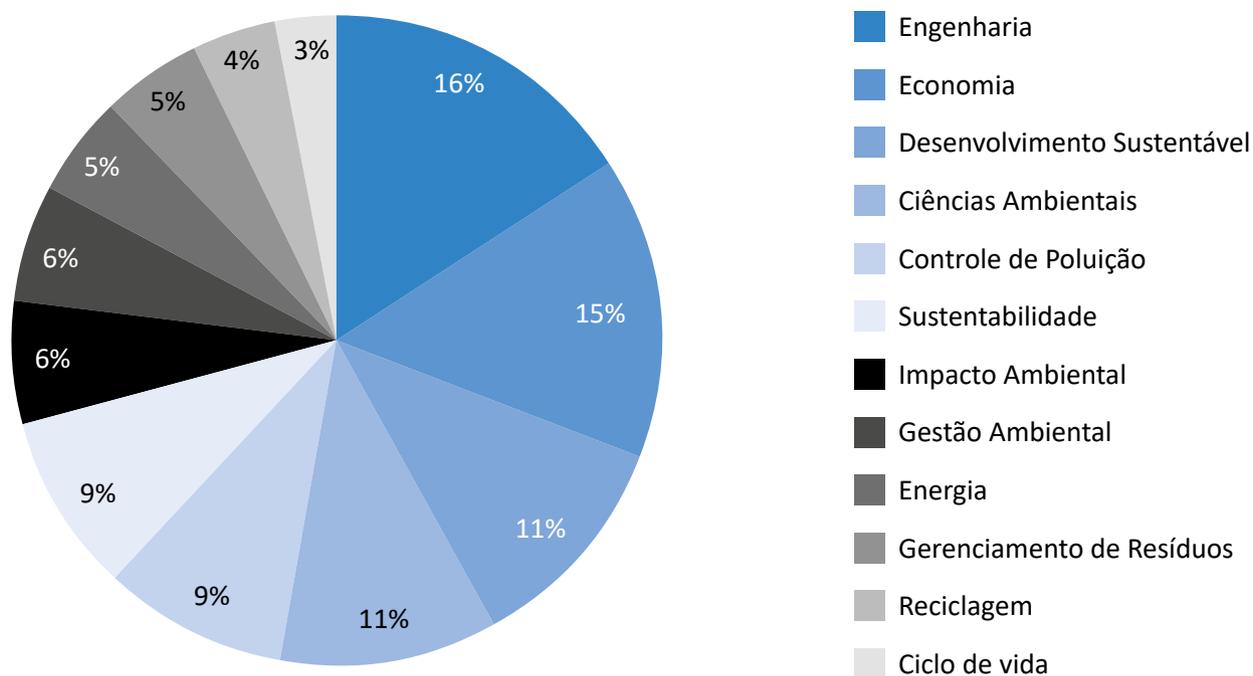
As análises posteriores foram feitas fundamentadas em uma amostra de 1.928 trabalhos recuperados na WoS com a utilização do *software* VOSViewer.

Sobre as características e tendências desses estudos na contemporaneidade, a seção seguinte apresenta um *overview* da IE por meio da análise cienciométrica.

Conforme os dados dessa amostra, a relevância da EI na literatura científica é evidenciada pela grande quantidade de materiais recuperados. A maioria dos trabalhos (78,21%) corresponde a artigos científicos que foram publicados nos últimos dez anos (72,45%). Analisando todo o universo recuperado, o ano de 2017 foi o com o maior número de publicações em EI (Figura 4).

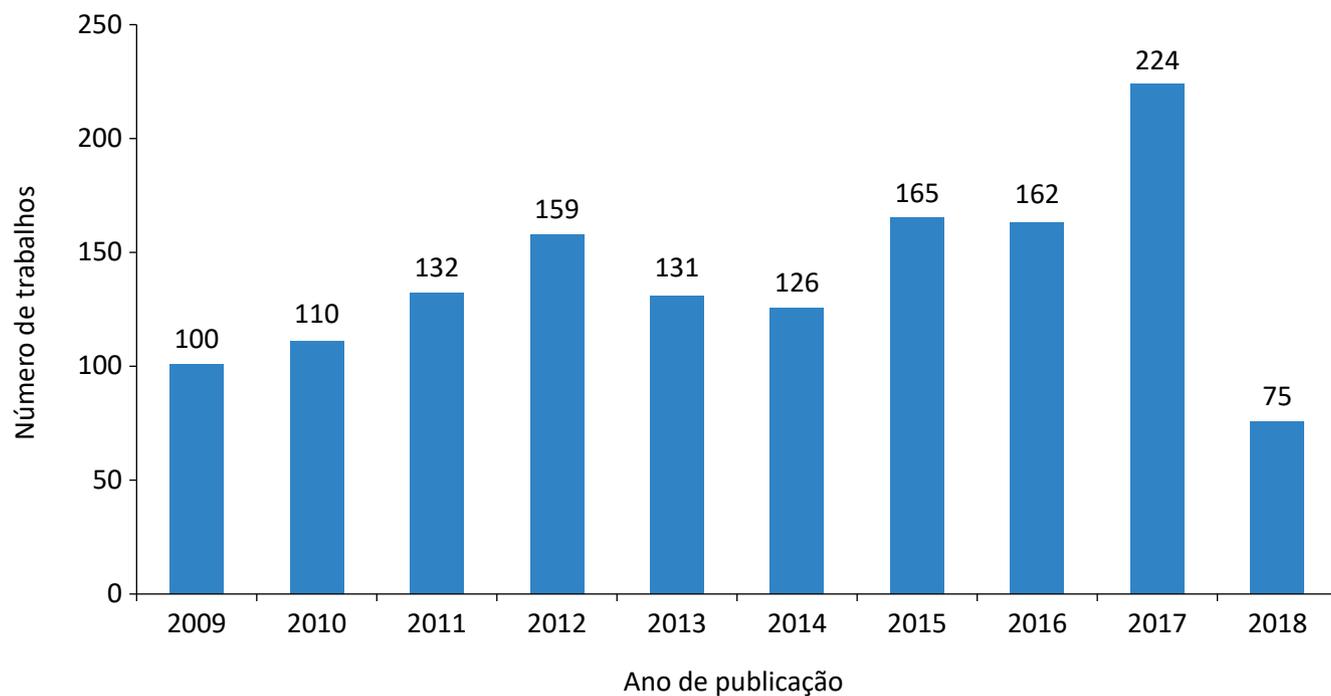
A segunda maior parcela de tipos de publicação são os *proceedings papers*, ou seja, artigos dos anais de eventos da área. Com base nos resultados encontrados, foram analisadas as quantidades e a tendência de publicações de artigos e *proceedings papers* em EI (Figuras 5 e 6).

Enquanto as publicações com a terminologia *ecologia industrial* vêm aumentando nos últimos anos nos periódicos, vem decrescendo a quantidade desses trabalhos



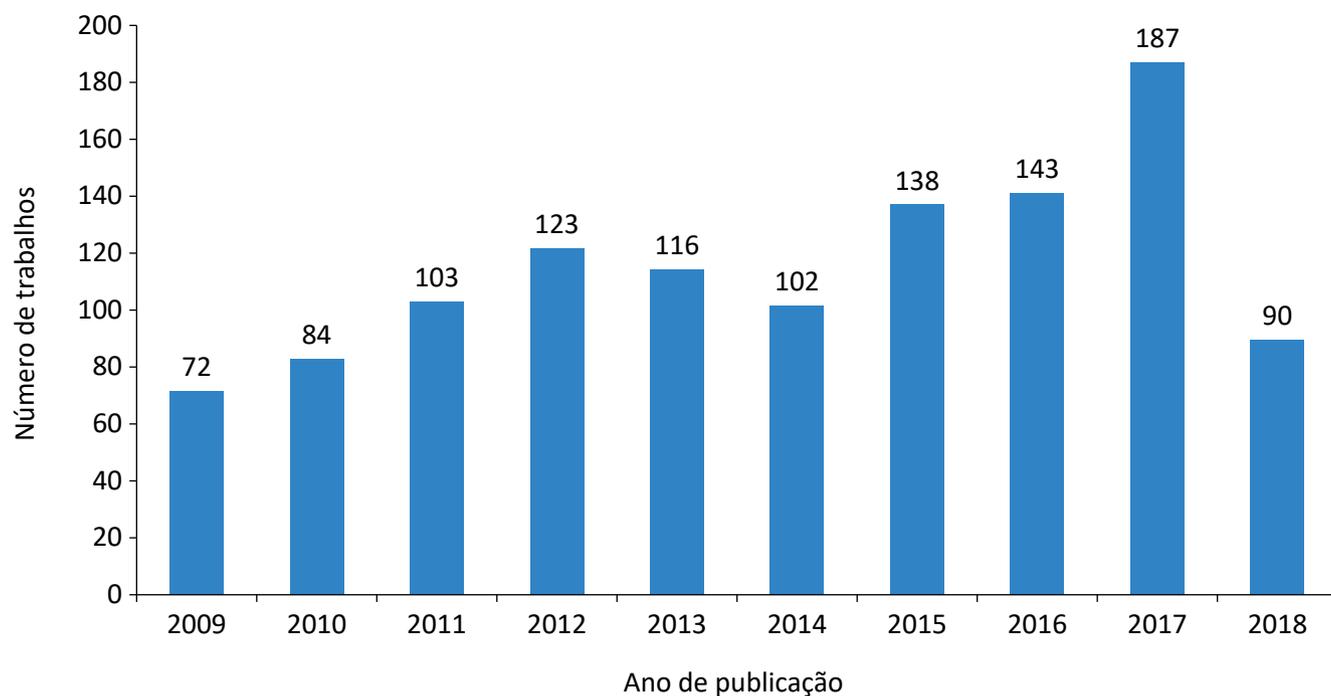
Fonte: adaptado do Portal de Periódicos da CAPES (2018).

Figura 3 – Áreas dos trabalhos recuperados no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 4 – Número de trabalhos publicados em ecologia industrial (2009–2018).



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 5 – Produção em ecologia industrial em periódicos (2009-2018).

divulgados em eventos científicos, contudo isso não é uma indicação de que a temática está sendo menos discutida. Desde 2014, com a inserção do conceito de *economia circular* como escola de pensamento, muitos dos assuntos e aspectos antes tratados pela EI agora estão sendo incorporados pela economia circular.

Ainda sobre o total dos trabalhos recuperados, estes encontram-se distribuídos em diversas áreas, com destaque para: ciências ambientais (67,34%), engenharia ambiental (61,28%), sustentabilidade e tecnologia (56,44%). Isso pode ser observado pela análise das palavras-chave utilizadas nos trabalhos em estudo (Figura 7).

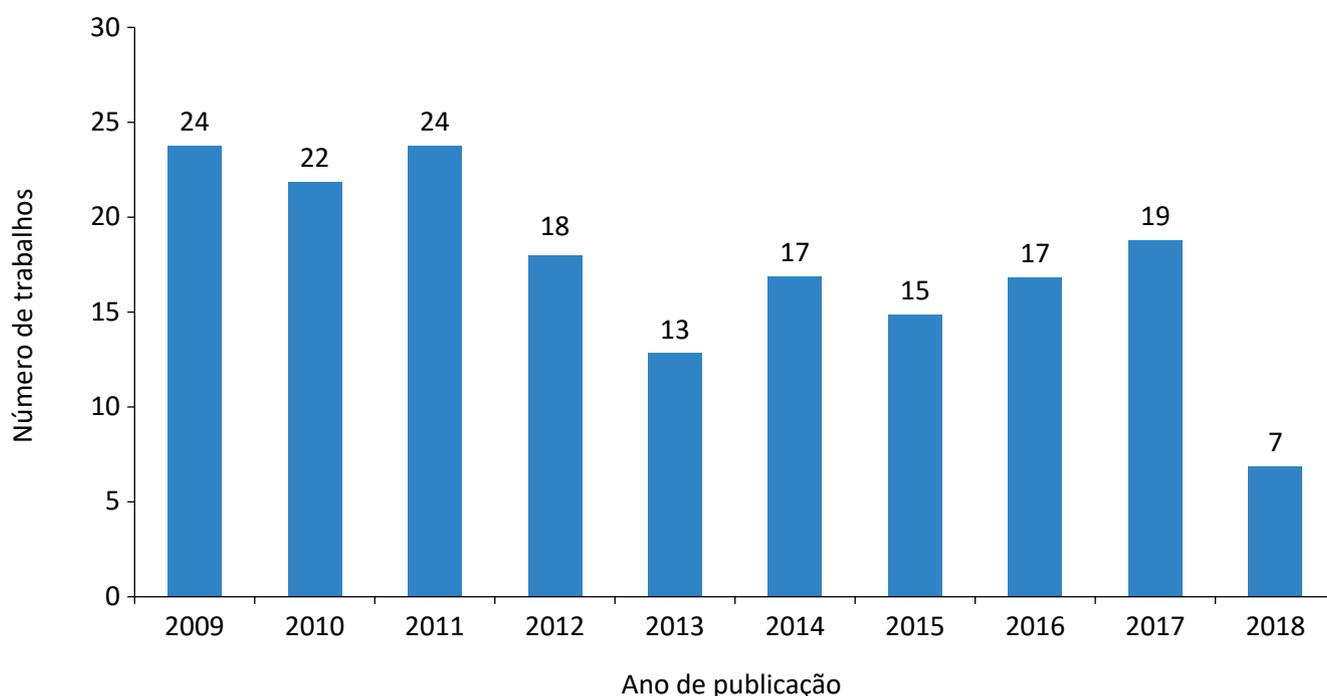
Na árvore das palavras-chave dos trabalhos recuperados (Figura 7)”, as *keywords* têm o seu nível de incidência representado pelo tamanho das fontes e caixas de texto: quanto mais citada, maior o *frame*. As cores indicam o período da maior incidência das palavras segundo a escala apresentada na figura. Com esses resultados, constata-se a concentração dos trabalhos nas áreas correlatas às ciências ambientais, tais como: ecologia, produção mais limpa e impactos ambientais. Também, podem ser visualizados temas abordados mais recentemente

na área, como *international trade*, *carbono footprint* e *construction*, indicando assim tendências na área.

Pela análise das palavras-chave, ainda podem ser identificadas ferramentas e metodologias utilizadas no campo da EI: avaliação do ciclo de vida (*life-cycle assesment* e *life cycle assessment — LCA*) e análise do fluxo de materiais (*input-output analysis — IOA*, *material flow analysis — MFA*, *substance flow analysis — SFA*).

Quanto aos países, os Estados Unidos são os que mais produzem e publicam material científico em EI (Figura 8), com 31,53% (608) dos trabalhos, seguidos da China (11,25%), Inglaterra (8,76%), Canadá (5,81%) e Alemanha (5,60%). Pelo *ranking* oferecido pela WoS, o Brasil está na 19ª posição, com apenas (1,19%) da produção. Verifica-se também que 98,39% do total de trabalhos foi publicado na língua inglesa. Em francês, espanhol e português foram publicados percentuais inferiores a 0,5% para cada idioma.

Com a análise da quantidade de publicações por países e a relação de citações entre os países com auxílio do *software* VOSViewer, os trabalhos podem ser agru-



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 6 – Produção em ecologia industrial em eventos científicos (2009-2018).

pados em nove *clusters* de países com temáticas e afinidades pelo uso do mesmo conjunto de referências (Tabela 1).

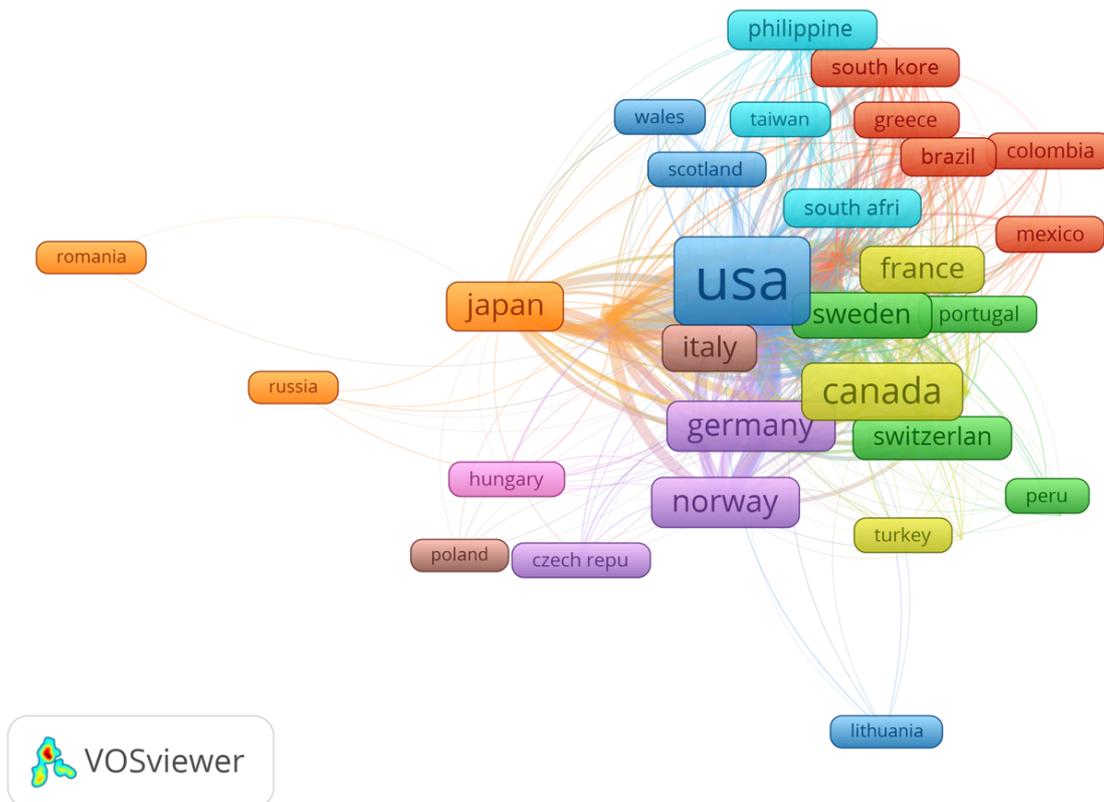
Na Figura 8, o número de publicações é representado pelo tamanho das fontes e das caixas. As cores nas caixas de texto equivalem aos *clusters* criados pelas relações entre as publicações entre os países. As linhas curvas entre os países indicam as relações de citações entre as pesquisas dessas localidades. Os países que tiveram a maior quantidade de relações foram agrupados nos *clusters*.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os resultados dos *clusters* de países por temática desenvolvida nos trabalhos, metodologia utilizada e materiais analisados. As barras horizontais representam o percentual de trabalhos com relação ao aspecto em estudo proporcional à quantidade total de trabalhos no *cluster*.

Analisando os resultados (Figura 9), incide-se que todos os *clusters* de países estudam aspectos relacionados à EI como simbiose industrial e eco-parks e eles já utilizam o termo *ecologia industrial* como área de concentração desses estudos. Ressalta-se que aspectos de inovação tecnológica são encontrados apenas no *cluster* 5 (PEREY *et al.*, 2018).

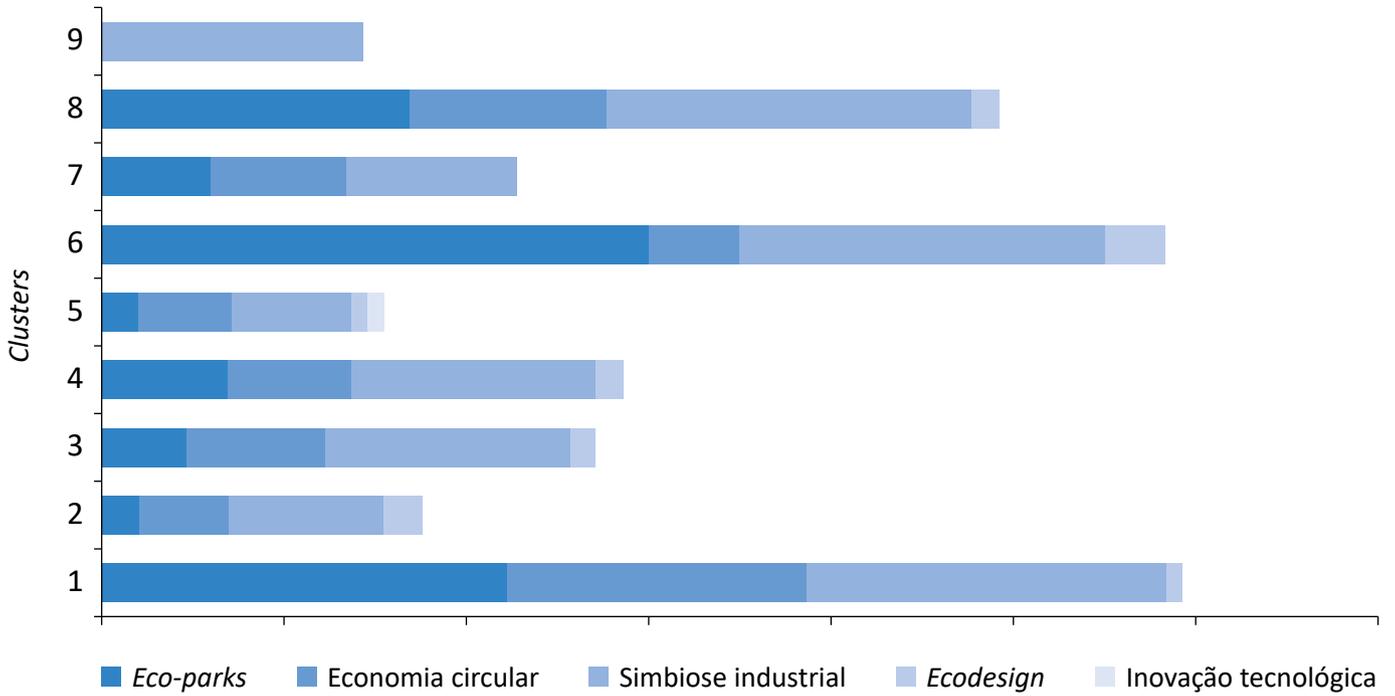
Todos os conjuntos de países têm como metodologia de estudo majoritária da EI a avaliação do ciclo de vida (ACV) (MANDERSON; CONSIDINE, 2018; LASO *et al.*, 2018) e a análise do fluxo de materiais (SOULIER *et al.*, 2018; SCHANDL *et al.*, 2018; CAO *et al.*, 2018) (Figura 10). A análise hierárquica de processo é encontrada como ferramenta para tomada de decisão nos *clusters* 1 e 7 (YAZAN *et al.*, 2018; PRAKASH; BARUA, 2015), e não foi recuperado nenhum resultado da sua utilização no *cluster* do seu país de origem (Estados Unidos).

Quando analisados em relação aos materiais envolvidos nas atividades de EI, os estudos indicam a necessidade



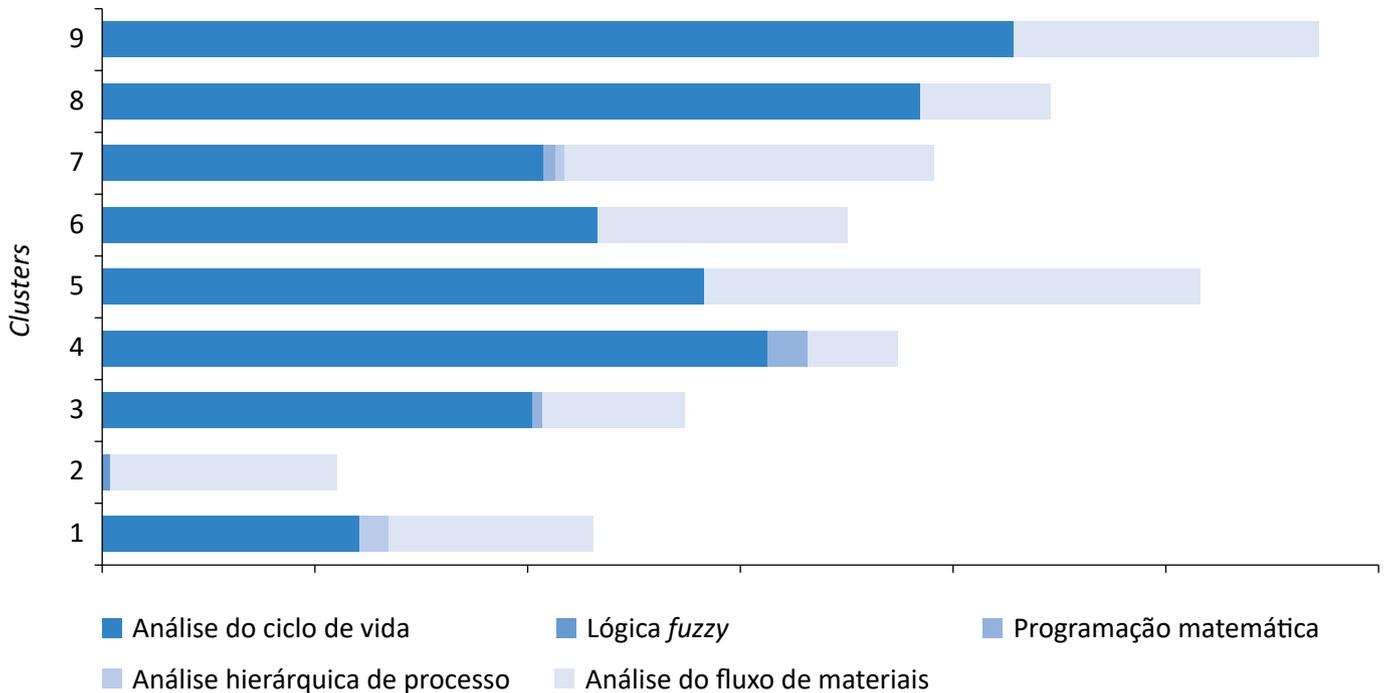
Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 8 – Quantidade de trabalhos produzidos por país e relações de citações.



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 9 – Análise das temáticas por clusters de países.



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 10 – Análise das ferramentas utilizadas, por clusters de países.

de otimização do consumo e a conservação dos recursos naturais. Desse modo, os trabalhos recuperados tratam predominantemente sobre água, atividades de reúso, tratamento e compartilhamento de sistemas de efluentes (AMÓN *et al.*, 2018; PAGOROPOULOS *et al.*, 2018). Destaca-se praticamente em todos os *clusters* a presença de estudos envolvendo biogás (THOMSEN *et al.*, 2017; FALLDE; EKLUD, 2014).

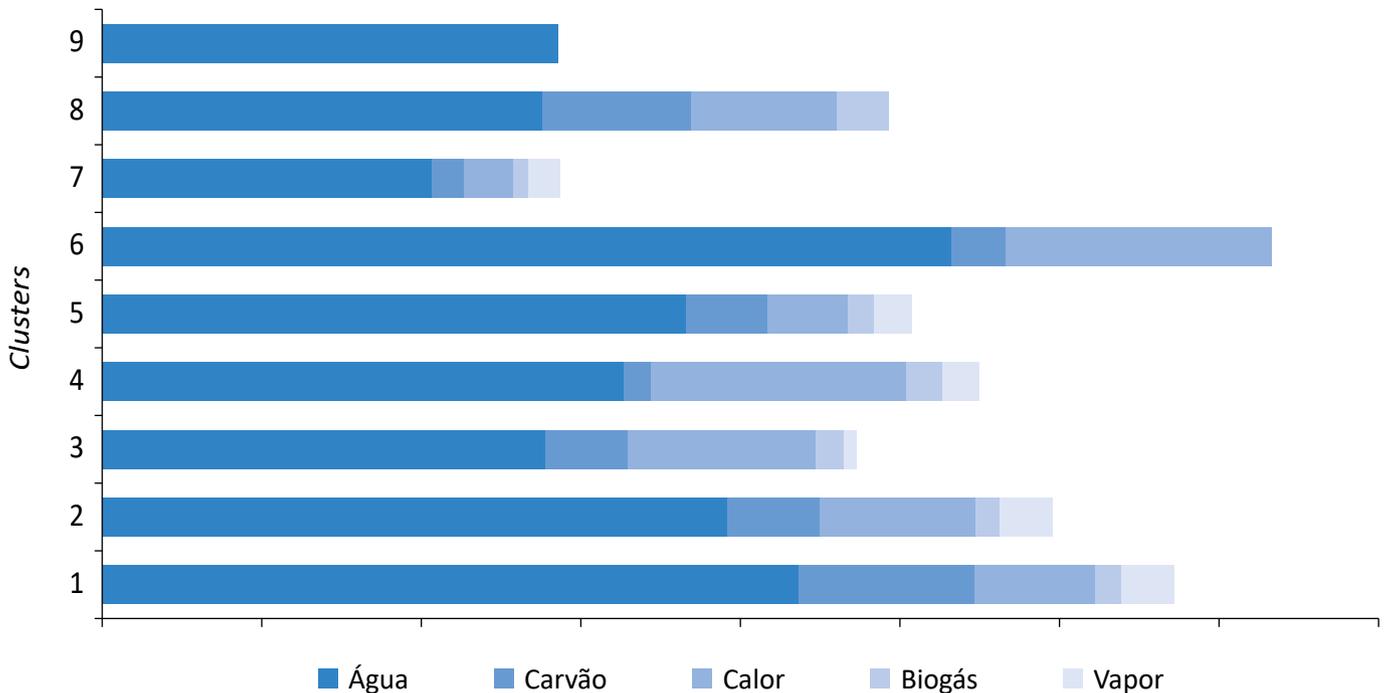
Quanto à autoria, os trabalhos têm concentração menor por autores, nenhum ultrapassando a marca de 1,3% do total das publicações. Destacam-se: Graedel (25), Lifset (21), Stromman (19), Keoleian (16), Korhonen (16) e Hertwich (15).

Graedel tem no início de seus trabalhos o esforço para conceituar, definir as abordagens e estudar o histórico da EI (JELINSKI *et al.*, 1992; GRAEDEL, 1996; 2000). A partir de 2009, os estudos começaram a direcionar-se para estoque e reciclagem de metais como chumbo, metais raros, níquel, entre outros (MAO; GRAEDEL, 2009; GRAEDEL *et al.*, 2011; DU; GRAEDEL, 2011). Recentemente, vem sendo utilizada a abordagem de ciclo de vida para estudar zinco e chumbo. O autor ana-

alisa também a disponibilidade de materiais utilizados para o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de energia, especialmente energia nuclear, apesar de nem sempre constatar criticidade entre a diferenças nas relações de oferta e demanda dos materiais estudados (CHEN; GRAEDEL, 2015; WEISZ *et al.*, 2015; HARPER *et al.*, 2015; NASSAR *et al.*, 2015).

Lifset já aponta aspectos relacionados ao futuro da EI, além de tratar recentemente de assuntos como manufatura aditiva e transparência e acessibilidade das informações para estudos de EI (LIFSET, 2017; HERTWICH *et al.*, 2018; KELLENS, 2017). Stromman concentra seus trabalhos em ACV de materiais elétricos de carros (SINGH *et al.*, 2014; ELLINGSEN *et al.*, 2014).

As organizações que mais produzem, por consequência, são norte-americanas, apesar de, ao analisar as instituições (Figura 12), termos uma universidade norueguesa ocupando o segundo lugar, o que aponta relativa importância do tema como problemática nos grupos de pesquisa no país, embora este ocupe a 10ª posição de produção. As instituições que ocupam os primeiros lugares de produção sobre EI são: Universidade de Yale



Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 11 – Análise dos materiais em estudo por *clusters* de países.

(81), Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (72) e Universidade de Michigan (47).

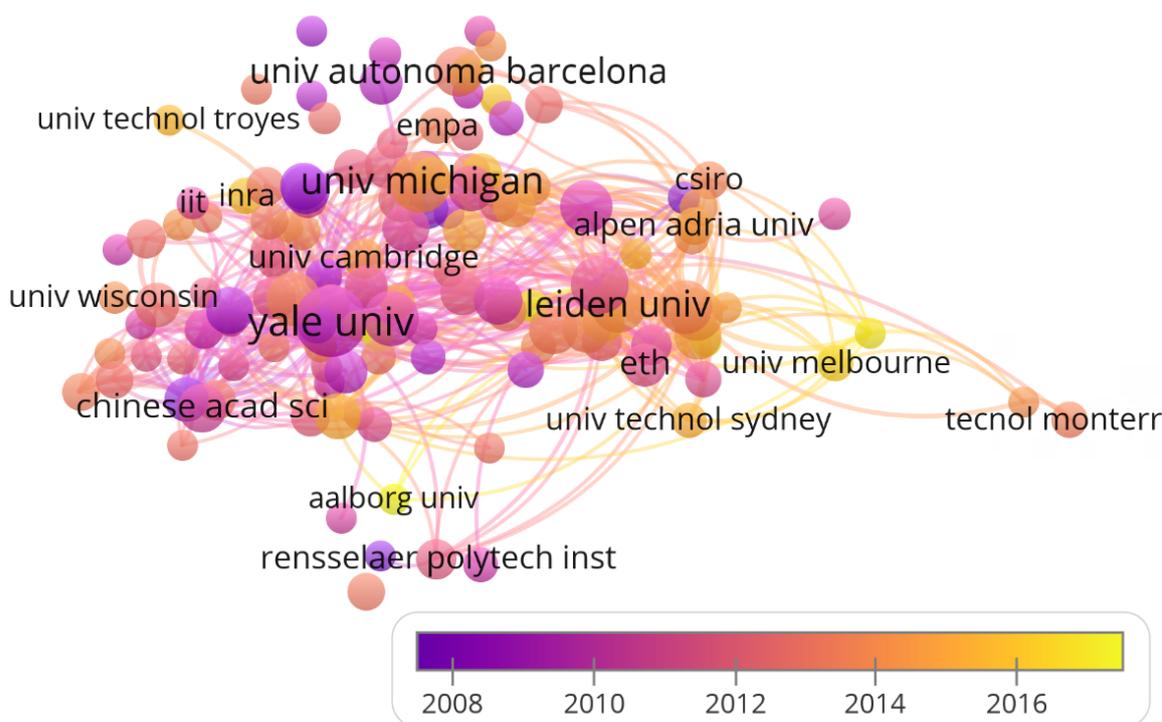
Não obstante serem as maiores detentoras da quantidade de publicações na área, as instituições com o maior número de trabalhos recentes são: Universidade de Melbourne (Austrália), Universidade de Nova Gales do Sul (UNSW) (Austrália), Universidade de Tecnologia de Sidney (Austrália), Universidade de Aalborg (Dinamarca) e Universidade de Tecnologia de Troyes (França). Ao analisar as relações de citações, vê-se que todas têm fortes relações com os trabalhos produzidos na Universidade de Yale.

Mais da metade da produção científica em análise (51,81%) encontra-se em dois periódicos: *Journal of Industrial Ecology* (837 trabalhos) e *Journal of Cleaner Production* (162 trabalhos). Todos os outros periódicos concentram menos de 2,5% da produção de EI em seu conteúdo. Ressaltam-se a referência e quantidade de

publicações na Universidade de Yale, por ser esta a fundadora do periódico, na primeira posição.

Segundo a classificação Qualis da CAPES (evento de classificação 2013–2016), o *Journal of Cleaner Production* tem classificação A1 na área de ciências ambientais e classificação A ou B para quase todas as áreas do conhecimento, enquanto o *Journal of Industrial Ecology* tem classificação apenas para as áreas de economia (B1) e interdisciplinar (A1). O fato não desmerece a revista, uma vez que a classificação Qualis acontece para determinada área quando o periódico em questão já teve publicações de brasileiros da referida área; a revista tem apenas cinco artigos publicados por brasileiros.

Ainda, analisando os resultados obtidos na base Web of Science, nota-se a média de citações por item de 19,48, ou seja, a soma da contagem do número de citações dividido pelo número de resultados no conjunto. Também um *h-index* de 84, que significa a existência de *h* artigos em que cada um foi citado ao menos *h* ve-



EMRA: Enterprise Risk Management Academy; IIT: Institutos de Tecnologia da Índia; INRA: Institut National de la Recherche Agronomique; CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation; ETHZ: Instituto Federal de Tecnologia de Zurique.
Fonte: adaptado da WoS (2018).

Figura 12 – Quantidade de trabalhos produzidos por universidades e relações de citações nos últimos dez anos.

zes na amostra em estudo. Esses resultados mostram as relações existentes entre os trabalhos em EI recuperados na busca em questão, também evidenciados pelos mapas gerados pelo VOSViewer, apresentados anteriormente.

A produção brasileira em EI recuperada concentra-se na Universidade Federal do Rio de Janeiro e na Universidade de São Paulo. Os trabalhos, em sua maioria, produzidos a partir de 2015, ressaltam o po-

tencial para simbiose industrial para a construção civil (FREITAS; COSTA; FERRAZ, 2017) e horticultura (SANYÉ-MENGUAL, 2018), simulação de impactos ambientais e benefícios socioeconômicos da implantação de indústria de biodiesel no Rio de Janeiro (SOUZA *et al.*, 2012) e contribuições da EI para a economia circular (SAAVEDRA *et al.*, 2018). Outros estudos também fazem a experiência (ainda não atestada metodologicamente) da utilização da ACV e do mapeamento do fluxo de materiais (SILVA *et al.*, 2015).

Grupos de pesquisa Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Com base nas informações disponíveis no diretório de grupos de pesquisa do CNPq, identificaram-se os grupos de pesquisas que trabalham de alguma forma com temas relacionados à EI (Tabela 2).

Os grupos de pesquisa na área de EI concentram-se majoritariamente nos cursos de Engenharia de Produção, Mecânica, Química e Sanitária em universidades do eixo Sul-Sudeste brasileiro. Observa-se ainda que

são encontradas poucas instituições do norte e nordeste com pesquisas relacionadas à área, com destaque para a Universidade Federal da Bahia. A ausência de trabalhos recuperados dessas instituições pode se dar por: trabalhos em EI publicados em eventos e periódicos não indexados pela base Web Of Science e pesquisas na área ainda em andamento e EI como conteúdo (de interesse) do grupo de pesquisa, mas ainda sem participantes atuantes na área.

Cenário brasileiro

No Brasil, a primeira iniciativa semelhante às práticas de EI foi a Bolsa de Resíduos. Criada na década de 1980, ela foi uma ideia de algumas das federações da indústria do país. O sistema funciona em uma plataforma *on-line* em que as empresas cadastram os materiais que têm disponíveis para troca ou venda e sinalizam necessidades que possam ser supridas por outras empresas (COELHO, 2001).

Em 2007 foi criado o Sistema Integrado de Bolsas de Resíduos (SIBR). Essa nova plataforma virtual buscou integrar as bolsas de resíduos das unidades da federação com os intuitos de dar mais visibilidade aos materiais e às necessidades das empresas e ampliar as oportunidades de negócios em escala nacional. Fazem parte do SIBR as bolsas de resíduos ligadas às federações da indústria dos estados da Bahia, de Goiás, de Minas Gerais, do Pará, do Paraná, de Pernambuco e de Sergipe (SIBR, 2018).

As federações da indústria inseridas no SIBR: não interferem nas negociações; não se responsabilizam pela destinação e/ou pelo uso dos resíduos trocados ou comercializados; não exerce nenhuma auditoria das informações fornecidas pelas empresas (SIBR, 2018).

Ao consultar a plataforma virtual do SIBR, é possível verificar que existem 7.225 empresas cadastradas e apenas 22 anúncios. O acesso ao banco de dados para as bolsas das federações está desativado, o *site* encontra-se desatualizado e os telefones para contato direcionam para um atendimento central da Confederação Nacional da Indústria (CNI) que não conta com informações disponíveis sobre o SIBR.

Pela postura passiva das bolsas de resíduos e pelo esforço necessário para o estabelecimento das trocas terem de partir unicamente das empresas, uma vez que boa parte destas ainda não tem uma visão estratégica nem empreendedora para desprender-se para a prática proposta pelas bolsas, é possível ressaltar que o processo de tomada de decisão logístico e técnico também fica todo a cargo das empresas envolvidas, sem uma metodologia ou procedimentos a serem seguidos para o sucesso nas transações, o que onera mais ainda o processo e o que provavelmente também contribuiu para a plataforma entrar em desuso. Com isso, a ferramenta, que poderia ser um instrumento para o fomento da simbiose industrial no país, não teve atuação efetiva nem se disseminou por todo o território nacional.

Tabela 2 – Grupos de pesquisa em ecologia industrial no Brasil.

Grupo de Pesquisa	Instituição	Área
ACV Brasil – Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos	UnB	Engenharia Mecânica
Ciência e Tecnologia ambiental	UNISC	Engenharia Sanitária
Desenvolvimento de Tecnologias Sustentáveis	UFBA	Engenharia de Produção
Desenvolvimento Sustentável	UNIFAE	Sociologia
Ecologia Agroindustrial	CESUMAR	Engenharia Química
Ecologia Bentônica Tropical	UFRA	Ecologia
Ecologia Industrial	UNIFAE	Engenharia Mecânica
Ecologia Industrial	IFBA	Engenharia Sanitária
Ecologia Industrial, Gestão e Educação Ambiental	CEETEPS	Engenharia de Materiais e Metalúrgica
Economia Circular – EcoInovação e a Abordagem do Ciclo de Vida	UVA/RJ	Engenharia de Produção
Energia e Meio Ambiente	UFRJ	Engenharia de Produção
Laboratório de Ensino em Sustentabilidade Socioambiental e Redes Técnicas (FLUXUS)	UNICAMP	Planejamento Urbano e Regional
Fotoquímica e Ressonância Magnética Nuclear	UNIP	Química
Gestão do Ciclo de Vida no Agronegócio (GCVAgro)	UFMS	Administração
Gestão de Qualidade e Produtividade	UDESC	Engenharia de Produção
Núcleo de Pesquisa em Sistemas e Gestão de Engenharia (GESTORE)	UFRJ	Engenharia de Produção
Grupo de Estudos Avançados em Energia e Ambiente (GREA)	UnB	Engenharia Mecânica
Grupo de Estudos e Pesquisas na Área Interdisciplinar de Planejamento de Sistemas Energéticos	UFOP	Engenharia de Produção
Grupo de Estudos em Materiais e Meio Ambiente (GEMMA)	UESB	Engenharia Mecânica
Grupo de Pesquisa Engenharia de Custo e Tecnologia Biomassa Limpa	UFRN	Engenharia Química
Grupo de Pesquisa em Inovação e Sustentabilidade (InoS)	UFC	Administração
Laboratório de Bioenergia e Catálise (LABEC)	UFBA	Engenharia Química
Meio Ambiente e Saúde Ocupacional para o Desenvolvimento Sustentável	CEETEPS	Engenharia de Produção
Núcleo de Estudos em Estratégia e Sustentabilidade (NESS)	UNIFOR	Administração
Produção e Meio Ambiente	UNIP	Engenharia de Produção
Produção Sustentável	UNITAU	Engenharia de Produção
Rede de Tecnologias Limpas (TECLIM)	UFBA	Engenharia Sanitária
TECLIM_UFSB, Produção Limpa, Gestão e Consumo Sustentável	UFSB	Engenharia de Produção

UnB: Universidade de Brasília; UNISC: Universidade de Santa Cruz do Sul; UFBA: Universidade Federal da Bahia; UNIFAE: Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino; CESUMAR: Centro Universitário de Maringá; UFRA: Universidade Federal Rural da Amazônia; IFBA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia; CEETEPS: Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza; UVA: Universidade Veiga de Almeida; UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro; UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas; UNIP: Universidade Paulista; UFMS: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul; UDESC: Universidade do Estado de Santa Catarina; UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto; UESB: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia; UFRN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; UFC: Universidade Federal do Ceará; UNIFOR: Universidade de Fortaleza; UNITAU: Universidade de Taubaté; UFSB: Universidade Federal do Sul da Bahia.

Fonte: adaptado do diretório dos grupos de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, 2018).

As iniciativas nacionais propriamente entendidas como práticas de EI se deram por meio da International Synergies, da CNI, do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e das federações da indústria dos estados financiados pela AI-Investments. O até então Programa Brasileiro de Simbiose Industrial (PBSI) teve protagonismo da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), que foi o órgão responsável por fomentar os demais projetos de simbiose industrial nos estados. Todos os outros projetos, com exceção do mineiro, estão descontinuados (FIEMG, 2018).

Minas Gerais foi o estado pioneiro, com a criação do Programa Mineiro de Simbiose Industrial (PMSI), que funciona sobre a tutoria da Gerência de Meio Ambiente da FIEMG. Iniciado em 2009, mais de 2.500 empresas já aderiram a ele de maneira parcial e integral. O PMSI utiliza a metodologia do National Industrial Symbiosis Program (NISP), em que os *quick wins* são a principal ferramenta para captação de participantes para o programa. Os eventos acontecem com o título “Conectando empresas, criando oportunidades”. Conforme a proposta, os *workshops* ocorrem em um ambiente dinâmico e com linguagem direcionada ao mundo dos negócios. A iniciativa mineira tem apoio e consultoria da International Synergies e já elenca mais de 139 mil toneladas e resíduos desviados de aterros, 194 mil toneladas de redução no uso de matérias-primas, 87 mil toneladas de redução de emissão de carbono, 13 milhões de m³ de água reutilizada e 8 milhões em redução de custo para as empresas (FIEMG, 2018).

Atividades de disseminação da simbiose industrial no Paraná se deram por meio da iniciativa mineira, mas pelo Centro Internacional de Negócios do Paraná (CIN/PR) e pela Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP). Em agosto de 2011, foi realizado um encontro com o mesmo título dos *workshops* de Minas Gerais. Na oportunidade 37 empresas foram reunidas, a rodada de negócio resultou em 95 ofertas e 36 procuras, e o total de 276 potenciais trocas simbióticas foi cogitado.

Em consulta, o CIN/PR e a FIEP informaram que os projetos foram descontinuados no Paraná. Os últimos termos e documentos do referido projeto estão datados de 2012, e as instituições não dispõem do relatório final do projeto, que não se encontra disponível *on-line* nem nos arquivos de acesso rápido dos órgãos. Os responsáveis comprometeram-se em fornecer os relató-

rios com os resultados das interações simbióticas, mas não retornaram até a data da entrega deste trabalho.

O NISP no Rio Grande do Sul teve suas primeiras atividades em 2011. Com promoção da CNI e suporte da FIEMG, foram realizados *workshops* com as rodadas de negócios. Em 2014, a Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento em parceria com o SENAI do Rio Grande do Sul e o Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL) promoveu o projeto Simbiose Industrial e o Plano de Gestão de Resíduos Sólidos para os Arranjos Produtivos Locais como ações da Política Estadual de Economia da Cooperação.

Esse segundo projeto teve um aspecto diferenciado dos demais produzidos no Brasil, uma vez que teve seu foco nos arranjos produtivos locais (APL). As atividades contaram com divulgação da proposta, visita às empresas por parte do corpo técnico do projeto e posteriormente identificação de cinco APLs para o desenvolvimento dos *workshops* (metalomecânico e automotivo; mecânico pós-colheita; moveleiro; pedras, gemas e joias; e moda da serra gaúcha) e um evento final de divulgação dos resultados (LIMA, 2014).

Ao realizar um estudo após a execução do projeto, Perinetti *et al.* (2016) constataram que em torno de 80% das empresas participantes já realizavam alguma forma de gerenciamento de resíduos, apenas 35% dos envolvidos efetivamente realizaram negociações envolvendo materiais e a maior dificuldade para o estabelecimento das parcerias envolve a falta de viabilidade econômica e geração de quantias de resíduos insuficientes para abster o fluxo simbiótico. Os envolvidos expressaram o interesse na continuidade do projeto; grande parte dos empresários envolvidos compreendeu a importância da simbiose industrial.

Sobre esse projeto, podem ser feitas algumas considerações em relação aos aspectos teóricos, técnicos e metodológicos. A literatura e experiência prática apontam que, quanto maior a diversidade das empresas, mais trocas simbióticas se têm em um espaço geográfico. A opção por adoção dos APLs como “unidades funcionais” do projeto fragiliza essa premissa, uma vez que os arranjos produtivos locais são especializados em uma única natureza de produtos, podendo gerar uma mesma família de resíduos que não seja de interesse das empresas. Se as atividades para o estabelecimento das relações tivessem acontecido entre os APLs, provavelmente se teria um número maior de associações.

A metodologia utilizada para identificação das potenciais trocas aconteceu segundo o modelo do NISP até a segunda etapa. O suporte técnico e facilitador das negociações, que deveriam ocorrer nas etapas seguintes, ficou sob responsabilidade dos próprios empresários. Muitos deles, apesar de ter interesse no projeto, alegaram falta de tempo para desprender-se para a viabilidade das negociações (PERINETTO *et al.*, 2016). A metodologia proposta pelo NISP fornece apoio aos interessados até a finalização e avaliação das trocas estabelecidas, entre outras coisas. Esse primeiro apoio da equipe técnica de implantação funciona para a aquisição de *know-how* sobre simbiose industrial dos empresários e corpo técnico das empresas.

Em Alagoas, também foram realizados por meio da parceria entre Federação das Indústrias do Estado do Alagoas (FIEA) e FIEMG três *workshops* “Conectando empresas, criando oportunidades” no ano de 2012 nas cidades de Maceió, Bento Gonçalves e Arapiraca. Não foi localizado nenhum documento ou registro sobre os resultados dos eventos e do projeto. Solicitou-se à FIEA algum material pertinente ao projeto, e os responsáveis comprometeram-se em fornecer os relatórios, mas não retornaram até a data da entrega deste trabalho.

No Brasil, ainda podem ser constatadas outras iniciativas de EI, obedecendo ao modelo *self-organizing symbiosis* (CHERTOW, 2000). Nele, as próprias empresas envolvidas não utilizam as nomenclaturas EI ou simbiose industrial, como o Polo Petroquímico de Camaçari,

no estado da Bahia (TANIMOTO, 2004), e outros que tratam da viabilidade da EI em demais ambientes de industriais (TRAMA, 2014).

Diante do que foi elucidado, é possível inferir que a EI no Brasil ainda precisa ser disseminada. As iniciativas do PBSI fomentadas pela FIEMG tiveram resultados positivos, mas em sua maioria foram descontinuadas por falta de suporte técnico, por inviabilidade financeira e talvez por falta de uma implementação que fizesse uso de uma metodologia que visasse ao maior suporte técnico nas etapas iniciais e fomentasse a independência das empresas para a tomada de decisão com ferramentas que dessem suporte para tal. Essas limitações também podem ser entendidas por se tratarem de projetos financiados com orçamento e recursos humanos limitados que envolviam não apenas uma prática industrial, mas mudança de valores e de percepção do sistema industrial tradicional.

As outras iniciativas que se configuram como simbiose industrial ainda não têm o entendimento por parte dos empresários e praticantes de que se trata de atividades de EI, do escopo teórico-metodológico, dos *cases* e das potencialidades de negócios, dos benefícios ambientais e sociais que suas atividades de troca de materiais e fluidos podem proporcionar. A pesquisa brasileira em simbiose industrial, conforme apresentado no estudo cienciométrico, não é muito expressiva e concentra-se em propostas de viabilidade de relações simbióticas em parques e distritos industriais.

CONCLUSÃO

A EI é uma área de estudo interdisciplinar em expansão e mais recentemente foi alocada no contexto teórico da economia circular. A simbiose industrial é uma das principais práticas relatadas nos estudos de EI. As metodologias mais utilizadas para operacionalização e mensuração de seus resultados são a ACV e a AFM. Países da América do Norte, Europa e Ásia já conseguem mensurar os seus resultados obtidos mediante práticas de EI, enquanto países da América do Sul têm grandes oportunidades de ganhos ambientais e econômicos por meio da incorporação de práticas relacionadas à EI.

Ressalta-se que os trabalhos endereçados no Brasil são, em sua maioria, estudos de viabilidade, e não análises de aplicação de técnicas e ferramentas da EI. Em conjunto com a baixa representatividade dos resul-

tados bibliométricos brasileiros em comparação à de outros países, reforçam-se as oportunidades existentes em todo o território nacional para a disseminação dos conceitos e práticas da EI, hoje não mais de forma isolada, mas em uma abordagem integrada pertencente ao contexto da economia circular.

Os trabalhos que propõem a utilização de metodologias mistas (ACV e AFM) dão grandes contribuições teóricas para a área, integrando ferramentas robustas para a tomada de decisão em negócios com perspectivas ambientalmente responsáveis. Por demandarem um grande volume de informações técnicas nem sempre disponíveis aos pesquisadores e profissionais e por necessitar de um arcabouço operacional complexo (*softwares* e metodologias), não são estudos que dão contribuições

diretas para a prática da EI no país, uma vez que estamos em um estágio diferente dos países da América do Norte, Europa e Ásia com relação a esse conteúdo.

Os estudos brasileiros estão concentrados no eixo Sul-Sudeste do país, não retratando possíveis peculiaridades e potencialidades da indústria do Norte-Nordeste, nem conglomerados industriais com funcionamento semelhante a ecoparques e práticas isoladas de EI ainda não estudadas, ou até mesmo não reconhecidas como parte desse conjunto de conhecimentos pelos gestores. Toda a produção também se encontra em língua inglesa e nos periódicos de maior influência da área.

Na perspectiva brasileira, percebe-se que ainda existe um longo caminho a ser trilhado por pesquisadores, empresários e órgãos públicos para a disseminação da EI entre os setores da indústria e da sociedade. Vale salientar que,

pelos oportunidades de produção mais limpa, otimização de processos e diminuição de geração de resíduos, não é necessária, nesse momento a massificação das práticas de simbiose industrial, mas a sua disseminação como ferramenta para otimização de processos e para benefícios ambientais após trabalhos de geração mínima de resíduos pelas empresas, evitando assim que a EI camufle a má gestão e a manutenção dos processos produtivos.

Além da produção mais limpa, outras ferramentas como a logística reversa e os próprios sistemas de gestão ambiental (SGA) são norteadoras de um conjunto de atividades que dão destinação aos materiais gerados sem serventia nos processos produtivos. Como já citado, deve-se evitar que os materiais a serem incorporados nas práticas de EI sejam aqueles gerados ou produzidos em excesso por aspectos do processo produtivo que precisam ser otimizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (422087/2018-1) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí - FAPEPI pelo financiamento de projetos.

REFERÊNCIAS

- AMÓN, R.; WONG, T.; KAZAMA, D.; MAULHARDT, M.; MAULHARDT, T.; SIMMONS, C. W. Assessment of the industrial tomato processing water energy nexus a case study at a processing facility. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 4, p. 904-915, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12600>
- BILLEN, G.; TOUSSAINT, F.; PEETERS, P.; SAPIR, M.; STEENHOUT, A.; VANDERBORGHT, J. P. *L'Ecosysteme Belgique*. Essai d'Ecologie Industrielle. Bruxelas: Centre de Recherche et d'Information Socio-politique-CRISP, 1983.
- CAO, Z.; SHEN, L.; ZHONG, S.; LIU, L.; KONG, H.; SUN, Y. A probabilistic dynamic material flow analysis model for Chinese urban. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 2, p. 377-391, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12579>
- CHEN, W.; GRAEDEL, T. E. In-use product stocks link manufactured capital to natural capital. *PNAS*, v. 112, n. 20, p. 6265-6270, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406866112>
- CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and Environment*, v. 25, p. 313-337, 2000. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- _____. "Uncovering" Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 11, n. 1, p. 11-30, 2007. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1110>
- COELHO, A. C. D. *Bolsa de Resíduos: Portal de oportunidades em produção mais limpa*. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.
- DU, X.; GRAEDEL, T. E. Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology*, v. 15, n. 6, p. 836-843, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00362.x>

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Economia Circular*. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular-1/conceito>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

ELLINGSEN, L. A.-W.; MAJEAU-BETTEZ, G.; SINGH, B.; SRIVASTAVA, A. K.; VALOEN, L. O.; STRØMMAN, A. H. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, v. 18, n. 1, p. 113-124, 2014. <https://doi.org/10.1111/jiec.12072>

ERKMAN, S. Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, v. 5, n. 1-2, p. 1-10, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6)

ERKMAN, S.; FRANCIS, C.; RAMASWAMY, R. *Ecologia Industrial: uma agenda para a evolução do sistema industrial*. São Paulo: Instituto Polis, 2005.

FALLDE, M.; EKLUND, M. Towards a sustainable socio-technical system of biogas for transport : € ping in Sweden the case of the city of Linköping. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, p. 17-28, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.089>

FEDERAÇÃO DA INDÚSTRIA DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). *Portal*. Disponível em: <<https://www7.fiemg.com.br>>. Acesso em: 5 dez. 2018.

FREITAS, G. de; COSTA, H. G.; FERRAZ, F. T. Impacts of Lean Six Sigma over organizational sustainability: a survey study. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 262-275, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.054>

FROSCH, R. A.; GALLOPOULOS, N. E. Strategies for Manufacturing. *Scientific American*, v. 261, n. 3, p. 144-152, 1989.

GRAEDEL, T. E. Grand Challenges in Metal Life Cycles. *Natural Resources Research*, v. 27, n. 2, p. 181-190, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9333-8>

_____. On the concept of industrial ecology: introducing the concepts. *Annual Review of Energy and the Environment*, v. 21, p. 69-98, 1996. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.21.1.69>

_____. The evolution of industrial ecology. *Environmental Science & Technology*, v. 34, n. 1, p. 28-31, 2000. <https://doi.org/10.1021/es003039c>

GRAEDEL, T. E.; ALLWOOD, J.; BIRAT, J.-P.; BUCHERT, M.; HAGELÜKEN, C.; RECK, B. K.; SIBLEY, S. F.; SONNEMANN, G. What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, v. 15, n. 3, p. 355-366, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>

GUSSOW, D.; MEYERS, J. *Industrial Ecology*. 1970.

HARPER, E. M.; DIAO, Z.; PANOUSI, S.; NUSS, P.; ECKELMAN, M. J.; GRAEDEL, T. E. The criticality of four nuclear energy metals. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 95, p. 193-201, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.12.009>

HARPER, E. M.; KAVLAK, G.; BURMEISTER, L.; ECKELMAN, M. J.; ERBIS, S.; ESPINOZA, V. S.; NUSS, P.; GRAEDEL, T. E. Criticality of the geological zinc, tin, and lead family. *Journal of Industrial Ecology*, v. 19, n. 4, p. 628-644, 2015. <https://doi.org/10.1111/jiec.12213>

HERTWICH, E.; HEEREN, N.; KUCZENSKI, B.; MAJEAU-BETTEZ, G.; MYERS, R. J.; PAULIUK, S.; STADLER, K.; LIFSET, R. Nullius in Verba 1 Advancing Data Transparency in Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 1, p. 6-17, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12738>

HOFFMAN, C.; SHAPERO, A. *Providing the industrial ecology required for the survival and growth of small technical companies. An action program for the Ozarks Region*. Report prepared for the Ozarks Regional Commission. Austin: Multi-Disciplinary Research. Inc., 1971.

- JELINSKI, L. W.; GRAEDEL, T. E.; LAUDISE, R. A.; MCCALL, D. W.; PATEL, C. K. Industrial ecology: Concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 89, n. 3, p. 793-797, 1992. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.793>
- KAPUR, A.; GRAEDEL, T. E. Industrial Ecology. *Encyclopedia of Energy*, v. 3, n. 4, p. 373-382, 2004. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00533-7>
- KELLENS, K.; BAUMERS, M.; GUTOWSKI, T. G. FLANAGAN, W.; LIFSET, R.; DUFLOU, J. R. Environmental Dimensions of Additive Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. S1, p. S49-S68, 2017. <https://doi.org/10.1111/jiec.12629>
- LASO, J.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; MARGALLO, M.; CRUJEIRAS, R. M.; IRABIEN, A.; ALDACO, R. Life cycle assessment of European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) landed by purse seine vessels in northern Spain. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 5, p. 1107-1125, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1318-7>
- LEARY, T. E. Shadows in the Cave: Industrial Ecology and Museum Practice. *The Public Historian*, v. 11, n. 4, p. 39-60, 1989.
- LIFSET, R. 3D Printing and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. S1, p. S6-S8, 2017. <https://doi.org/10.1111/jiec.12669>
- LIFSET, R.; GRAEDEL, T. E. Industrial ecology: goals and definitions. In: AYRES, R. U.; AYRES, L. W. *A Handbook of Industrial Ecology*. Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA: Edward Elgar, 2005.
- LIMA, L. B. *Análise das relações de ecologia industrial no polo produtivo sul de Teresina*. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Santo Agostinho, Teresina, 2014.
- MANDERSON, E. J.; CONSIDINE, T. J. An Economic Perspective on Industrial Ecology. *Review of Environmental Economics and Policy*, v. 12, n. 2, p. 304-323, 2018. <https://doi.org/10.1093/reep/rey001>
- MAO, J.; GRAEDEL, T. E. Lead in-use stock a dynamic analysis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 13, n. 1, p. 112-126, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00109.x>
- MORIGUCHI, Y. Industrial Ecology in Japan. *Journal of Industrial Ecology*, v. 4, n. 1, p. 7-9, 2000. <http://dx.doi.org/10.1162/108819800569249>
- NASSAR, N. T.; DU, X.; GRAEDEL, T. E. Criticality of the Rare Earth Elements. *Journal of Industrial Ecology*, v. 19, n. 6, p. 1044-1054, 2015. <https://doi.org/10.1111/jiec.12237>
- PAGOROPOULOS, A.; KJAER, L. L.; DONG, Y.; BIRKVED, M.; MCALOONE, T. C. Economic and Environmental Impact Trade-Offs Related to In-Water Hull Cleanings of Merchant Vessels. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 4, p. 916-929, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12627>
- PEREY, R.; BENN, S.; EDWARDS, M. The place of waste: Changing business value for the circular economy. *Business Strategy and the Environment*, v. 27, n. 5, p. 631-642, 2018.
- PERINETTO, A.; SILVA, C. S. de S. da; KOHL, C. A.; SILVA, I. C. da. Análise da implementação do projeto simbiose industrial no Rio Grande do Sul. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 7., 2016. *Anais...* 2016.
- PRAKASH, C.; BARUA, M. K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 37, n. 3, p. 599-615, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.03.001>
- SAAVEDRA, Y. M. B.; IRRITANI, D.; PAVAN, A. L.; OMETTO, A. Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, n. 1, p. 1514-1522, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>

- SANYÉ-MENGUAL, E.; MARTINEZ-BLANCO, J.; FINKBEINER, M.; CERDÀ, M.; CAMARGO, M.; OMETTO, A. R.; VELÁSQUEZ, L. S.; VILLADA, G.; NIZA, S.; PINA, A.; FERREIRA, G.; OLIVER-SOLÀ, J.; MONTERO, J. I.; RIERADEVALL, J. Urban horticulture in retail parks: Environmental assessment of the potential implementation of rooftop greenhouses in European and South American cities. *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 3081-3091, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103>
- SCHANDL, H.; FISCHER-KOWALSKI, M.; WEST, J.; GILJUM, S.; DITTRICH, M.; EISENMENGER, N.; GESCHKE, A.; LIEBER, M.; WIELAND, H.; SCHAFFARTZIK, A.; KRAUSMANN, F.; GIERLINGER, S.; HOSKING, K.; LENZEN, M.; TANIKAWA, H.; MIATTO, A.; FISHMAN, T. Global Material Flows and Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, n. 4, p. 827-838, 2018. <https://doi.org/10.1111/jiec.12626>
- SISTEMA INTEGRADO DE BOLSA DE RESÍDUOS (SIBR). *Portal*. Disponível em: <http://www.sibr.com.br/sibr/index_cni.jsp>. Acesso em: 7 dez. 2018.
- SILVA, D. A. L.; OLIVEIRA, J. A.; SAAVEDRA, Y. M. B.; OMETTO, A. R.; PONS, J. R.; DURANY, X. G. Combined MFA and LCA approach to evaluate the metabolism of service polygons: A case study on a university campus. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 94, p. 157-168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.001>
- SINGH, B.; GUEST, G.; BRIGHT, R. M.; STRØMMAN, A. H. Life Cycle Assessment of Electric and Fuel Cell Vehicle Transport Based on Forest Biomass. *Journal of Industrial Ecology*, v. 18, n. 2, p. 176-186, 2014. <https://doi.org/10.1111/jiec.12098>
- SOULIER, M.; PFAFF, M.; GOLDMANN, D.; WALZ, R.; GENG, Y.; ZHANG, L.; ESPINOZA, L. A. T. The Chinese copper cycle: Tracing copper through the economy with dynamic substance flow and input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 435-447, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.243>
- SOUZA, D. M.; MENDONÇA, F. M.; ALVES NUNES, K. R.; VALLE, R. Environmental and Socioeconomic Analysis of Producing Biodiesel from Used Cooking Oil in Rio de Janeiro The Case of the Copacabana District. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, n. 4, p. 459-664, 2012. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00517.x>
- TANIMOTO, A. H. *Proposta de simbiose industrial para minimizar os resíduos sólidos no Pólo Petroquímico de Camaçari*. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.
- TAYLOR, T. B.; HUMPHSTONE, C. *The restoration of the Earth*. Nova York: Harper and Row, 1972.
- THOMSEN, M.; SEGHETTA, M.; MIKKELSEN, M. H.; GYLDENKAERNE, S.; BECKER, T.; CARO, D.; FREDERIKSEN, P. Comparative life cycle assessment of biowaste to resource management systems – A Danish case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, n. 4, p. 4050-4058, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.034>
- TIBBS, H. *Industrial Ecology: an Environmental Agenda for Industry*. Emeryville, CA: Global Business Network, 1993.
- TRAMA, C. P. *Um estudo sobre Ecologia Industrial e avaliação da possibilidade de adaptação e transformação de Distritos Industriais em Parques Industriais Ecológicos: o caso do Município de Vespasiano, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG*. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- WEISZ, H.; SUH, S.; GRAEDEL, T. E. Industrial Ecology: The role of manufactured capital in sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 112, n. 20, p. 6260-6264, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1506532112>
- YAZAN, D. M.; FRACCASCIA, L.; MES, M.; ZIJM, H. Cooperation in manure-based biogas production networks : An agent-based modeling approach. *Applied Energy*, v. 212, p. 820-833, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.074>

