



Encontro Internacional sobre Gestão
Empresarial e Meio Ambiente

ISSN: 2359-1048
Dezembro 2016

ECONOMIA CIRCULAR E RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A EFICIÊNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA

ALLAN FOSTER

foster347@gmail.com

SAMANTA SOUZA ROBERTO

samantaroberto02@gmail.com

ALEXANDRE TOSHIRO IGARI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

alexandre.igari@usp.br

ECONOMIA CIRCULAR E RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A EFICIÊNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA

Resumo

As atividades produtivas geram impactos ambientais, principalmente ao extrair grandes quantidades de matéria prima e ao produzir elevado montante de resíduos e rejeitos. A Economia Circular propõe o fechamento dos processos produtivos lineares, com a reinserção dos resíduos no ciclo produtivo, minimizando a disposição no ambiente e também a extração de matéria prima. Esta pesquisa tem como objetivo apresentar um panorama dos casos de fechamento de ciclos produtivos já publicados na literatura científica, a fim de avaliar sua eficiência ambiental e econômica, considerando como indicadores: quantidade de material reinserido no ciclo; energia; recursos hídricos; emissões atmosféricas; e custo/benefício econômico. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática a partir da plataforma *Scopus* sobre as publicações científicas em língua inglesa. Como principais resultados, nota-se a predominância de casos de fechamento de ciclo na China (possivelmente por efeito da implementação de legislação local) e quase a totalidade dos casos apresentando ganhos de eficiência ambiental ou econômica. Praticamente não há casos que relatam efeitos adversos nos indicadores econômicos ou ambientais. Entretanto, a escassez de estudos que avaliem um conjunto maior de aspectos ambientais e econômicos dos fechamentos de ciclos produtivos pode implicar que os ganhos desses processos possam estar sendo superestimados.

Palavras-chave: Economia circular; Resíduos sólidos; Produção de ciclo fechado; Eficiência econômica e ambiental.

CIRCULAR ECONOMY AND SOLID WASTE: A SYSTEMATIC REVIEW ON ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY

Abstract

Productive activities cause environmental impacts, mainly regarding substantive raw material extraction and waste disposal. Circular Economy proposes to reintroduce productive residues into value chain, in order to minimize waste disposal on environment and also to reduce material extraction. This research aims to present a perspective of this closed-loop production across the scientific literature, in order to evaluate their environmental and economic efficiency. The research addressed the following indicators: amount of reintroduced material; energy; water resources; atmospheric emissions; and economic cost/benefit. This study carried out a systematic literature review on Scopus repository platform, retrieving English-written scientific production. There were a predominance of closing-loop cases on China (possibly an effect of implementation of local laws) and almost all cases pointed out gains on environmental or economic efficiency. Just a few cases showed closing-loop negative results on economic or environmental indicators. However, the lack of studies which investigate a broader set of environmental and economic aspects of closed-loop production suggest that the gains of these processes might be overestimated.

Key Words: Circular economy; Solid waste; Closed-loop production; Economic and environmental efficiency.

Introdução

O processo produtivo interage com o meio ambiente, sobretudo, durante as entradas e saídas de matéria e energia. Até meados do século XVIII, a produção de bens de consumo era feita artesanalmente ou em manufaturas, desta forma, a produção era lenta, pouco intensiva e com baixo volume. Após a Revolução Industrial, devido às inovações tecnológicas, foi possível aumentar substancialmente a produtividade e o volume total produzido, o que tornou os impactos do processo produtivo no ambiente muito mais intensos.

O modelo de produção predominante desde o fenômeno da industrialização é linear, ou seja, extrai-se a matéria prima, produz-se um bem, tal bem é consumido e em seguida descartado. Com isso, há a geração de resíduos e rejeitos e a dissipação de energia ao longo do processo produtivo. Tal modelo de produção pressupõe a depleção contínua de recursos naturais e também caracteriza-se pelo descarte acelerado e precoce dos bens consumidos. Assim, com o aumento da produção e do consumo, ocorre o aumento da extração de recursos naturais e da deposição de resíduos, provenientes do processo produtivo e também do pós-consumo.

Dois fatores fomentam e multiplicam os impactos negativos dos processos produtivos no meio ambiente, o aumento populacional e a intensificação do consumo *per capita*. De acordo com o *Living Planet Report* (McLellan *et al.*, 2014), a Pegada Ecológica mundial – uma estimativa da quantidade de área necessária para suprir todos os bens e serviços ecológicos usados pela população mundial - ultrapassa em 50% a biocapacidade do planeta. A biocapacidade é entendida nesta avaliação como a quantidade de terras disponíveis para prover esses bens e serviços. Assim, embora haja marcantes discrepâncias regionais, atualmente a população mundial necessita de 1,5 planetas para atender às suas necessidades.

A gestão de resíduos sólidos encontra desafios que intensificam-se na medida que o modelo linear de produção e o consumo de bens e serviços acelera o ritmo de descarte de materiais. Segundo o relatório *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*, publicado pelo Banco Mundial (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012), a geração de resíduos sólidos urbanos alcança cerca de 1,3 bilhão de toneladas por ano no mundo. As prospecções feitas no relatório preveem que até 2025, a geração de resíduos possa chegar a 2,2 bilhões de toneladas por ano. Desse montante, a maior parte é destinada para aterros sanitários (destinação mais utilizada no mundo), seguida pelos processos de reciclagem, incineração, despejo em lixões e compostagem.

Estas alternativas de destinação são causadoras de diversos impactos ambientais. O aterramento, forma de destinação de resíduos mais antiga, torna-se cada vez mais limitada devido à oferta restrita de espaço, especialmente nas proximidades das grandes concentrações urbanas. Além disso, a produção de chorume e a ausência de tratamento adequado acarretam em significativa poluição dos solos e corpos d'água próximos a esses locais. A incineração também pode trazer diversos problemas ambientais, pois o processo, além emitir gases de efeito estufa (GEE), dioxinas e outros poluentes atmosféricos, permanece gerando resíduos sólidos que demandam destinação.

Tendo em vista que as destinações atuais não são capazes de solucionar satisfatoriamente os problemas ambientais relacionados aos resíduos sólidos, existe a necessidade de encontrar não apenas alternativas de disposição final, mas opções que considerem o problema dos resíduos de forma sistêmica e que englobem o modelo produtivo como um todo. Uma das soluções que visa a reestruturação do modelo produtivo é a Economia Circular. A Economia Circular propõe, em linhas gerais, a reinserção dos materiais no ciclo produtivo, visando minimizar a deposição no ambiente e consequentemente evitando a geração de impactos ambientais negativos.

O fechamento de ciclos proposto pela Economia Circular já foi adotado em diversos processos produtivos, com crescente documentação na literatura científica, e vem

estabelecendo-se progressivamente como modelo de gestão ambiental. Entretanto, a consolidação da Economia Circular como modelo para gestão de resíduos sólidos depende da avaliação a respeito da eficiência econômica e ambiental das experiências documentadas, o que contribui para o estabelecimento de parâmetros para comparação com outras soluções de gestão.

Objetivos

Objetivo Geral

Estruturar um panorama global sobre a eficiência ambiental e econômica de experiências da Economia Circular para Gestão de Resíduos Sólidos.

Objetivos Específicos

- Identificar e sintetizar a avaliação de eficiência ambiental de processos de fechamento de ciclos de resíduos sólidos.
- Identificar e sintetizar a avaliação de eficiência econômica de processos de fechamento de ciclos de resíduos sólidos.
- Identificar se, e porventura como, é realizada a avaliação de eficiência de processos de fechamento de ciclos de resíduos sólidos com relação à energia, recursos hídricos e emissões atmosféricas.

Referencial Teórico

Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos têm grande diversidade de definição, variando de acordo com a localização e contexto no qual estão inseridos. Sua definição varia, principalmente, a partir de seu escopo de gestão, podendo ser classificados de diversas formas. Segundo a definição dada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal 12.305/2010), o resíduo sólido é:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder, nos estados sólidos ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.
(Brasil, 2010)

Segundo Hoornweg *et al.* (2013), apesar dos esforços para a redução da produção de resíduos na maioria dos países desenvolvidos, em 100 anos (de 1900 a 2000) a produção de resíduos nas áreas urbanas cresceu mais de 10 vezes (de menos de 300.000 ton/dia para mais de 3 milhões ton/dia), quase a mesma proporção que o aumento populacional nessas áreas. Nos países emergentes, com a perspectiva de crescimento econômico, o pico da produção de resíduos está longe de ser atingido (Hoornweg *et al.* 2013). Como a geração de resíduos tende a crescer em consonância com o aumento do PIB (Campos, 2012), é esperado que o aumento da geração de resíduos ocorra predominantemente nos países emergentes (Hoornweg *et al.*, 2013).

A composição dos resíduos tem uma contribuição cada vez maior de elementos sintéticos e poluentes, sendo muitas vezes fontes de compostos orgânicos voláteis, pesticidas, solventes e metais pesados (Gouveia, 2012), o que representa um perigo crescente para os

ecossistemas e para a saúde humana. Apesar das consequências negativas da disposição inadequada dos resíduos, grande parte deles ainda não tem destinação apropriada. No Brasil, em 2013, cerca de 42% dos resíduos sólidos urbanos foram destinados de forma inadequada, em aterros controlados e lixões (Abrelpe, 2014), caracterizando um quadro alarmante de poluição ambiental.

Mesmo quando ocorre destinação a aterros sanitários, a mais comum entre as classificadas como adequadas, a disposição em solo pode fazer com que os resíduos sólidos, durante o processo de decomposição, contaminem os corpos hídricos superficiais e subterrâneos próximos e ainda deteriore a qualidade do solo no local. Outros impactos associados incluem o comprometimento de grandes espaços, a proliferação de vetores de doenças e a emissão de metano, segundo gás com maior contribuição para o fenômeno do aquecimento global (Gouveia, 2012). Segundo o IPCC, a disposição de resíduos em solo e o tratamento de efluentes representam 3% de toda emissão de GEE no planeta e até 20% do total de emissão de metano relacionados a atividades antrópicas (IPCC, 2007).

Quando trata-se de lixões, a situação é ainda pior, pois a falta de controle e a vulnerabilidade social acabam atraindo pessoas que, além de serem impactadas indiretamente por todos os efeitos anteriormente citados, acabam expostas a diversas doenças e sujeitas a risco de contaminação ainda mais grave. A falta de planejamento e de implantação de estruturas adequadas faz com que os impactos ambientais negativos nesses locais sejam ainda mais acentuados. No Brasil, apesar de serem considerados proibidos desde a promulgação da lei 12.305/10, quase 34 mil toneladas de resíduos por dia foram destinadas a lixões (Abrelpe, 2014).

No caso da incineração, destinação muito utilizada nos países nórdicos devido às vantagens de redução do volume dos resíduos, possibilidade de aproveitamento energético e eliminação de até 90% dos patógenos e tóxicos (Russo, 2003), a ausência de controle adequado dos gases em projetos menos eficientes faz com que os efeitos da poluição e da emissão de partículas possam ser sentidos a grandes distâncias, devido à dispersão da poluição atmosférica (Gouveia, 2012).

O processo de incineração de resíduos sólidos urbanos pode produzir diversas substâncias tóxicas que são emitidas na atmosfera, como dioxinas, gases de mercúrio e furanos. Além disso, muitas vezes, as cinzas resultantes do processo, que são encaminhadas para aterros sanitários, tem alto teor de metais pesados, substâncias consideradas carcinogênicas pela IARC (*International Agency for Research in Cancer*) e que, por não serem biodegradáveis, apresentam efeito cumulativo no ambiente (Gouveia e Prado, 2010; Russo, 2003).

Tendo em vista que um brasileiro produz, em média, 1kg de resíduo por dia (MMA, 2012), e deste montante, aproximadamente 500g é composto de matéria orgânica, uma das soluções de processamento mais promissoras seria a compostagem. Trata-se de um processo de reciclagem natural de matéria orgânica que, apesar das muitas vantagens, como a produção de adubo natural não susceptível a lixiviação, é aplicado apenas a 3% dos resíduos orgânicos no Brasil (CEMPRE, 2013).

Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

Após uma tramitação de duas décadas, a Lei Federal 12.305 de 2010 (Brasil, 2010) instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que propõe uma gestão de resíduos sólidos mais sistêmica e expande a responsabilidade sobre a gestão de resíduos aos agentes da cadeia produtiva, passando a dar maior relevância aos processos anteriores ao descarte, como a redução na geração, reaproveitamento do material e reciclagem. Também merece ser destacada na PNRS a recomendação quanto ao *design* dos produtos, que deve facilitar os processos de reciclagem, assim como o direcionamento para a integração prioritária de

catadores nos serviços de coleta seletiva e logística reversa, como forma de combater as desigualdades sociais.

Os acordos setoriais previstos na PNRS representam elementos fundamentais no equacionamento das responsabilidades sobre a gestão de resíduos sólidos ao longo das cadeias produtivas. Segundo o MMA (2012), um acordo setorial é um “ato de natureza contratual firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos”. O conceito de Responsabilidade Compartilhada, por sua vez, é elucidado no próprio texto da lei 12.305/10, e expressa bem a sua complexidade de gestão:

Responsabilidade Compartilhada - O conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei. (Brasil, 2010)

Essa definição representa o entendimento da política ambiental brasileira em relação à maneira como o aprimoramento do gerenciamento de resíduos sólidos deve ocorrer: relacionando todas as partes envolvidas na problemática dos resíduos sólidos, determinando suas respectivas responsabilidades de forma individualizada e encadeada, e estimulando soluções coletivas.

Ecologia Industrial

Em um mundo com recursos finitos é impossível ter uma produção linear, com crescimento ilimitado. Assim, a Ecologia Industrial surge com a proposta de espelhar-se em sistemas naturais como modelos para a atividade industrial, devido ao fato dos ecossistemas biológicos possuírem grande eficiência na ciclagem de materiais e energia. Dessa forma, há ênfase na reciclagem de resíduos e subprodutos do processo produtivo, na minimização do uso de recursos naturais e na adoção de tecnologias mais limpas (Ayres e Ayres, 2002).

A Ecologia Industrial foca na reestruturação dos processos produtivos e no *design* de produtos. As indústrias são vistas como potenciais agentes para a melhoria ambiental, pois possuem o capital humano e tecnológico necessário para desenvolver suas atividades e produtos, levando em conta seus impactos ambientais. Contudo, as tentativas de melhora de eficiência energética ou limitação de impactos negativos no ambiente ocorreram predominantemente quando tais medidas foram impostas pela legislação ou quando há claras vantagens econômicas. (Ayres e Ayres 2002).

Simbiose Industrial

O conceito de simbiose industrial foi popularizado por Robert Frosch e Nicholas Gallopoulos em um artigo científico publicado em 1989 e foi definido como um modelo integrado para otimizar o consumo de matéria e energia ao mesmo tempo em que promove a minimização da geração de resíduos, pois os efluentes e resíduos de um processo são a matéria prima para outro processo (Zhang *et al.*, 2009).

A simbiose industrial busca mimetizar os ecossistemas naturais ao promover a ciclagem de matéria e aproveitamento de energia entre indústrias tradicionalmente distintas e assim aumentar a eficiência do uso de recursos (Chertow *et al.*, 2008). A associação entre indústrias pode trazer redução de custos e vantagens competitivas, além de diminuir o

impacto ambiental das mesmas ao reduzir os níveis de poluição, geração de resíduos e extração de recursos naturais (Zhang *et al.*, 2009).

Os casos de fechamento de ciclos geralmente ocorrem em um de três níveis. O primeiro nível diz respeito a empresas ou pequenos grupos de empresas que agem para melhoria de sua eficiência energética e de recursos. Este caso é conhecido por produção mais limpa (*cleaner production*) (Mathews e Tan, 2011).

O segundo nível se dá quando um grupo de empresas, geralmente próximas geograficamente, se organiza em um parque industrial para tomada de ações coletivas que melhorem a eficiência energética e de recursos do parque. Este nível é objeto de estudo da ecologia industrial e é denominado como simbiose industrial. A identificação de fluxos de matéria e energia entre as empresas do parque industrial é o que se denomina metabolismo industrial. Quando as indústrias são planejadas na sua concepção para fazerem parte de um parque industrial, juntamente com outras indústrias, a fim de partilhar estruturas e recursos, recebem a denominação de ecoparque industrial (Mathews e Tan, 2011).

O terceiro e último nível de fechamento de ciclos envolve a participação de toda uma cidade ou área municipal. Os processos interconectados são incentivados econômica e administrativamente ao passo que ausências de interconectividade são penalizadas. Este último nível é encontrado principalmente na China (Mathews e Tan, 2011).

Economia Circular

A Economia Circular compartilha com a Ecologia Industrial a ambição de reformar o sistema econômico linear e unidirecional de extração, produção e deposição, e assim diminuir o uso de recursos naturais e a produção de resíduos (Berndtsson, 2015). Nesta proposição os processos produtivos passam a serem concebidos e reformulados de forma circular, significando que os recursos naturais são inicialmente obtidos do ambiente, mas, depois disso, tornam-se ativos produtivos permanentemente reciclados nas cadeias de valor (Bonciu, 2014).

A Economia Circular implica no fim da sociedade do descarte. Significaria a renúncia do padrão “fazer, usar, descartar” como uma forma alternativa de organizar a produção, e a transição para a abordagem “reúso e reciclagem”. Uma definição breve de Economia Circular é “quando seus *outputs* tornam-se seus *inputs*” (Bonciu, 2014).

O fechamento das cadeias produtivas ganha crescente importância na medida que, mesmo com o aumento de ecoeficiência, a disponibilidade de muitos recursos não-renováveis, como metais e combustíveis fósseis, não é suficiente para atender à atual demanda humana e, além disso, a capacidade regenerativa de recursos renováveis, como florestas e água, é inferior às taxas de extração desses recursos (Braungart e McDonough, 2008; Berndtsson, 2015).

A Economia Circular permeia todas as atividades produtivas. Os processos, serviços e produtos devem ser desenhados de forma que sejam mais duráveis, reparáveis e atualizáveis, para permitir a remanufatura e a reciclagem pela mesma indústria ou por outras. Assim, a diferença fundamental entre a economia circular e a linear consiste no fato que na economia circular, produtos, serviços e processos industriais são projetados e concebidos de forma que permitam um ciclo de vida mais longo e a possibilidade de serem reparados, atualizados ou restaurados (Bonciu, 2014).

Além disso, na fase de *design* de produtos e serviços deve-se levar em conta que quando seu ciclo de vida acabar, eles serão recursos produtivos para outras indústrias (Bonciu, 2014). A operacionalização da Economia Circular requererá uma extensa rede de relações e colaboração entre as companhias de diferentes setores econômicos e entre empresas e consumidores (Bonciu, 2014). Esse aspecto também sinaliza que a Economia Circular requererá mudanças na educação, valores e comportamentos de produtores e consumidores.

A forma como a reciclagem é empreendida atualmente pouco reduz disposição de resíduos ao fim de cadeias produtivas, ainda predominantemente lineares, com processos pouco eficientes. A reciclagem de produtos não projetados *a priori* para este processamento na fase de pós uso resulta em reciclados de menor qualidade e valor em comparação aos produtos originais (*downcycling*). A proposição da Economia Circular de projetos de berço a berço (*cradle to cradle*) consiste em conceber produtos e sistemas industriais que sejam capazes de manter a qualidade e produtividade dos materiais em ciclos de vidas subsequentes (Berndtsson, 2015).

Procedimentos Metodológicos

Um estudo baseado no método de revisão sistemática utiliza a aplicação de métodos explícitos e sistemáticos de pesquisa e síntese de informação, a fim de responder alguma pergunta específica (Sampaio e Mancini, 2007). Avalia de forma crítica e buscando sintetizar resultados de estudos primários, tratando-se, portanto, de um estudo retrospectivo. Por ter como objetivo a construção de uma reflexão crítica do material analisado, a revisão sistemática propõe a otimização das pesquisas por dados, buscando pelo maior número possível de resultados adequados (Sampaio e Mancini, 2007).

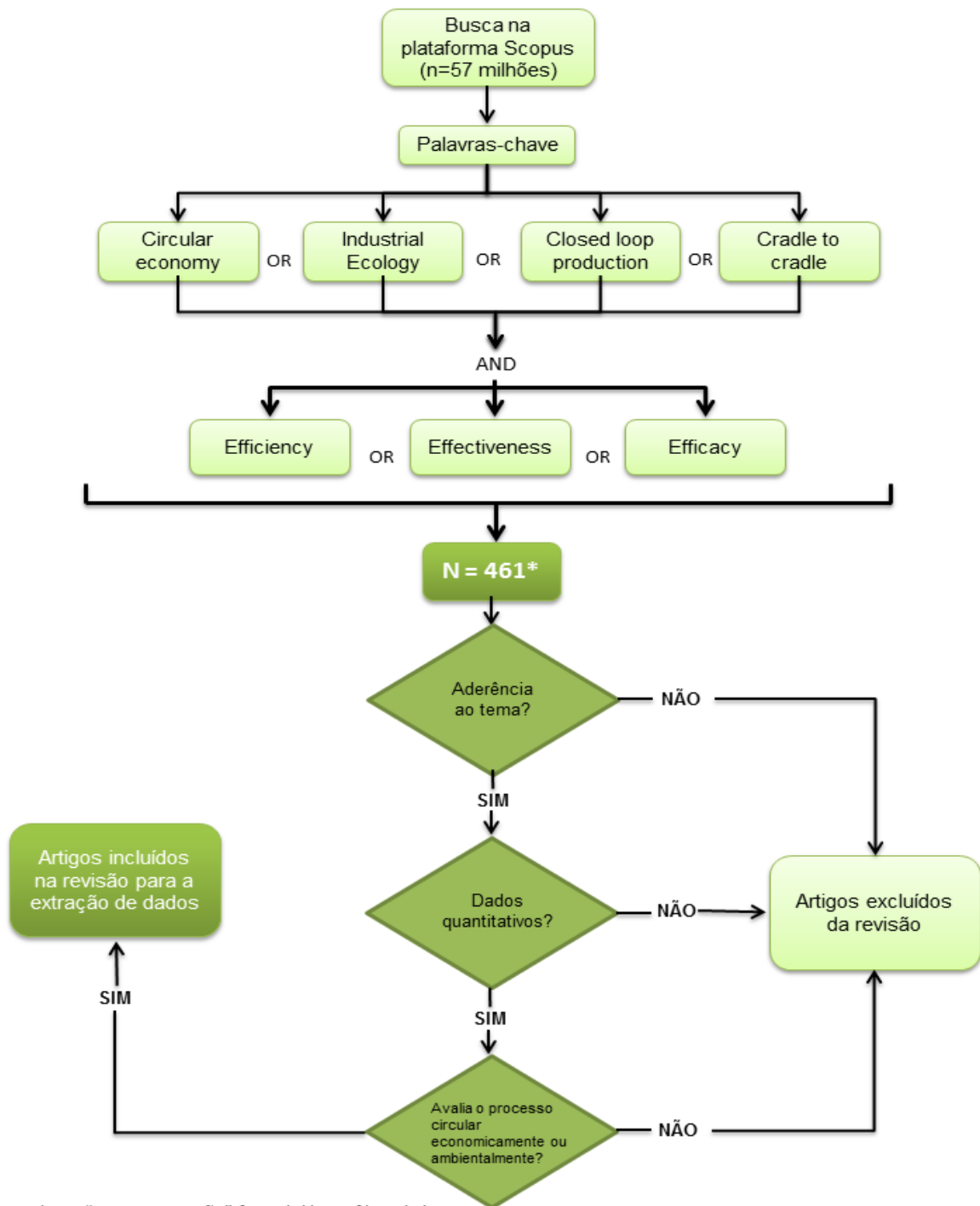
Segundo Sampaio e Mancini (2007), o primeiro passo para a elaboração de uma revisão sistemática é a definição da pergunta, que deve ser clara e bem elaborada, a fim de conduzir uma boa investigação científica. No caso deste trabalho, a questão direcionadora é: “Os processos de fechamento de ciclo envolvidos na aplicação da Economia Circular são eficazes econômica e ambientalmente?”.

O passo seguinte consiste em delimitar as fontes de dados e palavras-chave de busca. A base de dados escolhida foi o banco de publicações *Scopus*. Devido à literatura neste campo ser ainda muito limitada na língua portuguesa, foram utilizadas como palavras-chave termos em inglês que expressam ou relacionam-se de forma muito próxima à temática tratada: “Circular Economy” (Economia Circular), “Industrial Ecology” (Ecologia Industrial), “Closed loop production” (produção de ciclo fechado) e “Cradle to cradle” (do berço a berço). A este primeiro conjunto de termos de busca foi associado um conjunto de palavras-chave de restrição: “Efficiency” (eficiência), “Effectiveness” (efetividade) e “Efficacy” (eficácia), utilizando a sintaxe “AND” entre os dois conjuntos – figura 1. Outro critério de inclusão da pesquisa foi a restrição de filtro de busca, disponível na própria plataforma, apenas para Artigos ou Revisões.

Posteriormente à busca de resultados, foram aplicados os critérios de exclusão do material encontrado (Sampaio e Mancini, 2007). São excluídos do presente estudo publicações que não atendam a qualquer um dos seguintes critérios:

- Aderência da publicação ao tema deste estudo;
- Publicações que apresentam dados quantitativos;
- Avaliação econômica e/ou ambiental do processo de fechamento de ciclo.

O critério de “Aderência ao tema deste estudo”, tem como objetivo restringir a busca apenas a publicações que têm como temática principal casos de fechamentos de ciclos produtivos como, por exemplo, a simbiose industrial e a reciclagem de materiais e/ou energia. Abaixo, a figura 1 sintetiza o processo de seleção das publicações com a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão:



*A tipologia "artigo ou revisão" foi incluída no filtro de busca.

Figura 1: Fluxograma com critérios de inclusão e exclusão de publicações utilizadas na revisão sistemática

Fonte: Elaborada pelos autores

A aplicação dos critérios de exclusão foi realizada a partir da leitura dos títulos e resumos das publicações. Quando a leitura do título e resumo não foi suficiente para determinar a relevância da publicação para a revisão, foram analisados os métodos e, se ainda assim a aderência à pesquisa não ficou clara, a leitura ocorreu de forma integral. Por fim, todos os resultados das publicações selecionadas foram sintetizados e analisados.

Resultados e Discussão

A produção científica referente ao tema é relativamente recente, com as primeiras publicações em 1993 e um marcante aumento de documentos a partir de 2007. A aplicação dos critérios de inclusão selecionou um conjunto de 461 publicações para posterior análise (Fig. 1), composto por artigos (91%) e revisões (9%). Deste total, 29 publicações atenderam simultaneamente aos critérios de “aderência ao tema”, “apresentação de dados quantitativos” e “avaliação de parâmetros ambientais ou econômicos do fechamento dos ciclos produtivos” (Fig. 1). Destas publicações, apenas uma não foi utilizada na revisão, pois apesar de responder positivamente a todos os critérios, a apresentação dos dados predominantemente em gráficos impossibilitou a extração satisfatória de informações.

Essas 28 publicações representam 96 casos de fechamento de ciclos produtivos, que foram analisados considerando: o país onde ocorreu, o setor industrial, quando disponível, as empresas/atividades envolvidas no estudo e o material analisado. Em relação aos indicadores econômicos, identificaram-se o custo do fechamento de ciclo, o benefício trazido pelo mesmo e alguma medida de custo-benefício quando a disponibilidade dos dados permitiu. Em relação à eficiência ambiental, foi avaliada a reinserção de material no ciclo produtivo, a economia ou gasto de energia e água e as emissões resultantes. O quadro 1 ilustra a estrutura utilizada na análise dos dados a partir dos casos extraídos de 7 das 28 publicações selecionadas.

Dos casos analisados, 64,58% abordavam experiências reais e 35,42% propunham simulações a partir de modelos, incluindo a aplicação de Análises do Ciclo de Vida (ACV). Durante a extração de dados das publicações, foram encontrados dados em diversas unidades, às vezes relativizados em percentuais, outras vezes em valores absolutos. Sempre que possível, buscou-se relativizar os dados a fim de aumentar a possibilidade de comparação dos resultados. Nenhum dos casos apresentou informações em relação a todos os indicadores estabelecidos. Setenta casos apresentaram somente indicadores ambientais, cinco casos relataram somente indicadores econômicos e 21 apresentaram ambas categorias.

Dentre os 26 casos que apresentaram análises econômicas, em apenas quatro foi possível estabelecer alguma relação de custo-benefício. O maior retorno econômico sobre investimento para fechamento do ciclo foi de 29,25% a.a. (Han *et al.*, 2006 – Quadro 1), e o menor, de 0,39% a.a. (Hu *et al.*, 2011 – Quadro 1). Apesar do elevado valor do retorno máximo, os retornos sobre investimento nos demais casos também apresentam retornos sobre investimento bastante discretos, de 3,3% a.a. e 1% a.a. (Chang *et al.*, 2011 – Quadro 1). Além disso, o retorno de 3,3% a.a., apresentado por Chang *et al.* (2011), na verdade seria negativo, pois a energia elétrica gerada é cerca de 3000 vezes mais cara que a disponível no grid local, e o projeto somente ganha viabilidade financeira a partir do aporte de recursos de venda das Reduções Certificadas de Emissões (RCE) resultantes da categorização do projeto como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Cabe observar que estes últimos três resultados seriam insuficientes para conferir viabilidade financeira em países com altos custos de oportunidade como o Brasil.

Sob a perspectiva ambiental, 25 casos apresentaram indicadores relativos à energia, 16 em relação à água e 20 apresentaram indicadores de emissão atmosférica. O indicador ambiental que apresenta o maior número de resultados é o de material reinserido no processo, um total de 71 casos, o que deve-se à delimitação do escopo deste estudo. Assim como nos demais indicadores de eficiência ambiental, este indicador também variou largamente entre os casos na literatura. Devido à diversidade de materiais, torna-se difícil uma comparação padronizada, mesmo assim, destacam-se casos de reinserção de 68% de escória em cimenteira (Hara *et al.*, 2011 – Quadro 1), de 95% de alumínio (Pearce, 2008 – Quadro 1) e 98% de H₂SO₄ em indústria cloro-alcalina (Mathews e Tan, 2011).

Quadro 1: Compilação dos dados de eficiência econômica e ambiental extraídos de 7 das 28 publicações a

Caso estudado					Eficiência econômica do fechamento do ciclo			Eficiência ambiental	
Artigo	País	Setor/ Parque Industrial	Interação	Material analisado	Custo	Benefício	Custo/ Benefício do fechamento do ciclo	Material reinserido	Energia
Chang <i>et al.</i> , 2011	China	Agropecuária e energia	Bovinocultura para biodigestor	Biomassa, biogás e energia elétrica	60.000.000 RMB	2.000.000 RMB /ano (MDL)	3,3% a.a.	-	energia gerada é cerca de 3000 vezes mais cara
			Suinocultura para biodigestor		4.500.000 RMB	45.000 RMB /ano	1% a.a.	-	-
			Agropecuária para biodigestor		5.100.000 RMB	-	-	-	-
Han <i>et al.</i> , 2006	China	Criação de veados	-	Fertilizante orgânico a partir de estrume	14.700.000 RMB	4.300.000 RMB/ano	29,25% a.a.	40% menos fertilizante químico	-
Hara K. <i>et al.</i> , 2011	China	Siderúrgico e Cimenteiro	Siderúrgica para Cimenteira	Escória e cinzas	-	-	-	68%	-
			Casas para Siderúrgica	Plástico	-	-	-	30%	-
Hu <i>et al.</i> , 2011	China	Indústria de curtume	-	-	904.000.000 RMB	3.500.000 RMB/ano	0,39% a.a	economia de 235 t Na ₂ S/ano economia de 840 t CaO/ano	economia de 150 MW/ano
Jiménez Rivero <i>et al.</i> , 2016	União Europeia	Gesso	-	Gesso	-	-	-	5%	0
					-	-	-	18,72%	gasto de 0,53 MJ/m ² gesso

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 1: Compilação dos dados de eficiência econômica e ambiental extraídos de 7 das 28 publicações a

Caso estudado					Eficiência econômica do fechamento do ciclo			Eficiência
Artigo	País	Setor/ Parque Industrial	Interação	Material analisado	Custo	Benefício	Custo/benefício do fechamento do ciclo	Material reinserido
Park e Behera, 2014	Coréia do Sul	Ulsan	Incineradora de resíduos para Indústria de papel	Vapor	-	-	-	-
			ETE Municipal para Petroquímica	Efluente	-	-	-	redução de 38,9% no consumo de carbono
			Incineradora de resíduos para Indústria de ácido tereftálico	Vapor	-	-	-	-
			Química 1 para Química 2	Vapor	-	-	-	-
			Processadora de zinco para Indústria de tinta	Pó de zinco	-	-	-	redução de 14,1% no consumo de Zn
			Processadora de zinco para Indústria de papel	CO ₂ e vapor	-	-	-	-
			Química 3 para Química 4	Vapor	-	-	-	-
Pearce, 2008	EUA	Paineis Fotovoltaicos	Recicladora para Painel Solar	-	-	-	-	95% de Al e 20% de vidro

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foram registrados apenas dois artigos em que os casos de fechamento de ciclo implicaram em prejuízo em outro indicador de eficiência ambiental: Giurco *et al.*(2011) estimaram o aumento de gasto de energia para 5 alternativas de tratamento de água na Austrália; e Jimenez-Rivero *et al.*(2016) estimaram o aumento de consumo de energia e de emissões de gases de efeito estufa para dois cenários (um real e outro hipotético) de reciclagem de gesso na União Européia (Quadro 1).

A revisão não identificou resultados de perdas econômicas com o fechamento dos ciclos produtivos. Mesmo quando a viabilidade dos projetos parecia estar claramente comprometida, como em Chang *et al.* (2011), que observaram que a energia elétrica gerada a partir do biogás de estrume bovino seria cerca de 3000 vezes mais cara que a disponível no grid local, a eficiência econômica do processo foi destacada na publicação como resultado do aporte de recursos da venda de RCEs. A escassez de estudos que apresentem com mais abrangência os custos ambientais e econômicos dos fechamentos de ciclos produtivos pode indicar que a eficiência desses processos possa estar sendo superestimada.

É marcante a predominância de casos de fechamentos de ciclos na China, que apresentou mais do que o dobro de casos dos EUA (Fig. 2). Este cenário pode ser interpretado como resultado da aprovação na China, em 2008, da Lei de Promoção da Economia Circular, o primeiro marco legal no mundo a estabelecer a Economia Circular como estratégia nacional de desenvolvimento econômico e social (Mathews e Tan, 2011). Em grande parte das publicações analisadas, a escassez de recursos apresenta-se como motivação para a aplicação do conceito de Economia Circular, seja a escassez da própria matéria-prima, ou de insumos como água e energia. Benefícios como a redução dos custos de obtenção das matérias-primas e com a deposição de resíduos também são citados como motivações para fechamentos de ciclos. Este cenário é condizente com a maior ocorrência de processos dependentes de matérias primas em exaustão, como metais e água (Fig. 3).

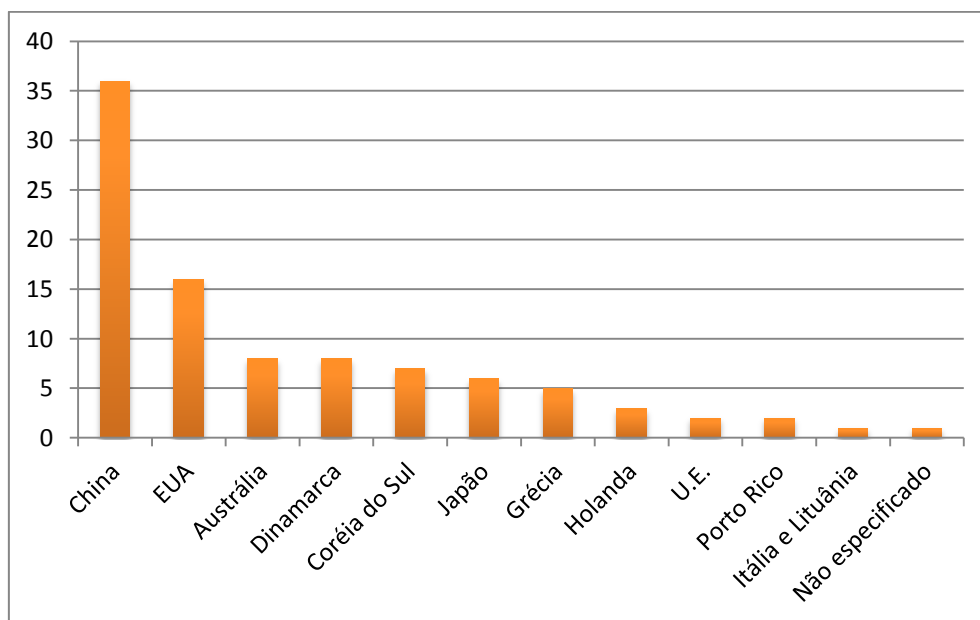


Figura 2 – Distribuição geográfica de casos de fechamento de ciclo (número de casos).
Fonte: Elaborada pelos autores.

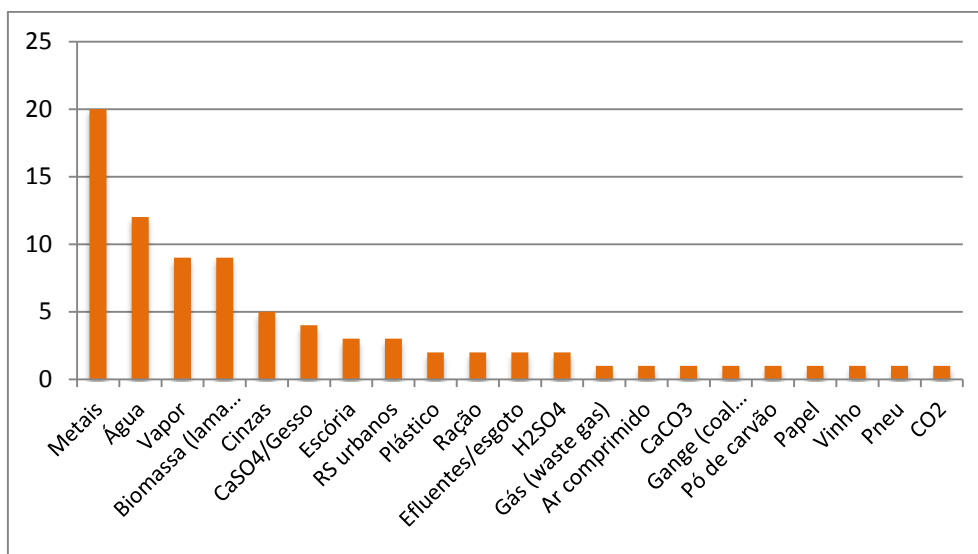


Figura 3 – Frequência (número de casos) de materiais nos casos de fechamento de ciclo.
Fonte: Elaborada pelos autores.

Uma troca simbiótica muito frequente entre os casos analisados é referente ao vapor (Fig.3), subproduto comum em diversos processos produtivos. No ecoparque de Ulsan na Coreia do Sul (Park e Behera, 2014 – Quadro. 1), das 34 trocas simbióticas estabelecidas, 14 tratavam de trocas envolvendo vapor. Essa recorrência pode ser justificada pelo fato das trocas de vapor envolverem tanto a transferência de energia, em forma de calor, quanto de matéria, em forma de água. Além disso, as tecnologias de aproveitamento de vapor são amplamente difundidas nos processos produtivos e são implementadas proporcionalmente ao custo para obtenção de energia térmica e água (Park e Behera, 2014).

O quarto material mais frequente em fechamentos de ciclos é a biomassa (Fig. 3). Os casos de fechamento frequentemente associam a produção de estrume e biodigestão de resíduos da atividade pecuária ao fornecimento de biofertilizantes usados na agricultura, como em Chang *et al.* (2011) e em Han *et al.* (2006) - Quadro 1.

Também foi observada recorrente presença de fechamentos de ciclos envolvendo a indústria siderúrgica e cimenteira (Hara *et al.*, 2011 – Quadro 1). Isso deve-se à alta demanda de calor por essas atividades, que pode ser produzido a partir da queima de uma grande variedade de materiais, favorecendo a utilização de resíduos de outros processos.

Conclusões

Este estudo buscou estruturar um panorama global sobre a eficiência ambiental e econômica de experiências da Economia Circular para gestão de resíduos sólidos. Houve dificuldade de compilação e síntese dos dados por conta da falta de padronização na apresentação das informações nas publicações. A adoção de parâmetros comuns para a avaliação dos fechamentos de ciclo, como ocorre com as Avaliações de Ciclo de Vida, permitiria maior comparabilidade da eficiência ambiental dos processos. A análise de eficiência econômica dos fechamentos de ciclo é um tema escassamente explorado na literatura, o que representa uma lacuna de pesquisa neste campo. Com isso, mesmo parâmetros econômicos básicos, como relação benefício/custo e retorno sobre investimento, raramente estão disponíveis da literatura para subsidiar as tomadas de decisão na governança privada e pública de resíduos sólidos.

Quase a totalidade dos casos de fechamento de ciclo encontrados enfatizou os ganhos de eficiência ambiental ou econômica, sendo poucos os casos que avaliam suficientemente as consequências adversas dos fechamentos de ciclo de resíduos sólidos sobre as variáveis

econômicas ou ainda sobre outras questões ambientais, como o consumo de energia, recursos hídricos e emissões atmosféricas. A escassez de estudos que apresentem com mais abrangência os custos ambientais e econômicos dos fechamentos de ciclos produtivos pode indicar que a eficiência desses processos possa estar sendo superestimada. Assim, é prudente ampliar o escopo nos estudos em Economia Circular, para que seja possível uma avaliação mais completa de sua repercussão na sociedade. Este estudo não teve entre os seus objetivos a avaliação de questões sociais da expansão da Economia Circular, como a distribuição de renda, desenvolvimento do capital social e humano, o que certamente deve ser objeto de investigações complementares sobre o tema.

Os requisitos legais têm grande influência no incentivo à Economia Circular, como observado no caso da China, que aprovou em 2008 a Lei de Promoção da Economia Circular, impulsionando a implementação de arranjos para fechamento dos processos produtivos. É razoável inferir que, na medida que avançarem estudos econômicos mais robustos neste campo, seria possível confrontar os indicadores de desempenho financeiro das diversas possibilidades de arranjo produtivo na Economia Circular, destacando suas potencialidades e eventuais fragilidades com relação aos processos lineares tradicionais.

Cabe observar que não foram documentados casos brasileiros de fechamentos de ciclos produtivos. Entretanto, observando-se os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10), presentes em seu Art. 7º, sobretudo nos incisos “VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados” e “XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético”, é possível estabelecer um paralelo com o caso chinês de estímulo legal à mudança nas cadeias de valor, vislumbrando-se o potencial da PNRS em impulsionar mudanças nos processos produtivos das indústrias brasileiras.

Referências Bibliográficas

Abrelpe. (2014). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014*.

Ayres, R. U. & Ayres, L. W. (2002). *A Handbook of Industrial Ecology*. Edward Elgar Publishing Limited.

Berndtsson, M. (2015). *Circular Economy and Sustainable development*. Tese de mestrado em Desenvolvimento Sustentável, Department of Earth and Sciences, Uppsala University.

Bonciu, F. (2014). The European Economy: From a Linear to a Circular Economy. *Romanian Journal of European Affairs* 14(4), 78-91.

Brasil (2010). Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Acessado em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.

Braungart, M., McDonough, W. (2008). *Cradle-to-cradle; Remaking the way we make things*. North Point Press.

Campos, H., K. T. (2012). Renda e evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos no Brasil. *Eng Sanit Ambient.*, 17(2), 171-180.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem (2013). *Cempre Review 2013*.

Chang, I. S., Zhao, J., Yin, X., Wu, J., Jia, Z. & Wang, L. (2011). Comprehensive utilizations of biogas in Inner Mongolia, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1442-1453.

- Chertow M.R., Ashton W.S. & Espinosa J.C. (2008). Industrial symbiosis in Puerto Rico: Environmentally related agglomeration economies. *Regional Studies*, 42(10), 1299-1312.
- Giurco, D., Bossilkov, A., Patterson, J. & Kazaglis, A. (2011). Developing industrial water reuse synergies in Port Melbourne: Cost effectiveness, barriers and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 19(8), 867-876.
- Gouveia, N. & Prado, R. R. (2010). Análise espacial dos riscos à saúde associados à incineração de resíduos sólidos: avaliação preliminar. *Rev Bras Epidemiol.*, 13(1), 3-10.
- Gouveia, N. (2012). Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(6), 1503-1510.
- Han L., Li B., Song T. & Tong L. J. (2006). Circular-Economy models of animal husbandry industry in Jilin Province. *Chinese Geographical Science*, 16(2), 148-153.
- Hara, K., Yabar, H., Uwasu, M. & Zhang, H. (2011). Energy intensity trends and scenarios for China's industrial sectors: A regional case study . *Sustainability Science*, 6(2), 123-134.
- Hoornweg, D. & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank, 15, 2012.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., Kennedy, C. (2013). Waste production must peak this century. *Nature*, 502, 615-617.
- Hu, J., Xiao, Z., Zhou, R., Deng, W. & Wang, M., Ma, S. (2011). Ecological utilization of leather tannery waste with circular economy model . *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), 221-228.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*.
- Jiménez Rivero , A., Sathre, R., García Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181
- Mathews, J.A. & Tan, H. (2011). Progress toward a circular economy in China: The drivers (and inhibitors) of eco-industrial initiative. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 435-457.
- McLellan, R., Iyengar, L., Jeffries, B., & Oerlemans, N. (Eds.). (2014). *Living Planet Report 2014: species and spaces, people and places*. World Wide Fund for Nature.
- MMA (2012). Plano Nacional de Resíduos Sólidos.
- Park, H. S., Behera, S. K. (2014). Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. *Journal of Cleaner Production*, 64, 478-485.
- Pearce J.M. (2008). Industrial symbiosis of very large-scale photovoltaic manufacturing. *Renewable Energy*, 33(5), 1101-1108.
- Russo, M. A. T. (2003) Tratamento de Resíduos Sólidos. Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.
- Sampaio, R. F., Mancini, M. C. Estudos de revisão sistemática: Um guia para síntese criteriosa de evidência científica. (2006). *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 11(1), 83-89.

Zhang, H., Hara, K., Yabar, H., Yamaguchi, Y. & Uwasu, M., Morioka, T. (2009). Comparative analysis of socio-economic and environmental performances for Chinese EIPs: Case studies in Baotou, Suzhou, and Shanghai. *Sustainability Science*, 4(2), 263-279.