



Prospecção Tecnológica de Resíduos Sólidos Urbanos com um olhar na Economia Circular

Isadora Rial Pinto da Rocha

Monografia em Engenharia Química

Orientador

Elcio Ribeiro Borges, *DSc.*

Maio de 2023

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM UM OLHAR NA ECONOMIA CIRCULAR

Isadora Rial Pinto da Rocha

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Química.

Aprovado por:


Suzana Borschiver, DSc.


Isabelli Dias Bassin, DSc.

Marcelo Mendes Viana, DSc.

Orientado por:


Elcio Ribeiro Borges, DSc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 2023

Ficha Catalográfica

Rocha, Isadora Rial Pinto da.

Prospecção Tecnológica de Resíduos Sólidos Urbanos com um olhar na Economia Circular/Isadora Rial Pinto da Rocha. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2023.

vii, 99 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2023.

Orientador: Elcio Ribeiro Borges, *DSc*.

1. Economia circular. 2. Prospecção Tecnológica. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Monografia. (Graduação –UFRJ/EQ). 5. Elcio Ribeiro Borges I. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, que sempre acreditou nos meus sonhos e me motivou a segui-los, amo vocês. À minha mami, que nunca poupou esforço para fazer o seu melhor e nos deixar sonhar cada vez mais alto, você é uma referência para mim. Às demais mulheres que me criaram, Edna, Madalena e Florinda, que me ensinaram, cada uma a seu jeito, o que é ser uma mulher forte e amorosa. Aos meus irmãos, Bárbara, Érico e Lucas, pelos muitos momentos de troca, risadas e carinho. O que sou devo a vocês, obrigada por tanto.

Ao meu namorado Jonathan, por aturar surtos e mais surtos nesses muitos anos de graduação. Obrigada pela paciência, amor e companheirismo.

Aos meus amores de quatro patas, Preta e Catarina, que apesar de não saberem ler me acompanharam horas a fio na produção desse trabalho. Obrigada pelo amor incondicional.

Agradeço também aos meus amigos, que tanto torceram e estiveram acompanhando de perto essa jornada complicada e longa. Obrigada por me ensinarem tanto e crescerem comigo! Certeza de que essa é apenas uma das muitas alegrias que vamos poder comemorar juntos.

Obrigada à UFRJ pela linda trajetória! Apesar dos percalços, costumo dizer que aproveitei tudo que a universidade tinha a me oferecer, da iniciação científica ao duplo diploma, e obrigada por todas as chances que me foram dadas. Obrigada também à École Centrale Marseille por me receber e permitir que desenvolvesse tantas habilidades diferentes em tão pouco tempo!

Ao meu orientador, Élcio, que não cansa de me mostrar o verdadeiro amor pela docência. Obrigada por acreditar em mim e por me ajudar a tornar esse sonho real.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Química.

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM UM OLHAR NA ECONOMIA CIRCULAR

Isadora Rial Pinto da Rocha

Abril, 2023

Orientador: Prof. Élcio Ribeiro Borges, *DSc.*

Os impactos ambientais, econômicos e sociais provenientes da economia linear apontam para a necessidade de um novo modelo de produção e consumo. A economia circular (EC) aparece como uma maneira de conceitualizar e operacionalizar o desenvolvimento sustentável, alcançando a separação entre crescimento econômico e esgotamento dos recursos naturais ou degradação ambiental. Aplicada ao contexto de resíduos sólidos urbanos (RSU), a EC visa fechar o ciclo de vida linear de produtos através de estratégias de valorização de resíduos, removendo desperdícios e retendo o máximo valor possível dos materiais envolvidos. Devido a relevância temática, o presente trabalho foi concebido mediante adoção da metodologia de Prospecção Tecnológica, através da estratégia de mapeamento de artigos científicos e de concessões de patentes. A avaliação contemplou a evolução dos documentos, a origem da tecnologia e a identificação dos principais temas discutidos em cada documento. Foi possível traçar um paralelo relevante entre a definição de políticas públicas e regulamentações com a produção de artigos acadêmicos e patentes, com destaque para países europeus. Percebeu-se uma forte atuação e importância de estudos sobre a produção de energia através do uso da fração orgânica dos RSU via incineração ou produção de biocombustível (tecnologias presentes em cerca de um terço dos artigos e patentes), além de um interesse mercadológico no uso de cinzas residuais para produção de materiais para o setor de construção civil. Identificou-se uma lacuna de interesse privado nas demais frações dos RSU, dada a alta relevância dentre as detentoras de patentes de empresas do setor de energia renovável ou já inseridas na rota de RSU. Posteriormente, as possíveis aplicações da EC na gestão de RSU no Brasil são discutidas, baseando-se em aprendizados captados em casos de sucesso europeus. Apesar do Brasil já possuir o arcabouço legal para uma gestão sustentável de RSU, existem ações como a definição de metas de sustentabilidade, fiscalização de programas de logística reversa e conscientização da população, que facilitariam a adoção da economia circular no contexto de gestão de RSU.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EC – Economia Circular

EPO – European Patent Office

EUA – Estados Unidos da América

GEE – Gases do efeito estufa

ISWA – Associação Internacional de Resíduos Sólidos

MoU – *Memorandum of Understanding*, Memorando de Entendimento de Cooperação

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

P&D – Pesquisa & Desenvolvimento

PFCs – Perfluorocarbonos

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SNIS-RS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de Resíduos Sólidos

UE – União Europeia

USPTO – United States Patent and Trademark Office

VRPs – Práticas de retenção de valor

SUMÁRIO

1. Capítulo 1 Apresentação do tema e justificativas	1
1.1. Contextualização e justificativa.....	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Estrutura do documento.....	5
2. Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	6
2.1. História da Economia Circular e sua definição	6
2.2. Limites da economia linear	11
2.2.1. Resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	18
2.3. Benefícios e limitações da economia circular	21
2.4. Principais usos e aplicações.....	25
2.5. Considerações gerais	33
3. Capítulo 3 Referencial teórico sobre a Prospecção Tecnológica	34
3.1. Prospecção Tecnológica	34
3.2. Uso de patentes e artigos científicos como ferramentas de Prospecção Tecnológica.....	36
4. Capítulo 4 Metodologia de pesquisa	38
4.1. Metodologia de pesquisa	38
4.2. Estratégia de busca de artigos científicos	41
4.3. Estratégia de busca de patentes	44
5. Capítulo 5 Resultados e discussões.....	47
5.1. Artigos científicos	47
5.1.1. Análise MACRO	47
5.1.2. Análises MESO e MICRO	52
5.2. Patentes.....	57
5.2.1. Análise MACRO	57
5.2.2. Análises MESO e MICRO	60
5.3. Considerações gerais	63
6. Capítulo 6 Estudo de caso	65
6.1. O papel da economia circular no panorama de RSU.....	65
6.2. Exemplos de países bem-sucedidos.....	67
6.2.1. Alemanha	67
6.2.2. Suécia	69

6.3.	Aplicação dos aprendizados globais no Brasil	70
6.4.	Considerações finais	76
7.	Capítulo 7 Conclusão	77
7.1.	Discussões finais	77
7.2.	Conclusões finais	77
7.3.	Sugestões para trabalhos futuros	79
8.	Referências	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de diferença entre economia circular e linear.....	2
Figura 2 – Extração de materiais em bilhões de toneladas (Gt) de 1972 a projeção de 2050 se nada mudar. Desde o Acordo de Paris, em 2015, meio trilhão de toneladas de materiais virgens foram extraídas.	13
Figura 3 – A Great Pacific Garbage Patch faz parte das cinco zonas de acúmulo de plástico nos oceanos e está localizada no meio do caminho entre o Havaí e a Califórnia. Cobre uma área aproximada de 1,6 Mkm ² – o correspondente a 3x a França.....	16
Figura 4 – Diferenciação entre resíduos e rejeitos	19
Figura 5 – Rota teórica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil	20
Figura 6 – Rota estimada de RSU no Brasil em 2021.....	21
Figura 7 – Diagrama da borboleta.....	26
Figura 8 – Diferenciação entre práticas de retenção de valor (VRPs)	29
Figura 9 – Representação gráfica das diretrizes, respectivamente, do poder dos ciclos internos, de circular por mais tempo, de cascadeamento e dos ciclos puros	31
Figura 10 – Fases da Prospecção Tecnológica.....	38
Figura 11 – Busca realizada na base SCOPUS em maio de 2023.	42
Figura 12 – Busca realizada na pesquisa pública da USPTO em maio de 2023.....	45
Figura 13 – Gráfico de documentos publicados por ano com circular economy no título, resumo ou palavra-chave.....	48
Figura 14 – Número de artigos publicados por país entre 2015 e 2023.....	49
Figura 15 – Número de artigos por organismos financiadores de pesquisa de 2015 a 2023	50
Figura 16 – Gráfico com as 10 instituições com o maior número de publicações sobre economia circular de 2015 a 2023	50
Figura 17 – Gráfico dos cinco maiores veículos de publicações	51
Figura 18 – Gráfico da divisão das publicações por área de conhecimento	52
Figura 19 – Número de artigos por taxonomia de classe nível MESO.....	54
Figura 20 – Patentes concedidas anualmente na base UPSTO com título ou resumo contendo o termo municipal solid waste	58
Figura 21 – Patentes UPSTO por taxonomias de classe nível MESO	61
Figura 34 – Diretrizes de hierarquização da PNRS	65
Figura 23 – Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU (%).....	75

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Objetivos da Prospecção Tecnológica	35
--	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Empresas parceiras de universidades em 7 artigos analisados e suas respectivas áreas de atuação.....	52
Tabela 2 – Divisão de artigos em taxonomias de classe nível MICRO	54
Tabela 3 - Empresas com mais patentes concedidas desde 1972 com municipal solid waste nos campos title (.TI.) e abstract (.AB.) da base UPSTO	59
Tabela 4 – Divisão das patentes da base UPSTO em taxonomias de classe nível MICRO	61
Tabela 5 – Linha do tempo de leis e regulações adotadas em Alemanha e Suíça	70

1. Capítulo 1 Apresentação do tema e justificativas

1.1. Contextualização e justificativa

Os sistemas circulares estão presentes em diversas atividades cotidianas, desde os ciclos biológicos e geoquímicos de moléculas essenciais como água, oxigênio e carbono até a prática da agricultura e o conhecimento popular de que restos de alimentos podem ser transformados em nutrientes para seres vivos, que, por sua vez, se tornam fertilizantes para a terra (MURRAY et al., 2017). O homem primitivo precisou lidar com qualquer recurso disponível e que pudesse ser usado como abrigo, alimento, produto ou ferramenta. A gestão cuidadosa de recursos e o respeito ao meio ambiente eram uma necessidade, visto que a sobrevivência das primeiras sociedades dependia do que a natureza tinha a oferecer (CIRCLE ECONOMY, 2022).

A partir da Revolução Industrial, ocorrida no século XVII, em que a mão de obra física começou a ser gradativamente substituída por máquinas, diversos bens passaram a ser manufaturados em larga escala. A partir de então, estabeleceu-se como principal modelo econômico o denominado *take-make-dispose* (explorar-produzir-descartar, em tradução livre), um modelo em que a produção de um bem ocorre mediante o uso de matérias-primas naturais, energia e mão de obra, com o intuito de que o produto final seja comercializado ao consumidor. Quando o produto é utilizado até o seu esgotamento, o consumidor o descarta, findando o ciclo de vida do bem (MACARTHUR, 2012).

Com a evolução da industrialização e modernização das sociedades, o consumo de produtos manufaturados se tornou cada vez mais frequente, e, atualmente, vivenciamos diversas consequências ambientais, sociais e econômicas da adoção de um modelo linear de consumo. Estima-se que em 2019, por exemplo, além de o mundo ter aquecido 1,1 grau desde a era pré-industrial, a sociedade também consumiu 100 bilhões de toneladas de recursos (CIRCLE ECONOMY, 2022).

Problemas ambientais como perda de biodiversidade, poluição do ar, água, e solo, emissão de gases do efeito estufa, esgotamento de recursos e uso excessivo da terra estão cada vez mais prejudicando os sistemas de apoio à vida na Terra (GEISSDOERFER et al., 2017). Calcula-se que 62% das emissões de gases do efeito estufa (excluindo as geradas pelo uso da terra e pela silvicultura) são liberadas na atmosfera durante a extração, o

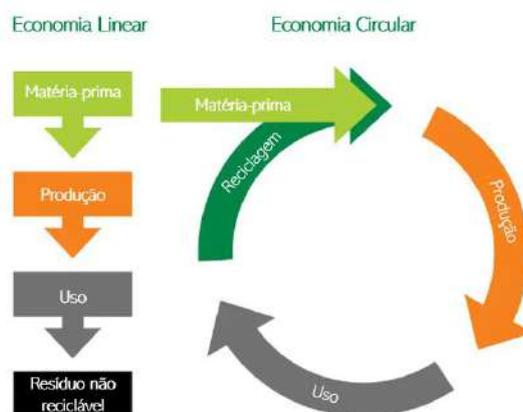
processamento e a manufatura de bens. A destinação de resíduos também não é gerenciável a longo prazo: entre 1950 e 2015, o mundo gerou mais de 8,3 bilhões de toneladas de plástico, dos quais 30% ainda permaneciam em uso em 2015 e apenas 9% teriam sido reciclados (RIBEIRO et al., 2019).

Ademais, no contexto social, expectativas sociais não são atendidas devido a questões como desemprego elevado, condições de trabalho precárias, vulnerabilidade social e aumento das desigualdades. Desafios econômicos, tais como risco de ruptura de fornecimento de materiais e mercados desregulados levam a instabilidades financeiras e econômicas cada vez mais frequentes para empresas e economias (GEISSDOERFER et al., 2017).

A economia circular surge como uma abordagem alternativa para que sejam respeitados, ao mesmo tempo, o meio ambiente e o crescimento da demanda global por recursos. Para tal propósito, a economia circular (EC) propõe estratégias que podem ser usadas para atender às necessidades da sociedade com um número radicalmente menor de materiais e emissões (CIRCLE ECONOMY, 2022).

A intenção da EC, portanto, é fechar o ciclo de vida linear do produto, substituindo o conceito de fim de vida útil por outros meios, como mostra a figura 1. Dado propósito pode ser alcançado a partir do desenho de modelos de negócios, sistemas e *designs* superiores, removendo desperdícios e retendo o máximo valor possível dos produtos e materiais envolvidos. Para tal, é fundamental o uso de energias renováveis e a eliminação de produtos químicos tóxicos (SASSANELLI et al., 2019).

Figura 1 – Exemplo de diferença entre economia circular e linear



Fonte: Adaptada do site da empresa BioPak.

A Comissão de Brundtland definiu sustentabilidade como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (GEISSDOERFER et al., 2017). A EC se apresenta como uma maneira de conceitualizar e operacionalizar o desenvolvimento sustentável, alcançando a separação entre crescimento econômico e esgotamento dos recursos naturais ou degradação ambiental (MURRAY et al., 2017). Assim, considera-se economia circular o sistema econômico que substitui o tradicional modelo de produção linear, ou, mais especificamente, sistemas regeneradores nos quais o consumo de recursos e resíduos, emissões e dissipação de energia são minimizados (RIBEIRO et al., 2019).

A EC pode se desdobrar em diferentes planos para países, empresas e sociedade. Existe um esforço crescente, principalmente de governos e órgãos multilaterais, para que os limites da economia linear sejam tratados com a devida seriedade e a economia circular passe a fazer parte do plano econômico e de desenvolvimento dos países. Durante a COP26 (Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021), um terço dos países mencionou economia circular em suas promessas, porém menos de 40% destes incluíram planos de treinamento para apoiar sua implementação e o foco para reduzir emissões de gases do efeito estufa segue sendo a redução de combustíveis fósseis (principalmente carvão) (CIRCLE ECONOMY, 2022).

Apesar do tema ganhar cada vez mais relevância, esforços não transformacionais não são suficientes para reverter a situação. Existe, portanto, a necessidade de se discutir um plano que envolva todas as parcelas da sociedade e que permita um desenvolvimento sustentável considerando economia, justiça social e meio ambiente.

Ao sugerir um modelo de produção e consumo regenerativo e restaurador, que fecha ciclos, espera-se que a EC aborde os desafios de recursos escassos, interrupções no fluxo de materiais e impactos das mudanças climáticas, ao mesmo tempo que revitaliza as economias locais e regionais (FRIANT et al., 2020).

Diante da importância da EC para o cenário ambiental e econômico mundial e da busca cada vez mais disseminada por um desenvolvimento sustentável, observou-se uma janela de oportunidades para empresas, governos e sociedade civil atuarem nesse nicho. Assim, considerando-se os pontos apresentados acima, julga-se pertinente uma avaliação da literatura existente sobre a EC e um posterior exercício de Prospecção Tecnológica sobre a economia circular e suas aplicações.

A Prospecção Tecnológica, como ferramenta de antecipação e entendimento das potencialidades, evolução, características e efeitos das mudanças tecnológicas, se apresenta como um processo rico para nortear decisões e direcionar oportunidades acerca da economia circular (COELHO, 2003). Entre as diversas estratégias de Prospecção Tecnológica caracterizadas na literatura, o Monitoramento de Sistemas de Inteligência torna-se um expressivo norteador capaz de indicar quais os passos a serem seguidos; quais as decisões a serem tomadas e quais as oportunidades a serem exploradas, rumo ao desenvolvimento de tecnologias de sucesso científico e mercadológico.

Diante do exposto, o presente trabalho objetiva apresentar um panorama sistemático sobre a economia circular em resíduos sólidos urbanos pela metodologia da Prospecção Tecnológica, usando como base artigos científicos e patentes concedidas sobre o tema para que se elucidem as principais tendências futuras de mercado.

Por fim, dada a importância da EC e sua relevância atual para a gestão de resíduos sólidos urbanos, ao final do trabalho é proposto um estudo de caso sobre como a aplicação da EC no Brasil pode alavancar aprendizados de demais países e gerar valor para a gestão de resíduos.

1.2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é apresentar um panorama sistemático sobre a economia circular em resíduos sólidos urbanos utilizando a metodologia de Prospecção Tecnológica e, posteriormente, discutir as possíveis aplicações da EC na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil, baseando-se em exemplos de políticas públicas e casos de sucesso de outros países.

De forma mais detalhada, entre os objetivos específicos do presente trabalho, compreende-se:

- definir uma estratégia de busca em bancos de dados disponíveis para patentes e artigos científicos;
- definir o escopo de taxonomias necessárias para a execução da metodologia de pesquisa, dividida nas fases: pré-prospectiva (amadurecimento da temática),

prospectiva (metodologia de pesquisa) e pós-prospectiva (avaliação dos resultados);

- realizar o tratamento dos dados separando-os em suas respectivas classificações e taxonomias;
- avaliar a implementação da EC em resíduos sólidos urbanos no Brasil, alavancando aprendizados da fase pós-prospectiva da Prospecção Tecnológica.

1.3. Estrutura do documento

O presente trabalho está dividido em capítulos correspondentes ao tema estudado. No capítulo 2, Revisão bibliográfica, a economia circular é definida e são apresentados sua importância no contexto atual, seus benefícios, aplicações e limitações.

O capítulo 3, Referencial teórico sobre a Prospecção Tecnológica, traz os conceitos e ferramentas que compõem a Prospecção Tecnológica.

No capítulo 4, Metodologia de pesquisa, é detalhada a metodologia adotada no presente trabalho, a estratégia de busca de artigos e patentes e a definição das taxonomias escolhidas.

O capítulo 5, Resultados e discussões, contém as análises das classes de níveis MACRO, MESO e MICRO de artigos e patentes concedidas, além das discussões sobre o mapeamento tecnológico.

O estudo de caso sobre resíduos sólidos urbanos no Brasil é apresentado no capítulo 6, que é seguido pela conclusão e propostas para trabalhos futuros (capítulo 7). O capítulo 8, “Referências”, traz os autores pesquisados para a elaboração do presente trabalho.

2. Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

2.1. História da Economia Circular e sua definição

A história dos processos circulares antecede o conceito de economia circular. Desde as estações do ano até o ciclo da água, é possível ver que o planeta Terra funciona naturalmente de maneira circular, e assim o tem feito por bilhões de anos. Na natureza, o desperdício é mínimo e a maior parte dos materiais ganha novas destinações quando cumpre seu papel no ciclo. Por exemplo, as árvores de carvalho utilizam a luz do sol e nutrientes do solo para crescer e se reproduzir, o que permite a formação de nozes – alimento precioso para os esquilos. As cascas de nozes descartadas pelos roedores tornam-se alimento para decompositores, como vermes, que as transformam em nutrientes para o solo posteriormente (CIRCLE ECONOMY, 2022).

Para além dos ciclos biológicos, as primeiras sociedades humanas respeitavam a natureza e utilizavam recursos de maneira mais sustentável que atualmente. O homem primitivo possuía uma economia de baixo desperdício devido à escassez de recursos: todo recurso disponível precisava ser transformado em abrigo, comida, produto ou ferramenta (STAHEL et al., 2020). À medida que a sociedade evoluiu, algumas práticas foram mantidas ao longo do tempo, tais como a reciclagem de cerâmica, que é feita de argila, um material facilmente disponível, além do uso de restos de alimentos e resíduos agrícolas como fertilizantes, excrementos para tingir couro e urina para tingir tecidos. A sobrevivência das sociedades humanas em grande parte dependia da utilização responsável e cuidadosa dos recursos naturais, o que exigia um respeito ao meio ambiente (CIRCLE ECONOMY, 2022).

A partir da Revolução Industrial, ocorrida no século XVIII, países europeus e os Estados Unidos substituíram o modelo agrícola de produção e a força física humana por máquinas, possibilitando a produção em grande escala de mercadorias. Tais mercadorias eram, então, encaminhadas para serem comercializadas em colônias no exterior, que se tornaram não só novos mercados, mas também fontes intensamente exploradas de matérias-primas para abastecer a produção. Com o passar do tempo, a industrialização expandiu-se pelo globo e, desde então, o consumo global e o uso de recursos têm sido descritos como *take-make-waste* (explorar-produzir-descartar, em tradução livre), o que caracteriza uma economia linear (CIRCLE ECONOMY, 2022).

O modelo de consumo vigente remonta, portanto, há mais de 200 anos, pautando-se em empresas que extraem materiais, aplicam energia e mão de obra para manufaturar um produto e o vendem a um consumidor final, que então o descarta quando este não serve mais ao seu propósito (MACARTHUR, 2012). O consumo desenfreado de recursos naturais, que inevitavelmente resulta em considerável produção de resíduos, acarreta graves impactos ambientais e sociais, que serão abordados mais adiante neste trabalho. É relevante salientar, no entanto, que a economia circular surge como uma alternativa ao modelo atual, propondo estratégias que visam atender à crescente demanda da sociedade por redução do consumo de materiais e emissões (CIRCLE ECONOMY, 2022). Em outras palavras, a abordagem circular objetiva desvincular o crescimento econômico do esgotamento de recursos naturais e da degradação ambiental (MURRAY et al., 2017).

Embora Stahel e Reday-Mulvey só tenham se referido a uma “economia do ciclo fechado” em 1976, o pensamento da economia circular já estava presente na literatura de outras maneiras. (STAHEL, REDAY-MULVEY, 1981). Em 1848, Hofman, o primeiro presidente da Royal Society of Chemistry, disse que “em uma fábrica de produtos químicos ideal, a rigor, não há desperdício, apenas produtos. Quanto melhor uma fábrica fizer uso de seus resíduos, mais perto ela se aproxima de seu ideal e maior é o lucro” (LANCASTER, 2002 *apud* MURRAY et al., 2017).

Vários autores, como Andersen (2007), Ghisellini et al. (2016) e Su et al. (2013) atribuem a introdução do conceito de economia circular a Pearce e Turner (1989). Eles descreveram como os recursos naturais influenciam a economia, já que fornecem insumos para produção e consumo, e recebem os resultados desse consumo na forma de resíduo. O trabalho de Pearce e Turner recebeu influências distintas, como de Boulding (1966), que descreveu a Terra como um sistema fechado e circular com capacidade assimilativa limitada e inferiu a partir disso que a economia e o meio ambiente devem coexistir em equilíbrio. Stahel e Reday (1976) também influenciaram Pearce e Turner ao introduzir características focadas na economia industrial. Eles conceitualizaram uma economia de ciclo fechado para descrever estratégias industriais para prevenção de resíduos, criação de empregos regionais, eficiência de recursos e desmaterialização da economia (GEISSDOERFER et al., 2017).

Segundo MacArthur (2012), além da contribuição de diversos pesquisadores, o conceito de economia circular também recebeu inspiração de outras escolas de pensamento, como:

- *design* regenerativo – se inspira na agricultura e defende que todos os sistemas poderiam ser orquestrados de forma regenerativa. Ou seja, os próprios processos renovam ou regeneram as fontes de energia e materiais que consomem;
- economia de *performance* – conceito criado pelo The Product-Life Institute, de Walter Stahel, que busca quatro objetivos principais: extensão da vida útil do produto, bens de longa duração, atividades de recondicionamento e prevenção de desperdício. O instituto também insiste na importância de vender serviços em vez de produtos, uma ideia conhecida como “economia funcional de serviços”;
- *cradle to cradle* – filosofia de *design* que considera todos os materiais envolvidos nos processos industriais e comerciais nutrientes que se encaixam em duas categorias: técnica ou biológica. O *design cradle to cradle* foi criado por William McDonough e Michael Braungart em 2003 (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015) e se inspira nos processos seguros e produtivos do “metabolismo biológico” da natureza como um modelo para desenvolver um fluxo de “metabolismo técnico” de materiais industriais. É um conceito muito utilizado na economia circular e será revisitado posteriormente no presente trabalho;
- ecologia industrial – estudo dos fluxos de materiais e energia presentes em sistemas industriais e como eles se conectam com a natureza e o ecossistema em que se inserem; conceito criado por Reid Lifset e Thomas Graedel em 2001 (GRAEDEL, LIFSET, 2003);
- biomimetismo – disciplina que, a partir do estudo da natureza, cria *designs* e processos para resolver problemas humanos – estudar uma folha para desenvolver uma célula solar é um exemplo. Criado por Janine Benyus em 2003 (BENYUS, 2003);
- economia azul (*blue economy*) – busca explorar soluções para suprir as necessidades fundamentais do planeta e de seus habitantes utilizando os recursos disponíveis na Terra e investindo pouco. Um exemplo prático seria a adoção de sistemas em cascata, em que o desperdício de um produto é aproveitado como matéria-prima para outro processo produtivo (CAMACHO-OTERO et al., 2018). Presente no artigo de 2010 de Gunter Pauli (PAULI, 2010 *apud* ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015);
- permacultura – conjunto de princípios e técnicas de *design* ecológico cujo objetivo é a integração de diversas espécies de animais e plantas perenes ou

autoperpetuantes em sistemas agropecuários. A abordagem da permacultura visa criar ecossistemas agrícolas completos que promovem a conservação dos recursos naturais, a regeneração dos ecossistemas e uma agricultura sustentável (CAMACHO-OTERO et al., 2018);

- capitalismo natural – abordagem que estuda como proteger a biosfera mantendo lucros e competitividade, articulada no artigo de 2008 de Amory Lovins, Hunter Lovins e Paul Hawken (LOVINS et al., 2008 *apud* ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Defende mudanças na forma de administrar o negócio, com base em técnicas avançadas para tornar os recursos mais produtivos e garantir o equilíbrio entre os estoques finitos e o fluxo de recursos renováveis (CAMACHO-OTERO et al., 2018).

Embora as correntes de pensamento que influenciaram o surgimento da economia circular sejam relevantes, é imprescindível compreender que esta abordagem é mais abrangente, tendo como objetivo harmonizar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental e de recursos naturais. Nesse sentido, ainda que a economia circular se inspire em tais conceitos e os utilize como instrumentos, ela avalia de forma holística os três pilares do desenvolvimento sustentável: econômico, ambiental e social (MURRAY et al., 2017).

Uma discrepância notável entre a economia circular e outras vertentes de pensamento sustentável é a sua origem, que se deu, em grande medida, por meio de políticas públicas implementadas por nações como a China e algumas nações europeias, diferentemente de outras correntes que frequentemente surgem de iniciativas acadêmicas ou de grupos de especialistas que se dissociam de uma determinada área para criar uma nova (MURRAY et al., 2017).

A Alemanha foi pioneira na integração do conceito de economia circular às leis nacionais, já em 1996, com a promulgação do *Closed Substance Cycle and Waste Management Act* (Lei de Ciclo Fechado de Substâncias e Gerenciamento de Resíduos) (SU et al., 2013). Na sequência, a *Basic Law for Establishing a Recycling-Based Society* (Lei Básica para o Estabelecimento de uma Sociedade com Base em Reciclagem) foi publicada no Japão em 2002 (METI, 2004 *apud* GEISSDOERFER et al., 2017), e a *Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China* (Lei de Promoção da Economia Circular da República Popular da China) na China, em 2009 (LIEDER, RASHID, 2016 *apud* GEISSDOERFER et al., 2017). O ambicioso plano de desenvolvimento da China envolveu

crescimento econômico, igualdade social e proteção ambiental, e a economia circular foi definida na legislação como um meio de reduzir, reutilizar e reciclar atividades realizadas no processo de produção, circulação e consumo (XUE et al. 2010; GENG et al. 2012 *apud* MURRAY et al., 2017).

Órgãos supranacionais também incorporaram preocupações com a economia circular, principalmente a Estratégia de Economia Circular de 2015 da União Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2015). A intenção era mostrar que tal abordagem poderia “impulsionar a reciclagem e evitar a perda de materiais valiosos; gerar empregos e crescimento econômico; mostrar como novos modelos de negócios, *eco-design* e a simbiose industrial poderiam levar os países para o desperdício zero; reduzir emissões de gases do efeito estufa e impactos ambientais” (EUROPEAN COMMISSION, 2014 *apud* MURRAY et al., 2017).

A despeito de legislações pioneiras, desde 2015, a China e a União Europeia têm servido de referência na promoção da economia circular por meio de seus arcabouços regulatórios, enfatizando a redução de resíduos. Em 2017, a China anunciou a chamada *National Sword* ou *Green Sword*, uma nova política que proíbe a importação de certos tipos de resíduos sólidos, como plásticos, papel e têxteis, além de estabelecer limites para a contaminação de materiais recicláveis. No ano subsequente, em julho, a China e a União Europeia firmaram um Memorando de Entendimento de Cooperação (MoU, do inglês *Memorandum of Understanding*) em economia circular, o que foi um avanço significativo na direção de um sistema global voltado para a eficiência no uso dos recursos e a redução da geração de resíduos (RIBEIRO et al., 2019). Ainda em 2018, o Parlamento Europeu aprovou as propostas da Comissão Europeia, introduzindo o *Circular Economy Package* e, em julho do mesmo ano, a nova legislação sobre resíduos entrou em vigor. Dita legislação estabelece uma estratégia específica para plásticos, visando estimular uma transformação na concepção, produção, utilização e reciclagem do material e seus produtos correlatos (RIBEIRO et al., 2019).

Uma vez considerada a influência do contexto histórico, econômico e político na economia circular, bem como as diversas escolas de pensamento que auxiliaram os pesquisadores a chegar a uma definição, é possível debater o conceito da economia circular de forma mais precisa. Embora não haja uma única definição sobre o assunto, os autores Geissdoerfer et al. (2017) e Schut et al. (2015) reconhecem a definição da Fundação Ellen MacArthur, de 2012, como a mais proeminente e citada. Portanto, esta será a definição adotada neste trabalho.

Economia circular é um sistema industrial que é restaurador ou regenerativo por intenção e design. Ela substitui o conceito de “fim de vida útil” pela restauração, transfere para o uso de energia renovável, elimina o uso de químicos tóxicos que prejudicam a reutilização, e visa à eliminação do desperdício por meio do design superior de materiais, produtos, sistemas e, dentro deles, modelos de negócios. (MACARTHUR, 2012).

Outras definições, como de Kirchherr et al. (2017), incluem também a divisão entre níveis micro (produtos, empresas, consumidores), meso (parques eco-industriais) e macro (cidade, região, nação e outros). Já a de Murray et al. (2017) critica a ausência da dimensão social inerente ao desenvolvimento sustentável na definição de MacArthur (2012) e define economia circular como “um modelo econômico no qual planejamento, recursos, compras, produção e reprocessamento são desenhados e gerenciados, tanto como processo e resultado, para maximizar o funcionamento do ecossistema e o bem-estar humano” (MURRAY et al., 2017).

2.2. Limites da economia linear

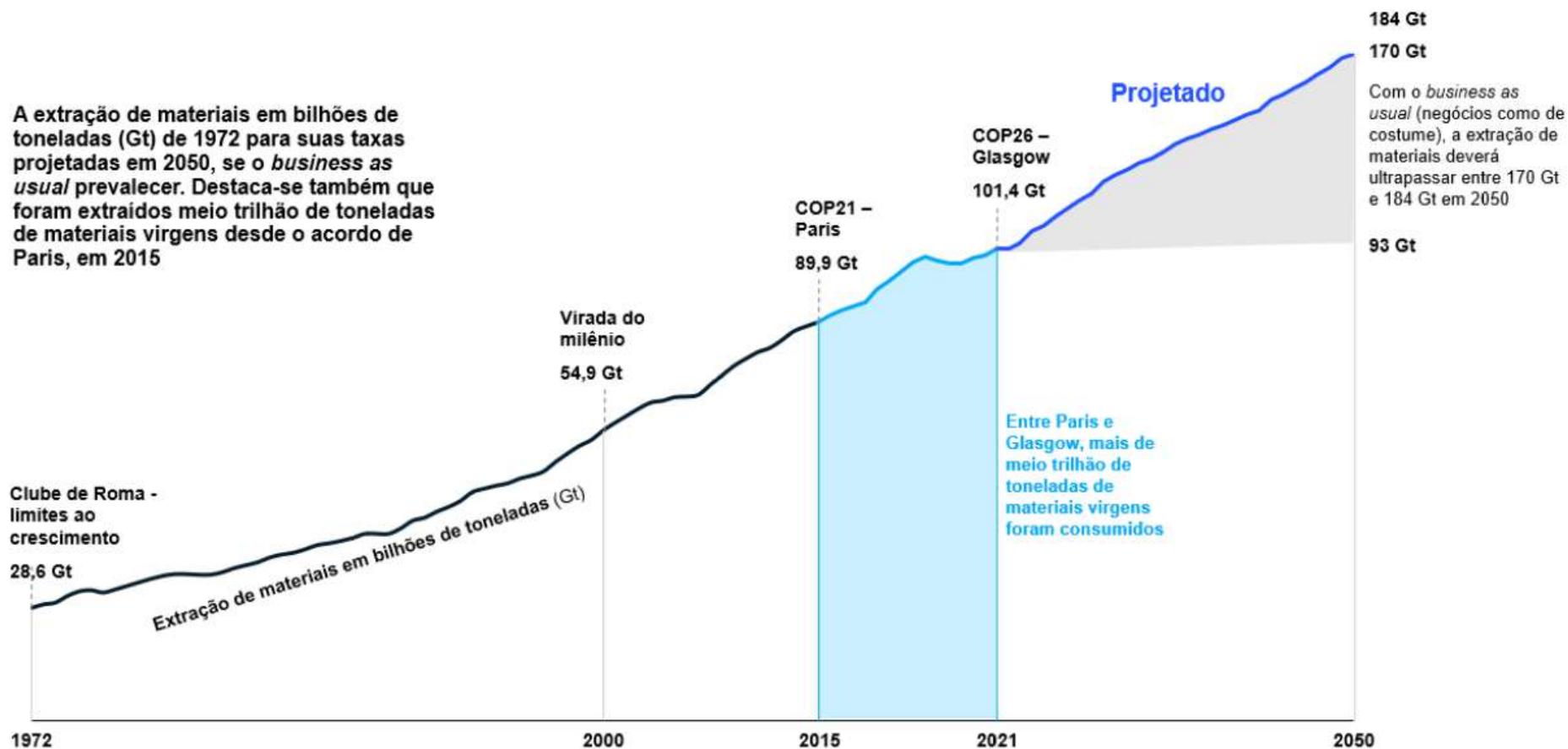
O modelo de produção e consumo linear é caracterizado pela extração de matérias-primas, seguida da aplicação de energia e mão de obra para produzir algo que será comercializado por um consumidor final. Este, por sua vez, descarta o produto quando o mesmo já não atende à sua necessidade. Cada etapa desse modelo (extração, produção, consumo e descarte) apresenta restrições que podem estar relacionadas aos problemas ambientais e sociais que têm sido enfrentados nas últimas décadas (MACARTHUR, 2012).

Ao analisar a etapa de extração do modelo linear de produção e consumo, constata-se que a extração de matérias-primas virgens, tais como minerais, biomassa, combustíveis fósseis e metais, tem se intensificado ao longo dos anos, conforme dados apresentados pelo *Circularity Gap Report* (2022). As matérias-primas são classificadas em quatro categorias principais: minerais não metálicos, biomassa, combustíveis fósseis e metais. Os minerais não metálicos, que incluem minerais de construção (como areia, cascalho e rocha triturada) e minerais industriais (como sais, fertilizantes e pesticidas), representam um terço do uso total de materiais e estão amplamente associados às atividades de construção. A biomassa, por sua vez, que abrange recursos de madeira, alimentos e rações, é a segunda categoria de

materiais mais utilizados em nível global e desempenha um papel crucial no setor agrícola. Os combustíveis fósseis, que incluem carvão, petróleo e gás natural, são importantes para a geração de energia e representam a terceira categoria de materiais mais usados. Por fim, os metais, como ferro, cobre e ouro, são amplamente utilizados em atividades de fabricação (OECD, 2020).

De acordo com o representado na figura 2, é possível notar que em 1972, quando o relatório *Limits to Growth*, do Club of Rome, foi publicado, o mundo consumia 28,6 bilhões de toneladas de materiais. Em 2000, o consumo de materiais tinha subido para 54,9 bilhões de toneladas, chegando a 100 bilhões de toneladas em 2019. Em apenas 50 anos, o uso global de materiais quase quadruplicou, ultrapassando o crescimento populacional. E a tendência futura é de um crescimento ainda mais exponencial: segundo o International Resource Panel, o uso de materiais pode subir para 170 a 184 bilhões de toneladas em 2050 se nada mudar (CIRCLE ECONOMY, 2022).

Figura 2 – Extração de materiais em bilhões de toneladas (Gt) de 1972 a projeção de 2050 se nada mudar. Desde o Acordo de Paris, em 2015, meio trilhão de toneladas de materiais virgens foram extraídas.



Fonte: Adaptada do Circularity Gap Report, 2022.

Na fase de produção do modelo linear de economia, há uma considerável perda durante a manufatura, além do consumo intensivo de recursos, com o apoio de fontes de energia não renováveis. De acordo com estimativas do Sustainable Europe Research Institute (SERI), a produção de bens nos países-membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) consome anualmente mais de 21 bilhões de toneladas de materiais que não são fisicamente incorporados aos produtos finais. Tais materiais, que nunca entram no sistema econômico, incluem sobrecarga de mineração, captura adicional de pesca, perdas de colheita de madeira e agricultura, entre outros (LONDONO et al., 2021). Ademais, a relação entre o custo reduzido de recursos e o alto custo de mão de obra foi responsável pela geração de um sistema de desperdício, onde a eficiência econômica era alcançada principalmente através do aumento no uso de recursos, sobretudo energia, para minimizar os custos de mão de obra (MACARTHUR, 2012). Acresce-se a isso, a baixa utilização de fontes de energia renovável, uma vez que em 2021 somente 6% da energia produzida em escala global foi proveniente de fontes renováveis (como energia hidrelétrica, solar, eólica, geotérmica, de ondas e marés e bioenergia) (BP, 2022).

A abordagem linear de produção e consumo não contempla a questão do consumo consciente como pauta, uma vez que práticas comerciais condicionam o crescimento econômico ao aumento do consumo, tais como a obsolescência programada e o uso de produtos descartáveis. É possível observar evidências do crescimento do consumo na sociedade americana, onde desde 1970, a população cresceu em 60%, enquanto o consumo aumentou em 400%, fenômeno comum em países com classe média em expansão (CIRCLE ECONOMY, 2022).

A tendência de aumento no consumo é global. Nos últimos 50 anos, a população mundial dobrou de tamanho, enquanto a quantidade de material em fluxo na economia mais que triplicou, de 27 bilhões de toneladas em 1970 para 84 bilhões de toneladas em 2015. Além disso, em 2021, foi alcançado um marco preocupante: a massa de produtos feitos por seres humanos, de calçados a apartamentos a telefones, superou a biomassa do planeta, que inclui todos os seres vivos, oceanos, árvores e animais. A massa de objetos artificiais era equivalente a 3% da biomassa do mundo em 1900 e, em 2021, essa massa se igualou à biomassa terrestre (CIRCLE ECONOMY, 2022).

Por último, o modelo linear falha em prever uma destinação sustentável para os resíduos gerados, que acompanham a tendência de crescimento de consumo. Resíduos são subprodutos das atividades humanas em sociedade, podendo ser um material, substância,

bem ou objeto descartado (ABRELPE, 2022). Grande parte dos resíduos podem ser recuperados por estratégias de valorização de produtos, como reciclagem, reutilização, reparo, remanufatura ou reforma, e o material sem oportunidade de reaproveitamento passa a se chamar rejeito (SNIS, 2021).

Na atualidade, mais de 90% de todos os materiais extraídos e utilizados em escala global são destinados ao descarte, enquanto somente 8,6% são reintroduzidos na economia por meio de processos de reciclagem ou recuperação (CIRCLE ECONOMY, 2022). Mesmo na União Europeia, que estabeleceu diversas regulamentações para a gestão de resíduos, somente 40% dos 2,7 bilhões de toneladas de resíduos gerados em 2010 foram reutilizados, reciclados, compostados ou digeridos (MACARTHUR, 2012).

De acordo com um relatório de 2018 do Banco Mundial, a quantidade anual de resíduos sólidos municipais gerados no mundo totalizava 2,01 bilhões de toneladas, sendo pelo menos 33% deles não gerenciados de forma ambientalmente segura. A geração média diária de resíduos por pessoa em todo o mundo é de 0,74 kg, variando de 0,11 a 4,54 kg, dependendo do nível de renda e industrialização do país. Embora representem apenas 16% da população mundial, os países de alta renda geraram cerca de 34% (683 milhões de toneladas) do lixo mundial produzido em 2018. O relatório também previu que a quantidade de resíduos sólidos municipais chegaria a 3,40 bilhões de toneladas anuais até 2050 (KAZA et al., 2018).

A composição dos resíduos difere entre os níveis de renda, refletindo os variados padrões de consumo. Os países de alta renda apresentam um percentual de 32% do total de seus resíduos compostos por alimentos e resíduos verdes, além de gerarem uma quantidade significativa de resíduos secos como plástico, papel, papelão, metal e vidro, que representam 51% de todo o resíduo gerado (o qual poderia ser reciclado). Já nos países de média e baixa renda, a parcela de resíduos de alimentos e verdes é de 53% e 56%, respectivamente, com o aumento da fração de resíduos orgânicos à medida que os níveis de desenvolvimento econômico diminuem. Além disso, nos países de baixa renda, apenas 16% do fluxo de resíduos é composto por materiais recicláveis (KAZA et al., 2018).

De acordo com o relatório de 2022 do Banco Mundial, aproximadamente 4% de todas as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) são atribuíveis a aterros e lixões a céu aberto (WORLD BANK, 2022). Em países de baixa renda, em 2018, os municípios gastaram cerca de 20% de seus orçamentos na gestão de resíduos, mas ainda assim mais de 90% desses resíduos foram queimados ou despejados em campos abertos. Na ausência de melhorias

significativas no setor, prevê-se que as emissões relacionadas a resíduos sólidos alcancem 2,6 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente até 2050 (KAZA et al., 2018).

A gestão inadequada de resíduos apresenta implicações ambientais, sociais e econômicas significativas (ABRELPE/ISWA, 2022). Dentre os riscos destacam-se as emissões resultantes da decomposição e da queima a céu aberto dos resíduos (ABRELPE, 2022), a contaminação de solos e lençóis freáticos, a poluição dos oceanos (figura 3), a atração de animais que podem ser vetores de doenças e a geração de chorume, que afetam de forma desproporcional as pessoas em situação de vulnerabilidade que residem ou trabalham próximo aos locais de descarte de resíduos (WORLD BANK, 2022). Além disso, a má gestão de resíduos tem um impacto social relevante, afetando muitas vezes de forma desproporcional as populações mais pobres, que ou não são contempladas pelos serviços de coleta de resíduos e recorrem ao descarte informal, ou têm pouca influência sobre o descarte informal próximo às suas residências (KAZA et al., 2018).

Figura 3 – A Great Pacific Garbage Patch faz parte das cinco zonas de acúmulo de plástico nos oceanos e está localizada no meio do caminho entre o Havai e a Califórnia. Cobre uma área aproximada de 1,6 Mkm² – o correspondente a 3x a França



Fonte: ONG The Ocean Clean Up, 2019.

De acordo com estimativas da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), a destinação inadequada de resíduos em lixões e aterros controlados pode ter impactos diretos na saúde da população em um raio de até 60 quilômetros. Além disso, no Brasil, entre os anos de 2016 e 2021, estima-se que o gasto total com saúde devido aos problemas decorrentes da gestão inadequada de resíduos tenha sido de US\$ 1,85 bilhão (ABRELPE, 2022).

A má gestão de resíduos não apenas acarreta problemas sociais e ambientais, mas também resulta em uma perda da energia residual contida nos materiais, que poderiam ser recuperados e reinseridos na economia, poupando gastos com energia (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

No paradigma linear, a disposição de um produto em aterro resulta na completa perda de sua energia residual. A incineração ou reciclagem de tais produtos recupera somente uma fração dessa energia, enquanto a reutilização pode economizar quantidades significativas da mesma. Um exemplo notável é o alumínio: na produção de produtos de alumínio, os processos de refino, fundição e transformação da bauxita em alumínio semiacabado consomem cerca de 80% da energia (e 67% do custo total envolvido). Dado que uma parcela significativa da energia necessária para a produção pode ser economizada com um sistema que não requer novos materiais como insumos a cada vez que um produto é fabricado, a indústria de alumínio e seus clientes têm buscado índices elevados de reciclagem. De acordo com a UNEP, em 2011 as taxas de reciclagem de alumínio no final do ciclo de vida variavam de 43% a 70%, enquanto as de outros metais não ferrosos importantes eram menores, como, por exemplo: cobre, de 43% a 53%; zinco, de 19% a 52%; e magnésio, de 39% (MACARTHUR, 2012).

As limitações da economia linear engendram consequências irreversíveis no meio ambiente, como perda de biodiversidade, poluição de água, ar e solo e esgotamento de recursos, além de diversos problemas sociais, como alto desemprego, condições precárias de trabalho, vulnerabilidade social e aumento das desigualdades. Economias e empresas também sofrem com o risco de ruptura de fornecedores, estruturas problemáticas de propriedade, mercados desregulados e estruturas de incentivos falhas, que levam a instabilidades financeiras e econômicas cada vez mais frequentes (GEISSDOERFER et al., 2017).

Um estudo do Circle Economy mostrou como a grande maioria das emissões de gases do efeito estufa (70%) são, em última análise, geradas pelo manuseio e uso de materiais –

sejam roupas que usamos, telefones que possuímos ou refeições que comemos (CIRCLE ECONOMY, 2022).

A análise do ciclo de vida desde a extração até a produção global de sete metais (ferro, alumínio, cobre, zinco, chumbo, níquel e manganês) e três materiais de construção (concreto, areia e brita) mostra uma ampla variedade de consequências ambientais ligadas ao uso de materiais. Entre as consequências estão impactos significativos na acidificação de solos e água, mudança climática, demanda cumulativa de energia, toxicidade na saúde humana, uso da terra e esgotamento da camada de ozônio. Esses sete metais e três materiais de construção juntos representam quase um quarto de todas as emissões de GEE e um sexto da demanda cumulativa de energia (OECD, 2019). Em consequência à crescente quantidade de materiais sendo utilizados, os impactos ambientais do uso de materiais estão projetados para mais que dobrar até 2060 (OECD, 2020).

2.2.1. Resíduos sólidos urbanos no Brasil

A destinação sustentável de resíduos municipais é uma limitação relevante da economia linear. No Brasil, resíduos sólidos urbanos (RSU) são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (resíduos de limpeza urbana). A Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, em seu art. 3º-C diz que os resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja atribuída ao gerador pode, por decisão do poder público, ser considerado resíduo sólido urbano. (SNIR).

Os RSU podem ser categorizados em resíduos úmidos, compostos por rejeitos e resíduos orgânicos como sobras de alimentos, galhos e folhas de árvores, os quais podem ser destinados a compostagem, geração de energia ou cascadeamento, e em resíduos secos, que podem ser recuperados por meio de processos industriais após triagem. O que não é possível ser reintroduzido no ciclo econômico devido à falta de viabilidade técnica ou econômica deve ser encaminhado para uma destinação adequada, preferencialmente em aterros sanitários, como apresentado na figura 4 (SNIS, 2021).

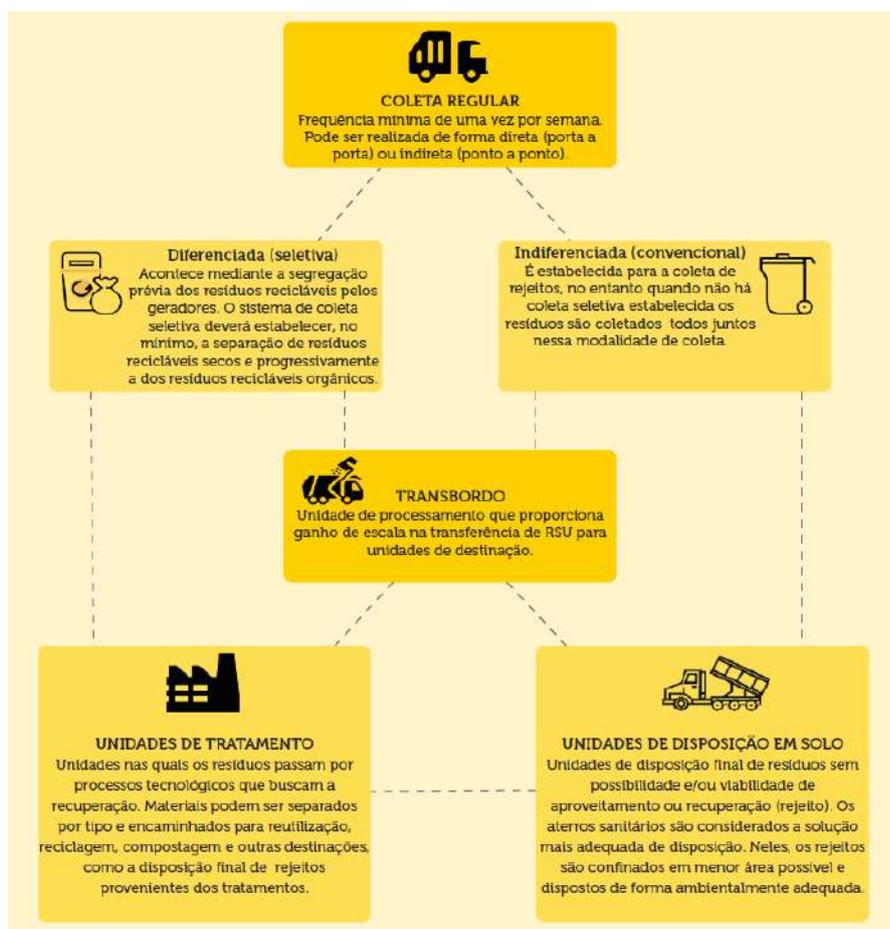
Figura 4 – Diferenciação entre resíduos e rejeitos



Fonte: SNIS, 2021.

O reaproveitamento dos resíduos depende de coleta e manejo apropriado, e a rota tecnológica dos RSU está descrita na figura 5. Ela começa com a coleta dos resíduos, que pode ser feita de forma indireta (com o uso de contêineres, caçambas ou contentores) ou direta (coleta porta a porta). A coleta também pode se dividir entre seletiva ou indiferenciada, dependendo se os resíduos são coletados já separados em recicláveis e orgânicos ou não. Em seguida, os RSU partem para a seleção, onde se separa resíduo de rejeito e, na sequência, para tratamento ou disposição final (SNIS, 2021).

Figura 5 – Rota teórica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil



Fonte: SNIS, 2021.

Durante o ano de 2022, a geração de RSU no Brasil totalizou 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias ou uma média de 1,043 kg de resíduo por dia por brasileiro (ABRELPE, 2022). Das 81,8 milhões de toneladas, apenas 76,1 milhões foram coletadas, o que significa que 7% dos RSU gerados no Brasil em 2022 sequer foram coletados, e, conseqüentemente, tiveram destinação imprópria (ABRELPE, 2022). Segundo estimativas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de Resíduos Sólidos (SNIS-RS), 20,8 milhões de habitantes brasileiros não tiveram acesso aos serviços de coleta regular direta e indireta em 2020 (9,8% da população) (SNIS, 2021).

Além da baixa cobertura de coleta, no Brasil, segundo relatório da Abrelpe, 39% de todo RSU gerado em 2022 possuiu disposição ambientalmente inadequada. Em suma, 29,7 milhões de toneladas de resíduos foram destinados para aterros controlados ou lixões, instalações com poucos cuidados ambientais ou com a saúde e segurança dos trabalhadores que lá transitam (ABRELPE, 2022).

Apesar de ser a melhor escolha de destinação, aterros sanitários deveriam ser utilizados apenas para disposição final de rejeitos, o que não ocorre no Brasil, segundo Ribeiro et al. (2019). O baixo reaproveitamento de resíduos e índice de reciclagem faz com que praticamente todo o RSU gerado vá para a destinação final. Um exemplo pode ser encontrado na figura 6, onde o relatório do SNIS (2021) demonstra que, das 66 milhões de toneladas de RSU estimadas para 2021, apenas 1,34 milhão (2%) foi recuperado, e as demais 98% foram destinadas para aterros sanitários, aterros controlados ou lixões.

Figura 6 – Rota estimada de RSU no Brasil em 2021



Fonte: SNIS, 2021.

2.3. Benefícios e limitações da economia circular

Com o aumento contínuo do consumo e da dependência de recursos, juntamente com a insuficiência dos esforços para buscar eficiências na produção, governos e empresas têm

direcionado sua atenção para o modelo de economia circular como um meio de fomentar a inovação e promover um crescimento sustentável (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Conforme a adoção da economia circular avançar, será necessária a criação de um novo setor dedicado a atividades de ciclo reverso para reuso, reforma, remanufatura e reciclagem (MACARTHUR, 2012). Novos modelos de negócio, mercados e oportunidades de emprego poderão ser criados, graças à mudança de sistema onde produtos são mantidos na circulação econômica pelo maior tempo possível em vez de apenas uma vez, como ocorre no modelo econômico atual (KORHONEN et al., 2018).

A Fundação Ellen MacArthur, o SUN Institute e a McKinsey & Company apoiaram um estudo comparativo entre 65 artigos acadêmicos que “apontam para efeitos positivos no mercado de trabalho caso a economia circular seja implementada”. O impacto em questão pode ser atribuído ao aumento dos gastos impulsionado pelos preços mais baixos esperados em todos os setores e à necessidade de mão de obra em atividades de coleta, desmontagem, reforma e reciclagem de produtos, além da maior necessidade de qualificação em empregos de remanufatura e reforma. Seriam também criados empregos nos setores industriais por meio do desenvolvimento da logística reversa local e em pequenas e médias empresas por meio do aumento da inovação e do empreendedorismo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

No modelo circular, as economias se beneficiarão do menor uso de materiais, além da mudança de foco em uso intensivo de energia e extração primária. A partir de menos materiais virgens sendo introduzidos no sistema e menos resíduos sendo gerados, os custos com recursos e energia seriam reduzidos, juntamente com os custos com resíduos e emissões. Custos para se adaptar às legislações ambientais, gastos com impostos ou custos de gestão de resíduos e aterros também diminuiriam (MACARTHUR, 2012).

Para a Europa, a Fundação Ellen MacArthur estimou que o desenvolvimento da economia circular poderia reduzir em 48% as emissões de dióxido de carbono em mobilidade, sistemas de alimentação e construção civil até 2030 ou em 83% até 2050, em relação aos níveis em 2015. Também seria possível reduzir em 32% até 2030 ou 53% até 2050, ainda em relação aos níveis de 2015, o consumo de matérias-primas (medido por veículos e materiais de construção, terras imobiliárias, fertilizantes sintéticos, pesticidas, uso de água agrícola, combustíveis e energia elétrica não renovável) (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Visto que, para alguns países, as ambições do Acordo de Paris

(incluindo as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) e o objetivo “bem abaixo de dois graus”) não serão atendidas no cenário atual, serão necessários esforços adicionais para atingir essas metas, e a economia circular se mostra como uma interessante solução (OECD, 2019).

Para empresas e indústrias, além da menor dependência de recursos (e, conseqüentemente, menor exposição às oscilações de custo das matérias-primas), há ainda a potencial vantagem de remodelar seu relacionamento com o consumidor, aumentando a interação com o cliente e a sua fidelidade. Criar dinâmicas onde os produtos são devolvidos ao fabricante ao final do ciclo de uso exige um novo relacionamento com o cliente: “consumidores” tornam-se “usuários”. Com contratos de *leasing* ou *performance* em vigor, mais *insights* sobre os clientes podem ser gerados para melhor personalização, customização e retenção (MACARTHUR, 2012).

Companhias no mercado de moda, como H&M ou a Mud Jeans, têm implementado alguns programas que promovem a economia circular e estreitam a relação com os consumidores. A H&M tem uma série de programas que incentivam a compra de roupas previamente usadas, como a plataforma RE:WEAR, que ajuda consumidores a revenderem suas roupas para outros clientes H&M em uma plataforma própria, segura e que indica o preço de revenda (H&M). Já a empresa Mud Jeans oferece um programa de assinatura de *jeans*, em que o consumidor paga uma taxa durante 12 meses e, ao final deste período, o *jeans* passa a ser de sua propriedade. Alternativamente, o consumidor pode optar por devolver o produto para a loja, a fim de que seja reciclado. Adicionalmente, é possível que a taxa mensal possua descontos, caso o consumidor entregue *jeans* usados que não utiliza mais para a loja, durante o período de 12 meses (MUD JEANS).

Para o consumidor, os benefícios são diversos. Além de maior longevidade do produto (já que o *design* na economia circular exige que ele seja feito para durar ou ser reutilizado), a mudança de “consumidor” para “usuário” permite mais personalização e diminui o custo total de propriedade (todos os custos envolvidos na aquisição, utilização e manutenção de um determinado bem ou serviço durante todo o seu ciclo de vida). Benefícios secundários são concedidos ao cliente se os produtos entregarem mais do que sua função básica – por exemplo, carpetes que atuam como filtros de ar ou embalagens que podem ser utilizadas como fertilizantes (MACARTHUR, 2012).

Quando se pensa em RSU, a economia circular se apresenta como uma maneira de instrumentalizar a gestão adequada de resíduos, impulsionando ainda a criação de mercado

para materiais secundários (ABRELPE/ISWA, 2022). Essa gestão adequada de resíduos é fundamental para a economia circular, já que é por meio dela que serão fornecidos recursos e materiais recuperados. Ao mesmo tempo, a economia circular apresenta uma maneira de impulsionar o setor de gestão de resíduos ao promover novos modelos de negócio que exigem logística reversa, consumo de materiais recicláveis, responsabilidade estendida do produtor e *designs* apropriados para valorização de resíduos (SILVA et al., 2021).

Considerando o atual panorama ambiental e social, torna-se cada vez mais necessário pensar em novos modelos de exploração, produção e consumo. Nesse sentido, a adoção do modelo de economia circular apresenta-se como uma alternativa viável e necessária para a promoção da sustentabilidade. Além dos benefícios já mencionados, cabe ressaltar que o modelo linear de produção e consumo atual é insustentável a longo prazo e precisa ser repensado (MACARTHUR, 2012). No entanto, é importante destacar que o conceito de economia circular também possui algumas limitações, conforme indicado por Murray et al. (2017).

A comunidade acadêmica não possui uma única definição de economia circular, embora a definição da Fundação Ellen MacArthur (2012) seja a mais difundida. A maior parte dos artigos que envolvem economia circular retrata o conceito de EC como uma combinação de atividades de reciclagem, redução e reutilização, tendo como foco o papel da EC na prosperidade econômica, seguida de qualidade ambiental, e, segundo Goyal et al. (2021), há uma falta de foco no vínculo da EC com equidade social e desenvolvimento sustentável.

Para Kirchherr et al. (2017), estudos sobre economia circular devem promover um senso de hierarquia entre as diferentes atividades, priorizando redução e reutilização em vez de reciclagem e recuperação, conforme expresso pela hierarquia de resíduos da Europa. Também é necessário deixar clara a necessidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável, em vez de apenas ampliar a eficiência dos recursos, e destacar o papel das empresas e consumidores como capacitadores do modelo circular (CAMACHO-OTERO et al., 2018).

Para Murray et al. (2017), não está claro como o conceito de EC levará a uma maior igualdade social, em termos de equidade intrageracional e entre gerações, igualdade de gênero, racial e religiosa, igualdade financeira ou menor disparidade de oportunidades sociais. São questões morais e éticas importantes que estão faltando na construção, segundo o autor (MURRAY et al., 2017).

É relevante destacar a carência de metodologias precisas e confiáveis para avaliar e medir todas as variáveis que fazem parte de um sistema circular. Contudo, segundo o economista Peter Drucker (2005), para gerenciar e aprimorar um sistema, é fundamental que ele seja mensurado, e isso se aplica também aos sistemas circulares (SASSANELLI et al., 2019).

2.4. Principais usos e aplicações

Na prática, a EC se traduz em transformar o modelo linear de produção e consumo (extração, produção, consumo e descarte) em um modelo mais completo, como na figura 7, que apresenta o diagrama de borboleta elaborado pela Fundação Ellen MacArthur.

Figura 7 – Diagrama da borboleta

DEFINIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR

PRINCÍPIO

1

Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis
 Alavancas ReSOLVE: regenerar, virtualizar, trocar



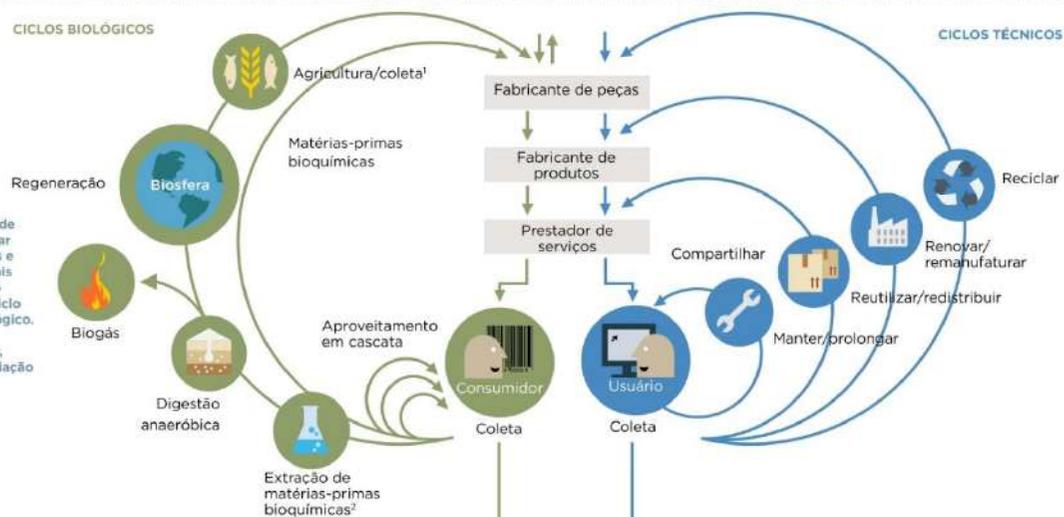
Gestão do fluxo de renováveis

Gestão de estoques

PRINCÍPIO

2

Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais em uso no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico.
 Alavancas ReSOLVE: regenerar, compartilhar, otimizar, promover a criação de circuitos



PRINCÍPIO

3

Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio
 Todas as alavancas ReSOLVE

Minimizar perdas sistêmicas e externalidades negativas

1. Caca à perda
 2. Nada aproveitar tanto resíduos pós-colheita como pós-consumo (risco)

Fonte: Ellen MacArthur Foundation, SUN and McKinsey Center for Business and Environment; Drawing from Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).

Fonte: Elaborado por Ellen MacArthur Foundation, SUN e McKinsey Center for Business and Environment, 2011.

O diagrama começa com o Princípio 1, que envolve uso de materiais e energia. Para que a EC seja bem-sucedida, é necessário que a energia seja de fonte renovável e que a introdução de materiais nos ciclos seja minimizada, garantindo que todo material biológico utilizado possa ser devolvido à biosfera, que as tecnologias disponíveis já foram utilizadas e que o material a ser utilizado está vindo de outros ciclos, extraindo o mínimo possível de materiais puros (MACARTHUR, 2012).

Ao minimizar a quantidade de materiais e energia necessários na produção, é possível diminuir as emissões de recursos e produtos finais. Tal redução pode ser alcançada pelos modelos de compartilhamento e aluguel, redução do peso dos materiais, produtos multifuncionais, aumento da eficiência energética ou digitalização (CIRCLE ECONOMY, 2022). Uma vez que esses requisitos são atendidos e a gestão dos estoques de capital natural finito (principalmente de materiais primários) e da fonte de energia são garantidas, os ciclos biológicos e técnicos podem ser implementados (MACARTHUR, 2012).

A segunda parte do diagrama, o Princípio 2, descreve ciclos biológicos e técnicos. O objetivo é otimizar o rendimento de recursos fazendo com que produtos, componentes e materiais circulem em alto nível de utilização. O ciclo técnico envolve a gestão de estoques de materiais finitos, onde o uso substitui o consumo. Os materiais técnicos são recuperados e, em sua maioria, restaurados no ciclo técnico. Já o ciclo biológico engloba os fluxos de materiais renováveis, onde o consumo de fato ocorre, mas nutrientes biológicos são regenerados (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

No ciclo biológico, os nutrientes orgânicos são utilizados de modo a reintegrar a biosfera de forma segura, e sua decomposição se converte em uma valiosa matéria-prima para um novo ciclo. Os produtos são concebidos com a finalidade de serem consumidos ou metabolizados de forma a enriquecer a biosfera. É de suma importância o sentido de regenerativo, já que se deve evitar materiais que não podem ser disseminados por diferentes aplicações ou usados para posterior extração de matérias-primas e reintrodução de seus nutrientes na biosfera, como químicos tóxicos (MACARTHUR, 2012).

A indústria da moda possui alguns exemplos de eliminação de químicos tóxicos de seu processo para facilitar o fechamento de ciclos. Um exemplo marcante é a Patagônia, que se comprometeu a retirar os perfluorocarbonos (PFCs) de suas peças, pois são materiais não biodegradáveis e que podem se acumular no meio ambiente por longos períodos. Depois de investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) desde 2013, a marca atingiu 66% de seu portfólio resistente à água livre de PFC em 2023 (PATAGONIA).

Um exemplo real de ciclo biológico é o trabalho da companhia BioPak, que criou uma linha de embalagens para *delivery* de comida criada de materiais renováveis e compostáveis. Após o uso, a embalagem pode ser descartada em uma composteira juntamente com restos de comida, onde será degradada e fornecerá nutrientes para o processo de compostagem. Desde o início do negócio, em 2010, a BioPak diz já ter evitado 22 milhões de toneladas de plástico com seus produtos na Nova Zelândia e na Austrália (BIOPAK).

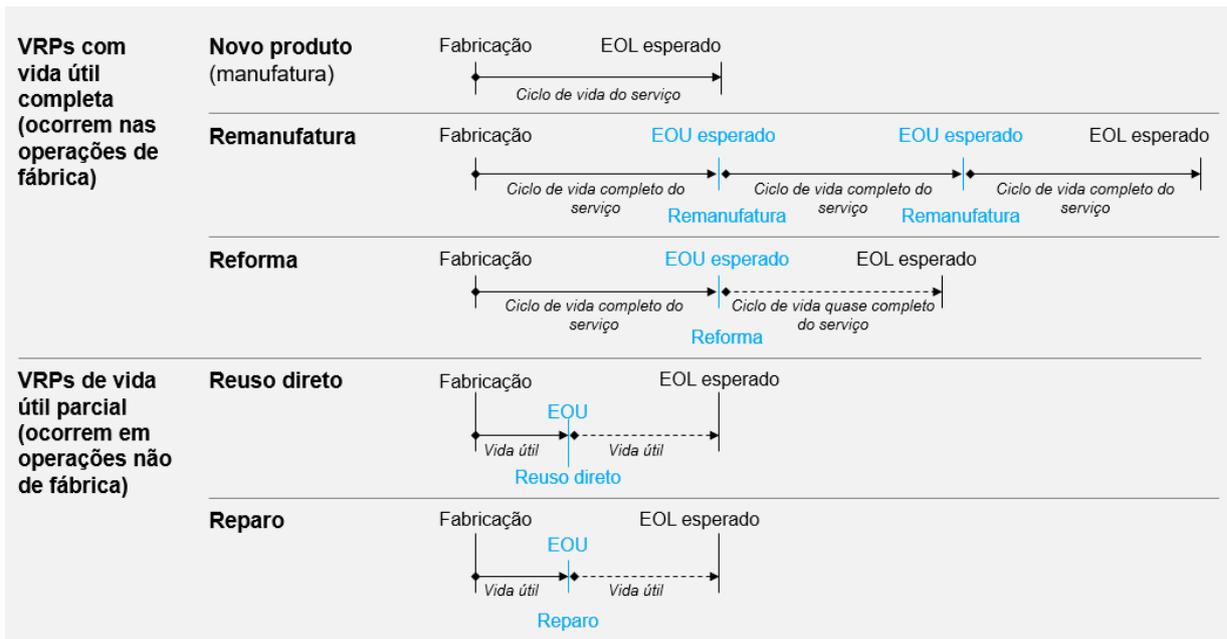
Já no ciclo técnico, uma estratégia circular envolve otimizar o *design* do produto para permitir a remanufatura, reforma, reutilização e reciclagem, mantendo componentes técnicos e materiais circulando e contribuindo para a economia (MACARTHUR, 2012).

Os conceitos de reutilização, reparo, remanufatura e reforma representam estratégias para valorizar produtos, além de serem alternativas à fabricação e consumo convencionais que auxiliam na mitigação dos impactos negativos no meio ambiente e na escassez de materiais (RUSSELL et al., 2022). Para um completo entendimento do ciclo técnico, é crucial definir a diferenciação entre eles.

De acordo com o Painel Internacional de Recursos, os processos de retenção de valor podem ser organizados em duas categorias: processos de vida útil completa equivalente e processos de vida útil parcial. Os processos de vida útil completa incluem fabricação (novo produto), remanufatura e renovação, e ocorrem em ambientes industriais e de fábrica. Os processos de vida útil parcial incluem reutilização direta, reparo e, em alguns casos, renovação, e ocorrem em operações de manutenção (RUSSELL et al., 2022).

A remanufatura e a reforma incluem uma operação fabril e envolvem a completa transformação do produto, embora, após a reforma, o produto possua um segundo ciclo de vida mais curto que o primeiro. Já o reúso e o reparo são técnicas para garantir o ciclo de vida esperado e evitar descartes antecipados de produtos que ainda possuem serventia. A figura 8 explica de maneira visual a diferenciação entre as práticas de retenção de valor (VRPs), e diferencia o conceito de *end-of-life* (EOL), final de vida útil do produto, em tradução livre, e *end-of-use* (EOU), final do uso daquele produto (RUSSELL et al., 2022).

Figura 8 – Diferenciação entre práticas de retenção de valor (VRPs)



Fonte: Adaptada de Russell et al., 2022.

Segundo MacArthur (2012), existem quatro diretrizes de maximização de valor, que garantem que a energia é preservada e a vida do produto é estendida ao máximo, conforme apresentado na figura 9. São elas:

1. Poder dos ciclos internos: diretriz que indica que é essencial maximizar o tempo em que os recursos permanecem dentro dos ciclos internos, priorizando a recuperação de materiais para reuso, reforma e reparo, seguidos pela remanufatura, antes de serem utilizados como matérias-primas. O uso como matéria-prima tem sido o foco principal na reciclagem tradicional (KORHONEN et al., 2018). Este princípio otimiza os recursos materiais, de mão de obra, de energia e de capital, tornando a combustão para energia e o descarte em aterros as últimas opções (MACARTHUR, 2012).
2. Poder de circular por mais tempo (prolongar o ciclo de vida dos produtos): diretriz que se refere à maximização do número de ciclos consecutivos (seja reuso, remanufatura ou reciclagem) e/ou do tempo em cada ciclo. Para atingir essa meta, é possível aumentar o número de ciclos consecutivos, reformando diversas vezes o mesmo produto, ou prolongar o tempo dentro de um ciclo, por exemplo, estendendo a vida útil de uma lavadora de roupas (por exemplo, de 1.000 para 10.000 lavagens) (MACARTHUR, 2012). Cada ciclo prolongado evita o material, a energia e a mão

de obra da criação de um novo produto ou componente (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). A estratégia de extensão da vida útil do produto é customizada e alavancada por características do produto (tempo de vida, maturidade tecnológica e intensidade de recursos) e restrições do negócio (dinâmica e regulamentações do mercado) (GOYAL et al., 2021). Novos conceitos de negócio podem incluir arrendamento e aluguel do serviço fornecido pelo produto, estratégias de logística reversa e conceitos que melhorem o compartilhamento da função do produto entre muitos usuários. A “economia de compartilhamento” pode trazer melhorias significativas de eficiência na forma como as pessoas organizam suas acomodações (aluguel de apartamentos vs. quartos de hotéis) e na forma como as pessoas se locomovem (possuir um veículo vs. compartilhar seu uso) (MURRAY et al., 2017). Além disso, para materiais onde a estratégia de reuso não faça sentido, é importante garantir o uso de material durável, *design* modular e *design* para desmontagem, reparo, remanufatura, reforma, remodelagem ou reciclagem (CIRCLE ECONOMY, 2022).

3. Poder de cascateamento (*waste-is-food*): segundo esta diretriz, podemos usar o descarte de um ciclo como matéria-prima para outro, diversificando o reuso em toda a cadeia de valor. Por exemplo, roupas de algodão podem ser reutilizadas como vestuário de segunda mão, vendidas em brechós, para em seguida servir como estofamento em fibras na indústria de móveis. Ao fim do uso dos móveis, o mesmo material pode ser posteriormente reutilizado na construção civil para isolamento de residências. Em cada caso, a entrada de materiais virgens na economia foi substituída, e as fibras de algodão tiveram diversos usos antes de serem devolvidas com segurança para a biosfera (MACARTHUR, 2012).
4. Poder dos círculos puros (onde o material da fonte permanece não contaminado, melhorando assim a eficiência da redistribuição e a produtividade dos materiais): por fim, diretriz que reside no fato de que fluxos de materiais não contaminados aumentam a eficiência da coleta e da redistribuição e mantêm a qualidade dos materiais técnicos. Tal estratégia amplia a longevidade do produto e a produtividade dos materiais. Ou seja, para gerar o máximo valor, cada uma das alavancas acima exige uma certa pureza de material e qualidade de produtos e componentes (MACARTHUR, 2012).

Figura 9 – Representação gráfica das diretrizes, respectivamente, do poder dos ciclos internos, de circular por mais tempo, de cascateamento e dos ciclos puros



Fonte: Adaptado de Ellen MacArthur Foundation, SUN e McKinsey Center for Business and Environment, 2011.

A terceira parte do diagrama da borboleta (apresentado na figura 7), o Princípio 3, foca na redução de danos a sistemas e áreas como alimentos, mobilidade, abrigo, educação, saúde e entretenimento, e o gerenciamento de fatores externos, como uso da terra, poluição do ar, da água e do solo, e a liberação de substâncias tóxicas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

O terceiro princípio é relevante para a discussão acerca da impossibilidade de manter produtos, componentes ou materiais perpetuamente no ciclo de produção. Caso o processo em questão não gere resíduos e não exija novas entradas de matéria e energia, estamos diante de uma máquina de moto-perpétuo, ou seja, uma máquina capaz de produzir trabalho ininterruptamente, consumindo a mesma energia e valendo-se dos mesmos materiais. Contudo, tal cenário contraria a segunda lei da termodinâmica, que estabelece que o grau de degeneração de um sistema isolado tende a aumentar com o tempo, o que impede a existência

de moto-perpétuos. Sendo assim, é inevitável que componentes e materiais atinjam um limite físico e necessitem ser descartados, tornando-se rejeitos – o problema é que, na economia linear, atingir esse limite é a exceção, e não a regra (MACARTHUR, 2012).

A fim de avançar na instrumentalização da borboleta da Fundação Ellen MacArthur (2012), a adoção de uma gestão circular da produção é um aspecto crucial para viabilizar novos modelos de negócios que se baseiem na economia circular, pela implementação de práticas que visem ao fechamento, estreitamento e desaceleração dos ciclos produtivos. É fundamental que haja um enfoque no ciclo de vida dos produtos desde a fase de *design*, garantindo que sejam projetados de forma a permitir a desmontagem e adaptação para reutilização. Esse enfoque reflete uma mentalidade econômica alternativa que prioriza o acondicionamento, remanufatura e reciclagem (HOMRICH et al., 2018).

Além disso, para viabilizar a geração de valor a partir de materiais e produtos em seu fim de vida útil, torna-se necessário coletá-los e reintroduzi-los na indústria. Logística reversa e métodos de tratamento adequados abrangendo a cadeia de entrega, triagem, armazenamento, gerenciamento de riscos, geração de energia e até biologia molecular e química de polímeros permitem que os materiais voltem ao mercado. É imprescindível que os sistemas de coleta sejam facilmente acessíveis e possam manter a qualidade dos materiais coletados. As cadeias de logística reversa para disseminar materiais para outras aplicações deverão ser otimizadas do início ao fim. Portanto, é essencial desenvolver as capacidades e a infraestrutura para avançar rumo a uma maior circularidade (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Não obstante a complexidade inerente à adoção de modelos circulares, os progressos tecnológicos têm a capacidade de gerar oportunidades crescentes para a sociedade. As tecnologias da informação e da indústria estão cada vez mais disponíveis *on-line* ou implantadas em grande escala, possibilitando a criação de abordagens de negócios baseadas na economia circular que não eram possíveis anteriormente. São avanços que propiciam maior colaboração e compartilhamento de conhecimento, melhor monitoramento de materiais, configuração mais eficiente de logística reversa e futura, e uso ampliado de fontes de energia renovável (OECD, 2020).

2.5. Considerações gerais

Os impactos ambientais, econômicos e sociais provenientes da economia linear, modelo econômico adotado desde a Revolução Industrial que se baseia em produzir, consumir e descartar, estão cada vez mais alarmantes. Perda da biodiversidade, aumento da produção de gases do efeito estufa, geração significativa de resíduos que não são propriamente geridos, poluição de água, ar e solo, esgotamento de recursos e grande desigualdade social são apenas alguns dos problemas que têm sido enfrentados globalmente, e que apontam para a necessidade de um novo modelo de produção e consumo que atenda à demanda da sociedade com um número radicalmente menor de materiais e emissões.

A economia circular aparece como uma maneira de conceitualizar e operacionalizar o desenvolvimento sustentável, fomentando a separação entre crescimento econômico e esgotamento dos recursos naturais ou degradação ambiental. Ao fechar o ciclo de vida linear do produto pelo desenho de modelos de negócios, sistemas e *designs* superiores e uso de energias renováveis, a EC tem como objetivo remover desperdícios e reter o máximo valor possível dos produtos e materiais envolvidos.

Existem diversas ferramentas para instrumentalizar a EC pelos ciclos técnicos e biológicos. A tradicional abordagem da reciclagem é apenas uma delas, e, segundo a diretriz do poder dos ciclos internos, deveria haver uma hierarquização entre as abordagens que maximizasse o uso de materiais e energia, deixando a recuperação da energia residual de um produto para o final de sua vida útil.

Diversos governos, empresas e organismos multilaterais estão discutindo a EC em seus planos e projetos para atender suas metas de sustentabilidade e usando-a como um instrumento de suporte para formular políticas regulatórias em diferentes níveis de governança: internacional, supranacional, nacional, regional e local. Devido à crescente relevância desse tema, o presente trabalho apresenta um levantamento tecnológico de artigos acadêmicos e patentes concedidas para traçar um horizonte das principais tendências acerca da economia circular pela metodologia de Prospecção Tecnológica e pretende servir como base para conduzir e ajudar no desenvolvimento de pesquisas futuras voltadas para a temática. Finalmente, o presente trabalho visa discutir as aplicações e a importância da EC no contexto de resíduos sólidos urbanos no Brasil, pela comparação com países já avançados no tema.

3. Capítulo 3 Referencial teórico sobre a Prospecção Tecnológica

3.1. Prospecção Tecnológica

Segundo Coelho (2003), é comum no Brasil o uso dos termos prospecção, estudos do futuro e prospectiva de forma intercambiável, para se referir às atividades de investigação que buscam antecipar mudanças tecnológicas, funcionais ou temporais, bem como compreender o significado de determinadas inovações (COELHO, 2003). O equivalente na língua inglesa é abordado como *forecast(ing)*, *foresight(ing)* e *future studies*, o que significa respectivamente previsão, visão e estudos de futuro, por fornecer tendências para determinada tecnologia, produto ou sistema. De acordo com Kupfer e Tigre (2004), “a Prospecção Tecnológica pode ser definida como um meio sistemático de mapear desenvolvimentos científicos e tecnológicos futuros capazes de influenciar de forma significativa uma indústria, a economia ou a sociedade como um todo” (KUPFER et al., 2004).

Dessa forma, quando as ações presentes alteram o futuro, como ocorre com a inovação tecnológica, não há um futuro único e, sim, possibilidades de futuros. Portanto, o uso da prospecção ajuda gestores a melhor aproveitar ou enfrentar oportunidades ou ameaças futuras, visando atingir seus objetivos a partir desse estudo antecipatório. A Prospecção Tecnológica permite que gestores se posicionem de modo a influenciar nas trajetórias tecnológicas, garantindo a competitividade de mercado, a sobrevivência das instituições pesquisa e desenvolvimento e beneficiando os usuários de seus resultados. Outra definição apresenta a prospecção como um processo sistemático que examina o futuro de longo prazo da ciência, tecnologia, economia e sociedade, com o objetivo de identificar áreas de pesquisa estratégicas e tecnologias emergentes que tenham o potencial de gerar grandes benefícios econômicos e sociais (SECTES/CEDEPLAR, 2009). De mesmo modo, Costa (2011) definiu a Prospecção Tecnológica como um tipo de busca, o qual faz o mapeamento da evolução de uma tecnologia, a identificação de mercados, o rastreamento de capacitação tecnológica e a orientação para pesquisa (COSTA, 2011).

Amparo et al. (2012) afirmam que estudos de Prospecção Tecnológica são de fundamental importância, e constituem a ferramenta básica para orientar os esforços empreendidos para o desenvolvimento de tecnologias, atuando como subsídios para ampliar

a capacidade de antecipação e estimulando a organização dos sistemas de inovação. Ainda segundo os autores, o objetivo dos estudos de prospecção não é desvendar o futuro e, sim, delinear e testar visões possíveis e desejáveis para que, no presente momento, sejam feitas escolhas que contribuirão, de forma mais significativa, na construção do futuro.

Os estudos de Prospecção Tecnológica, também chamados de estudos de futuro, ou *forecast(ing)*, *foresight(ing)* ou *future studies*, fornecem as principais tendências no contexto mundial, sendo possível segmentar estas tecnologias por setor da economia. Estes estudos auxiliam a identificação de tecnologias promissoras, úteis para uma determinada organização, bem como apontam para possibilidades de negócios e parcerias. A sistematização da prática de monitoramento tecnológico, a ser coberta pela Prospecção Tecnológica e de inovação, visa congrega a busca de soluções adequadas para a identificação e priorização de uma agenda de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), articulada com instituições de pesquisa, que possa inclusive influenciar a agenda de P&D nacional e criar demandas para a cadeia inovativa do setor (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

Para Teixeira (2013), os objetivos gerais e específicos de estudos de Prospecção Tecnológica podem ser resumidos conforme determinados no quadro 2.

Quadro 1 – Objetivos da Prospecção Tecnológica

Objetivos gerais	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar áreas de pesquisa estratégica e as tecnologias genéricas emergentes que têm a propensão de gerar os maiores benefícios econômicos e sociais.
Objetivos específicos	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar oportunidades ou ameaças futuras segundo as forças que orientam o futuro (desejável e indesejável). • Construir futuros (desejáveis e indesejáveis), antecipando e entendendo o percurso das mudanças. • Subsidiar e orientar o processo de tomada de decisão em ciência, tecnologia e inovação. • Identificar oportunidades e necessidades mais relevantes para a pesquisa futura, estabelecendo prioridades e avaliando impactos possíveis. • Promover a circulação de informação e de conhecimento estratégico para a inovação. • Prospectar os impactos das pesquisas atuais e da política tecnológica. • Descobrir novas demandas sociais, novas possibilidades e novas ideias. • Monitorar seletivamente as áreas econômica, tecnológica, social e ambiental.

Fonte: Adaptado de Teixeira, 2013.

O estudo prospectivo envolve o uso de múltiplos métodos ou técnicas, quantitativos e qualitativos, de modo a se compensar as possíveis deficiências trazidas pelo uso de técnicas ou métodos isolados. Uma vez que não faz sentido definir uma fórmula pronta para uma metodologia de prospecção, a escolha dos métodos e técnicas e seu uso dependem de cada situação (SANTOS et al., 2004). O propósito dos estudos de prospecção não é descobrir o futuro, mas sim delinear e testar visões possíveis e desejáveis para que sejam feitas, hoje, escolhas que contribuirão, da forma mais positiva possível, na construção do futuro. Tais visões podem ajudar a gerar políticas de longo prazo, além de estratégias e planos que dispõem circunstâncias futuras prováveis e desejáveis (MAYERHOFF, 2008).

A prospecção tem, então, destaque por ser capaz de nortear empresas e institutos. Com a análise prospectiva tem-se um conjunto de conceitos e técnicas que antevem o comportamento das variáveis socioeconômicas, políticas, tecnológicas e culturais, assim como a consequência da interação de ditas variáveis. Configurando uma primeira etapa do planejamento em espaços temporais distintos (BORSCHIVER et al., 2016).

3.2. Uso de patentes e artigos científicos como ferramentas de Prospecção Tecnológica

A Prospecção Tecnológica, no seu processo inicial, identifica um tema que necessita de monitoramento. A estratégia é estabelecida pelo profissional da informação em parceria com o pesquisador. As fontes de informação, preferencialmente de natureza técnica e científica, são identificadas, coletadas, analisadas e estruturadas (AMPARO et al., 2012).

O artigo científico, pela sua condição de fonte de informação original e de qualidade, constitui-se como um veículo de transmissão do conhecimento produzido pelos pesquisadores, servindo de literatura base para corroborar os estudos já existentes e inspirar novas pesquisas (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

Por outro lado, uma das formas de se avaliar o desenvolvimento tecnológico de um segmento/setor da indústria é pela análise de documentos de patentes. Segundo Borschiver e Silva (2016), as patentes apresentam-se como excelentes indicadores de inovação, pois podem servir para medir os resultados de P&D, produtividade, estrutura e a evolução de uma tecnologia/indústria específica.

A Prospecção Tecnológica, utilizando informações oriundas dos documentos de patentes, se mostra uma potente ferramenta e um instrumento bastante eficaz no apoio à tomada de decisão, tendo em vista o estado da arte disponível no seu conteúdo, que permite identificar tecnologias relevantes, parceiros, concorrentes no mercado, rotas tecnológicas, inovações, investimentos, processos, produtos, P&D, fusões e aquisições, entre outras (AMPARO et al., 2012, p. 200).

Para Coelho (2003), a análise de patentes se baseia no pressuposto de que o aumento do interesse por novas tecnologias se refletirá no aumento da atividade de P&D e que isso, por sua vez, resulta no aumento de depósito de patentes. Assim, presume-se que se pode identificar novas tecnologias pela análise dos padrões de pedidos de patentes em determinados campos. No entanto, vale ressaltar que o uso de patentes como indicador de inovações possui limitações: as inovações nem sempre correspondem às invenções patenteadas, e nem todas as invenções patenteadas possuem valor tecnológico ou econômico (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

A patente consiste em um título de propriedade temporária sobre uma invenção ou modelo de utilidade, outorgados pelo Estado aos inventores ou autores ou outras pessoas físicas ou jurídicas detentoras de direitos sobre a criação. Em outras palavras, uma patente é um direito exclusivo de um produto ou processo que geralmente fornece uma nova maneira de fazer algo, ou oferece uma nova solução técnica para um problema (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

Neste contexto, e dada a importância da economia circular no cenário global, é que se desenvolve a presente proposta relativa à prospecção das tecnologias envolvendo a definição, habilitadores e aplicações do conceito.

4. Capítulo 4 Metodologia de pesquisa

4.1. Metodologia de pesquisa

No presente estudo foi utilizada a metodologia do Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos (NEITEC), grupo de pesquisa da Escola de Química da UFRJ, liderado pela professora Suzana Borschiver, sendo desenvolvida em três fases: pré-prospectiva, Prospecção Tecnológica e pós-prospectiva.

- Fase 1 – pré-prospectiva: etapa em que são definidos objetivos, escopo, abordagem, metodologia com seu devido detalhamento e o levantamento da fonte de dados.
- Fase 2 – Prospecção Tecnológica ou prospectiva: etapa referente à coleta, ao tratamento e à análise dos dados. Durante a fase 2, o conhecimento obtido na fase 1 é utilizado para realização de buscas direcionadas, utilizando-se palavras-chave, a partir de documentos técnicos como artigos científicos e patentes.
- Fase 3 – pós-prospectiva: é a etapa que inclui a demonstração dos resultados, a implantação das ações e o monitoramento (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

Figura 10 – Fases da Prospecção Tecnológica



Fonte: Adaptado de Borschiver e Silva, 2016.

Fase 1: Pré-prospectiva

Em mais detalhes, a fase 1, pré-prospectiva, consistiu na definição da metodologia de Prospecção Tecnológica e na busca das fontes de informação a serem empregadas para as análises em fases posteriores. Tais levantamentos foram obtidos a partir de uma busca geral por informações acerca do assunto definido em mídias especializadas, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, *sites* e revistas.

Inicialmente, o aprofundamento no assunto “economia circular” foi concebido a partir da construção de uma visão geral do tema e das terminologias e definições envolvidas com o intuito de se formar uma visão técnica fundamentada. Para tanto, foi conduzida uma extensa revisão bibliográfica, abrangendo a origem da economia circular, suas aplicações em diversos campos e sua relevância para o contexto atual. Tal construção foi orientada de forma ampla por meio da plataforma SCOPUS, do Google Scholar e dos periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O resultado desta fase contribuiu para a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2 e para a definição do escopo do trabalho, a partir do qual os seguintes critérios foram definidos:

- seleção da base de dados a ser adotada para as fases seguintes;
- limitação do período de busca;
- levantamento das principais instituições detentoras de artigos científicos e patentes a respeito do tema escolhido.

Para o presente trabalho foram analisados diversos artigos científicos e patentes concedidas. Os artigos científicos foram escolhidos pois não só servem como literatura base para corroborar estudos já existentes, mas também inspiram novas pesquisas. Por outro lado, a análise de patentes foi realizada para avaliar o desenvolvimento tecnológico de um segmento ou setor da indústria, uma vez que as patentes são indicadores importantes de inovação, fornecendo informações valiosas sobre os resultados de P&D e a evolução de uma determinada tecnologia ou indústria (BORSCHIVER, SILVA, 2016).

Fase 2: Prospectiva

Na fase 2, de Prospecção Tecnológica, utilizam-se as bases de dados definidas na fase 1 e os conhecimentos adquiridos para a busca de palavras-chave e definição de taxonomias de classificação (*drivers*) para os níveis MACRO, MESO e MICRO, especificando e associando cada documento aos ditos pontos. O intuito da fase prospectiva é o delineamento da prospecção da inovação por algumas análises, como: análise da curva de crescimento da

tecnologia, levantamento das principais instituições detentoras de artigos científicos e patentes, reconhecimento dos principais aspectos específicos que se relacionam à EC pelas taxonomias, monitoramento da atuação comercial dos principais *players* utilizadores da EC, entre outros.

Segundo Borschiver e Silva (2016), as taxonomias de classificação delimitadas durante a fase 2 foram subdivididas em três níveis: MACRO (objetiva), MESO e MICRO (subjetivas):

- CLASSE NÍVEL MACRO: neste nível, os documentos são analisados de acordo com a distribuição histórica de publicações, a distribuição por países, por instituições ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento da tecnologia e parcerias (entre pessoas físicas, empresas, universidades e outras instituições);
- CLASSE NÍVEL MESO: corresponde à extração das principais informações dos documentos para categorizar e criar taxonomias com perspectivas de mercado, produto e tecnologia. Aqui, os documentos são classificados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno do tema;
- CLASSE NÍVEL MICRO: por fim, nesta categoria são identificadas, detalhadas e analisadas as particularidades de cada taxonomia da análise MESO, visando explorá-la melhor. São analisadas e extraídas informações mais detalhadas para definir, dentro de cada taxonomia de classe MESO, as subcategorias MICRO, permitindo agrupá-las por similaridade, quantificar frequências e descobrir padrões dentro dos dados.

Fase 3: Pós-prospectiva

Chegando à fase final, o conhecimento que foi auferido é organizado em taxonomias e separado de acordo com a evolução temporal (curto, médio e longo prazo). Como resultado, tem-se o *roadmap* tecnológico. A construção de um *roadmap* tecnológico exige um estudo extenso, a inclusão de patentes depositadas e análise aprofundada de *players*. Por limitações de escopo, o presente trabalho discutirá as conclusões da fase prospectiva e a aplicação da economia circular em um caso de uso, se limitando a não concluir a fase pós-prospectiva. Importante ressaltar, porém, que o presente estudo poderá servir como subsídio para a elaboração de um *roadmap* tecnológico sobre o tema.

4.2. Estratégia de busca de artigos científicos

A metodologia de pesquisa empregada na fase de mapeamento de artigos científicos referentes a este projeto consistiu na busca por palavras-chave pela base de dados SCOPUS (Elsevier, Amsterdã), que foi selecionada pela sua grande abrangência, facilidade de *download* de uma grande quantidade de documentos, alta relevância dos artigos científicos e análises para classe nível MACRO facilitadas pela própria estrutura do *site*. Em todas as buscas, inclusive para patentes (discutido no próximo subtópico deste capítulo), operadores booleanos (AND, OR e ANDNOT) e *wildcards* (*, \$, entre outros) foram combinados com as palavras-chave selecionadas para limitar e orientar a busca ao campo de interesse.

A palavra-chave utilizada na base SCOPUS foi “*circular economy*” (tradução inglesa do termo economia circular) AND “*municipal solid waste*” (tradução inglesa do termo resíduos sólidos urbanos). A busca foi realizada para os campos de título, resumo e palavras-chave do artigo. Os filtros utilizados foram:

- tipo de acesso: livre;
- tipo de documento: artigo;
- idiomas: inglês, espanhol, português e francês;
- período de busca: sem limitação temporal.

Cabe ressaltar que a busca por documentos ocorreu em maio de 2023 retornou 269 artigos, conforme ilustrado na figura 11. Na sequência foi realizado um entendimento qualitativo dos 35 artigos mais recentes publicados na plataforma para entendimento da relevância do artigo para a pesquisa, que buscava compreender o quanto a EC se relacionava com a espinha dorsal do artigo. Caso a EC fosse tratada como prioridade ou se relacionasse diretamente ao fio condutor do artigo, o artigo seria considerado relevante. Caso apenas fosse citada no resumo, mas não contribuísse para conclusões ou metodologia, o artigo seria considerado não relevante.

Figura 11 – Busca realizada na base SCOPUS em maio de 2023.



Dos 269 artigos encontrados, os 35 mais recentes foram analisados quanto à sua relevância e classificados entre as taxonomias de classificação com três níveis diferentes.

Classe nível MACRO: os documentos foram analisados de acordo com a distribuição histórica das publicações; a distribuição por países envolvidos; e a distribuição por organizações ligadas ao conhecimento científico e desenvolvimento da tecnologia.

Classe nível MESO: os documentos foram categorizados de acordo com os aspectos mais relevantes em torno do tema.

Classe nível MICRO: foram identificadas, detalhadas e analisadas as particularidades de cada taxonomia da análise MESO.

A seguir, são descritas as taxonomias de classificação de nível MESO e MICRO utilizadas para artigos científicos.

- **Matéria-prima:** embora a maior parte dos artigos use resíduos sólidos urbanos em geral como matéria-prima para novas tecnologias ou modelos de negócios, alguns artigos especificam o tipo de resíduo utilizado, e esses artigos foram classificados na taxonomia “matéria-prima”, com o respectivo resíduo especificado classificado nas taxonomias de classe nível MICRO representadas abaixo.
 - **Resíduos orgânicos**
 - **Metais**
 - **Vidros**
 - **Plásticos**
 - **Papéis**
 - **Materiais eletroeletrônicos**

- **Produto final:** diversos artigos discutem a valorização de resíduos sólidos urbanos enquanto produtos reciclados ou reutilizados, fechando o ciclo econômico e promovendo uma economia circular. Assim como na taxonomia “**matéria-prima**”, alguns artigos especificam o produto final e, por esse motivo, foram classificados na presente taxonomia. As taxonomias de classe nível MICRO inclusas nessa taxonomia são:
 - **Cimento e materiais de construção**
 - **Cinza residual:** resíduos sólidos resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos
 - **Biocombustíveis**
 - **Fertilizantes e produtos agrícolas**
- **Habilitador:** nesta taxonomia entram artigos que discutem o que é necessário para que uma gestão de RSU baseada na economia circular ocorra. Dentre as taxonomias de classe nível MICRO estão:
 - **Dados de gestão:** dados coletados por municípios ou empresas privadas sobre as diferentes etapas da gestão de RSU que permitam análise de sua efetividade ou nível de sustentabilidade
 - **Viabilidade financeira:** entraram nesta taxonomia artigos que discutem investimentos necessários, programas de cobrança municipal e discussões aprofundadas sobre redução de custo ou rentabilização da gestão de resíduos
 - **Modelo de negócio**
 - **Conscientização da sociedade**
 - **Coleta adequada**
 - **Pureza dos materiais**
- **Tecnologia:** estão inclusos nesta taxonomia artigos que apresentam tecnologias ou processos específicos para instrumentalização da EC em RSU.
 - **Incinerador**
 - *Machine Learning*
 - **Reciclagem**
 - **Compostagem**
 - **Reúso**

- Objetivo: artigos que discutem especificamente objetivos da adoção de uma gestão de resíduos sólidos urbanos mais circular, trazendo motivos explícitos e dados para tal.
 - **Redução de GEE**
 - **Produção de energia**
 - **Orientação para Políticas Públicas**
 - **Otimização da recuperação de materiais**
 - **Despoluição de materiais tóxicos**

Cabe ressaltar que um mesmo documento pode ser classificado em mais de uma taxonomia de classe nível MESO ou MICRO, e essa possibilidade de multiclassificação faz com que a soma dos artigos por taxonomia resulte em mais que o total de artigos analisados.

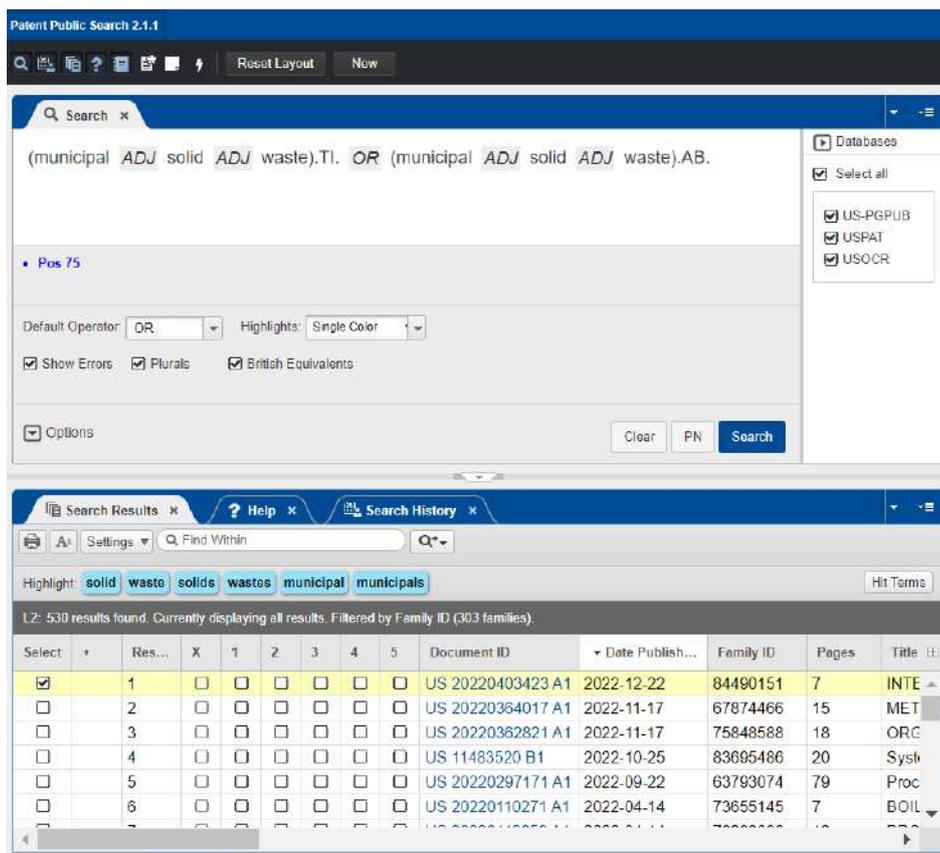
4.3. Estratégia de busca de patentes

Para patentes concedidas, a fonte utilizada foi o site do *United States Patent and Trademark Office* (USPTO – escritório de marcas e patentes dos Estados Unidos).

O USPTO foi escolhido pois os Estados Unidos são uns dos maiores centros de tecnologia do mundo e possuem um grande mercado consumidor, sendo assim, detentores de uma grande quantidade de pedidos de patentes de empresas de todo o globo e de diversas áreas tecnológicas.

A busca foi feita na página de pesquisa pública de patentes concedidas (The Patent Public Search tool, <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/landing.html>), uma ferramenta de pesquisa de patentes disponível desde setembro de 2022. O termo empregado na referida busca foi novamente *municipal solid waste* nos campos *title* (.TI.) e *abstract* (.AB.), optando assim, pela busca por patentes concedidas cujo termo estivesse presente no título ou no resumo, como mostrado na imagem a seguir (figura 12).

Figura 12 – Busca realizada na pesquisa pública da USPTO em maio de 2023



Foram encontradas 530 patentes com o termo na base de patentes americanas. As 35 patentes mais recentes encontradas na base UPSTO foram analisadas nas classes nível MACRO, MESO e MICRO, apresentadas previamente para estratégia de busca de artigos. Parte dos *drivers* se mantiveram da análise de artigos, mas alguns ajustes foram necessários. Os *drivers* MESO e MICRO utilizados para patentes foram:

- **Matéria-prima:** embora a maior parte das patentes use resíduos sólidos urbanos em geral como matéria-prima para novas tecnologias ou modelos de negócios, algumas especificam o tipo de resíduo utilizado, e as mesmas foram classificadas na taxonomia “matéria-prima”, com o respectivo resíduo especificado classificado nas taxonomias de classe nível MICRO representadas abaixo.
 - **Resíduos orgânicos**
 - **Vidros**
 - **Plásticos**
 - **Papéis**

- **Cinza residual:** diferente dos artigos, em que cinza residual era discutida como produto final, nas patentes ela aparece como matéria-prima para outros produtos
- **Produto final:** patentes que discutem a valorização de resíduos sólidos urbanos enquanto produtos reciclados ou reutilizados, fechando o ciclo econômico e promovendo uma economia circular. Assim como na taxonomia “**matéria-prima**”, algumas patentes especificam o produto final e, por esse motivo, foram classificadas na presente taxonomia. As taxonomias de classe nível MICRO inclusas nessa taxonomia são:
 - **Cimento e materiais de construção**
 - **Biocombustíveis**
 - **Celulose e outros açúcares:** incluído para patentes
- **Habilitador:** nesta taxonomia entram patentes que discorrem sobre o que é necessário para que uma gestão de RSU baseada na economia circular ocorra. Dentre as taxonomias de classe nível MICRO estão:
 - **Dados de gestão**
 - **Modelo de negócio**
 - **Conscientização da sociedade**
 - **Coleta adequada**
 - **Pureza dos materiais**
- **Tecnologia:** estão inclusos nesta taxonomia patentes que apresentam tecnologias ou processos específicos para instrumentalização da EC em RSU.
 - **Incinerador**
 - **Reciclagem**
 - **Compostagem**
 - **Processamento preliminar de resíduos:** patentes que discutem pré-tratamentos ou processos que facilitarão uma posterior reciclagem ou incineração
- **Objetivo:** patentes que discutem especificamente objetivos da adoção de uma gestão de resíduos sólidos urbanos mais circular, trazendo motivos explícitos e dados para tal.
 - **Redução de GEE**
 - **Produção de energia**
 - **Otimização da recuperação de materiais**

- **Despoluição de materiais tóxicos**
- **Recuperação de aterros**

5. Capítulo 5 Resultados e discussões

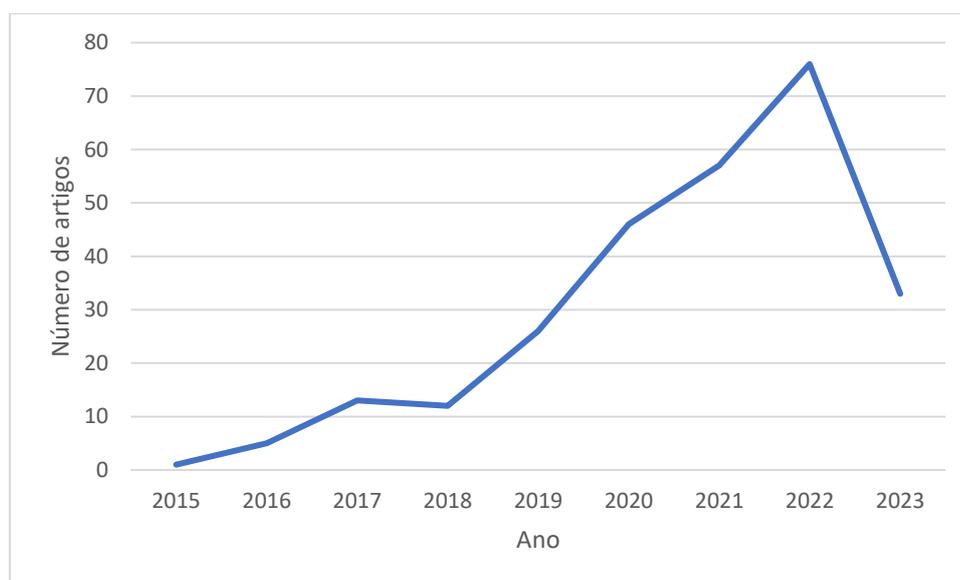
Com base na metodologia de Prospecção Tecnológica adotada no presente trabalho, o Capítulo 4 apresentou os passos referentes à fase 1 (pré-prospectiva), onde a metodologia de prospecção tecnológica foi explanada e detalhada, definindo ainda a fonte de informações a ser adotada. Por conseguinte, o presente capítulo tratar-se-á dos resultados obtidos, integrando as fases 2 e 3, as quais consistem nas etapas prospectiva e pós-prospectiva, respectivamente.

5.1. Artigos científicos

5.1.1. Análise MACRO

A partir da pesquisa de *circular economy* e *municipal solid waste* em títulos, resumos e palavras-chave de artigos de acesso aberto na base SCOPUS, limitada aos idiomas inglês, francês, espanhol e português, foi possível encontrar 269 documentos de 2006 a 2023. Desses documentos, 88% foram publicados de 2019 a 2023, sendo 2022 e 2021 responsáveis por 28% e 21% das publicações, respectivamente. A queda no ano de 2023 não é indicativo de menos publicações sendo feitas neste ano, e sim de uma limitação temporal: a pesquisa foi realizada em maio do mesmo ano, enquanto os demais anos estão completos.

Figura 13 – Gráfico de documentos publicados por ano com *circular economy* no título, resumo ou palavra-chave



O primeiro ponto de atenção no gráfico da figura 13 é o início da publicação de artigos. A base SCOPUS possui artigos desde 1960, e *circular economy* e *municipal solid waste* em títulos, resumos e palavras-chave aparece apenas em 2015, o que indica a novidade do tema, já que a primeira menção foi feita há menos de 10 anos.

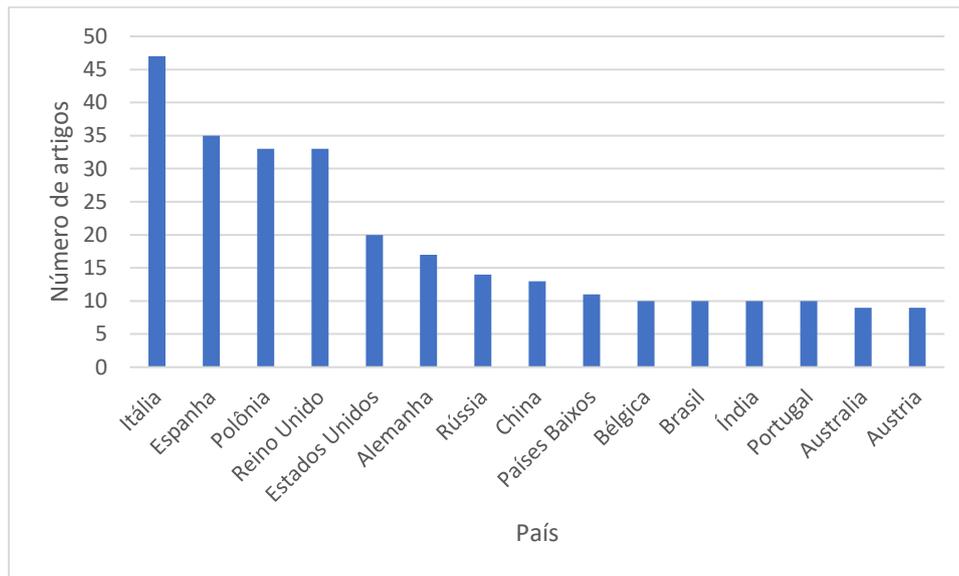
O início da publicação de artigos em 2015 provavelmente se deve à criação da Estratégia de Economia Circular da União Europeia, em 2015, um plano com novas regulações e incentivos que visava metas comuns de sustentabilidade entre países-membros (COMISSÃO EUROPEIA, 2015).

Segundo o vice-presidente da Comissão Europeia na época, Jyrki Katainen, a estratégia era

eliminar as barreiras que dificultam a otimização do uso de recursos pelas empresas e impulsionar o mercado interno de matérias-primas secundárias. O objetivo é alcançar um progresso real e que essa ambição seja alcançada em conjunto com não apenas os Estados-membros, regiões e municípios, mas também com as empresas, a indústria e a sociedade civil (COMISSÃO EUROPEIA, 2015).

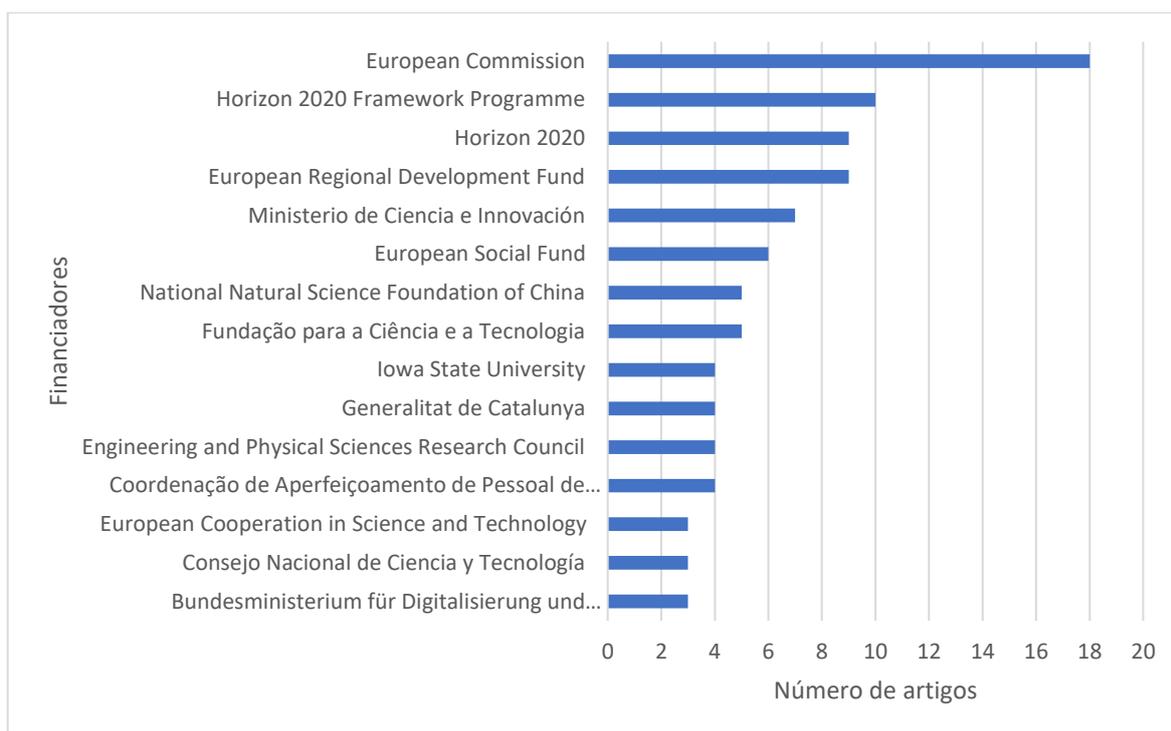
Analisando o período completo de busca, os 15 países que mais publicaram artigos estão representados na figura 14. Os três primeiros países, Itália, Espanha e Polônia representam, respectivamente, 11%, 8% e 8% de todas as publicações sobre o tema. O Brasil se encontra em 11º, com 10 artigos publicados.

Figura 14 – Número de artigos publicados por país entre 2015 e 2023



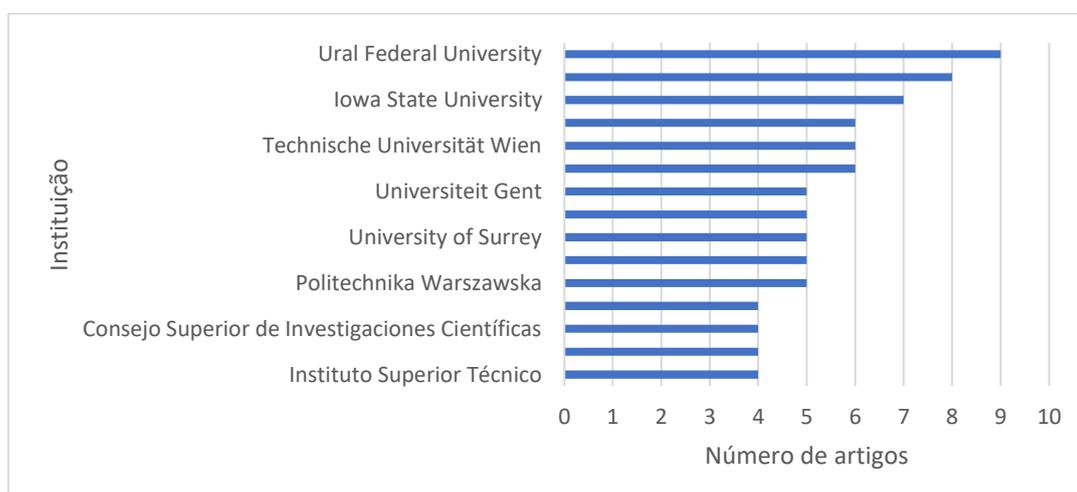
Os países europeus também se destacam nos principais financiadores de pesquisas sobre o tema, conforme apresentado na figura 15. O Horizon 2020, um dos principais financiadores entre os artigos analisados, foi o programa de financiamento de pesquisa e inovação da União Europeia de 2014 a 2020 com um orçamento de quase €80 bilhões (COMISSÃO EUROPEIA, 2020). Entre os 15 maiores financiadores de artigos sobre o tema, somente dois organismos não europeus aparecem: o National Natural Science Foundation of China (Fundação Nacional de Ciência Natural da China), em 7º com 5 documentos, e a CAPES, brasileira, em 12º com 4 documentos.

Figura 15 – Número de artigos por organismos financiadores de pesquisa de 2015 a 2023



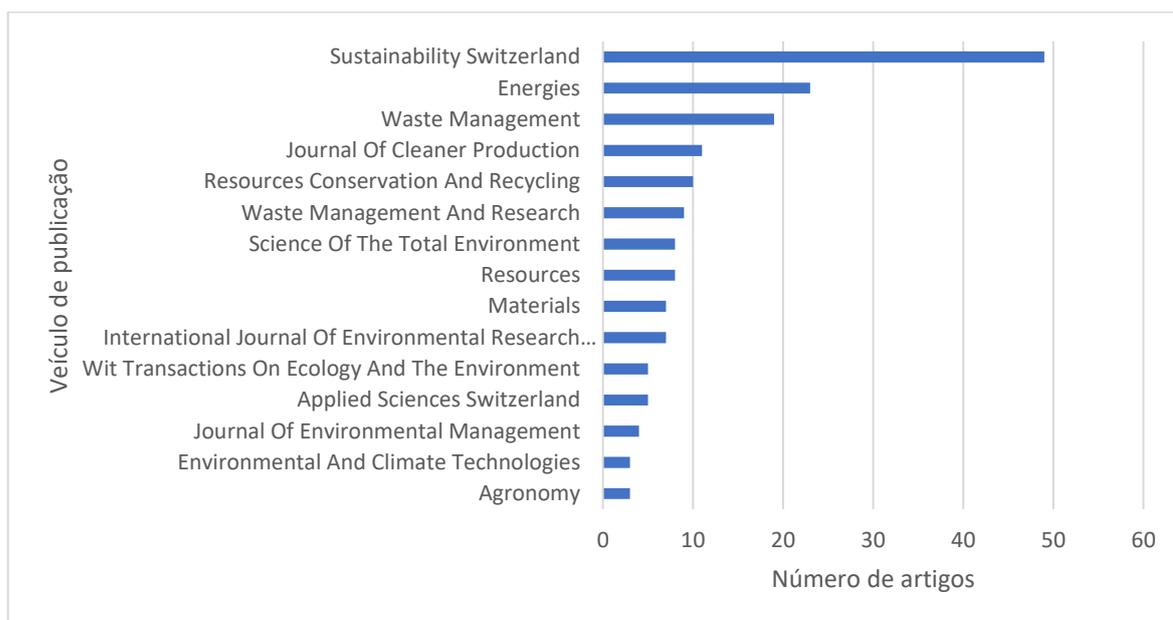
Ao se observar as 15 maiores instituições responsáveis por publicações acerca do tema, despontaram como as que mais publicam artigos a Ural Federal University, da Rússia, com 9 publicações; a Wrocław University of Environmental and Life Sciences, polonesa, com 8 publicações e a Iowa State University, americana, com 7 artigos publicados. O gráfico reitera as informações supracitadas (figura 16).

Figura 16 – Gráfico com as 10 instituições com o maior número de publicações sobre economia circular de 2015 a 2023



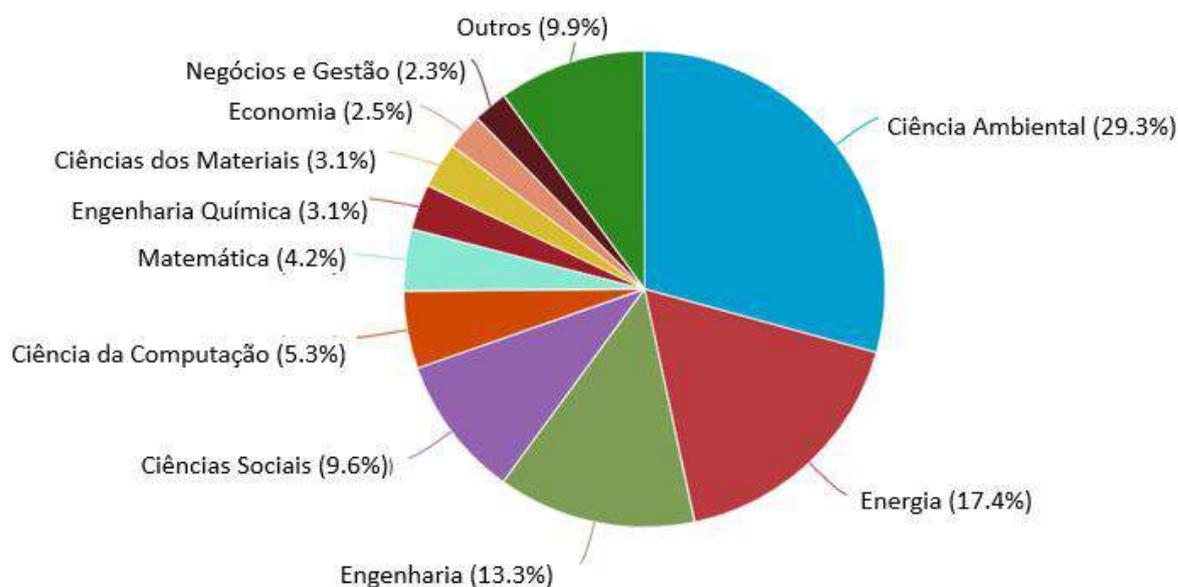
Os cinco maiores veículos de publicação a respeito do tema podem ser encontrados no gráfico abaixo (figura 17), com destaque para o Sustainability Switzerland, com 18% de todos os artigos publicados sobre o tema e uma crescente de publicações desde 2018.

Figura 17 – Gráfico dos cinco maiores veículos de publicações



Por último, subdividindo as principais publicações em áreas, obtiveram-se como áreas mais relevantes ciência ambiental, com 29,3% dos artigos publicados, energia com 17,4% e engenharia, com 13,3%, conforme pode ser visto na figura 18. Dada a relevância da EC para o desenvolvimento sustentável e sua importância para a recuperação dos danos ambientais causados pela economia linear, é de se esperar que “ciência ambiental” se destaque dentre as áreas de estudo. O uso de resíduos como fonte de energia, tão utilizado por diversos países europeus, também justifica a maior incidência de “energia” como área.

Figura 18 – Gráfico da divisão das publicações por área de conhecimento



5.1.2. Análises MESO e MICRO

Na análise MESO foram definidos os tópicos abordados nas publicações. Entre os 269 artigos apresentados na plataforma, foram analisados os 35 documentos mais recentes, todos datados de 2023.

Dos 35 artigos analisados, apenas 7 eram fruto de parcerias entre universidades e empresas. Nenhuma empresa se repete e, com exceção da *Bioproducts* e *Hughes Energy*, parceiras em um artigo e empresas americanas, todas as demais são europeias, conforme explicitado na tabela abaixo. Se destacam empresas focadas na gestão de RSU e demais empresas que desenvolvem tecnologias ambientais (produção de bioprodutos, biomassa, etc).

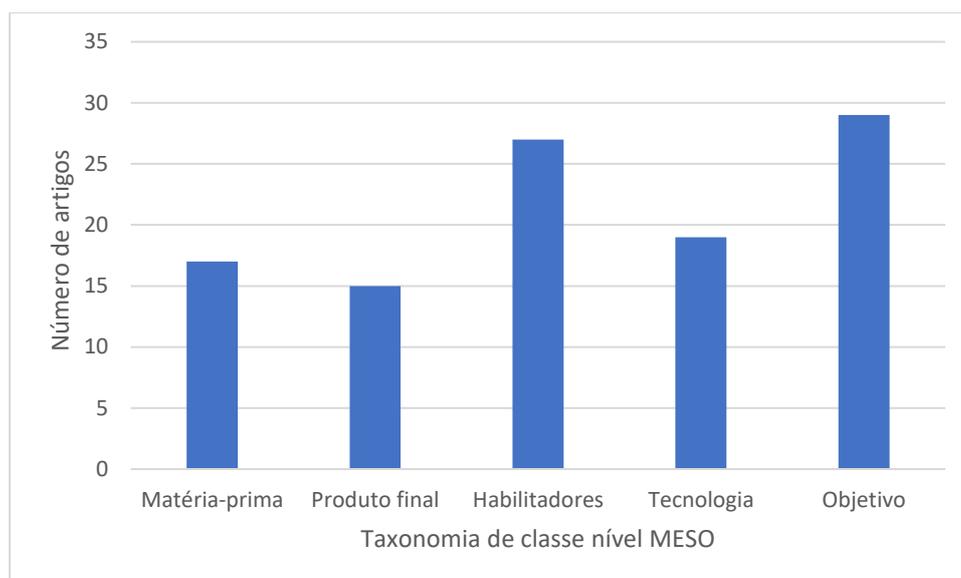
Tabela 1 – Empresas parceiras de universidades em 7 artigos analisados e suas respectivas áreas de atuação

Empresa	País	Descrição
British Geological Survey	Reino Unido	Organização de pesquisa de ciências da Terra, fundada em 1835, que fornece informações geológicas e hidrológicas para o governo do Reino Unido e para a indústria.
Bioproducts Research Unit	Estados Unidos	Unidade de pesquisa do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) que se

		dedica a pesquisas em bioprodutos, com foco em resíduos agrícolas e florestais. Foi fundada em 1945.
Hughes Energy LLC	Estados Unidos	Empresa de tecnologia energética fundada em 2012, que se dedica à produção de energia limpa e renovável a partir de resíduos sólidos urbanos.
German Biomass Research Centre (DBFZ)	Alemanha	Centro de pesquisa em biomassa que realiza pesquisas em tecnologias de conversão de biomassa para energia e produtos químicos. Foi fundado em 2008.
Altstoff Recycling Austria AG	Áustria	Empresa de reciclagem que se dedica à gestão de resíduos sólidos urbanos e de construção. Foi fundada em 1992.
PST Transgór S.A.	Polônia	Empresa de gestão de resíduos que se dedica à coleta, transporte e disposição final de resíduos sólidos urbanos e perigosos. Foi fundada em 2001.
Fondazione Edmund Mach	Itália	Fundação de pesquisa em agricultura, meio ambiente e tecnologias alimentares, fundada em 2008.
Calabra Maceri e Servizi s.p.a.	Itália	Empresa de gestão de resíduos que se dedica à coleta, transporte e disposição final de resíduos sólidos urbanos e industriais. Foi fundada em 1976.
UdR INSTM-STEMS	Itália	Unidade de pesquisa em ciência e tecnologia de materiais, sediada na Universidade de Nápoles Federico II. Realiza pesquisas em materiais avançados e nanotecnologia. A UdR INSTM-STEMS foi fundada em 2004.

O resultado da classificação dos artigos analisados em taxonomias de classe nível MESO estão representados na figura 19.

Figura 19 – Número de artigos por taxonomia de classe nível MESO



É possível notar que a taxonomia mais citada foi “**Objetivo**”, presente em 83% dos artigos, seguida por “**Habilitadores**”, presente em 77% e “**Tecnologias**”, 54%. Uma hipótese para a predominância da taxonomia “**Habilitadores**” é a novidade do tema economia circular – diversos artigos discutem novas tecnologias, modelos de negócio e demais fatores necessários para que a EC seja implementada em RSU. Provavelmente, com o avanço do tema e a crescente adoção de modelos circulares, taxonomias como “**Produto final**” podem se tornar mais relevantes, além de outros aspectos que não se mostraram relevantes nessa pesquisa, como melhoria contínua ou aprimoramento de processos.

Na análise MICRO, os tópicos abordados nas taxonomias de classe nível MESO foram aprofundados. Assim, identificaram-se os principais temas abordados, de forma a classificar, para cada um dos *drivers*, as subcategorias. A divisão dos artigos em categorias de classe nível MICRO está representada na tabela 2.

Tabela 2 – Divisão de artigos em taxonomias de classe nível MICRO

Taxonomia de classe nível MACRO	Taxonomia de classe nível MICRO	Número de artigos
Matéria-prima	Resíduos orgânicos	9
	Plásticos	4
	Metais	3
	Vidros	2
	Papel	2

	Materiais eletroeletrônicos	1
Produto final	Biocombustível	6
	Fertilizantes e produtos agrícolas	5
	Cimento e materiais de construção	4
	Cinza residual	3
Habilitador	Modelo de negócio	12
	Coleta adequada	11
	Viabilidade financeira	10
	Conscientização da sociedade	7
	Dados de gestão	4
	Pureza de materiais	4
Tecnologia	Reciclagem	11
	Incinerador	6
	Compostagem	3
	<i>Machine learning</i>	2
	Reuso	2
Objetivo	Otimização de recuperação de materiais	15
	Produção de energia	10
	Orientação Políticas Públicas	10
	Redução GEE	6
	Despoluição de materiais tóxicos	4

Como apresentado acima, as taxonomias de classe nível MICRO mais abordadas foram, em ordem decrescente: “**otimização da recuperação de materiais**” (presente em 43% dos artigos relevantes), “**modelo de negócio**” (34%), “**coleta adequada**” (31%), “**reciclagem**” (31%) e “**viabilidade financeira**” (29%). Também se destacam “**produção de energia**” (29%), “**orientação de políticas públicas**” (29%), “**resíduos orgânicos**” (26%), “**conscientização da sociedade**” (20%) e “**biocombustível**” (17%).

Dado que o intuito da economia circular em resíduos sólidos urbanos visa a valorização do resíduo enquanto material a ser recuperado e reinserido no ciclo econômico, era de se esperar que “**otimização da recuperação de materiais**” fosse um grande tema dentre as taxonomias de classe nível MICRO. Devida novidade do tema economia circular, muitos modelos de negócio novos são discutidos nos artigos para viabilizar a circularidade e promover técnicas de recuperação de resíduos.

Um exemplo de artigo que representa essa taxonomia de classe nível MICRO é intitulado *Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste*

incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator (BLASENBAUER, 2023). O artigo discute qual melhor método para incineração de resíduos, considerando a posterior recuperação de materiais recuperáveis em cinzas residuais, como metais, vidro e minerais. Os resultados mostram que a qualidade dos materiais recuperáveis nas cinzas residuais da planta de combustão em leito fluidizado é melhor.

“**Produção de energia**”, “**resíduos orgânicos**” e “**biocombustível**” ganham destaque graças a diversos artigos que discutem o uso da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos para produção de biocombustíveis. Um exemplo é o artigo *Energetic Valorization of Bio-Waste from Municipal Solid Waste in Porto Santo Island* (PEREIRA & SILVA, 2023), que discute a produção de biogás a partir da fração de resíduos orgânicos dos RSU na ilha de Porto Santo, em Portugal. As metodologias utilizadas no estudo incluem a identificação e mapeamento de recursos, análise de parâmetros e soluções de processo, iniciativa piloto para separação e coleta de resíduos alimentares, desenvolvimento de soluções de processo e determinação de investimentos, custos de produção e receitas. O estudo é realizado na ilha de Porto Santo, visando reduzir os custos de transporte marítimo de resíduos para a ilha da Madeira e contribuir para o desenvolvimento de uma solução inovadora para a valorização energética de resíduos orgânicos, incluindo a participação da comunidade local.

Há uma preocupação constante nos artigos de viabilidade e atratividade financeira das atividades de gestão de resíduos sólidos, o que justifica a relevância da taxonomia de classe MICRO “**viabilidade financeira**”. Diversos artigos discutem não só a tecnologia necessária, mas o nível de investimento e as ações necessárias para que as inovações se tornem rentáveis. É um forte indício da baixa atratividade de investimentos do setor, que ainda precisa provar o valor de resíduos como matérias primas e alternativa rentável.

A menor incidência de drivers diferentes de “**reciclagem**” em “**Tecnologia**” indica que ainda há espaço para avançar em dois conceitos importantes: o poder dos ciclos internos e o poder de circular por mais tempo. A taxonomia de classe nível MICRO “**reúso**” aparece em apenas 2 artigos, versus 11 artigos classificados em “**reciclagem**” e, segundo o poder dos ciclos internos e o diagrama da borboleta da Fundação Ellen MacArthur (figura 7, na seção 2.4), a reciclagem deveria ser a última etapa do ciclo técnico. Ou seja, demais conceitos, como “remanufatura”, “reforma” e reparo” poderiam possuir maior incidência.

Dois dos grandes habilitadores para o aumento de incidência das demais tecnologias de valorização de produtos presente no ciclo técnico, quando pensamos em RSU, são a “**coleta adequada**” e a “**conscientização da população**”. A coleta adequada de resíduos permite

que a destinação correta seja realizada mais facilmente, e a conscientização da população é fundamental para que recursos como a coleta seletiva sejam bem-sucedidos. O destaque de “**coleta adequada**” enquanto taxonomia de classe nível MICRO mostra como os autores identificam a necessidade de ações que a viabilize.

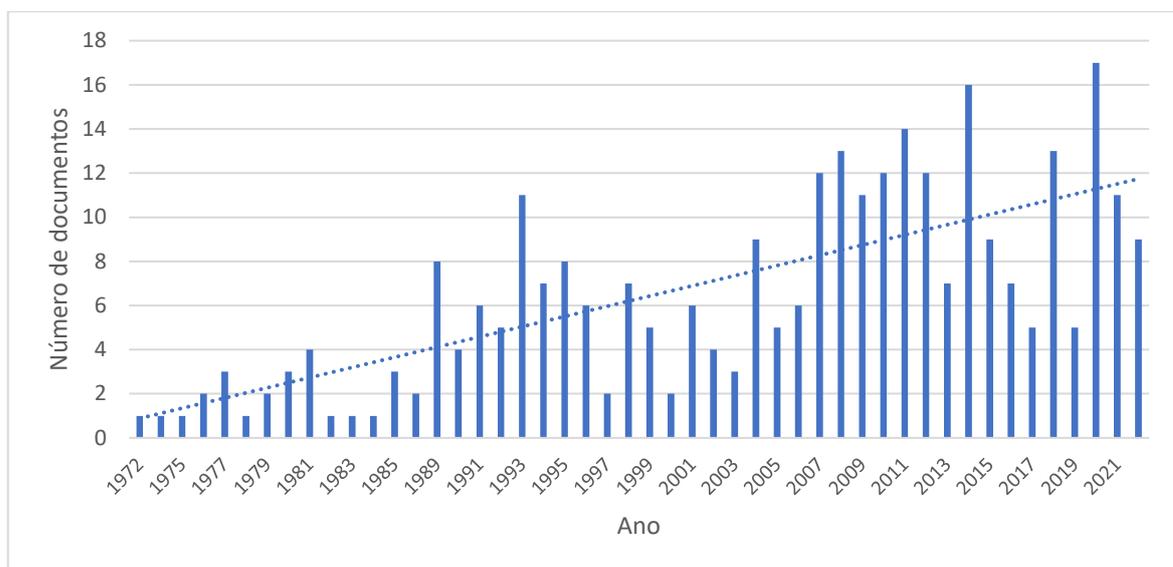
Por último, vale ressaltar a taxonomia de classe nível MICRO “**orientação políticas públicas**”, que inclui artigos discutindo referências e possíveis diretrizes para influenciar gestores que tomam decisões políticas. Um exemplo interessante é o artigo *Waste management beyond the COVID-19 pandemic: Bibliometric and text mining analyses* (RANJBARI, 2023), que apresenta uma análise bibliométrica da produção científica relacionada à gestão de resíduos no contexto da pandemia de COVID-19. Devido ao aumento de demanda por equipamentos de proteção pessoal, em especial máscaras faciais, uma quantidade significativa de resíduos foi gerada em todo o mundo. O artigo apresenta os desafios encontrados por profissionais, tomadores de decisão e autoridades municipais, além de descrever os sete principais temas de pesquisa na área de gestão de resíduos relacionados à COVID-19 e propostas de incentivos para envolver efetivamente setores informais e capacidades locais na descentralização da gestão municipal de resíduos, com foco em países em desenvolvimento.

5.2. Patentes

5.2.1. Análise MACRO

A partir da busca de *municipal solid waste* nos campos *title* (.TI) e *abstract* (.AB.) em patentes concedidas da base UPSTO foram encontradas 530 patentes depositadas divididas em 303 famílias. Esse resultado, quando classificado por ano de publicação da patente resulta no gráfico representado pela figura 20.

Figura 20 – Patentes concedidas anualmente na base UPSTO com título ou resumo contendo o termo *municipal solid waste*



É perceptível um aumento de pesquisa a partir de 2004, e 65% de todas as patentes foram concedidas a partir desse ano. Esse incremento na produção nos últimos 20 anos pode ser justificado por alguns fatores. O primeiro deles é o aumento da conscientização global sobre gestão de resíduos, que levou diversos países a aprimorar suas políticas públicas relacionadas à economia circular e à gestão de resíduos sólidos urbanos.

A China, por exemplo, foi uma das pioneiras nas políticas públicas sobre economia circular, pela *Circular Economy Promotion Law of the People's Republic of China* (Lei de Promoção da Economia Circular da República Popular da China), promulgada em 2009 (LEAP/UNEP, 2008). O governo teria o papel de “estabelecer um sistema de responsabilidade objetiva para o desenvolvimento da economia circular” por medidas econômicas como isenção de impostos, subsídios, empréstimos a baixo custo ou financiamento de projetos que promovam a economia circular, além de incentivar e apoiar desenvolvimento e pesquisa em torno do tema. Já empresas/produtores se tornaram responsáveis pela reciclagem de produtos listados no catálogo de artigos sujeitos à reciclagem obrigatória e, para produtos não apropriados à reutilização, produtores se tornaram responsáveis por torná-los inofensivos à natureza (LEAP/UNEP, 2008).

A partir dos anos 2000 houve também um rápido avanço tecnológico na a recuperação de energia a partir de resíduos. O relatório de 2015 da UNEP, *Global Waste Management Outlook*, apresenta diversas tecnologias emergentes de gestão de resíduos, incluindo a

recuperação de energia a partir de resíduos e a produção de biocombustíveis a partir de resíduos orgânicos. O relatório destaca que essas tecnologias passam a se tornar cada vez mais viáveis no início dos anos 2010 e que podem ter um papel importante na transição para uma economia circular e de baixo carbono.

Outro ponto importante de atenção na figura 20 é o início de patentes que data de 1972. Diferente dos artigos, em que foi pesquisado documentos que também citavam “*circular economy*”, um conceito relativamente recente, a busca de patentes não truncada com o termo economia circular permite que seja analisado o início do interesse do mercado na gestão de resíduos sólidos urbanos.

A primeira patente, datada de 1972, se chama *Process for conversion of municipal waste* (BAN, 1972) e discute um processo de separação de resíduos via passagem de gases quentes, para separar água e materiais orgânicos de materiais não carbonizáveis, como vidros e metais.

Dentre as principais empresas que obtiveram as patentes concedidas estão as citadas na tabela 3. Há uma predominância de empresas americanas e de empresas do setor de energia renovável ou de resíduos.

Tabela 3 - Empresas com mais patentes concedidas desde 1972 com *municipal solid waste* nos campos *title* (.TI.) e *abstract* (.AB.) da base UPSTO

Empresa	Descrição	Número de patentes
Westinghouse Electric Corp.	Empresa fundada em 1886 nos Estados Unidos que atua no setor de energia. Oferece serviços de engenharia, tecnologia e soluções para gerar eletricidade em todo o mundo.	13
AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.	Fundada em 1940 nos Estados Unidos e é uma empresa que produz gases industriais e equipamentos para diversas aplicações. Oferece soluções de gás natural, hidrogênio, energia renovável, entre outras.	7
ThermoChem Recovery International, Inc.	Empresa americana fundada em 1996 que desenvolve tecnologias para tratamento de resíduos e recuperação de energia a partir de biomassa e resíduos sólidos urbanos.	5
RENESCIENCE A/S	Empresa dinamarquesa fundada em 2009, que desenvolve soluções biotecnológicas para o tratamento de resíduos orgânicos, como conversão em biogás ou fertilizantes.	4

ANAERGIA INC.	Empresa canadense fundada em 2008, que oferece tecnologias avançadas para a gestão de resíduos e produção de energia renovável.	4
Intermodal Technologies, Inc.	Empresa americana fundada em 2008 que desenvolve tecnologias para gestão de resíduos e reciclagem de materiais em contêineres de transporte.	4
Controlled Environmental Systems Corporation	Empresa americana fundada em 1966 que desenvolve sistemas de gestão de resíduos e soluções ambientais para indústrias.	3
National Recovery Technologies, LLC	Empresa norte-americana fundada em 1981, que fornece tecnologias para a separação e reciclagem de materiais como vidro, plásticos e metais.	3
New Life Foundation	Empresa americana fundada em 1998 que atua na gestão de resíduos e recuperação de materiais a partir de resíduos sólidos urbanos e da construção civil.	3
Hydrocarbon Technologies, Inc.	Empresa americana fundada em 1987 que desenvolve tecnologias para tratamento e reciclagem de resíduos oleosos e combustíveis usados.	2
WTE Corporation	Empresa americana fundada em 1978 que atua na gestão de resíduos e produção de energia renovável a partir de resíduos sólidos urbanos e biomassa.	2
Permabase, Inc.	Empresa americana fundada em 1989 que desenvolve materiais para construção civil, como placas e painéis à prova d'água e resistentes a incêndios.	2
Institute of Gas Technology	Empresa americana fundada em 1941 que atua no desenvolvimento de tecnologias para geração de energia, produção de combustíveis e gestão de resíduos.	2
Eastern Power Limited	Empresa chinesa fundada em 2002 que desenvolve tecnologias para produção de energia renovável, como energia eólica e solar.	2
Emerging Acquisitions, LLC	Empresa americana que atua na gestão de resíduos e recuperação de materiais a partir de resíduos sólidos urbanos e da construção civil.	2

5.2.2. Análises MESO e MICRO

Das 530 patentes encontradas, as 35 mais recentes foram analisadas nas classificações de nível MESO e MICRO. Diferente dos artigos, em que os termos "*circular economy*" e "*municipal solid waste*" sendo procurados em conjunto garantiram que os artigos encontrados tivessem relevância para a pesquisa, algumas das patentes pesquisadas não possuíam correlação com a economia circular.

Um exemplo é a patente *Sample Preparation Mould And Sample Preparation Method For Triaxial Test Of Municipal Solid Waste* (ZHANG et al., 2021), que discute uma nova tecnologia de teste tri axial para entender como certos materiais de RSU se comportam quando submetidos a tensões em diferentes direções.

Assim, das 35 patentes mais recentes, 2 foram consideradas não relevantes pois, embora falassem sobre resíduos sólidos urbanos, não estão correlacionadas com a economia circular e suas ferramentas. Portanto, 33 análises analisadas foram consideradas relevantes.

A classificação nas taxonomias de classe nível MESO e MICRO estão na figura 21 e tabela 4, respectivamente.

Figura 21 – Patentes UPSTO por taxonomias de classe nível MESO

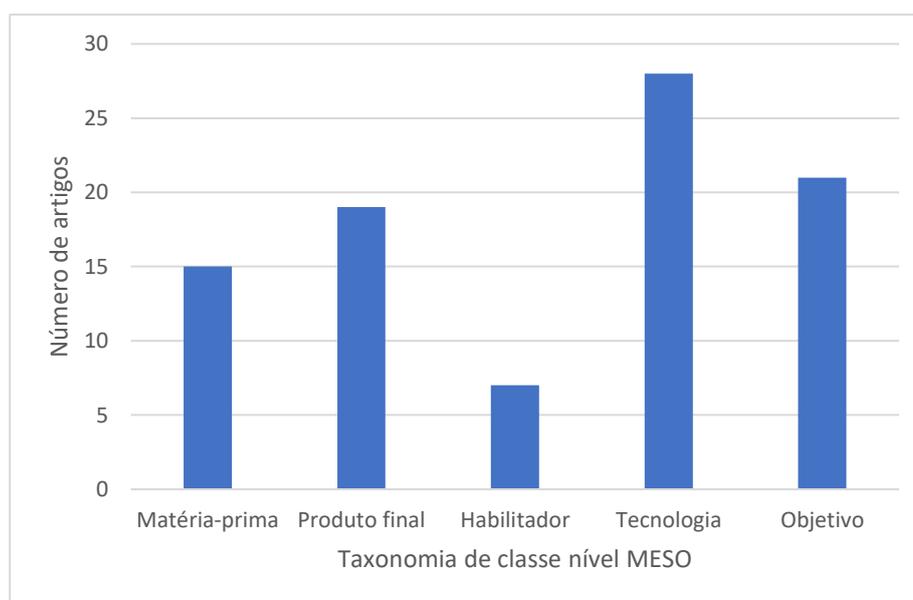


Tabela 4 – Divisão das patentes da base UPSTO em taxonomias de classe nível MICRO

Taxonomia de classe nível MESO	Taxonomia de classe nível MICRO	Número de artigos
Matéria-prima	Resíduos orgânicos	10
	Cinza residual	5
	Plásticos	3
	Papel	1
	Vidros	1
Produto final	Cimento e materiais de construção	8
	Biocombustível	8

	Celulose e outros açúcares	3
Habilitador	Modelo de negócio	4
	Coleta adequada	3
	Pureza de materiais	2
	Dados de gestão	1
Tecnologia	Reciclagem	13
	Processamento preliminar de resíduos	9
	Incinerador	8
	Compostagem	6
Objetivo	Produção de energia	9
	Otimização de recuperação de materiais	9
	Redução GEE	3
	Despoluição de materiais tóxicos	3
	Recuperação de aterros	1

Diferentemente dos artigos, que podem ter um foco mais amplo e exploratório, as patentes são elaboradas com a finalidade de proteger as propriedades intelectuais de uma invenção, por meio de uma descrição clara e concisa do funcionamento e dos resultados obtidos. Por isso, é de se esperar que a taxonomia “**Tecnologia**” seja relevante para os documentos, estando presente em 85% deles.

Há um destaque para a taxonomia de classe nível MICRO “**resíduos orgânicos**”, presente em 30% das patentes analisadas, principalmente pela correlação com “**produção de energia**” e “**compostagem**”, visto que diversas patentes apresentam o uso da fração orgânica dos RSU para produção de biocombustíveis.

Um destaque importante é que, em patentes, a “**cinza residual**” da queima de resíduos é apresentada principalmente como matéria-prima, enquanto em artigos a mesma foi apresentada como produto final. Enquanto diversos artigos discutem processos para aumentar o rendimento do processo de incineração, ou filtrar/recuperar os gases obtidos no processo, as patentes discutem principalmente como transformar essa cinza residual em produtos como “**cimento e materiais de construção**”.

Um exemplo é a patente *Method of making waterproof magnesium oxychloride refractory brick by fly ash from municipal solid waste incineration* (LI et al., 2020), que descreve um método para produzir tijolos refratários impermeáveis usando cinzas volantes de incineração de resíduos sólidos municipais.

O *driver* “**processamento preliminar de resíduos**” também se destaca (presente em 27% dos artigos analisados) pois diversas patentes discutem tratamentos necessários para que a etapa de reciclagem posterior seja mais efetiva. Um exemplo é a patente *System and process for sorting and recovery of recyclable materials from mixed waste* (TORRIERE, 2020), que descreve um sistema e processo para a separação e recuperação de materiais recicláveis a partir de resíduos sólidos urbanos misturados em uma instalação de recuperação de materiais. O processo envolve a utilização de equipamentos e técnicas de separação para recuperar materiais como papel, plástico, vidro e metais dos resíduos sólidos urbanos, permitindo a sua reutilização e reduzindo a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários.

5.3. Considerações gerais

Com base na análise de artigos e patentes, a economia circular tem se mostrado promissora na gestão de resíduos sólidos urbanos e pode beneficiar significativamente as tecnologias de gestão de RSU.

A partir da análise MACRO de artigos, onde a busca do termo “resíduos sólidos urbanos” foi truncado ao termo “economia circular”, se torna notável a novidade do tema da EC. O primeiro artigo encontrado data de menos de 10 anos, enquanto na busca de patentes, onde a pesquisa foi apenas do termo “resíduos sólidos urbanos”, é possível observar o surgimento das tecnologias sobre gestão de resíduos desde os anos 70.

No entanto, a produção de documentos em ambas as categorias aumentou após a instauração de leis e políticas públicas, indicando a relevância dessas iniciativas para influenciar novas tecnologias e produções acadêmicas. Para artigos, especificamente, é notável o aumento de produção de documentos a partir da criação da Estratégia de Economia Circular da União Europeia, em 2015, que além de fornecer diretrizes importantes também financiou diversos projetos sobre EC. Um terço dos artigos analisados discutiam, inclusive, “**orientações para políticas públicas**” e como municípios e comunidades conseguem melhorar sua gestão de RSU.

A instrumentalização da EC em RSU visa transformar resíduos em materiais que podem ser reinseridos no ciclo econômico. A relevância da taxonomia de classe nível MICRO “**otimização de recuperação de materiais**” tanto em artigos quanto em patentes (presente

em 43% e 29% dos documentos, respectivamente) é um indicador da relevância dessa estratégia.

A produção de energia a partir de resíduos sólidos urbanos, principalmente da fração orgânica, também se destaca como uma estratégia relevante. A taxonomia de classe nível MICRO “**produção de energia**” foi identificada em 29% dos artigos e em 27% das patentes, e o *driver* “**resíduos orgânicos**” em 26% e 30%.

Por fim, é importante ressaltar que a maior parte das empresas que possuem patentes na temática RSU são empresas de energia renovável ou de alguma etapa da rota de resíduos, da coleta à destinação final. A falta de interesse de demais áreas do setor privado em tecnologias para uma gestão mais ambientalmente correta de RSU indica a necessidade de fortalecimento da responsabilidade do produtor, onde empresas deveriam ser responsabilizadas por seus produtos também quando os mesmos se tornam resíduos.

Embora haja uma produção crescente de documentos sobre biocombustíveis a partir da fração de resíduo orgânico, existe uma falta de interesse das empresas em relação às demais frações de RSU. Essa lacuna pode ser explicada pela falta de políticas públicas que responsabilizem as empresas ou pela dificuldade em visualizar o potencial existente nos resíduos. A relevância do *driver* “**viabilidade financeira**”, presente em 29% dos artigos, destacou a necessidade de autores em provar que não apenas transformar resíduos em riqueza é possível, mas também é rentável.

6. Capítulo 6 Estudo de caso

No presente capítulo será apresentada e discutida a aplicação da EC para a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. O estudo de caso visa elucidar como o Brasil, como potência econômica e ambiental, pode alavancar ferramentas da economia circular em sua gestão de resíduos. A partir da análise sistemática do panorama mundial sobre economia circular, legislações e diretrizes, vislumbra-se definir inspirações em países europeus em um caso que se aplique ao cenário nacional.

6.1. O papel da economia circular no panorama de RSU

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil atualmente é regido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.035, que foi aprovada em 2010 depois de 20 anos de tramitação no Congresso Nacional. A lei prevê instrumentos para hierarquizar a gestão de RSU, começando pela não geração e terminando na disposição final adequada e minimizada por todas as demais etapas, como mostrado na figura 34 (RIBEIRO et al., 2019).

Figura 22 – Diretrizes de hierarquização da PNRS



Fonte: Ribeiro et al., 2019.

Além das diretrizes acima, a PNRS também traz conceitos como a responsabilidade compartilhada entre poder público, empresas e sociedade civil e a logística reversa, para que resíduos voltem à indústria para reaproveitamento ou descarte adequado. (BRASIL, 2010) Os princípios da PNRS estão no artigo 6º da Lei nº 12.035/2010 e são:

- i. a prevenção e a precaução;
- ii. o poluidor-pagador e o protetor-recebedor;
- iii. a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública;
- iv. o desenvolvimento sustentável;
- v. a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta;
- vi. a cooperação entre as diferentes esferas do poder público, o setor empresarial e demais segmentos da sociedade;
- vii. a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- viii. o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania;
- ix. o respeito às diversidades locais e regionais;
- x. o direito da sociedade à informação e ao controle social;
- xi. a razoabilidade e a proporcionalidade (BRASIL, 2010).

De acordo com a PNRS, fica a cargo do município as seguintes obrigações: i) elaborar os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos; ii) implantar coleta seletiva; iii) fazer compostagem; e iv) dispor apenas os rejeitos em aterros sanitários (BRASIL, 2010).

Semelhanças entre os princípios da PNRS e as ferramentas já explicitadas da economia circular não são mera coincidência. Em ambas se define o gerenciamento eficiente dos recursos a partir da hierarquia dos resíduos – ou seja, separação, pré-tratamento, reutilização, reciclagem e recuperação de energia – e o aumento da eficiência do uso dos recursos,

aproveitando ao máximo as substâncias e materiais presentes nos resíduos (RIBEIRO et al., 2019).

A abordagem da hierarquia dos resíduos estabelece um conjunto refinado, mas ainda linear, de opções de disposição, já que a prevenção e reutilização de resíduos são as opções preferíveis, seguidas por reciclagem e recuperação (por exemplo, compostagem e energia a partir de resíduos) e o descarte de resíduos em aterros sanitários deve ser o último recurso.

Já a abordagem da economia circular vai um passo além e busca fechar o ciclo em relação à extração, fabricação e disposição, promovendo o *design* de produtos para reduzir o desperdício, maximizando o uso de produtos e materiais pelo maior tempo possível e reciclando materiais de produtos no fim de sua vida útil de volta para a economia (WORLD BANK, 2022).

Segundo Milios (2017), a união de políticas de reutilização, reparo e remanufatura com contratos públicos pode influenciar simultaneamente no *ecodesign*, consumo e gestão de resíduos, possibilitando a aplicação da responsabilidade estendida do produtor para mudanças no *design* do produto, fortalecendo a coleta e reciclagem de produtos. Dessa forma, a aplicação conjunta dessas políticas atua em toda a cadeia produtiva, criando uma abordagem sistêmica da economia circular.

6.2. Exemplos de países bem-sucedidos

6.2.1. Alemanha

A gestão dos RSU é um desafio mundial, e alguns países estão sendo bem-sucedidos nos esforços para melhorar essa questão pela economia circular. O primeiro exemplo a ser explorado no presente trabalho será a Alemanha, que revolucionou a gestão de resíduos a partir de programas de educação ambiental, política fiscal e tarifária e o desenvolvimento de políticas e tecnologias para rentabilizar o setor de gestão de RSU (RIBEIRO et al., 2019).

Em 2019, 14% da matéria-prima usada na Alemanha provinha do tratamento de resíduos e menos de 0,5% dos resíduos gerados eram destinados a aterros sanitários (RIBEIRO et al., 2019). A primeira legislação sobre RSU data de 1972, o Waste Disposal Act (Lei de Disposição de Resíduos). Visto que até o início dos anos 70 existiam cerca de 50 mil lixões

no país, o objetivo era a substituição dos mesmos por grandes aterros regulados e fiscalizados. O fechamento dos lixões gerou um problema de falta de área para novas instalações, e, embora a incineração de resíduos tenha sido uma opção, não serviu como solução e, em 1986, foi lançada a Waste Avoidance and Management Act (Lei de Prevenção e Gestão de Resíduos), que visava reduzir o volume de resíduos por meio da reciclagem e redução da geração.

Em 1991, a responsabilidade do produtor foi estabelecida na Packaging Ordinance (Ordenança de Embalagens), o que levou a uma redução no consumo de embalagens de aproximadamente 15% e aumento do nível de reciclagem de 60 a 80% (RIBEIRO et al., 2019). Em 2020 foi adicionado à responsabilidade do produtor garantir que seus produtos não causem danos desnecessários ao meio ambiente ou à saúde humana (BUNDESREGIERUNG). Além disso, essa lei serviu como propulsor para o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem, especialmente para plásticos (RIBEIRO et al., 2019).

As leis Closed Substance Cycle and Waste Management Act (Lei de Ciclo Fechado de Substâncias e Gestão de Resíduos), de 1996 e a Circular Economy Act (Lei de Economia Circular), em 2020, estenderam de forma abrangente as políticas sobre resíduos, estabelecendo regulações e metas específicas para responsabilidade do produtor em alguns setores e permitindo que ela fosse implementada por legislações oficiais ou por compromissos voluntários por parte de produtores e distribuidores (BUNDESREGIERUNG).

O fim da deposição de resíduos biodegradáveis e orgânicos em aterros sanitários até 2005 foi outro marco importante na gestão de resíduos na Alemanha. Pela lei Waste Deposition Ordinance Act (Lei de Ordenação de Deposição de Resíduos), em 2001 (posteriormente incorporada à lei Landfill Ordinance – Lei de Aterros Sanitários –, em 2009), se tornou obrigatório o tratamento de resíduos como lixo doméstico e lixo comercial semelhante ao doméstico em plantas de incineração ou de tratamento mecânico-biológico antes da disposição final (BUNDESREGIERUNG).

A gestão de resíduos na Alemanha evoluiu a ponto de ter se tornado um setor econômico que movimenta cerca de €80 bilhões anualmente, com 280 mil trabalhadores e 15 mil plantas de tratamento de resíduos (BUNDESREGIERUNG). O país também se destaca por suas altas taxas de reciclagem: 67% do lixo doméstico, cerca de 70% dos resíduos industriais e comerciais e quase 90% de resíduos da construção civil (RIBEIRO et al., 2019).

6.2.2. Suécia

A Suécia iniciou a estruturação da política para gestão de resíduos urbanos em 1969, com o Environment Protection Act (Lei de Proteção ao Meio Ambiente), que impôs obrigações ambientais às novas unidades de tratamento de resíduos. A partir da década de 70, segundo a Swedish Environmental Protection Agency, o país passou a tratar os resíduos como recurso, com foco na separação, compostagem, incineração etc. Nos anos 80, o foco mudou para redução dos impactos ambientais causados pela gestão de resíduos, combinadas com a prevenção da produção de resíduos e a redução de substâncias tóxicas. Em 1990, uma taxa sobre resíduos (Waste Bill) foi proposta pela primeira vez, e os municípios assumiram a responsabilidade pelo planejamento da gestão de resíduos (RIBEIRO et al., 2019).

Em 1992, foi introduzido o conceito de “ecociclos”, incentivando o reúso, a reciclagem e a disposição final adequada. Uma medida importante foi a implementação da responsabilidade do produtor em coletar e descartar certos materiais, como embalagens, pneus e eletroeletrônicos. Em 1997, após a entrada da Suécia na União Europeia e a adoção da hierarquia de prioridades (que visava reduzir a destinação a aterros sanitários), medidas foram adotadas para reduzir o volume de resíduos destinados a aterros, com a proibição do envio de materiais que pudessem ser aproveitados em instalações de incineração e de resíduos orgânicos (RIBEIRO et al., 2019).

Apesar da responsabilidade pela gestão de resíduos ser responsabilidade dos municípios, 60% dos municípios suecos colaboram entre si (NATURVÅRDSVERKET). No Brasil, os consórcios de resíduos sólidos entre municípios representam apenas 29% (CNM, 2019). Os municípios financiam a gestão de resíduos locais por meio de taxas de resíduos municipais, e o nível das taxas, decidido pelo conselho municipal, cobre os custos dos recipientes, coleta, transporte, tratamento, centros de reciclagem, informação, planejamento e administração. A taxa pode ser diferenciada para incentivar a reciclagem, e os fundos arrecadados são exclusivamente para a gestão local de resíduos e não podem ser utilizados para outros serviços locais (NATURVÅRDSVERKET).

A coleta de resíduos domésticos e de alimentos é em contêineres por sistemas de coleta domiciliar. Resíduos volumosos, como resíduos de jardim e resíduos perigosos, são coletados por meio de centros de reciclagem municipais. A maior parte dos resíduos é tratada na Suécia, com resíduos de alimentos sendo submetidos à digestão anaeróbia, resíduos de jardim sendo compostados e resíduos volumosos sendo reciclados, incinerados ou aterrados

– principalmente resíduos inertes (NATURVÅRDSVERKET). Segundo dados referentes a 2017 divulgados pelo Avfall Sverige, órgão responsável pela gestão de resíduos, um terço do volume de RSU foi destinado à reciclagem e 50% ao aproveitamento energético. O volume de resíduos domésticos destinado a aterros sanitários é de apenas 0,5%, o que significa que mais de 99% do lixo doméstico é recuperado na forma de materiais, nutrientes ou energia (RIBEIRO et al., 2019).

6.3. Aplicação dos aprendizados globais no Brasil

Os casos de Alemanha e Suécia podem servir como inspiração para o Brasil, e algumas soluções adotadas por esses países parecem fazer sentido para o contexto nacional, embora requeiram adaptações. Na tabela 5 é possível encontrar um resumo da linha do tempo de regulações para RSU aplicadas em cada um dos países.

Tabela 5 – Linha do tempo de leis e regulações adotadas em Alemanha e Suíça

País	Ano	Nome da lei/regulação	Diretriz
Alemanha	1972	Waste Disposal Act	Estabelece as responsabilidades e obrigações dos estados e municípios alemães para a gestão de resíduos, bem como as obrigações dos geradores de resíduos em relação à coleta, transporte e tratamento dos resíduos gerados.
	1986	Waste Avoidance and Management Act	Visa reduzir a quantidade de resíduos gerados, promovendo a reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, bem como a redução de substâncias perigosas em produtos e processos de produção.

1991	Packaging Ordinance	Regulamenta a gestão de embalagens e resíduos de embalagens, estabelecendo metas de reciclagem e definindo as obrigações dos fabricantes, importadores e comerciantes.
1996	Closed Substance Cycle and Waste Management Act	Visa estabelecer uma economia circular de materiais, por meio da recuperação e reciclagem de materiais e substâncias em um sistema fechado de ciclo de vida de produtos e processos.
2001	Waste Deposition Ordinance Act	Regulamenta a deposição de resíduos em aterros sanitários, definindo critérios para a seleção de locais, monitoramento e controle dos aterros.
2009	Landfill Ordinance	Estabelece regras para a construção e operação de aterros sanitários, com o objetivo de proteger a saúde pública e o meio ambiente. A lei estabelece diretrizes para a seleção do local, o projeto e a construção do aterro, bem como para a operação, manutenção e fechamento do mesmo.
2020	Circular Economy Act	Reforça e complementa as leis anteriores, estabelecendo novas metas para a economia circular e introduzindo medidas para aumentar a transparência e a responsabilidade no ciclo de vida dos produtos.

	1969	Environment Protection Act	Lei geral que estabelece as disposições fundamentais para proteção do meio ambiente.
Suécia	1990	Waste Bill	Lei que estabelece metas e diretrizes para o gerenciamento de resíduos na Suécia, incluindo a redução de resíduos, reciclagem e responsabilidade do produtor.
	1997	Entrada da Suécia na União Europeia e adoção da hierarquia de prioridades	

É importante ressaltar que, diferente de Suécia e Alemanha, onde menos de 1% dos RSU são destinados a aterros sanitários, a realidade brasileira é de 7% dos RSU sequer sendo coletados (ABRELPE, 2022). Isso implica a necessidade de um trabalho de base que garanta pelo menos a rota teórica de gestão de RSU sendo completa para viabilizar a implementação de um plano mais elaborado.

Dito isso, segundo os casos de sucesso, foi possível inferir quatro aprendizados relevantes:

1. a conscientização da população é um fator importante, seja por leis e programas que promovam a circularidade, seja com taxas ou multas municipais por geração de resíduo;
2. há a necessidade da criação de leis rígidas, com garantia de fiscalização do cumprimento, e metas bem estabelecidas;
3. a responsabilidade do produtor é um ponto fundamental para implementação da logística reversa;
4. são necessários investimentos em todos os âmbitos (nacional, estadual e municipal), inclusive com alavancagem de recursos privados (parcerias público-privadas podem ser uma opção).

Muitas das ações vigentes nos países europeus já estão previstas na PNRS, como a hierarquização entre não geração e a destinação correta em aterros sanitários. Porém, para inserir o Brasil na lógica da economia circular para gestão de RSU precisam ser estimuladas políticas de educação ambiental, a fim de conscientizar e educar a população sobre a importância da separação correta do lixo doméstico e sua reciclagem. Uma pesquisa realizada pelo Ibope em 2018 indicou que, apesar da população brasileira reconhecer a importância da reciclagem, há pouca ou nenhuma informação sobre quais materiais podem ser reciclados e o que é coleta seletiva (RIBEIRO et al., 2019).

A conscientização sobre destinação de resíduos deve incluir também a popularização de conceitos como consumo consciente, que ainda se mostra incipiente em discussões e artigos científicos. A hierarquia da gestão de RSU se inicia pela não geração, e o consumo consciente é uma ferramenta importante para reforçar duas diretrizes de maximização de valor, o poder dos ciclos internos e o poder de circular por mais tempo.

Leis rígidas, fiscalização e responsabilidade do produtor

Embora a PNRS tenha diversos pontos em comum com as políticas públicas europeias, existem diversos impedimentos à sua execução com maestria no Brasil. Um deles é a dificuldade de fiscalização para garantir seu cumprimento.

Um exemplo prático é a responsabilidade do produtor, prevista na PNRS como responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida de produtos. Para alguns setores específicos, projetos mostram que a lei pode se provar eficaz caso associada a mecanismos de fiscalização, como, por exemplo, para embalagens de defensivos agrícolas e embalagens de óleos lubrificantes.

Para embalagens de defensivos agrícolas, o Sistema Campo Limpo, operado desde 2001 pelo Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias (INPEV), passou de cerca de 37,4 mil toneladas processadas em 2012 para mais de 53,5 mil toneladas em 2021, das quais 92,1% foram enviadas para reciclagem e 7,9% para incineração. Tal dado significa que 94% das embalagens primárias de defensivos agrícolas comercializadas no Brasil foram processadas para reciclagem ou incineração em 2021, e o programa já atingiu a marca de 650 mil toneladas de embalagens destinadas corretamente em seus 20 anos de existência. O sistema possui 312 postos e 99 centrais de recebimento, além de usar coletas itinerantes para municípios com baixa demanda (ABRELPE, 2022).

Embora diversos setores, como de cosméticos, bebidas não alcoólicas e roupas já realizem programas de retorno ou reúso de embalagens, as iniciativas são pontuais e costumam estar relacionadas às metas de descarbonização das empresas. Por exemplo, a Coca-Cola possui um programa de embalagens retornáveis, onde o consumidor devolve a garrafa vazia de bebida para o ponto de venda e adquire uma garrafa cheia com um desconto no preço do produto. Essa garrafa volta para a fábrica e é higienizada e reutilizada para a produção de um novo produto Coca-Cola. Esse programa, apesar de gerar impactos positivos na redução de resíduos plásticos, é uma iniciativa individual da companhia, que visa reduzir sua pegada de carbono e custos de produção.

Planos como o Sistema Campo Limpo, onde agricultores, produtores de defensivos agrícolas e governo atuam em conjunto, se aplicados para mais setores industriais, facilitariam a inserção da logística reversa no mercado brasileiro para além das metas individuais do setor privado.

Investimentos na gestão de RSU

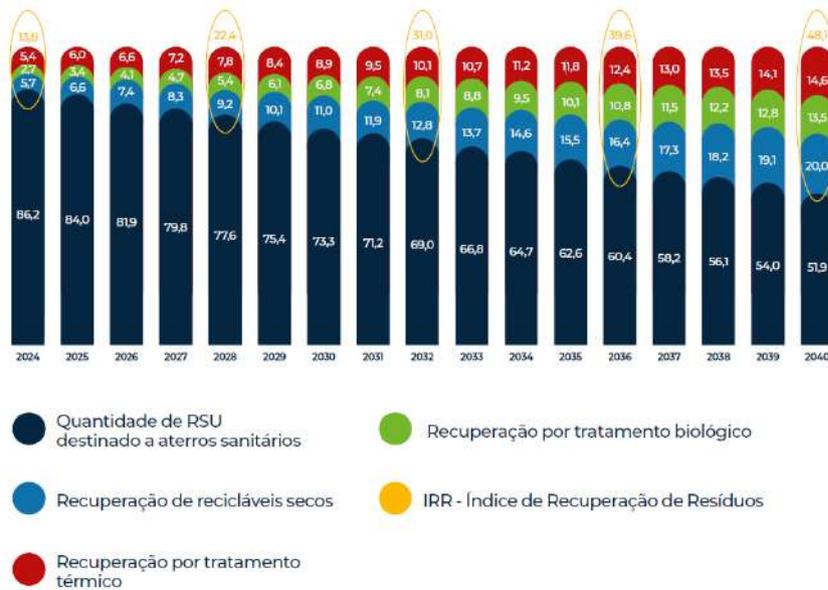
Uma dificuldade para a implementação da PNRS no Brasil envolve o financiamento do processo de coleta, tratamento e disposição dos resíduos. Segundo o painel de manejo dos RSU, disponível no SNIS, em 2021 apenas 42,1% dos municípios cobraram pelo serviço de gestão de RSU. Importante ressaltar que a legislação prevê essa cobrança, mas as prefeituras muitas vezes não implantam por questões políticas (RIBEIRO et al., 2019). Taxas municipais se mostraram importantes em casos como o da Suécia, sendo não apenas uma fonte de financiamento, mas também um mecanismo de conscientização da população.

Além de investimentos municipais, é importante que haja participação das diversas esferas do governo na gestão de RSU. O relatório da Confederação Nacional de Municípios (CNM), de 2020, aponta que de 2010 a 2020 foram autorizados R\$ 415 milhões em programas federais relacionados a resíduos sólidos, mas apenas R\$ 3,6 milhões (0,8%) foram efetivamente gastos.

Em 2022, o governo brasileiro apresentou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), por meio do Decreto Federal nº 11.043. A ideia do plano é instrumentalizar a PNRS, definindo metas, estratégias e ações para colocá-la em prática. As quatro principais metas do plano são: i) eliminação de lixões e aterros controlados até 2024; ii) recuperação da fração orgânica por meio de sistemas de tratamento biológico; iii) recuperação da fração

seca dos recicláveis por processos de reciclagem; e iv) recuperação e aproveitamento energético por meio do tratamento térmico (ABRELPE, 2022). A figura 23 mostra o cenário em 2024 e a previsão do plano para 2040.

Figura 23 – Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU (%)



Fonte: Abrelpe, 2022.

Segundo relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), publicado em 2022, o investimento necessário para atingimento dessas metas seria em torno de R\$ 60 bilhões até 2040. O mesmo relatório calcula que o atingimento das metas reduziria as emissões de GEE em 30 milhões de toneladas de CO₂eq, considerando apenas as emissões na disposição de RSU (ABRELPE, 2022).

Nesse contexto, o setor privado tem um papel importantíssimo a ser desempenhado: em situações nas quais o poder público não tem condições técnicas e financeiras, as concessões e parcerias público-privadas (PPP) são apontadas por muitos como a alternativa para modernização da gestão pública, dando protagonismo em questões públicas à iniciativa privada (RIBEIRO et al., 2019).

Outro caminho possível para uma articulação mais forte entre o poder público e a iniciativa privada é uma política tributária que promova incentivos econômicos para o aproveitamento dos resíduos por meio de logística reversa, valorização e transformação dos mesmos.

6.4. Considerações finais

Os benefícios de uma gestão adequada de resíduos sólidos são vários e de consideráveis proporções, em termos ambientais, climáticos, sociais, de saúde e econômicos. Apesar de possuir uma realidade geográfica, socioeconômica e populacional diferente dos países europeus, a PNRS parece já possuir o arcabouço legal para que o Brasil se torne um caso de sucesso.

Incentivos financeiros e fiscais para desenvolvimento de modelos circulares, conscientização da população, programas de fiscalização sobre responsabilidade compartilhada, investimento na infraestrutura de coleta, tratamento e destinação de RSU, desenvolvimento de planos em diferentes esferas do governo e parcerias público-privadas são algumas das ações que poderiam ser incorporadas ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

O caminho para uma boa gestão de resíduos sólidos urbanos passa pela economia circular, e quanto antes o reconhecimento desse fato entrar nos planos do governo, nas metas das empresas e na consciência da sociedade civil, maior será o impulso do Brasil rumo ao desenvolvimento sustentável.

7. Capítulo 7 Conclusão

7.1. Discussões finais

A economia circular se apresenta como uma alternativa ao modelo linear de consumo que vem causando diversos problemas ambientais, sociais e econômicos no mundo (CIRCLE ECONOMY, 2022). Sendo restauradora e regenerativa por intenção e *design*, a EC substitui o conceito de “fim de vida útil” pela restauração, defende o uso de energia renovável, elimina o uso de materiais tóxicos, e visa à eliminação do desperdício (MACARTHUR, 2012).

A partir da Prospecção Tecnológica com estudo de artigos e patentes concedidas realizado no presente trabalho, fica evidente o interesse de universidades e empresas nas tecnologias e tendências envolvendo a economia circular aplicada em resíduos sólidos urbanos, apesar da novidade do tema e falta de um consenso único na definição do termo. Os bancos de dados utilizados forneceram o material necessário para a análise pretendida.

A metodologia de prospecção e os documentos estudados se mostraram, de forma qualitativa e quantitativa, consistentes com o objetivo de mapear as principais tendências sobre o tema e capazes de mostrar quais empresas, instituições e mercados vêm mostrando maior interesse no tema abordado. Análises MACRO permitiram a identificação dos principais mercados do setor, onde se destacam países da União Europeia e o ramo de energias renováveis.

Foi possível traçar um paralelo importante entre a definição de políticas públicas e o desenvolvimento de publicações e patentes acerca da temática, o que indica a importância de uma implementação conjunta entre governo, setor privado e sociedade civil. A partir desse paralelo e utilizando dois países europeus como referência, foi possível analisar a implementação da EC na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

7.2. Conclusões finais

- A produção recente de artigos, onde o primeiro artigo data de 2015 e o aumento de patentes a partir dos anos 2004 revelam a novidade do tema economia circular

aplicada em resíduos sólidos urbanos. Nota-se, porém, uma significativa evolução temporal quanto ao número de publicações no decorrer dos últimos anos sobre o tema, o que evidencia um crescente interesse pela conceituação, uso e aplicações da EC em RSU, sendo que este não se limita ao ambiente corporativo, mas se propaga também ao nível acadêmico.

- No que tange à produção acadêmica sobre a temática, os artigos analisados destacam a pertinência de países europeus, o que pode ser justificado pela presença de políticas públicas robustas e consistentes e financiamento expressivo para pesquisas sobre EC. A incidência do *driver* “**orientação para políticas públicas**”, presente em um terço dos artigos analisados, reforça a importância da ação de governos para o desenvolvimento de estratégias mais circulares na gestão de RSU.
- Entre as principais tecnologias discutidas em artigos e patentes sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), destaca-se o uso da fração orgânica para a produção de energia renovável (*driver* “**produção de energia**” presente em 29% dos artigos e 27% das patentes e *driver* “**resíduos orgânicos**” em 26% e 30%, respectivamente). Essa abordagem pode ser realizada por meio da incineração de resíduos ou da produção de biocombustíveis. Existe também grande interesse do mercado na utilização das cinzas residuais de incineração como matéria-prima para o setor de construção (*driver* “**cimento e materiais de construção**” destacado em 24% das patentes).
- A crescente importância da geração de energia a partir de resíduos justifica a presença significativa de empresas do setor de energia entre as detentoras de patentes. Porém, ainda há uma lacuna de interesse do setor privado em frações diferentes da orgânica nos RSU, o que indica a necessidade de fortalecimento da responsabilidade do produtor.
- O Brasil, apesar de possuir suas particularidades e dados desafiadores sobre a gestão de RSU, possui como arcabouço legal a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a PNRS, que define diretrizes semelhantes às de países europeus referência, como Alemanha e Suécia. Existem, porém, algumas ações que poderiam ser implementadas, tal como definição de metas de sustentabilidade, fiscalização de programas de logística reversa e conscientização da população, que facilitariam a adoção da economia circular no contexto de gestão de RSU.

- Promissora em suas aplicações e solução fundamental para que seja alcançado um desenvolvimento sustentável que respeite meio ambiente e supra as demandas mundiais, a EC é o futuro do padrão de consumo mundial, ditando novos modelos de negócio e tecnologias produtivas.

7.3. Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se, para trabalhos futuros, os seguintes temas:

- elaboração do *roadmap* tecnológico sobre a economia circular em resíduos sólidos urbanos, com adição de patentes depositadas e análise temporal;
- avaliação de soluções já existentes no Brasil para implementação da EC na gestão de RSU, como os aplicativos Cataki e projeto Compostar;
- avaliação econômica da implantação de um projeto piloto de plantas de reaproveitamento de resíduos em um município do Brasil;
- avaliação de uma possível taxonomia no âmbito de inteligência artificial, em que seja possível ponderar a revolução tecnológica emergente como forma de aumentar a produtividade em todos os setores, bem como o impacto resultante de sua utilização.

8. Referências

ABRELPE; ISWA. O futuro do setor de gestão de resíduos. Tendências, desafios e oportunidades para a década (2021-2030). jun. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/o-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos/>.

AIR LIQUIDE. Air Liquide in Brief. Disponível em: <https://www.airliquide.com/group/air-liquide-brief>.

AMPARO, K. K. S.; RIBEIRO, M. C. O.; GUARIEIRO, L. L. N. Estudo de caso utilizando mapeamento de Prospecção Tecnológica como principal ferramenta de busca científica. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v.17, n.4, p.195-209, out./dez. 2012

ANDERSEN, M. S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, v. 2, n. 1, p. 133-140, 2007. DOI: 10.1007/s11625-006-0013-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. São Paulo, SP: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>

ASSUNÇÃO, Lorena R. C.; MENDES, Pietro A.S.; MATOS, Stelvia; BORSCHIVER, Suzana. Technology roadmap of renewable natural gas: Identifying trends for research and development to improve biogas upgrading technology management. *Applied Energy*, v. 292, p. 116849, 2021. ISSN 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116849.

BAN, T. E. Process for conversion of municipal waste. Document ID US 3668077 A. 6 jun. 1972. UPSTO.

BENYUS, J. M. (2003). *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: HarperCollins Publishers.

BIO-PAK. Circular Economy Design. Disponível em: <https://www.biopak.com/uk/resources/circular-economy-design>.

BIO-PAK. Why Choose BioPak? Disponível em: <https://www.biopak.com/uk/about/why-choose-biopak>.

BLASENBAUER, Dominik et al. Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate

incinerator. *Waste Management*, v. 161, p. 142-155, 2023. ISSN 0956-053X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.021>.

BOEING. About Us. Disponível em: <https://www.boeing.com/company/>.

BORSCHIVER, Suzana et al. Technology roadmap for hyaluronic acid and its derivatives market: Technology Roadmap for the hyaluronic acid and its derivatives' market. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, 2018. DOI: 10.1002/bbb.1936.

BORSCHIVER, Suzana; SILVA, Andressa Léa Rojas da. *Technology Roadmap – Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia*. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciencia, 2016. 120 p.

BP. BP Statistical Review of World Energy, 2022. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

BUNDESREGIERUNG. Circular Economy and Waste Policy. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Disponível em: <https://www.bmuv.de/en/topics/water-resources-waste/circular-economy/waste-policy>. Acesso em: 07 abr. 2023.

CAMACHO-OTERO, Juana; BOKS, Casper; PETTERSEN, Ida Nilstad. Consumption in the Circular Economy: A Literature Review. *Sustainability*, [S.l.], v. 10, n. 8, p. 2758, 2018. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su10082758.

CHEVRON CORPORATION. 2021 Annual Report. Disponível em: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/annual-report/2021/documents/2021-Annual-Report.pdf>.

CHOU, Ming-Yu et al. On the removal efficiency of copper ions in wastewater using calcined waste eggshells as natural adsorbents. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 13, n. 1, p. art. no. 437, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-27682-5.

CIRCLE ECONOMY. *The Circularity Gap Report 2022*. Amsterdam: Circle Economy, 2022. 64 p.

CNOOC. About us. Disponível em: <https://www.cnooc.com.cn/>.

COELHO, G. M. Prospecção Tecnológica: metodologias e experiências nacionais e internacionais. Rio de Janeiro: INT, 2003.

COMISSÃO EUROPEIA. Circular Economy: Closing the loop. 2015. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_15_6203.

COMISSÃO EUROPEIA. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. 2015. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>.

COMISSÃO EUROPEIA. Horizon 2020. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS - CNM. Pesquisa diagnóstico da política nacional de resíduos sólidos. Brasília, DF: CNM, 2020. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/2596>

COSENZA, João Pedro; ANDRADE, Eduardo Mendes; ASSUNÇÃO, Gardênia Mendes de. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade - GeAS, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 1-30, 2020. DOI: 10.19177/geas2020.v9e16147.

COSTA, Eduardo Soares. Tutorial de busca de informação tecnológica em bases de patentes. Santa Maria-RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2011. 86 slides (acompanha texto).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. 2015. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>.

FRIANT, Martin Calisto; VERMEULEN, Walter J.V.; SALOMONE, Roberta. A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. Resources, Conservation and Recycling, [S.l.], v. 161, p. 104917, 2020. ISSN 0921-3449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104917.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy; HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy e A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, [S.l.], v. 143, p. 757-768, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

GOYAL, Sandeep; CHAUHAN, Sumedha; MISHRA, Pavitra. Circular economy research: A bibliometric analysis (2000 – 2019) and future research insights. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, 125011, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125011.

GRAEDEL, T. E.; LIFSET, R. J. (Eds.). *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

H&M. REWEAR. Disponível em: <https://rewear.hm.com/ca-en>.

HOMRICH, Aline Sacchi; GALVÃO, Graziela; ABADIA, Lorena Gamboa; CARVALHO, Marly M. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production*, v. 175, p. 525-543, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.064.

HUMMEN, T.; SUDHESHWAR, A. Fitness of product and service design for closed-loop material recycling: A framework and indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 190, art. no. 106661, 2023. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106661.

KAZA, S., et al. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPALA, Jyri. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, v. 143, p. 37-46, 2018. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.

KUPFER, D.; TIGRE, P. B. Prospecção Tecnológica. In: Modelo SENAI de prospecção: documento metodológico. CARUSO, L. A.; TIGRE, P. B. (Coord.) Montevideo: CINTERFOR/OIT (Papeles de la Oficina Técnica, 14). p. 77, 2004.

LEAP/UNEP. Circular economy promotion law of the People's Republic of China. 2008. Disponível em: <https://leap.unep.org/countries/cn/national-legislation/circular-economy-promotion-law-peoples-republic-china>.

LI, Jinhui et al. Method of making waterproof magnesium oxychloride refractory brick by fly ash from municipal solid waste incineration. US 20200399182 A1, 24 dez. 2020. UPSTO.

LONDONO, Natalia A Cano; CABEZAS, Heriberto. Perspectives on circular economy in the context of chemical engineering and sustainable development. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 34, p. 100738, 2021. ISSN 2211-3398. DOI: 10.1016/j.coche.2021.100738.

LOVINS, A.; LOVINS, H.; HAWKEN, P. A road map for natural capitalism. *Harvard Business Review*, v. 86, n. 9, p. 172-183, set. 2008.

MACARTHUR, Ellen. *Towards the Circular Economy Vol 1*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2012.

MARTÍNEZ-MENDOZA, Leonardo J.; GARCÍA-DEPRAECT, Octavio; MUÑOZ, Raúl. Unlocking the high-rate continuous performance of fermentative hydrogen bioproduction from fruit and vegetable residues by modulating hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, v. 373, art. no. 128716, 2023. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128716.

MATHEWS, J.; TAN, H. Circular economy: Lessons from China. *Nature*, v. 531, p. 440–442, 2016. DOI: 10.1038/531440a.

MAYERHOFF, Zélia de Vasconcellos Leão. *Uma análise sobre os estudos de Prospecção Tecnológica*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Propriedade Industrial, 2008.

MÉNDEZ, Daniel A. et al. Sustainable bioactive pectin-based films to improve fruit safety via a circular economy approach. *Food Hydrocolloids*, [S.l.], v. 137, p. 108327, apr. 2023. ISSN 0268005X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108327>.

MILIOS, Leonidas. Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. *Sustainability Science*, v. 13, n. 3, p. 861-878, 2018. DOI: 10.1007/s11625-017-0502-9.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS. Diagnóstico Temático - Visão Geral Resíduos Sólidos 2021. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: <http://antigo.snis.gov.br/diagnosticos>

MUD JEANS. Lease. Disponível em: <https://mudjeans.eu/pages/lease-page>.

MUNIZ SACCO, Fernanda Cristina et al. Operation of a pilot-scale lipid accumulation technology employing parameters to select *Microthrix parvicella* for biodiesel production from wastewater. *Bioresource Technology*, v. 369, art. no. 128498, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422013296>. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128498.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES Kathryn. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, v. 140, p. 369-380, 2017. DOI: 10.1007/s10551-015-2693-2.

NATURVÅRDSVERKET. Municipal waste management in Sweden. Swedish Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.naturvardsverket.se/en/topics/waste/municipal-waste-management-in-sweden/>.

O CONSULTOR. Família de patentes. Disponível em: <https://oconsultorempatentes.com/familia-de-patentes/>.

OECD. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris, 2019. DOI: 10.1787/9789264307452-en.

OECD. Improving resource efficiency and the circularity of economies for a greener world. OECD Environment Policy Papers, No. 20, OECD Publishing, Paris, 2020. DOI: 10.1787/1b38a38f-en.

PATAGONIA. PFC-Free. Disponível em: <https://www.patagonia.com/our-footprint/pfc-free.html>.

PAULI, G. *The Blue Economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Taos, New Mexico: Paradigm Publications, 2010.

PEREIRA, F.; SILVA, C. Energetic valorization of bio-waste from municipal solid waste in Porto Santo Island. *Clean Technologies*, v. 5, n. 1, p. 233-258, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5010014>.

PIWOWAR, Arkadiusz et al. Modelling the Factors Influencing Polish Consumers' Approach towards New Food Products on the Market. *Sustainability*, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 2818, Mar. 2023. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su15032818.

RANJBARI, Meisam et al. Waste management beyond the COVID-19 pandemic: Bibliometric and text mining analyses. *Gondwana Research*, v. 114, p. 124-137, 2023. ISSN 1342-937X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.12.015>.

RIBEIRO, Heliana Kátia Tavares; BARROS, Ana Karoline Rodrigues de. Políticas públicas na gestão de resíduos sólidos: experiências comparadas e desafios para o Brasil. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 53, n. 4, p. 742-760, jul./ago. 2019. DOI: 10.1590/0034-7612180864.

RUSSELL, Jennifer; NASR, Nabil. Value-retained vs. impacts avoided: the differentiated contributions of remanufacturing, refurbishment, repair, and reuse within a circular economy. *Journal of Remanufacturing*, [S.l.], v. 13, 2022. ISSN 2210-4690. DOI: 10.1007/s13243-022-00119-4.

SANTOS, Gardênia Mendes de Assunção. Economia circular como política governamental de gestão de resíduos sólidos: implicações de sua implementação no Brasil. *Rev. Episteme Transversalis*, Volta Redonda-RJ, v.10, n.1, p.343-357, 2019.

SANTOS, Marco Antonio dos; COELHO, Guilherme; SANTOS, Débora Moraes; FELLOWS FILHO, Lincoln. Prospecção de tecnologias de futuro: métodos, técnicas e abordagens. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, DF, n. 19, p. 189-229, 2004.

SASSANELLI, Claudio; ROSA, Paolo; ROCCA, Roberto; TERZI, Sergio. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, [S.l.], v. 229, p. 440-453, 2019. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.019.

SCHUT E. et al. Circular economy in the Dutch construction sector: A perspective for the market and government. RIVM report 2016-0024, 2015.

SECTES/CEDEPLAR. Metodologia de Prospecção Tecnológica – Projeto oportunidades ao desenvolvimento sócio-econômico e desafios da ciência, tecnologia e da inovação em Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2009.

SEREDA, Luciane; FLORES-SAHAGUN, Thais Helena Sydenstricker. Panorama of the Brazilian Plastic Packaging Sector and Global Technological Trends: the Role of Developed and Developing Countries in Achieving Environmental Sustainability and a Better Quality of Life Worldwide. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, [S.l.], v.

13, n. 3, p. 244, jun. 2023. ISSN 20695837. Disponível em:

<https://doi.org/10.33263/BRIAC133.244>.

SILVA, Thainy Genny Esteves. Economia circular: um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil. *Revista Produção Online*, Florianópolis, SC, v. 21, n. 3, p. 951-972, 2021.

SILVA, Wesley Douglas Oliveira; MORAIS, Danielle Costa. Transitioning to a circular economy in developing countries: A collaborative approach for sharing responsibilities in solid waste management of a Brazilian craft brewery. *Journal of Cleaner Production*, v. 319, p. 128703, 2021. ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128703.

SINIR. Sistema Nacional de Informação sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>

SINOPEC. Sobre Sinopec. Disponível em:

<http://www.sinopecgroup.com/group/gywm/gsjj.shtml>.

SNOWDEN, Scott. 300-Mile Swim Through The Great Pacific Garbage Patch Will Collect Data On Plastic Pollution. *Forbes*, 30 maio 2019. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/scottsnowden/2019/05/30/300-mile-swim-through-the-great-pacific-garbage-patch-will-collect-data-on-plastic-pollution/?sh=6e2ab9b8489f>.

STAHEL, W. R.; REDAY-MULVEY, G.; REDAY-MULVEY, G. *Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy*. New York: Vantage Press, 1981.

STAHEL, Walter R. History of the Circular Economy. The Historic Development of Circularity and the Circular Economy. In: Eisenriegler, S. (eds) *The Circular Economy in the European Union*. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-50239-3_2

SU, B. et al. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, v. 42, p. 215-227, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

TAIFOURIS, Manuel; MARTÍN, Mariano. Towards energy security by promoting circular economy: A holistic approach. *Applied Energy*, [S.l.], v. 333, p. 120544, mar. 2023. ISSN 03062619. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120544>.

TEIXEIRA, Luciano Pivoto. *Prospecção Tecnológica: importância, métodos e experiências da Embrapa Cerrados*. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2013. 34 p.

TORRIERE, B. System and process for sorting and recovery of recyclable materials from mixed waste. US 20200171547 A1, 4 jun. 2020. UPSTO.

UNEP. Global Waste Management Outlook 2015. Nairobi, Quênia: UNEP, 2015.
Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook>.

VELHO, Pedro; BARROCA, Leonor R.; MACEDO, Eugénia A. Partition of antioxidants available in biowaste using a green aqueous biphasic system. *Separation and Purification Technology*, v. 307, art. no. 122707, 2023. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122707.

WORLD BANK. Transitioning to a Circular Economy: An Evaluation of the World Bank Group's Support for Municipal Solid Waste Management (2010–20). Washington, DC: World Bank, 2022. Disponível em:
<https://ieg.worldbankgroup.org/sites/default/files/Data/Evaluation/files/MunicipalSolidWasteManagement.pdf>.

ZHANG, Zhenying et al. Sample preparation mould and sample preparation method for triaxial test of municipal solid waste. US 20210172842 A1, 10 jun. 2021. UPSTO