



Proposta Metodológica para Transição de Parques Industriais Rumo à Economia Circular

Methodological Proposal for Transitioning Industrial Parks Towards Circular Economy

Propuesta Metodológica para la Transición de Parques Industriales hacia la Economía Circular

 10.5020/2318-0722.2025.31.e15718

Felipe Moura Oliveira  

Professor Assistente I da Universidade Estadual do Piauí. Desenvolve pesquisas nos temas: transição energética, economia circular e mudanças climáticas.

Luís Matheus Tavares Silva  

Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq - Nível B. Desenvolve pesquisas nos temas: transição energética, economia circular, dinâmica de sistemas, nexus Água-Energia e mudanças climáticas.

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu  

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq nível1C. Líder do Laboratório de Estudos em Competitividade e Sustentabilidade - LECoS/UFC. Desenvolve pesquisas nos temas: economia circular; simbiose industrial; responsabilidade social corporativa, estratégia climática, gestão ambiental, políticas públicas e desenvolvimento sustentável, teoria institucional, teoria dos Stakeholders energias renováveis e mudança climática.

Caroline Rodrigues Vaz  

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq nível 2, Líder do Grupo de Pesquisa de Sustentabilidade e Inovação em Energias Renováveis – SINERGIA/UFSC. Desenvolve pesquisas nos temas: sustentabilidade, eco-inovação, energias renováveis, logística reversa, economia circular, políticas públicas e mudanças climáticas.

Resumo

Este estudo tem como objetivo propor uma metodologia para o início do mapeamento de processos industriais e de fluxos materiais em parques industriais, visando subsidiar o início da transição para a Economia Circular em parques industriais. Diferentemente da Economia Linear (EL), baseada na extração, na produção, no consumo e no descarte, a Economia Circular (EC), quando aplicada a parques industriais, busca integrar empresas e fluxos materiais para que resíduos e subprodutos de uma atividade sejam reinseridos como insumos em outros processos produtivos. A metodologia foi estruturada em três etapas: (1) identificação do parque industrial e das empresas nele instaladas; (2) mapeamento de insumos, processos produtivos, produtos e resíduos, por meio da análise documental de Estudos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto Ambiental, articulada a uma revisão de escopo da literatura científica; e (3) identificação de oportunidades de circularidade a partir do reaproveitamento de resíduos em processos fabris. O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) foi adotado como lócus empírico do estudo. Para o mapeamento, foram analisados 7 EIA/RIMA e 125 artigos indexados na Web of Science. A operacionalização da metodologia no CIPP permitiu identificar diferentes processos, resíduos e oportunidades de reaproveitamento, incluindo partículas finas na produção de pré-moldados, gases residuais para a indústria de fertilizantes e lodo para geração de energia. Como contribuição, o estudo oferece uma metodologia estruturada e replicável para o diagnóstico inicial de oportunidades de circularidade em parques industriais, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o avanço de estratégias mais sustentáveis em nível mesoindustrial.

Palavras-chave: economia circular, gestão de resíduos, proposta metodológica.

Abstract

This study aims to propose a methodology for mapping industrial processes and material flows in industrial parks in order to support the early stages of the transition to the Circular Economy. Unlike the linear economy, which is based on extraction, production, consumption, and disposal, the Circular Economy, when applied to industrial parks, seeks to integrate companies and material flows

so that waste and by-products from one activity can be reintroduced as inputs into other production processes. The methodology was structured into three stages: (1) identification of the industrial park and the companies located within it; (2) mapping of inputs, production processes, products, and waste through documentary analysis of Environmental Impact Studies and Environmental Impact Reports, combined with a scoping review of the scientific literature; and (3) identification of circularity opportunities based on the reuse of waste in production processes. The Pecém Industrial and Port Complex (CIPP) was adopted as the empirical setting of the study. For the mapping, 7 EIA/RIMA documents and 125 articles indexed in the Web of Science were analyzed. The operationalization of the methodology at CIPP made it possible to identify different processes, waste streams, and reuse opportunities, including fine particles in the production of precast materials, residual gases for the fertilizer industry, and sludge for energy generation. As a contribution, the study offers a structured and replicable methodology for the initial diagnosis of circularity opportunities in industrial parks, contributing to the reduction of environmental impacts and to the advancement of more sustainable strategies at the meso-industrial level.

Keywords: circular economy, waste management, methodological proposal.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo proponer una metodología para iniciar el mapeo de procesos industriales y flujos de materiales en parques industriales, con el fin de apoyar las primeras etapas de la transición hacia la Economía Circular en estos entornos. A diferencia de la Economía Lineal (EL), basada en la extracción, producción, consumo y eliminación de recursos, la Economía Circular (EC), cuando se aplica a parques industriales, busca integrar empresas y flujos de materiales de modo que los residuos y subproductos de una actividad sean reincorporados como insumos en otros procesos productivos. La metodología se estructuró en tres etapas: (1) identificación del parque industrial y de las empresas instaladas en él; (2) mapeo de insumos, procesos productivos, productos y residuos mediante el análisis documental de Estudios de Impacto Ambiental y Informes de Impacto Ambiental, articulado con una revisión de alcance de la literatura científica; y (3) identificación de oportunidades de circularidad a partir del reaprovechamiento de residuos en procesos industriales. El Complejo Industrial y Portuario de Pecém (CIPP) fue adoptado como ámbito empírico del estudio. Para el mapeo se analizaron siete Estudios e Informes de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) y 125 artículos indexados en la base de datos Web of Science. La operacionalización de la metodología en el CIPP permitió identificar diversos procesos, residuos y oportunidades de reaprovechamiento, incluyendo partículas finas para la producción de elementos prefabricados, gases residuales para la industria de fertilizantes y lodo para la generación de energía. Como contribución, el estudio ofrece una metodología estructurada y replicable para el diagnóstico inicial de oportunidades de circularidad en parques industriales, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales y al avance de estrategias más sostenibles a nivel mesoindustrial.

Palabras clave: economía circular, gestión de residuos, propuesta metodológica.

Introdução

A Economia Linear (EL) é um modelo de produção e consumo de bens e serviços baseado em “extrair, produzir, usar e descartar” (Geissdoerfer et al., 2017). No contexto dos parques industriais, o modelo linear se manifesta por um elevado consumo de água e energia, pela geração de resíduos e pela ausência de mecanismos de Simbiose Industrial (SI), além disso, pelo reuso entre empresas e pela valorização de resíduos como insumos substitutos em novos processos produtivos (Nguyen & Le, 2025; The World Bank, 2021). Em contrapartida a esse modelo, a Economia Circular (EC) desponta como abordagem capaz de mitigar os impactos ambientais e de promover a sustentabilidade em diversos setores da economia global (MacArthur, 2013). A EC promove, assim, a reutilização de materiais que seriam descartados e reduz a quantidade de energia que seria dissipada para o ambiente, ao mesmo tempo em que reduz a geração de resíduos e diminui seu encaminhamento para aterros sanitários, incineradores e outros locais de descarte inadequado, contribuindo para a ampliação da vida útil dessas estruturas (Geng et al., 2019).

A implementação da EC em parques industriais requer a inclusão de todos os atores instalados no parque nos processos de tomada de decisão, bem como a integração das diferentes cadeias de suprimentos, visando à redução de impactos ambientais e sociais e à promoção de um modo de produzir e consumir recursos materiais de forma sustentável (Abreu et al., 2020; Ceglia et al., 2017). De modo geral, isso envolve a regulamentação e a facilitação das inter-relações entre os atores do parque industrial, criando um ecossistema que sincroniza e otimiza todas as atividades (Asgari & Asgari, 2021).

No contexto normativo brasileiro, o Plano Nacional de Economia Circular (PNEC, 2025–2034) contempla a Simbiose Industrial (SI) e a define como “um sistema que permite fluxos circulares de recursos, envolvendo organizações tradicionalmente separadas em uma abordagem coletiva, para compartilhar fluxos de entrada e de saída, e otimizar suas redes de valor” (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços [MDIC] 2025, p. 14). Desse modo, a SI é o meio pelo qual a EC é introduzida em parques industriais. Parida et al. (2019) afirmam

que a criação desse ecossistema circular implica diferenciação de mercado e liderança, por meio da redução de custos e um melhor desempenho dos pontos de vista social, financeiro e ambiental para os clientes e consumidores.

No entanto, existem alguns impeditivos para a transição de parques industriais rumo à EC, como falta de iniciativa para troca de informações sobre os processos fabris e resíduos gerados (Abreu et al., 2020; Kirchherr et al., 2018), lacuna de conhecimento sobre as oportunidades de reutilização de subprodutos existentes nos processos fabris (Bacudio et al., 2016; Sellitto et al., 2021) e falta de colaboração e confiança, com foco na geração de economia de escala (Zhang et al., 2019). Além disso, no Brasil, não vigora nenhuma lei que imponha aos parques industriais a adoção obrigatória de um modelo circular. Ainda assim, isso não significa ausência de pressão normativa, pois o Decreto nº 12.082/2024 instituiu a Estratégia Nacional de Economia Circular com a finalidade de promover a transição do modelo de produção linear para uma Economia Circular (EC). Ademais, o Plano Nacional de Economia Circular (PNEC) prevê a criação de metas, padrões, indicadores e do Programa Nacional de Simbiose Industrial (MDIC, 2025; Decreto nº 12.082, 2024).

Embora Prieto-Sandoval et al. (2021), Rodríguez-Borges (2024) e Verkic et al. (2026) cite avanços da Simbiose Industrial (SI) e da Economia Circular (EC) na proposição de *frameworks*, modelos conceituais e roteiros de implementação, ainda persiste, no nível dos parques industriais, uma lacuna operacional relacionada à ausência de um caminho metodológico para orientar esse processo. Nessa direção, Krzeminski et al. (2026) demonstram que a implementação da SI tende a se iniciar pelo mapeamento da situação atual, seguido pela identificação de sinergias, pela avaliação de viabilidade e pela seleção de oportunidades.

Embora alguns métodos sejam utilizados para apoiar a transição para a Economia Circular (EC), eles ainda apresentam limitações. O *Material Flow Analysis*, por exemplo, contribui para quantificar entradas, saídas e estoques de recursos, mas depende de dados consistentes e de levantamento intensivo de informações. Ademais, possui dificuldades para captar a complexidade dinâmica dos sistemas, o que pode tornar sua aplicação custosa e restrita por barreiras de confidencialidade e de acesso à informação (Patricio et al., 2022; Munonye, 2025). De forma semelhante, o *Life Cycle Assessment* (LCA) é mais adequado para comparar cenários de circularidade anteriormente delineados do que para estruturar diagnósticos iniciais, além disso, enfrenta elevada variabilidade metodológica e problemas de comparabilidade entre estudos (Patricio et al., 2022; Vahidzadeh et al., 2025). Desse modo, ferramentas de diagnóstico de prontidão para a transição auxiliam na avaliação das condições de troca entre empresas, mas não solucionam, por si só, o desafio do mapeamento de processos e resíduos em complexos industriais (Agudo et al., 2022).

Ramírez-Rodríguez et al. (2024) assevera que a transição para a EC não deve se apoiar em um único método, mas em combinações metodológicas ajustadas às diferentes fases de identificação, avaliação, implementação e monitoramento. A partir dessa lacuna, a pergunta de pesquisa que orienta o artigo é a seguinte: *como estruturar uma metodologia de mapeamento de processos industriais e fluxos materiais em parques industriais, com base em evidências documentais e literatura científica, para subsidiar oportunidades de Simbiose Industrial voltadas à transição para a Economia Circular?* Em coerência com essa pergunta, o objetivo do artigo é propor uma metodologia para o início do mapeamento de processos industriais e fluxos materiais em parques industriais, visando subsidiar o início da transição para a Economia Circular (EC) em parques industriais.

A proposta oferece uma ferramenta para o planejamento da transição de parques industriais para a EC por meio da SI, permitindo identificar resíduos, subprodutos, recursos e potenciais conexões interempresariais com base em evidências documentais e científicas. Do ponto de vista acadêmico, este estudo contribui para o debate sobre EC em nível meso, propondo um procedimento replicável para identificar oportunidades preliminares de Simbiose Industrial (SI) em parques industriais, onde a concentração de atividades e a diversidade de fluxos materiais coexistem com baixa transparência informacional e limitada articulação entre empresas. Por meio de documentos públicos e padronizados como base analítica, o método viabiliza um diagnóstico inicial sem depender de cooperação prévia entre os atores. Do ponto de vista gerencial, o procedimento apoia o mapeamento de fluxos, a definição de prioridades de articulação e o início do planejamento de ações voltadas à circularidade.

Este artigo divide-se em: (a) introdução, que expõe a apresentação geral do estudo; (b) metodologia, que apresenta os passos a serem seguidos para a transição de um parque industrial rumo à Economia Circular (EC); (c) análise dos resultados, com a presença da exposição da aplicação da metodologia proposta em um parque industrial, bem como os levantamentos da possibilidade de circularidade; (d) construção do fluxo metodológico proposto como a discussão deste estudo e (e) considerações finais sobre a metodologia proposta neste estudo.

Metodologia

Neste artigo, propõe-se que a transição de parques industriais rumo à EC seja iniciada por meio da identificação das fábricas nele presentes. Essa etapa é fundamental, visto que a troca de materiais entre empresas colocalizadas promove um ecossistema circular, o que ocorre devido à circulação dos recursos (Wen & Meng, 2015). Em seguida, realiza-se o mapeamento dos insumos, dos processos fabris, dos produtos e dos resíduos (Pereira et al., 2023; Yu et al., 2015). Para essa etapa, indica-se a coleta e a análise documental de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), quando existentes, das fábricas presentes no complexo industrial e a

revisão do escopo da literatura científica sobre os processos principais dessas fábricas, bem como aplicações de EC para seus resíduos.

No contexto do licenciamento ambiental, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) constitui o instrumento técnico responsável por identificar, prever e avaliar os possíveis impactos ambientais decorrentes da implantação e da operação de determinado empreendimento, oferecendo subsídios analíticos para a apreciação de sua viabilidade ambiental (Secretaria do Desenvolvimento Sustentável do Paraná, 2025). Complementarmente, o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) apresenta, de forma sintética, objetiva e em linguagem acessível, os principais resultados do EIA, com a finalidade de tornar as informações compreensíveis à sociedade e favorecer a transparência e a participação pública no processo decisório (Instituto Água e Terra, 2025). Em conjunto, EIA e RIMA desempenham papel central na mediação entre avaliação técnica, controle institucional e legitimidade social no âmbito do licenciamento ambiental.

O EIA e o RIMA são, assim, ferramentas úteis nesse processo, pois fornecem informações reais sobre as operações e os processos instalados, os produtos e os resíduos gerados por empreendimentos cujo potencial poluidor é classificado como alto pela legislação ambiental e pelos órgãos competentes (Rocha et al., 2023; Oliveira et al., 2024). A revisão de escopo é importante, pois explora os principais conceitos do tema, ademais, condensa e sistematiza os dados em informações úteis para a análise (Mattos et al., 2023; Kastner et al., 2012; Mays et al., 2005; Thomas & Harden, 2008). A partir disso, é possível identificar insumos, processos fabris, produtos e levantar oportunidades de reaproveitamento dos resíduos comumente encontrados no complexo industrial.

Etapas da Metodologia

Neste estudo, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) foi escolhido para aplicação desta metodologia, pois visa desenvolver a indústria cearense por meio da integração entre atividades portuárias e industriais (Abreu et al., 2020). O CIPP é uma *joint venture* entre o Governo do Estado do Ceará e o Porto de Roterdã e está localizado nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia (Complexo do Pecém, 2023). As fábricas que atuam no CIPP produzem cimento, siderurgia, pré-moldados de concreto, ração animal, fertilizantes, cerâmica, pás eólicas e energia por meio da queima de carvão mineral (Complexo do Pecém, 2023). Durante os meses de fevereiro e abril de 2023, sete EIA/RIMA foram coletados e analisados por meio de consulta eletrônica e duas visitas à Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE-CE), sendo estes EIA/RIMA: três de empresas cimenteiras, dois de siderurgias e dois de termoeletricas. Em seguida, houve a busca de artigos científicos na base de dados *Web of Science* no mês de setembro do ano de 2023. A coleta e a análise de dados basearam-se na lista de verificação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews* (PRISMA) (Liberati et al., 2009).

O recorte temporal da revisão de literatura foi delimitado até o ano de 2023, por corresponder ao período de realização da coleta de dados da pesquisa. Essa definição buscou assegurar coerência entre a base bibliográfica analisada e o momento empírico de operacionalização do estudo, refletindo o estado do conhecimento disponível à época. Após a coleta, os artigos passaram por etapas de triagem, aplicação de critérios de inclusão e exclusão e aprofundamento analítico, processo que demandou tempo para sistematização dos achados. Considera-se, ainda, que a articulação entre os estudos selecionados e os dados obtidos por meio dos EIA/RIMA possibilitou um nível suficiente de aprofundamento teórico e empírico para a identificação das oportunidades de SI discutidas no trabalho.

Partindo disso, este estudo adotou os seguintes passos para a Revisão de Escopo: (1) identificação das *strings*; (2) estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos; (3) definição das informações a serem extraídas dos estudos relacionados (categorização dos estudos); (4) interpretação dos resultados; (5) apresentação da revisão (síntese do conteúdo) (Munn et al., 2018; Pham et al., 2014; Tricco et al., 2016). Os termos utilizados nesta busca foram: (1) ramo industrial; (2) Economia Circular; e (3) avaliação do ciclo de vida. O primeiro termo delimita o segmento industrial foco, o segundo levanta possibilidades de Economia Circular nesse segmento e o terceiro foca nos insumos, processos, produtos e resíduos gerados. Com isso, 125 artigos científicos foram coletados. A etapa de identificação das *strings* pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1

Strings de Busca da revisão de escopo

Atividade	String	Resultado
Cimenteira	"Cement industry" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	11
Aciaria	"Steel industry" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	12
Nutrição Animal	"Animal feed" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	19
Pá eólica	"wind blade" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	1
Termoeletrica	"steam thermal power plant" OR "coal-fired" OR "thermal power plant" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	4
Pré-moldados	"Precast concrete" OR "prefabricated concrete" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	7
Fertilizantes	"fertilizer*" AND "circular economy" AND "Life Cycle Assessment"	71

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

No tocante aos critérios de inclusão e exclusão, adotaram-se os parâmetros apresentados na tabela 2.

Tabela 2

Critérios de inclusão e exclusão dos artigos da revisão de escopo

Critério	Pergunta
Inclusão	O artigo aborda diretamente a relação entre os princípios da Economia Circular (EC) e a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)?
	O artigo explora a aplicação de LCA para avaliar conceitos de EC dentro dos segmentos industriais especificados?
	O artigo se concentra em um dos seguintes segmentos industriais: • Indústria de cimento? • Indústria siderúrgica? • Alimentação animal? • Fabricação de pás eólicas? • Usinas termelétricas a gás ou usinas a carvão? • Concreto pré-fabricado ou pré-moldado? • Produção de fertilizantes? • Indústrias de cerâmica ou de olaria?
	O artigo fornece uma descrição clara da metodologia de LCA, incluindo fontes de dados, limites do sistema e pressupostos?
	O artigo aborda ou explora os princípios, estratégias ou práticas da EC nos segmentos industriais especificados? Exemplos incluem <i>design</i> de produtos para longevidade ou reuso, reciclagem e recuperação de materiais, eficiência de recursos e redução de resíduos, remanufatura ou recondicionamento, Responsabilidade Estendida do Produtor (REP) ou cadeias de suprimento circulares.
	O artigo não se relaciona com a interseção da EC e da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)?
Exclusão	O artigo não é uma publicação revisada por pares, como editoriais, artigos de opinião ou notícias?
	O artigo não foi publicado em inglês?
	O artigo se concentra em indústrias não relacionadas aos segmentos industriais especificados dentro do escopo da revisão?
	O artigo não está alinhado com o EIA/RIMA das empresas do complexo em estudo?
	O artigo apresenta um viés extremo ou desequilibrado em sua abordagem, comprometendo a imparcialidade e a objetividade?
	O artigo não fornece informações substanciais ou relevantes sobre a interseção de CE e LCA, mesmo que atenda a outros critérios.
	O artigo não está disponível em acesso aberto ou não pode ser acessado de maneira razoável pela equipe de revisão?

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

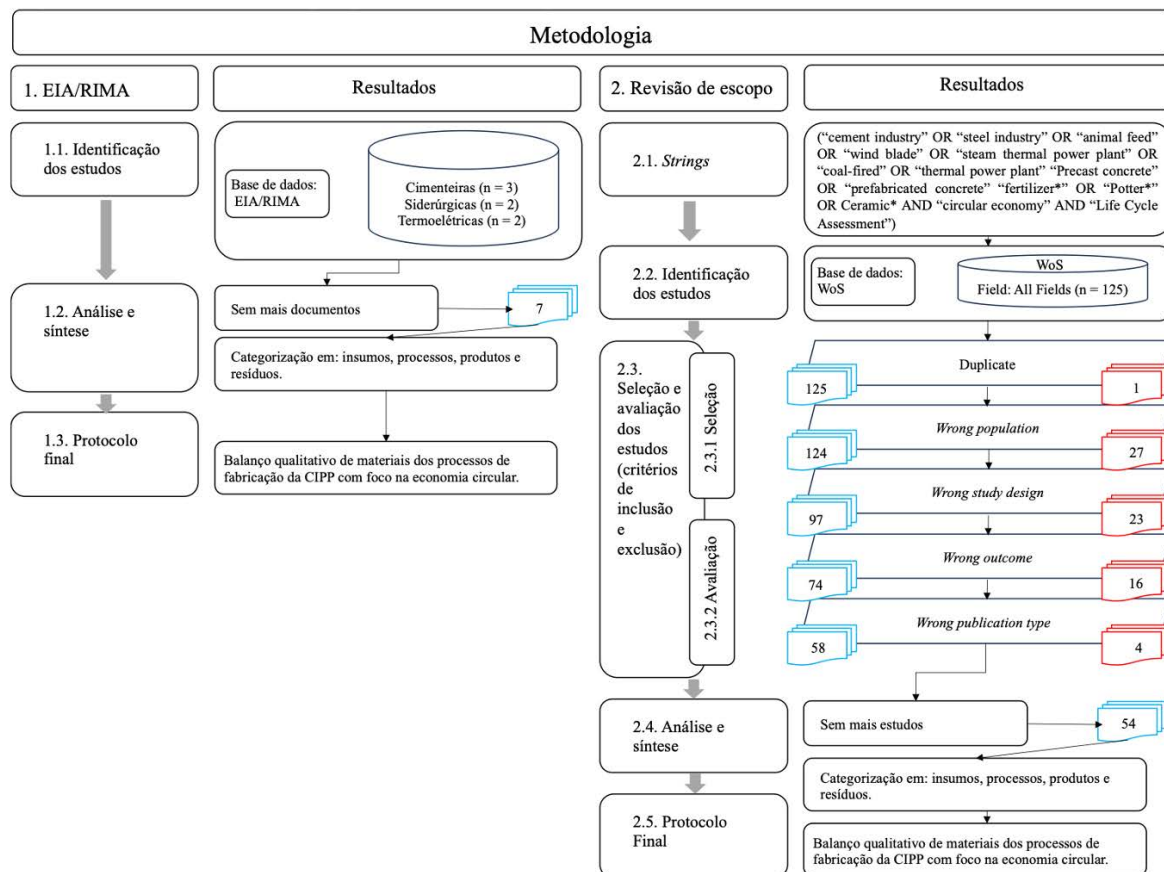
Para a seleção inicial dos artigos da revisão de escopo, este trabalho contou com três juízes com expertise no tema, todos com perfil acadêmico, egressos de programas de pós-graduação *stricto sensu* e com atuação no magistério superior. Antes dos julgamentos, todos tiveram acesso aos EIA/RIMA das empresas do complexo, documentos que serviram como referência para orientar a seleção dos estudos. O primeiro juiz tem formação em engenharia civil e pós-graduação em engenharia ambiental, atuando na escolha dos artigos da cimenteira, aciaria, pá eólica, termoelétrica, pré-moldados e cerâmica, totalizando 55 artigos julgados. O segundo juiz tem formação em engenharia ambiental e auxiliou na escolha de nutrição animal, pá eólica, termoelétrica, pré-moldados e fertilizantes, totalizando 102 artigos julgados. O terceiro juiz tem formação em economia e pós-graduação em pesquisa operacional e julgou os estudos de cimenteira, aciaria, cerâmica, nutrição animal e fertilizantes, totalizando 114 artigos. Após o julgamento, 54 artigos estavam elegíveis para continuar no estudo e serem lidos na íntegra para a realização da catalogação.

Os julgamentos foram realizados por meio do *software* Rayyan, plataforma on-line e gratuita para o auxílio de revisões sistemáticas de literatura. O modo *blind on* foi aplicado para que cada juiz tivesse acesso apenas aos seus

trabalhos. Nessa perspectiva, foi possível identificar a quantidade de trabalhos utilizados como base dessa pesquisa, conforme apresentado na figura 1.

Figura 1

Protocolo da proposta metodológica



Na revisão de escopo realizada, após o julgamento dos especialistas, foram selecionados artigos que atendiam aos critérios previamente estabelecidos de inclusão e exclusão, para cada área de estudo específica. Restaram 1 artigo para a pá-eólica, 3 artigos para a termoeletrica, 4 artigos para a pré-moldados, 3 artigos para a cimenteira, 4 artigos para a aciaria, 14 artigos para a nutrição animal, 11 artigos para a cerâmica e 14 artigos para a área de fertilizantes, totalizando 54 artigos.

Resultados da Aplicação

A metodologia proposta tem caráter replicável e pode ser adaptada a diferentes parques industriais. Neste estudo, a aplicação empírica foi delimitada às indústrias efetivamente presentes no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Considerando que nem todas as empresas do complexo possuíam EIA/RIMA disponíveis, a metodologia foi estruturada de forma complementar, articulando os dados documentais com achados provenientes da literatura científica. Desse modo, sua contribuição reside justamente na possibilidade de aplicação em diferentes contextos industriais, desde que existam informações mínimas que permitam o diagnóstico inicial de fluxos materiais e a identificação de oportunidades de circularidade.

Este estudo sistematiza 54 artigos provenientes da revisão de escopo e os sete EIA/RIMA. Após essa etapa, extraíram-se as informações necessárias para iniciar o processo de transição de parques industriais rumo à EC, a saber: insumos, processos fabris, produtos e resíduos gerados. A tabela 3 apresenta o modelo de negócios de forma linear (com os insumos utilizados por cada empresa, seu processo fabril, seus produtos e os resíduos gerados). Alguns desses resíduos podem ser incorporados como insumos de processos industriais dentro do complexo, implicando maior circularidade no CIPP. Essa prática pode trazer inúmeros benefícios para organizações, tais como mitigação dos impactos ambientais e aumento da vida útil de um resíduo (Ghisellini et al., 2016).

A escória é o subproduto da fundição de metais ou da produção de aço e consiste em materiais não metálicos e impurezas que são separadas do metal durante o processo de fusão (Uddin et al., 2023; Ren et al., 2017; Perathoner et al., 2021), sendo rica em sílica e alumina, dois componentes cruciais na composição do cimento. Portanto, esse

resíduo pode ser empregado como um substituto total ou parcial do clínquer, principal componente do cimento (Perathoner et al., 2021). Outra aplicação da escória como insumo estende-se ao processo produtivo do concreto, inclusive, a incorporação da escória implica melhora na resistência à compressão e à abrasão e na durabilidade do concreto. Por fim, a escória como insumo pode ser utilizada no processo produtivo do asfalto e de outros materiais de construção (Pinto & Diemer, 2020). Outro resíduo produzido no CIPP é a cinza proveniente do processo produtivo de termoeletrônicas. Por ser rica em sílica e alumina, esse resíduo aumenta a resistência do cimento à abrasão e à fissuração, tornando-o mais durável e resistente (Batuecas et al., 2021; Uddin et al., 2023). Os resíduos sólidos de produção da pá eólica, cimento e concreto também podem ser utilizados para a incorporação no cimento, por meio do processo físico de trituração (Batuecas et al., 2021).

Durante o processo de produção de fertilizantes, por meio do tratamento anaeróbico, forma-se o lodo, rico em gás metano e utilizado na produção de energia, o biogás. A queima do biogás, por sua vez, gera cinzas, que podem ser direcionadas para a produção de cimentos e pré-moldados de concreto (Rufi-Salis et al., 2020). O Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará prevê a operação de uma estação produtora de água de reúso para abastecimento do CIPP. Essa estação será abastecida por meio de efluentes, advindos de efluentes urbanos captados da Região Metropolitana de Fortaleza (Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 2018). O lodo surge, então, como resultado do tratamento de efluentes. Esse material pode ser utilizado na produção de fertilizantes por meio da formação de cristais de estruvita e três processos são empregados nessa formação: (1) REM-NUT®, baseado em troca iônica, que pode recuperar fósforo na forma de estruvita a partir do efluente tratado secundário, adicionando Mg^{2+} para cumprir a relação estequiométrica e precipitando a estruvita; (2) Ostara®, que requer um reator específico e produtos químicos com Mg^{2+} e NH_4^+ para precipitar a estruvita do digestato; e (3) AirPrex®, que também envolve a adição de Mg^{2+} via cloreto de magnésio antes de entrar no reator AirLift, onde a aeração intensa é adicionada por meio de *stripping* de CO_2 para aumentar o pH e produzir cristais de estruvita no fundo do reator (Rufi-Salis et al., 2020).

As partículas finas são resíduos resultantes do processo de produção de cerâmica e de pré-moldados, sendo um tipo de poluente atmosférico que se refere a partículas sólidas ou líquidas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 micrômetros (PM 2,5) ou 10 micrômetros (PM 10). Essas partículas podem ser inaladas e, até mesmo, entrar na corrente sanguínea, causando uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer (Settembre-Blundo et al., 2019). As partículas finas podem ser inseridas no processo produtivo de concreto ou de asfalto, desde que sejam submetidas a processos químicos para que sua toxicidade seja eliminada (Perathoner et al., 2021).

Notou-se que todas as empresas de produção de cimento, aço, pré-moldados e termoeletrônicas emitem os gases de efeito estufa e que apresentam similaridade quanto às emissões, a saber: CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), CH_4 (metano), NO_x (óxidos de nitrogênio), N_2O (óxido nitroso), SO_2 (dióxido de enxofre), HF (ácido fluorídrico) e HCl (ácido clorídrico). Esses gases podem ser utilizados para produzir fertilizantes conforme as etapas a seguir: (1) processo de conversão catalítica, no qual o nitrogênio atmosférico (N_2) é transformado em óxido nitroso (N_2O) (Sen & Bakshi, 2023); (2) o óxido nitroso submete-se a uma reação com hidrogênio (H_2), resultando na formação de amônia (NH_3) (Mohammed et al., 2018). A amônia produzida desempenha um papel essencial na fabricação de fertilizantes nitrogenados, como ureia, nitrato de amônio e sulfato de amônia (Aleisa et al., 2021). É importante ressaltar que o processo de produção da amônia mais difundido é o método Haber-Bosch, caracterizado por requerer alta pressão e temperatura (Humphreys et al., 2021).

Tabela 3

Sistematização dos insumos, processos, produtos e resíduos identificados

Indústria	Insumos	Processos Fabris	Produto	Resíduos	Referências
Cimenteira	Calciário, argila, minério de ferro, gesso, areia e cinzas de carvão.	Moagem, mistura, cozimento, moagem de clínquer.	Cimento, clínquer.	Gases de efeito estufa (CO_2 , CO, CH_4 , NO_x , N_2O e SO_2) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), partículas finas (PM 2,5 e PM 10) e metais pesados (As, Cr, Hg e Ni).	Uddin et al. (2023); Batuecas et al. (2021); Perathoner et al. (2021); Apodi (2019); Votorantim (2014); Polimix (2016).
Aciaria	Sucata de aço, minério de ferro, coque, carvão e calcário.	Fusão, refino e laminação.	Aço	Escória, poeira, gases e águas residuais.	Broadbent (2016); Pinto e Diemer (2020); Minunno et al. (2020); Li et al. (2022); Dong et al. (2016); ArcellorMittal (2017); Gerdau (2012).
Nutrição Animal	Proteína, água, resíduos de alimentos e grãos.	Mistura, granulação, embalagem.	Ração.	Resíduos de produção, coprodutos de compostagem, CH_4 , N_2O e VOCs.	Campos et al. (2020); Jagtap et al. (2021); Viana et al. (2023); Laso et al. (2018); Teigiserova et al. (2022); Petit et al. (2020); Ojha et al. (2020); Oldfield et al. (2017); San Martin et al. (2021); Albizzati et al. (2021a, 2021b); Owsianiak et al. (2022); Sanchez Matos et al. (2021); Suckling et al. (2021).
Pá Eólica	Fibra de carbono, fibra de vidro e epóxi	Fabricação, moldagem e montagem.	Pás eólicas.	Retalhos de material e resíduos de fabricação.	Ghosh et al. (2022).

Termoelétrica	Carvão, gás, biomassa, água, O ₂ , resíduos orgânicos, inorgânicos, inertes para produzir biogás, lama vermelha e escória (alumínio e carboneto).	Combustão, geração de eletricidade.	Energia	Cinzas, águas residuais, gases (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , CO e CH ₄), metais pesados (Zn, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb e V) e compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC).	Asif et al. (2022); Rathore e Sarmah (2020); Ren et al. (2017); MPX (2001); Termolux (2008).
Pré-Moldados	Concreto, aço, madeira, cimento e agregados (areia, cascalho e pedra britada), água, partículas sólidas (fly ash), cimento, água, areia, superplastificante e lixos de construção e demolição (CDW).	Moldagem, cura, acabamento.	Produtos pré-moldados.	Gases de efeito estufa (CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x , N ₂ O e SO ₂) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), partículas finas (PM 2,5 e PM 10) e metais pesados (As, Cr, Hg e Ni).	Zhang et al. (2023); Yu et al. (2024); Zhao et al. (2020); Moreno-Juez et al. (2020).
Fertilizantes	Nitrogênio, cálcio, silício, fósforo, potássio, estruvita, materiais orgânicos, herbicida, amônia, águas residuais tratadas, fosfato, magnésio, NH ₄ NO ₃ , (NH ₄) ₂ HPO ₄ , estruvita, lodo, esterco, resíduos sólidos municipais (MSW), resíduos lignocelulósicos, fosfogesso e compostagem.	Mistura, granulação, gaseificação e purificação.	Fertilizantes.	Lodo purgado e cinzas.	Colley et al. (2021); Pagliaro et al. (2022); Ruffi-Salis et al. (2020); Möller et al. (2023); Cobo et al. (2019); Taifouris e Martin (2018); Aleisa et al. (2021); Li et al. (2022); Mohammed et al. (2018); Sen e Bakshi (2023); Pajura et al., (2023); Antonetti et al. (2017).
Cerâmica	Argila, feldspato, areia, água e carbonato de cálcio.	Moldagem, secagem, queima e esmaltação.	Produtos cerâmicos.	Resíduos de produção (quebras) e gases poluentes (CO ₂ , NO _x , SO ₂ , HF e HCl).	López-García et al. (2021); Silvestri et al. (2021); Bianchi et al. (2023); Barbosa et al. (2022); Barraco et al. (2023); Cangussu et al. (2023); Zygmuntowicz et al. (2021); Dino et al. (2020); Simão et al. (2022); Gaibor et al. (2023); Settembre-Blundo et al. (2019).

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Além disso, na indústria de fertilizantes, o CH₄ pode ser empregado na produção de fertilizantes nitrogenados (Colley et al., 2021; Li et al., 2022). O CO₂, por sua vez, é útil na fabricação de fertilizantes fosfatados, como superfosfato simples e superfosfato triplo (Cobo et al., 2019). Esse reaproveitamento de gases residuais é um aspecto significativo da eficiência e da sustentabilidade na indústria de fertilizantes, contribuindo para a otimização dos recursos e para a redução do impacto ambiental (Colley et al., 2021).

Outrossim, esses gases residuais podem ser utilizados na produção de ração (Teigiserova et al., 2022). O metano, por exemplo, oriundo da digestão anaeróbica de matéria orgânica, como dejetos de animais, pode ser utilizado diretamente na produção de ração (Laso et al., 2018). Da mesma forma, o CO₂ e a NH₃ também podem ser utilizados nessa produção, por meio da fermentação (Laso et al., 2018). Assim, a utilização de gases residuais na produção de ração emerge como um desafio tecnológico para o complexo industrial, pois necessita de atenção para as técnicas requeridas (Ojha et al., 2020).

Com base na literatura, empresas de produção de pré-moldados em concreto e cimenteiras apresentaram Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) como resíduos, que são poluentes atmosféricos não metálicos. Em geral, VOCs são compostos químicos orgânicos que têm baixo ponto de ebulição e alta pressão de vapor, o que significa que eles podem facilmente evaporar e se tornar gases na atmosfera (Yu et al., 2024). Muitos VOCs são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, além disso, são frequentemente emitidos por processos industriais, produtos químicos, solventes, combustíveis e outras fontes. Contudo, os artigos não especificaram esses compostos e não mencionaram a circularidade entre as empresas do complexo industrial, nesse sentido, recomenda-se a destinação desses resíduos para um aterro sanitário industrial.

Na mesma situação, a literatura também evidencia que empresas como cimenteira, termoelétricas e pré-moldados geram metais pesados como resíduos, sendo eles: As (arsênio), Cr (cromo), Hg (mercúrio), Ni (níquel), Zn (zinco), Pb (chumbo), V (vanádio). Para esses elementos, a literatura não apresenta evidências consolidadas de circularidade, dessa forma, também se indica o seu direcionamento para um aterro sanitário industrial. Esses elementos, nas palavras de Zhang et al. (2023), se forem descartados de forma inadequada, podem causar contaminação da água, do solo, do ar e afetar toda a cadeia da biosfera, implicando uma ameaça à saúde humana.

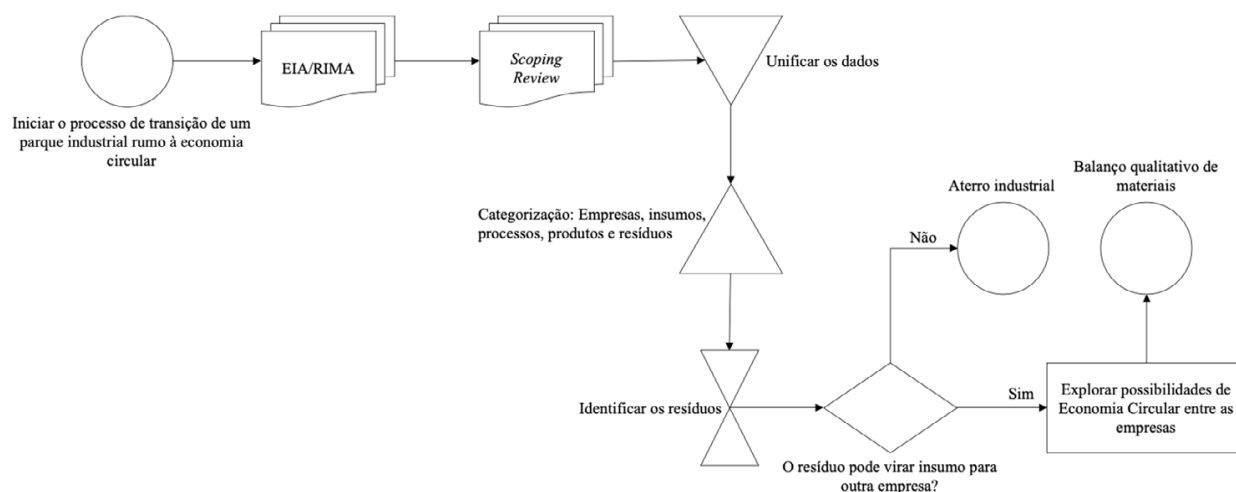
Construção do Fluxo Metodológico e Próximos Passos para a Transição de Parques Industriais Rumo à Economia Circular

Para o balanço qualitativo de materiais no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, com foco na circularidade, surgiu a necessidade/oportunidade de propor uma metodologia para o início do mapeamento de processos industriais e fluxos materiais em parques industriais, visando subsidiar o início da transição para a EC em parques industriais, que, neste trabalho, é apresentada como a união da análise dos EIA/RIMA com a revisão de escopo. Esse levantamento analisou os procedimentos empregados na compreensão e no aprimoramento das operações das empresas de um complexo, favorecendo o bem-estar ecológico e social, além de abrir oportunidades para novos negócios.

A figura 2 exibe um fluxograma que propõe os procedimentos necessários para reproduzir os passos iniciais de identificação de oportunidades de EC entre empresas dentro de um complexo. A ACV é um fator determinante para entender as trocas de materiais, pois é uma metodologia que determina limites do processo produtivo a serem estudados, apresentando seus componentes (insumos, processos fabris, produtos e resíduos) e os impactos ambientais.

Figura 2

Fluxo metodológico proposto



Para replicar este estudo de forma a utilizá-lo metodologicamente, primeiramente, é necessário destacar a relevância da Economia Circular (EC) para o complexo em análise. Após isso, devem-se seguir estes passos:

- 1) Escolher o complexo industrial para iniciar o processo de transição rumo à Economia Circular (EC) e mapear suas empresas;
- 2) Coletar os documentos de EIA/RIMA das empresas que estão no complexo industrial escolhido, pois eles direcionam as análises de seleção/exclusão e a qualidade dos estudos obtidos na etapa da revisão de escopo;
- 3) Conduzir uma revisão de escopo (*scoping review*) para mapear e compreender o estado atual do conhecimento científico sobre os processos fabris no contexto do complexo em estudo;
- 4) Categorizar as informações (tanto dos artigos quanto dos EIA/RIMA), abrangendo aspectos como empresas envolvidas, insumos utilizados, processos adotados, produtos gerados e resíduos resultantes;
- 5) Identificar as oportunidades de aproveitar os resíduos como insumos aproveitáveis por outras empresas;
- 6) Integrar os resultados obtidos nas fases anteriores, de forma visual, por meio de uma tabela com a presença das categorias pré-definidas.

Esse passo a passo permite uma visão abrangente e holística da metodologia proposta. Em resumo, identifica não apenas os pontos para a sua otimização e eficiência, mas também mapeia estratégias concretas para promover a EC, por meio da troca de materiais entre as empresas, e para fortalecer a EC no complexo, por meio de documentos secundários.

A figura 2 demonstrou que a metodologia foi concebida para atuar precisamente sobre os entraves que dificultam a transição de parques industriais para a EC. O uso de EIA/RIMA reduz a dependência de trocas voluntárias de informação em ambientes marcados por baixa abertura informacional entre empresas, conforme descrito por Abreu et al. (2020) e Kirchherr et al. (2018). Em complemento, a incorporação da *scoping review* expande a capacidade de identificar alternativas de reaproveitamento de subprodutos ao relacionar os fluxos mapeados no parque a possibilidades técnicas discutidas por Bacudio et al. (2016) e Sellitto et al. (2021). A etapa de unificação e categorização dos dados, por sua vez, enfrenta uma fragmentação que dificulta a visualização de conexões entre processos, insumos, produtos e resíduos. Nesse sentido, a verificação da conversão de resíduos em insumos antecipa, no plano analítico, uma articulação interfirmas, que tende a ser limitada por baixos níveis de confiança e cooperação, conforme argumentam Zhang et al. (2019). Dessa forma, a metodologia contorna a interdependência entre compartilhamento de informação e confiança prévia entre empresas, ao viabilizar um diagnóstico inicial sem exigir, desde o início, relações colaborativas consolidadas. Assim, o método identifica fluxos materiais e estrutura a base informacional a partir da qual a transição circular pode começar.

Considerações Finais

Em síntese, o estudo alcançou seu objetivo ao propor uma metodologia para o mapeamento de processos industriais e fluxos materiais em parques industriais, visando subsidiar o início da transição para a Economia Circular (EC) em parques industriais. A partir da articulação entre a análise de EIA/RIMA e a revisão de escopo da literatura, a proposta identificou fluxos materiais e oportunidades preliminares de circularidade entre atividades industriais presentes no complexo.

A principal contribuição do estudo reside na oferta de um procedimento metodológico replicável, aplicável em contextos nos quais a cooperação interempresarial ainda é limitada e os dados primários nem sempre estão prontamente disponíveis. Desse modo, a metodologia não representa a transição em si, mas uma etapa diagnóstica inicial e necessária para sua estruturação, apoiando gestores públicos e privados na identificação de possibilidades de SI e no planejamento de estratégias de circularidade em nível meso.

Como limitação, a aplicação da metodologia dependeu da disponibilidade de documentos ambientais acessíveis, em meio digital ou físico. Esse ponto é relevante porque nem todos os processos industriais exigem EIA/RIMA, podendo o licenciamento ocorrer com estudos simplificados ou com dispensa, a depender das características do empreendimento e da decisão do órgão ambiental. Assim, os resultados refletem as informações efetivamente acessíveis no momento da pesquisa. Ainda assim, a disponibilização de outros documentos ambientais pode ampliar a base informacional do método e potencializar o mapeamento inicial de fluxos, resíduos e oportunidades de circularidade em parques industriais.

Como agenda de pesquisas futuras, recomenda-se sua aplicação em outros contextos produtivos, tanto para examinar sua replicabilidade quanto para apoiar investigações que aprofundem, validem e quantifiquem oportunidades de circularidade. As oportunidades identificadas por meio do método proposto demandam investigações posteriores, capazes de validar sua viabilidade em contextos específicos e, quando pertinente, quantificar fluxos, ganhos e limitações associados à sua implementação. Nesse sentido, pesquisas futuras podem não apenas ampliar a robustez analítica da metodologia, mas também consolidar sua utilidade como base para estudos sobre a transição de diferentes arranjos produtivos rumo à Economia Circular (EC).

Referências

- Abreu, M. C. S. de, Mota, R. C., & Paula, E. V. de. (2020). Identifying barriers and proposing a roadmap to develop industrial symbiosis. *Revista de Administração da UFSM*, 13(3), 517–534. <https://doi.org/10.5902/1983465929127>
- Agudo, F. L., Bezerra, B. S., Paes, L. A. B., & Gobbo, J. A., Júnior. (2022). Proposal of an assessment tool to diagnose industrial symbiosis readiness. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 916–929. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.013>.
- Albizzati, P. F., Tonini, D., & Astrup, T. F. (2021a). A quantitative sustainability assessment of food waste management in the European Union. *Environmental Science & Technology*, 55(23), 16099–16109. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03940>
- Albizzati, P. F., Tonini, D., & Astrup, T. F. (2021b). High-value products from food waste: An environmental and socio-economic assessment. *Science of the Total Environment*, 755, 142466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142466>
- Aleisa, E., Alsulaili, A., & Almuzaini, Y. (2021). Recirculating treated sewage sludge for agricultural use: Life cycle assessment for a circular economy. *Waste Management*, 135, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.035>
- Antonetti, E., Iaquaniello, G., Salladini, A., Spadaccini, L., Perathoner, S., Centi, G. (2017). Waste-to-chemicals for a circular economy: The case of urea production (waste-to-urea). *ChemSusChem*, 10(5), 912–920. <https://doi.org/10.1002/cssc.201601555>
- Apodi. (2019). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. Apodi.
- ArcellorMittal. (2017). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. ArcellorMittal.
- Asgari, A., & Asgari, R. (2021). How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem: The barriers and incentives. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 566–579. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.020>

- Asif, Z., Chen, Z., Wang, H., & Zhu, Y. (2022). Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(8), 2329–2347. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02328-8>
- Atalano, M., Ibiapina, H., & Machado, T. (2022). A economia circular como modelo de desenvolvimento sustentável. *Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(1), 1-21. <https://doi.org/10.26668/IndexLawJournals/2526-0057/2022.v8i1.8963>
- Barbosa, M. Z., Dias, J. de O., Marvila, M. T., & de Azevedo, A. R. G. (2022). Life cycle approach applied to the production of ceramic materials incorporated with ornamental stone wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 9957–9970. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16386-w>
- Batuecas, E., Liendo, F., Tommasi, T., Bensaid, S., Deorsola, F. A., & Fino, D. (2021). Recycling CO₂ from flue gas for CaCO₃ nanoparticles production as cement filler: A Life Cycle Assessment. *Journal of CO₂ Utilization*, 45(1), 101446. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101446>
- Bianchi, I., Forcellese, A., Simoncini, M., Vita, A., Delledonne, L., & Castorani, V. (2023). Life cycle assessment of carbon ceramic matrix composite brake discs containing reclaimed prepreg scraps. *Journal of Cleaner Production*, 413(1), 137537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137537>
- Broadbent, C. (2016). Steel's recyclability: Demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1658–1665. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1081-1>
- Campos, I., Valente, L. M. P., Matos, E., Marques, P., & Freire, F. (2020). Life-cycle assessment of animal feed ingredients: Poultry fat, poultry by-product meal and hydrolyzed feather meal. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119845>
- Cangussu, N., Vasconcelos, L., & Maia, L. (2023). Environmental benefits of using sewage sludge in the production of ceramic bricks. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25344–25355. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18670-9>
- Ceglia, D., de Abreu, M. C. S., & da Silva, J. C. L., Filho. (2017). Critical elements for eco-retrofitting a conventional industrial park: Social barriers to be overcome. *Journal of Environmental Management*, 187, 375–383. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.064>
- Cobo, S., Levis, J. W., Dominguez-Ramos, A., & Irabien, A. (2019). Economics of enhancing nutrient circularity in an organic waste valorization system. *Environmental Science & Technology*, 53(11), 6123–6132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06035>
- Colley, T. A., Valerian, J., Hauschild, M. Z., Olsen, S. I., & Birkved, M. (2021). Addressing nutrient depletion in Tanzanian sisal fiber production using life cycle assessment and circular economy principles, with bioenergy co-production. *Sustainability*, 13(16), 8881. <https://doi.org/10.3390/su13168881>
- Complexo do Pecém. (2023). *Área industrial*. <https://www.complexodopecem.com.br>
- Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. (2024). Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. Câmara dos Deputados. <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2024/decreto-12082-27-junho-2024-795869-publicacaooriginal-172239-pe.html>
- Dino, G. A., Cavallo, A., Rossetti, P., Garamvölgyi, E., Sándor, R., & Coulon, F. (2020). Towards sustainable mining: Exploiting raw materials from extractive waste facilities. *Sustainability*, 12(6), 2383. <https://doi.org/10.3390/su12062383>
- Dong, L., Fujita, T., Dai, M., Geng, Y., Ren, J., Fujii, M., Wang, Y., & Ohnishi, S. (2016). Towards preventative eco-industrial development: An industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China. *Journal of Cleaner Production*, 114, 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.015>
- Gaibor, N., Mateus, R., Leitão, D., Cristelo, N., Miranda, T., Pereira, E. N. B., & Cunha, V. M. C. F. (2023). Sustainability assessment of half-sandwich panels based on alkali-activated ceramic/slag wastes cement versus conventional building solutions. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136108>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Geng, Y., Sarkis, J., & Bleischwitz, R. (2019). How to globalize the circular economy. *Nature*, 565, 153–155. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00017-z>
- Gerdau. (2012). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. Gerdau
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghosh, T., Hanes, R., Key, A., Walzberg, J., & Eberle, A. (2022). The circular economy life cycle assessment and visualization framework: A multistate case study of wind blade circularity in United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106531>
- Humphreys, J., Lan, R., & Tao, S. (2021). Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1), 2000043. <https://doi.org/10.1002/aesr.202000043>
- Instituto Água e Terra. (2025). *Relatório de impacto ambiental – RIMA: PCH Paiol Grande*. Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo do Paraná. https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files_documento/2025-10/rima_pch_paiol_grande_out2025.pdf
- Jagtap, S., Garcia-Garcia, G., Duong, L., Swainson, M., & Martindale, W. (2021). Codesign of food system and circular economy approaches for the development of livestock feeds from insect larvae. *Foods*, 10(8), 1701. <https://doi.org/10.3390/foods10081701>
- Kastner, M., Tricco, A. C., Soobiah, C., Lillie, E., Perrier, L., Horsley, T., Welch, V., Cogo, E., Antony, J. & Straus, S. E. (2012). What is the most appropriate knowledge synthesis method to conduct a review? Protocol for a scoping review. *BMC Medical Research Methodology*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-12-114>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, 150, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
- Krzeminski, P., Anastasovski, A., Erceg, A., Erceg, B. Č., Dosoretz, C. G., Borg, M., Refalo, P., Godina, R., Neves, A., Jonaitiene, V., Kilcan, C. Ö., Tkaczyk, A. H., Szilagyi, A., Skoulou, V., Ryan, Y., & Puche, A. M. (2026). From theory to practice: a methodological roadmap for mapping, assessing, and implementing Industrial Symbiosis. *Cleaner Engineering and Technology*, 31(1), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2026.101159>
- Laso, J., Margallo, M., García-Herrero, I., Fullana, P., Bala, A., Gazulla, C., Poletini, A., Kahhat, R., Vázquez-Rowe, I., Irabien, A., & Aldaco, R. (2018). Combined application of Life Cycle Assessment and linear programming to evaluate food waste-to-food strategies: Seeking for answers in the nexus approach. *Waste Management*, 80, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.009>
- Li, D-Y., Cho, Y-C., Hsu, M. H., & Lin, Y-P. (2022). Recovery of phosphate and ammonia from wastewater via struvite precipitation using spent refractory brick gravel from steel industry. *Journal of Environmental Management*, 302, 114110–114117. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114110>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gotzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), 1–34. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- López-García, A. B., Cotes-Palomino, T., Uceda-Rodríguez, M., Moreno-Maroto, J. M., Cobo-Ceacero, C. J., Andreola, N. M. F., & Martínez-García, C. (2021). Application of life cycle assessment in the environmental study of sustainable ceramic bricks made with ‘alperujo’ (olive pomace). *Applied Sciences*, 11(5), 2278. <https://doi.org/10.3390/app11052278>

- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23–44.
- Mattos, S. M., Cestari, V. R. F., & Moreira, T. M. M. (2023). Scoping protocol review: PRISMA-ScR guide refinement. *Revista de Enfermagem UFPI*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.26694/reufpi.v12i1.3062>
- Mays, N., Pope, C., & Popay, J. (2005). Systematically reviewing qualitative and quantitative evidence to inform management and policy-making in the health field. *Journal of Health Services Research & Policy*, 10(1), 6–20. <https://doi.org/10.1258/1355819054308576>
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G. M., & Gruner, R. L. (2020). Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104855–104869. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855>
- Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. (2025). *Plano Nacional de Economia Circular (PNEC): 2025–2034*. https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2013-2034_03-06-2025.pdf
- Mohammed, F., Biswas, W. K., Yao, H., & Tadé, M. (2018). Sustainability assessment of symbiotic processes for the reuse of phosphogypsum. *Journal of Cleaner Production*, 188, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.309>
- Møller, H., Lyng, K-A., Røös, E., Samsonstuen, S., & Olsen, H. F. (2023). Circularity indicators and added value to traditional LCA impact categories: Example of pig production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02150-4>
- Moreno-Juez, J., Vegas, I. J., Gebremariam, A. T., García-Cortés, V., & Di Maio, F. (2020). Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121515–121530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121515>
- Munonye, W. C. (2025). Towards circular economy metrics: a systematic review. *Circular economy and sustainability*, 5(5), 4093–4135. <http://dx.doi.org/10.1007/s43615-025-00604-5>
- MPX. (2001). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. MPX.
- Munn, Z., Peters, M. D. J., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology*, 18, 1–7. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Nguyen, B. T., & Le, N. B. A. (2025). Circular economy: A study of eco-industrial park governance. *Journal of Governance and Regulation*, 14(2), 310–316. <https://doi.org/10.22495/jgrv14i2siart9>
- Ojha, S., Bußler, S., & Schlüter, O. K. (2020). Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing. *Waste Management*, 118, 600–609. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.010>
- Oldfield, T. L., Achmon, Y., Perano, K. M., Dahlquist-Willard, R. M., VanderGheynst, J. S., Stapleton, J. J., Simmons, C. W., & Holden, N. M. (2017). A life cycle assessment of biosolarization as a valorization pathway for tomato pomace utilization in California. *Journal of Cleaner Production*, 141, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.051>
- Oliveira, O. B. Q., Filho, E. G., Junior, dos Santos, N. L., & de Oliveira, M. P. (2024). A trajetória do processo de licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica de Ferreira Gomes-AP. *Caderno Pedagógico*, 21(6), e4742. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-034>
- Owsianiak, M., Pusateri, V., Zamalloa, C., de Gussem, E., Verstraete, W., Ryberg, M., & Valverde-Pérez, B. (2022). Performance of second-generation microbial protein used as aquaculture feed in relation to planetary boundaries. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106158>
- Pagliaro, M., Lino, C., Pizzone, D. M., Mauriello, F., Russo, M., Muscolo, A., Ciriminna, R., & Avellone, G. (2022). Amino acids in new organic fertilizer AnchoisFert. *ChemistrySelect*, 7(47), e202203665. <https://doi.org/10.1002/slct.202203665>

- Pajura, R., Masłoń, A., & Czarnota, J. (2023). The use of waste to produce liquid fertilizers in terms of sustainable development and energy consumption in the fertilizer industry—A case study from Poland. *Energies*, 16(4), 1747. <https://doi.org/10.3390/en16041747>
- Parida, V., Burström, T., Visnjic, I., & Wincent, J. (2019). Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 101, 715–725. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.006>
- Perathoner, S., Van Geem, K. M., Marin, G. B., & Centi, G. (2021). Reuse of CO₂ in energy intensive process industries. *Chemical Communications*, 57(84), 10967–10982. <https://doi.org/10.1039/D1CC03154F>
- Pereira, L. S., Gomes, T., & Pacheco, E. B. A. V. (2023). Métodos de alocação de impactos ambientais para avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos plásticos. *Peer Review*, 5(19), 303–324.
- Petit, G., Korbél, E., Jury, V., Aider, M., Rousselière, S., Audebrand, L., K., Turgeon, S. L., & Mikhaylin, S. (2020). Environmental evaluation of new brewer's spent grain preservation pathways for further valorization in human nutrition. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(47), 17335–17344. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04236>
- Patricio, J., Kalmykova, Y., Rosado, L., Cohen, J., Westin, A., & Gil, J. (2022). Method for identifying industrial symbiosis opportunities. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106437>
- Pinto, J., & Diemer, A. (2020). Supply chain integration strategies and circularity in the European steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104517–104533. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104517>
- Polimix. (2016). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. Polimix.
- Pham, M. T., Rajić, A., Greig, J. D., Sargeant, J. M., Papadopoulos, A., & McEwen, S. A. (2014). A scoping review of scoping reviews: Advancing the approach and enhancing the consistency. *Research Synthesis Methods*, 5(4), 371–385. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>
- Prieto-Sandoval, V., Torres-Guevara, L. E., Ormazabal, M., & Jaca, C. (2021). Beyond the circular economy theory: Implementation methodology for industrial SMEs. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 14(3), 425–438. <https://doi.org/10.3926/jiem.3413>
- Ramírez-Rodríguez, L. C., Ormazabal, M., & Jaca, C. (2024). Mapping sustainability assessment methods through the industrial symbiosis life cycle for a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 50, 253–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.005>
- Rathore, P., & Sarmah, S. P. (2020). Economic, environmental, and social optimization of solid waste management in the context of circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106510. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106510>
- Ren, C., Wang, W., Mao, Y., Yuan, X., Song, Z., Sun, J., & Zhao, X. (2017). Comparative life cycle assessment of sulfoaluminate clinker production derived from industrial solid wastes and conventional raw materials. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1314–1324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.184>
- Rocha, J., Barbosa, J. R. de A., & de Medeiros, S. R. F. Q. (2023). Projeto hídrico e transformações territoriais no Ceará-Brasil. *Revista GeoNordeste*, 34(1), 55–71. <https://periodicos.ufs.br/geonordeste/article/view/18861>
- Rodríguez-Borges, C. G., Arroyo De León, K. L., Pérez-Rodríguez, J. A., & Andrade-Cedeno, R. J. (2024). Metodología para la planificación estratégica de un parque ecoindustrial en Esmeraldas-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 30(2), 274–290. <https://doi.org/10.31876/rcs.v30i2.41905>
- Rufi-Salís, M., Brunnhofer, N., Petit-Boix, A., Gabarrell, X., Guisosola, A., & Villalba, G. (2020). Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions. *Science of the Total Environment*, 737, 139783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139783>

- Ruiz-Pastor, L., Chulvi, V., Mulet, E., & Royo, M. (2022). A metric for evaluating novelty and circularity as a whole in conceptual design proposals. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130495>
- San Martin, D., Orive, M., Martínez, E., Iñarra, B., Ramos, S., González, N., de Salas, A. G., Vázquez, L. A., & Zufía, J. (2021). Multi-criteria assessment of the viability of valorising vegetable by-products from the distribution as secondary raw material for animal feed. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 15716–15730. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11752-6>
- Sanchez Matos, J., Barberino, A. T. M. S., de Araujo, L. P., Lôbo, I. P., & de Almeida, J. A., Neto. (2021). Potentials and limitations of the bioconversion of animal manure using fly larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 3497–3520. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01141-y>
- Secretaria do Desenvolvimento Sustentável do Paraná. (2025). *Instrução normativa nº 20/2025, de 25 de abril de 2025: Estabelece definições, critérios e diretrizes para empreendimentos geradores de energia de fonte solar*. Instituto Água e Terra. https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2025-05/instrucao_normativa_20-2025_-_empreendimentos_geradores_de_energia_fonte_solar_-_23.574.540-2.pdf
- Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. (2018). *Plano de ações estratégicas de recursos hídricos do Ceará*. https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2018/07/PLANO-DE-ACOES-ESTRATEGICAS-DE-RECURSOS-HIDRICOS-CE_2018.pdf
- Sellitto, M. A., Murakami, F. K., Butturi, M. A., Marinelli, S., Kadel, N., Jr., & Rimini, B. (2021). Barriers, drivers, and relationships in industrial symbiosis of a network of Brazilian manufacturing companies. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.016>
- Sen, A., & Bakshi, B. R. (2023). Techno-economic and life cycle analysis of circular phosphorus systems in agriculture. *Science of the Total Environment*, 872, 162016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162016>
- Settembre-Blundo, D., García-Muiña, F. E., Pini, M., Volpi, L., Siligardi, C., & Ferrari, A. M. (2019). Sustainability as source of competitive advantages in mature sectors: The case of Ceramic District of Sassuolo (Italy). *Smart and Sustainable Built Environment*, 8(1), 53–79. <https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2018-0038>
- Silvestri, L., Forcina, A., Di Bona, G., & Silvestri, C. (2021). Circular economy strategy of reusing olive mill wastewater in the ceramic industry: How the plant location can benefit environmental and economic performance. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129388>
- Simão, F. V., Chambart, H., Vandemeulebroeke, L., Nielsen, P., Adrianto, L. R., Pfister, S., & Cappuyns, V. (2022). Mine waste as a sustainable resource for facing bricks. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133118>
- Suckling, J., Druckman, A., Small, R., Cecelja, F., & Bussemaker, M. (2021). Supply chain optimization and analysis of *Hermetia illucens* (black soldier fly) bioconversion of surplus foodstuffs. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128711. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128711>
- Taifouris, M. R., & Martin, M. (2018). Multiscale scheme for the optimal use of residues for the production of biogas across Castile and Leon. *Journal of Cleaner Production*, 185, 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.018>
- Teigiserova, D. A., Hamelin, L., Tiruta-Barna, L., Ahmadi, A., & Thomsen, M. (2022). Circular bioeconomy: Life cycle assessment of scaled-up cascading production from orange peel waste under current and future electricity mixes. *Science of the Total Environment*, 812, 152574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152574>
- Termolux. (2008). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. Termolux.
- The World Bank. (2021). *Circular Economy in Industrial Parks: technologies for competitiveness*. The World Bank.
- Thomas, J., & Harden, A. (2008). Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-8-45>

- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K., Colquhoun, H., Kastner, M., Levac, D., Ng, C., Sharpe, J. P., Wilson, K., Kenny, M., Warren, R., Wilson, C., Stelfox, H. T., & Straus, S. E. (2016). A scoping review on the conduct and reporting of scoping reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 16, 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12874-016-0116-4>
- Uddin, A., Ali, Y., Sabir, M., Petrillo, A., & De Felice, F. (2023). Circular economy and its implementation in cement industry: A case point in Pakistan. *Science of the Total Environment*, 898, 165605–165617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165605>
- Verkic, B., Schröder, E., Drees, K., Dosch, K., Buschbeck, C., & Greiff, K. (2026). Evaluation approach to assess actions and scenarios for improving climate and resource efficiency of municipalities and companies in industrial parks. *Journal of Environmental Management*, 398, 128442. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128442>
- Viana, L., Dessureault, P-L., Marty, C., Boucher, J-F., & Paré, M. C. (2023). Life Cycle Assessment of oat flake production with two end-of-life options for agro-industrial residue management. *Sustainability*, 15(6), 5124. <https://doi.org/10.3390/su15065124>
- Votorantim. (2014). *Estudo de impacto ambiental e relatório de impacto ambiental*. Votorantim.
- Wen, Z., & Meng, X. (2015). Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: A case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New District. *Journal of Cleaner Production*, 90, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.041>
- Yu, F., Han, F., & Cui, Z. (2015). Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. *Journal of Cleaner Production*, 87, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.058>
- Yu, Y., Pacheco-Torgal, F., Zhao, X-Y., & Wang, X-L. (2024). Cleaner production of the precast concrete industry: Comparative life cycle analysis of concrete using recycled aggregates from crushed precast rejects. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 28(5), 1014-1038. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2240882>
- Zhao, Z., Courard, L., Gros Lambert, S., Jehin, T., Léonard, A., & Xiao, J. (2020). Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104786–104799. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104786>
- Zhang, A., Venkatesh, V. G., Liu, Y., Wan, M., Qu, T., & Huisinigh, D. (2019). Barriers to smart waste management for a circular economy in China. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118198>
- Zhang, C., Hu, M., van der Mei, M., Di Maio, F., Yang, X., Gao, X., Li, K., Zhao, H., & Li, C. (2023). Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. *Waste Management*, 155, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.035>
- Zygmuntowicz, J., Tomaszewska, J., Zurowski, R., Wachowski, M., Szachogluchowicz, I., Piotrkiewicz, P., Kaszuwara, W., & Konopka, K. (2021). Environmental footprint as a criterion in the ZTA composites forming process via centrifugal slip casting. *Ceramics International*, 47(13), 18053–18064. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.121>

Como citar:

Oliveira, F. M., Silva, L. M. T., de Abreu, M. C. S., & Vaz, C. R. (2025). Proposta Metodológica para Transição de Parques Industriais Rumo à Economia Circular. *Revista Ciências Administrativas*, 31, 1-17. <https://doi.org/10.5020/2318-0722.2025.31.e15718>

Endereço para correspondência:

Felipe Moura Oliveira
E-mail: felipeoliveira@uespi.unc.br

Luís Matheus Tavares Silva
E-mail: luismatheusts@gmail.com

Mônica Cavalcanti Sá de Abreu
E-mail: mabreu@ufc.br

Caroline Rodrigues Vaz
E-mail: caroline.vaz@ufsc.br



Recebido em: 16/01/2025.

Aceito em: 21/02/2025.