



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Tomada de decisão na simbiose industrial: percepções sobre a necessidade de ferramentas de apoio

Flávia Ferrari dos Santos

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção - UFSM

Danielle Ferrari dos Santos

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - UFSM

Julio Cezar Mairesse Siluk

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - UFSM

Paula Donaduzzi Rigo

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - UFSM

Resumo:

A crescente busca por soluções sustentáveis tem levado organizações a adotarem a simbiose industrial (SI) como estratégia capaz de reduzir impactos ambientais, gerar ganhos econômicos e fortalecer a competitividade. Apesar de seus benefícios, a implementação da SI permanece desafiadora devido à complexidade dos fatores envolvidos que dificultam a tomada de decisão. Diante dessa dificuldade e complexidade na tomada de decisão, este artigo teve como objetivo investigar e validar a necessidade de uma ferramenta de apoio à decisão que contribua para viabilizar projetos de SI. Para tanto, adotou-se uma abordagem metodológica mista: (i) revisão bibliométrica da literatura científica indexada na base *Scopus*, abrangendo 1.336 trabalhos publicados entre 1994 e 2025; e (ii) pesquisa com 53 especialistas brasileiros e italianos, selecionados por sua experiência acadêmica ou profissional na área. Os resultados bibliométricos revelaram a consolidação do tema, evidenciada pelo crescimento das publicações ao longo dos anos, forte internacionalização da coautoria científica e diversidade de áreas de aplicação. A coleta de dados com especialistas confirmou a percepção de que uma ferramenta de apoio à decisão é não apenas relevante, mas fundamental para simular cenários, avaliar múltiplas variáveis e apoiar gestores em escolhas mais seguras e eficazes. Em síntese, os achados demonstram que a criação de ferramentas específicas pode reduzir a distância entre o potencial teórico e a prática da SI, fortalecendo a adoção dessa estratégia em diferentes contextos industriais.

Palavras-chave: Simbiose industrial, ferramenta de apoio, tomada de decisão, revisão bibliométrica.

Decision-making in industrial symbiosis: insights into the need for support tools

Abstract:

The growing search of sustainable solutions has led organizations to adopt industrial symbiosis (IS) as a strategy to reduce environmental impacts, generate economic gains, and strengthen competitiveness. Despite its benefits, the implementation of IS remains challenging due to the complexity of the factors involved, which hinder decision-making. In light of these challenges, this article seeks to investigate and validate the need for a decision-support tool that can contribute to the feasibility of IS projects. To this end, a mixed methodological approach was employed: (i) a

bibliometric review of the scientific literature indexed in Scopus, comprising 1,336 papers published between 1994 and 2025; and (ii) a survey of 53 Brazilian and Italian experts, selected based on their academic and professional experience in the field. The bibliometric results indicate the consolidation of the topic, evidenced by the growth of publications over the years, the strong internationalization of scientific co-authorship, and the diversity of application areas. The survey data confirm the perception that a decision-support tool is not only relevant but also essential for simulating scenarios, assessing multiple variables, and enabling managers to make safer and more effective choices. Overall, the findings demonstrate that the development of specific tools can bridge the gap between the theoretical potential and practical implementation of IS, thus reinforcing the adoption of this strategy across different industrial contexts.

Keywords: Industrial symbiosis, support tool, decision-making, bibliometric review.

1. Introdução

A busca por sustentabilidade e eficiência operacional tornou-se um dos pilares para a competitividade industrial na economia global, levando empresas de todo o mundo a adotarem diferentes abordagens para alcançar melhores resultados (LAATSIT; JOHANSSON, 2025). Entre essas abordagens, a simbiose industrial (SI) destaca-se como uma das mais promissoras. Ao promover trocas simbióticas por meio da colaboração entre diferentes empresas e organizações, a SI possibilita não apenas o compartilhamento de materiais, mas também de conhecimento e práticas de gestão, contribuindo para otimizar insumos, aprimorar processos e alcançar vantagem competitiva (CHERTOW, 2000; LOMBARDI; LAYBOURN, 2012).

No entanto, a viabilização de redes de SI é intrinsecamente complexa. A literatura aponta que seu desenvolvimento é influenciado por um conjunto diverso de fatores técnicos, econômicos, políticos e organizacionais (MIRATA, 2004). Essa interdependência de variáveis torna o processo de tomada de decisão arriscado e desafiador. A ausência de mecanismos estruturados para analisar esses fatores e guiar as decisões cria uma lacuna significativa entre o potencial teórico da SI e sua aplicação prática.

Diante dessa lacuna, o presente artigo tem como objetivo central investigar e validar a necessidade de uma ferramenta de apoio à decisão para a implementação da SI. Utilizando uma metodologia mista, que combina uma revisão bibliométrica da literatura com uma pesquisa online junto a especialistas da área, este estudo analisa o cenário acadêmico e justifica a relevância de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que auxilie gestores e formuladores de políticas a tomar decisões mais seguras, transparentes e eficazes.

Este artigo está dividido em 4 seções. A primeira contextualiza o tema geral do trabalho, descreve rapidamente o problema que pretende solucionar ou discutir, e aponta o objetivo de sua realização. A segunda seção, traz uma revisão teórica sobre o tema. A terceira apresenta a metodologia utilizada, e por fim, a quarta etapa apresenta os resultados alcançados.

2. Simbiose Industrial

Frente a um cenário global marcado pela crescente pressão por práticas produtivas mais sustentáveis e pela volatilidade no mercado de matérias-primas, a SI emerge como uma estratégia inovadora para promover a resiliência e a competitividade do setor industrial. Baseada no conceito biológico de relações mutuamente benéficas entre espécies, a SI foca na colaboração entre diferentes organizações, promovendo compartilhamento de recursos e conhecimentos para a geração de vantagem competitiva (CHERTOW, 2000; LOMBARDI; LAYBOURN, 2012; SCHWARZ; STEININGER, 1997).

A aplicação pioneira da SI ocorreu na década de 1990, nas instalações industriais da cidade de Kalundborg, Dinamarca, uma cidade modelo que exemplifica o sucesso da ecologia industrial até os dias atuais através da troca de materiais e energia entre as empresas locais e a comunidade (CHERTOW, 2007; DOMENECH; DAVIES, 2011; EHRENFELD; GERTLER, 1997).

Com o tempo, o escopo da SI ampliou-se, originalmente limitado à troca física de recursos entre indústrias, o conceito passou a englobar também o compartilhamento de ativos, conhecimento, infraestrutura, logística e informações, refletindo uma compreensão mais abrangente de colaboração interorganizacional (CHERTOW, 2000; DOMENECH et al., 2019; LOMBARDI; LAYBOURN, 2012).

A literatura aponta múltiplos benefícios associados à adoção da SI. No âmbito ambiental, destacam-se a redução no consumo de matérias-primas e no descarte de resíduos; na esfera econômica, a obtenção de novos clientes, o aumento da atratividade do negócio e a redução de custos; e, na social, o compartilhamento de conhecimento, o fortalecimento da capacidade de inovação e a ampliação de oportunidades de trabalho (DOMENECH et al., 2019; HARFELDT-BERG, 2024; MIRATA, 2004; PATRICIO et al., 2018).

Entretanto, a implementação da SI não está isenta de desafios. A implementação da SI também apresenta diversos desafios técnicos, econômicos, legais e/ou regulatórios e sociais (SELLITTO et al., 2025). Como aumento da carga administrativa, restrições de tempo e disponibilidade e questões regulatórias (DOMENECH et al., 2019; HARFELDT-BERG, 2024; PATRICIO et al., 2018)

3. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza exploratória e descritiva, com abordagem quantitativa e qualitativa. Para tanto, nesta pesquisa foram adotados os procedimentos próprios desses dois tipos de pesquisa. A pesquisa exploratória tem como objetivo desenvolver e esclarecer conceitos e ideias sobre determinado tema, enquanto a pesquisa descritiva busca retratar o perfil ou as características de fenômenos ou situações específicas relacionadas ao estudo (GIL, 2025; MATIAS-PEREIRA, 2019).

No que se refere ao método de investigação, este estudo concentrou-se em duas etapas principais: (i) uma revisão bibliométrica e (ii) a coleta de dados com especialistas atuantes no setor.

A primeira etapa consistiu na revisão bibliométrica, utilizando a base de dados *Scopus* para mapear a produção científica sobre o tema, escolhida por reunir elevado número de editoras e por sua ampla utilização internacional. Para a busca, foi elaborada uma *string* de pesquisa que combinou os termos mais diretamente relacionados ao tema com sinônimos capazes de ampliar os resultados. As palavras-chave centrais foram “*industrial symbiosis*” e “*tool*”, acrescidas de variações como *framework*, *methodology* e *approach*. Dessa forma, a string final utilizada foi: (“*industrial symbiosis*”) AND (“*framework*” OR “*tool*” OR “*methodology*” OR “*approach*”). A busca foi realizada nos campos de título, resumo e palavras-chave, sem restrição de período, o que resultou na identificação inicial de 1.336 trabalhos.

A bibliometria é um método quantitativo voltado a identificar, medir e quantificar a produção científica em um campo específico do conhecimento. Permite criar indicadores, mapear redes de colaboração, identificar lacunas e apontar temas emergentes de pesquisa (CHUEKE; AMATUCCI, 2022).

Para a análise dos dados coletados na plataforma *Scopus*, utilizou-se o *software* VOSviewer®, ferramenta especializada na construção e visualização de redes

bibliométricas. O *software* VOSviewer® foi utilizado para gerar mapas a partir de nós representativos, o que permitiu identificar os principais *clusters* de pesquisa.

Na segunda etapa, voltada a complementar as análises bibliométricas e compreender a necessidade prática de uma ferramenta de apoio à decisão, foi realizada uma coleta de dados com especialistas da área. A pesquisa (*survey*) ocorreu por meio de um questionário online, focada em entender a percepção desses profissionais sobre a necessidade de uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisão em projetos de SI.

A seleção dos participantes ocorreu, de forma criteriosa, por meio de amostragem não probabilística intencional. Os 53 especialistas respondentes foram selecionados através de uma abordagem de amostragem intencional com base em sua experiência acadêmica ou profissional comprovada no campo. A identificação desses especialistas foi feita por meio de busca por autores na base *Scopus* e por profissionais na rede *LinkedIn*.

4. Resultados

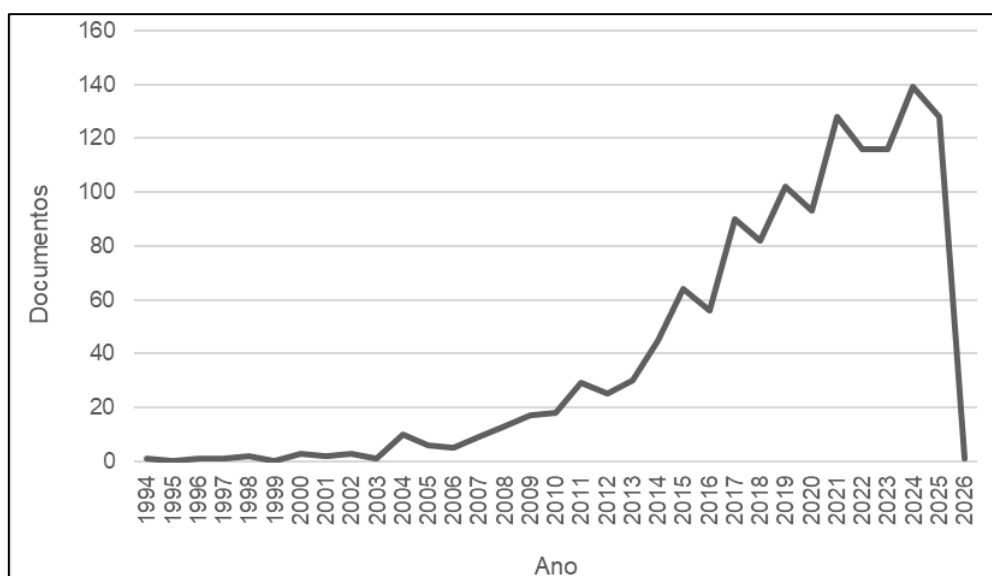
4.1 Resultados bibliométricos

A pesquisa bibliométrica, realizada na base Scopus em setembro de 2025 revelou 1.336 trabalhos, publicados entre 1994 e 2025. O idioma de publicação predominante é o inglês, correspondendo a 97,60% dos artigos, seguido pelo chinês (1,27%), alemão (0,45%) e outros 5 idiomas que juntos correspondem a 0,68%.

Dos 1.336 trabalhos identificados na pesquisa, foram identificados 871 artigos (65,2%), 219 artigos de conferências (16,4%) e 114 capítulos de livro (8,5%) e outros 132 documentos que representam 12,6% do total de trabalhos e dividem-se em (*Review, Conference Review, Book, Editorial, Note, Erratum e Short Survey*).

A evolução da produção científica com relação a ferramentas voltadas à SI apresenta um crescimento considerável nos últimos anos, conforme apresenta a Figura 1. O primeiro registro encontrado na base Scopus data o ano de 1994, com publicações ainda incipientes até o início dos anos 2000. A partir de 2010, observa-se um crescimento contínuo, alcançando um pico em 2024, com 139 publicações. Entre 2018 e 2024, a produção manteve-se elevada, com destaque para os anos de 2021 (128), 2022 (116) e 2023 (116), o que demonstra a consolidação do tema como um campo relevante de investigação.

Figura 1 - Produção científica anual

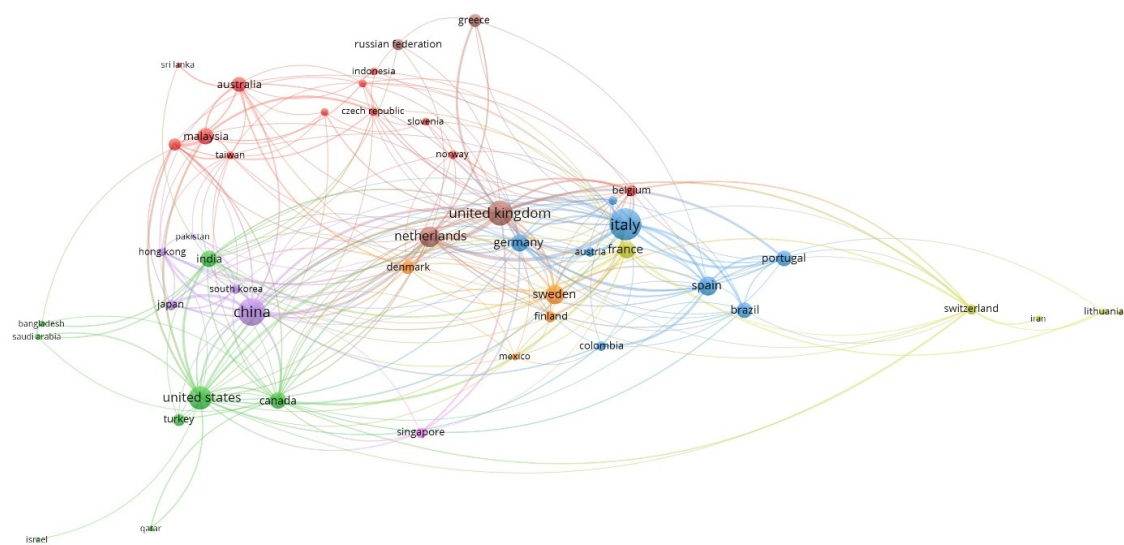


Fonte: Autores (2025)

No que se refere à coautoria entre países, a Figura 2 apresenta o mapa bibliométrico de coautoria de publicações sobre SI. A posição de cada país no mapa é determinada pela intensidade de suas conexões com os outros países. Quanto mais próximos os países estão, mais fortes são suas interações científicas.

Através deste mapa é possível observar a formação de diferentes clusters de colaboração científica conjunta, a qual é fortemente internacionalizada. Notam-se quatro principais clusters sendo liderados pela Itália, China, Reino Unido e Estados Unidos da América. O Brasil aparece conectado principalmente ao cluster onde estão alguns países europeus, especialmente à Itália, à Espanha e a Portugal.

Figura 2 - Mapa bibliométrico de coautoria entre países



Fonte: Autores (2025)

Para os 1.336 trabalhos foram identificadas fontes de publicação, considerando periódicos e anais de eventos. A Tabela 1 relaciona os periódicos e o número de trabalhos publicados. Os 10 principais periódicos representam aproximadamente 36% do total, contando com 485 trabalhos. Foram identificadas 160 fontes de publicação, destas, 85 com apenas 1 ou 2 trabalhos publicados no tema.

Tabela 1 – Periódicos e trabalhos publicados

Periódico	Trabalhos Publicados
Journal of Cleaner Production	172
Sustainability Switzerland	94
Journal of Industrial Ecology	67
Resources Conservation and Recycling	32
Journal of Environmental Management	27
Sustainable Production and Consumption	22
Progress in Industrial Ecology	19
Computer Aided Chemical Engineering	19
Procedia CIRP	17
IFIP Advances in Information and Communication Technology	16

Fonte: Autores (2025)

Foram identificadas 5.937 palavras-chave nos documentos, destas, as principais são “*industrial symbiosis*” com 589 ocorrências, seguida por “*sustainable development*” com 280 ocorrências, “*circular economy*” com 225 ocorrências e “*industrial ecology*” com 222 ocorrências. Outras palavras-chave de relevância para o estudo, com mais de 100 ocorrências, foram: “*symbiosis*”, “*waste management*”, “*industrial economics*”, “*recycling*”, “*industry*” e “*life cycle*”.

Figura 3 - Mapa bibliométrico de coocorrência de palavras-chave

Fonte: Autores (2025)

4.2 Resultados da coleta de dados

4.2.1 Perfil dos respondentes

A pesquisa contou com a participação de 53 especialistas com atuação relevante na área de estudo. O perfil dos respondentes demonstra um grupo experiente e diversificado, conferindo robustez aos dados coletados.

Do ponto de vista demográfico, a amostra é composta majoritariamente por profissionais brasileiros (44 respondentes), complementada por um grupo de 9 especialistas italianos. Em relação ao gênero, 56,6% dos participantes são do sexo masculino e 43,4% do sexo feminino. A média de idade do grupo é de 43 anos, indicando um alto grau de maturidade profissional.

A experiência profissional dos especialistas, é um dos pontos fortes da amostra. O tempo de atuação varia amplamente, de 1 a 45 anos, com uma média geral de aproximadamente 15,5 anos de experiência. Observa-se a presença de especialistas em diferentes estágios de carreira, desde aqueles com 2 a 7 anos de atuação até profissionais sêniores com mais de 20 anos, essa diversidade garante uma pluralidade de visões.

A qualificação dos especialistas respondentes reflete uma amostra de alto nível, com predominância de profissionais com pós-graduação *stricto sensu*. A maioria dos participantes possui títulos de Doutor (PhD) ou Mestre, o que reforça o caráter técnico-científico do grupo. A análise da formação acadêmica e da atuação profissional revela um perfil multidisciplinar dos respondentes, essencial para a compreensão de um tema complexo como a SI.

As áreas de conhecimento são diversas, com uma forte concentração de profissionais das engenharias, ciências aplicadas e gestão e outras áreas que enriquecem a análise com perspectivas complementares. Evidenciando a natureza interdisciplinar da SI, que demanda conhecimento não apenas técnico, mas também gerencial, econômico e estratégico. Quanto à atuação profissional, os especialistas se dividem principalmente em dois perfis: Pesquisadores e Professores, ligados a universidades e institutos de pesquisa, e Profissionais de mercado, atuando diretamente em empresas, consultorias ou como gestores. Essa dualidade é estratégica para a pesquisa, pois combina a visão teórica e científica aprofundada com a experiência prática da implementação, desafios e oportunidades da SI no ambiente industrial.

Em síntese, a amostra é composta por um painel de especialistas altamente qualificados, com forte base acadêmica e experiência prática, cuja diversidade de formação, senioridade, gênero e origem geográfica assegura uma análise robusta e fundamentada.

4.2.2 Percepção sobre a necessidade de uma ferramenta de apoio à decisão

Após a caracterização do perfil dos respondentes, esta seção se aprofunda na análise dos dados coletados, iniciando pela avaliação da principal hipótese deste trabalho.

Partindo do pressuposto de que a complexidade da SI impõe desafios à tomada de decisão, os especialistas foram questionados sobre a necessidade de uma ferramenta de suporte, por meio da pergunta: "Como você avalia a necessidade de uma ferramenta para auxiliar o processo de tomada de decisão na simbiose industrial?". O objetivo foi mensurar a relevância percebida de tal ferramenta para mitigar barreiras decisórias, com as respostas coletadas qualitativamente em campo de texto livre.

A análise das respostas revela uma percepção predominantemente positiva. Os especialistas não apenas confirmam a necessidade da ferramenta, como também detalham em suas justificativas os principais desafios que a solução poderia endereçar. A maioria

classificou a ferramenta como "necessária", "muito importante" ou "fundamental", validando sua relevância.

As justificativas se concentraram em eixos centrais. A mais citada foi a capacidade da ferramenta de gerenciar a complexidade relacionada à SI, com destaque para a organização de informações, simulação de cenários e análise de múltiplos fatores. Adicionalmente, a ferramenta foi apontada como um instrumento estratégico, capaz de gerar diferencial competitivo e consolidar práticas de sustentabilidade. Outras contribuições relevantes mencionadas foram o auxílio na mensuração de ganhos econômicos, sociais e ambientais e na gestão de riscos e conflitos de interesse.

Entretanto, embora a percepção geral seja amplamente positiva, algumas ressalvas foram apontadas. Um número reduzido de respondentes destacou que a adoção da ferramenta somente se justificaria caso apresentasse uma abordagem inovadora em relação às já existentes. Além disso, ressaltaram que sua eficácia dependeria fortemente do contexto organizacional, incluindo aspectos culturais, estruturais e de governança.

5. Conclusões

A análise realizada evidenciou que a SI se consolidou como campo de investigação científica e prática empresarial relevante, com crescente produção acadêmica e forte coautoria internacional.

Os resultados indicam um crescimento contínuo das publicações sobre SI, sobretudo a partir da década de 2010. Das redes de colaboração científica, tem-se ênfase na Itália, China, Reino Unido e Estados Unidos da América

No que se refere às palavras-chave, os resultados mostraram quatro grandes clusters temáticos, envolvendo ecologia industrial, aspectos organizacionais, termos ligados à indústria, simbiose e aspectos ambientais. Indicando a SI como uma área interdisciplinar, que transita entre dimensões ambientais, econômicas e sociais.

Complementarmente, a pesquisa com especialistas reforçou a percepção da necessidade de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, capaz de lidar com a complexidade inerente à SI. A maioria dos respondentes destacou que tal instrumento é essencial para organizar informações, simular cenários, mensurar benefícios e apoiar gestores e formuladores de políticas na adoção de práticas sustentáveis.

O estudo, portanto, contribui ao validar a lacuna existente entre o potencial teórico da SI e sua aplicação prática, reforçando que a ausência de instrumentos adequados pode limitar o alcance de seus benefícios. A confirmação dessa demanda abre caminho para o desenvolvimento de soluções inovadoras que facilitem a integração entre atores industriais, gestores públicos e formuladores de políticas.

Referências

CHERTOW, Marian R. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 25, n. Volume 25, 2000, p. 313–337, 1 nov. 2000.

CHERTOW, Marian R. “Uncovering” Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 11–30, 1 jan. 2007.

CHUEKE, Gabriel Vouga; AMATUCCI, Marcos. Métodos de sistematização de literatura em estudos científicos: bibliometria, meta-análise e revisão sistemática. **Internext**, v. 17, n. 2, p. 284–292, 17 mar. 2022.

DOMENECH, Teresa *et al.* Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 76–98, 1 fev. 2019.

DOMENECH, Teresa; DAVIES, Michael. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 10, p. 79–89, 1 jan. 2011.

EHRENFELD, John; GERTLER, Nicholas. Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg. **Journal of Industrial Ecology**, v. 1, n. 1, p. 67–79, 1 jan. 1997.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2025.

HARFELDT-BERG, Lovisa. Distribution of benefits and adverse effects and their role in industrial symbiosis decision-making – A Swedish case study. **Cleaner Environmental Systems**, v. 13, p. 100202, 1 jun. 2024.

LAATSIT, Mart; JOHANSSON, Glenn. Fostering industrial symbiosis in process industries: An innovation policy perspective. **Environmental Technology & Innovation**, v. 37, p. 104027, 1 fev. 2025.

LOMBARDI, D. Rachel; LAYBOURN, Peter. Redefining Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 1, p. 28–37, 1 fev. 2012.

MATIAS-PEREIRA, José. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MIRATA, Murat. Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 12, n. 8–10, p. 967–983, 1 out. 2004.

PATRICIO, Joao *et al.* Enabling industrial symbiosis collaborations between SMEs from a regional perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1120–1130, 20 nov. 2018.

SCHWARZ, Erich J.; STEININGER, Karl W. Implementing nature's lesson: The industrial recycling network enhancing regional development. **Journal of Cleaner Production**, v. 5, n. 1–2, p. 47–56, 1 jan. 1997.