

**PROGRAMA DE SIMBIOSE INDUSTRIAL PARA O DISTRITO INDUSTRIAL DE SANTA CRUZ-RJ: UMA PROPOSTA DE FLUXO SIMBIÓTICO ENTRE UMA SIDERÚRGICA E UMA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE GESEN  
ACARTONADO****INDUSTRIAL SYMBIOSIS PROGRAM FOR THE SANTA CRUZ INDUSTRIAL DISTRICT, RIO DE JANEIRO: A PROPOSAL FOR SYMBIOTIC FLOW BETWEEN A STEEL MILL AND A GYPSUM BOARD MANUFACTURING INDUSTRY****PROGRAMA DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL PARA EL DISTRITO INDUSTRIAL DE SANTA CRUZ, RÍO DE JANEIRO: UNA PROPUESTA DE FLUJO SIMBIÓTICO ENTRE UNA FÁBRICA DE ACERO Y UNA INDUSTRIA DE FABRICACIÓN DE PLACAS DE YESO**

10.56238/revgeov17n2-096

**Melissa Rocco de Oliveira**

Mestre em Engenharia Ambiental

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: melrocco.mr@gmail.com

**Adriana Martins de Souza**

Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: adriana.martins@aedin.com.br

**Erika de Queiros Eugenio**

Doutora em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: erikaqe@fat.uerj.br

**Márcia Rosa de Almeida**

Doutora em Ciências - Química

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: marcia.rosa@fat.uerj.br

**RESUMO**

Este trabalho objetiva implementar um Programa de Simbiose Industrial (SI) no Distrito Industrial de Santa Cruz (RJ), com foco em uma siderúrgica e uma indústria de fabricação de placas de gesso acartonado. Para tanto foi empregado o modelo do Distrito Industrial dinamarquês de Kalundborg e o conhecimento adquirido pelo Programa SACI (Systemic Approach to Clean Industry) em colaboração com o Instituto Kalundborg Symbiosis. Foram elaboradas visitas técnicas e 9 das 15 empresas que compõe o Distrito Industrial de Santa Cruz tiveram seus fluxos simbióticos investigados e mapeados.



A coleta de dados foi realizada a partir de questionários previamente elaborados e uma ferramenta de apoio foi desenvolvida para identificação das principais matérias-primas e resíduos dos processos produtivos, bem como possibilidades de reuso ou sinergias simbióticas para as empresas localizadas nesse Distrito. Foram identificados mais de 15 fluxos simbióticos entre as empresas avaliadas, sendo o mais relevante encontrado, e com potencial de implantação a curto prazo, a possibilidade de uso do subproduto FGD (Flue Gas Desulfurization) gerado no alto-forno siderúrgico como matéria-prima para a indústria fabricante de placas de gesso acartonado. Benefícios ambientais e econômicos significativos, incluindo a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e a diminuição da dependência de gipsita natural podem ser alcançados a partir dos fluxos simbióticos propostos. Assim, a implementação da simbiose industrial pode otimizar recursos e promover a economia circular no Distrito Industrial de Santa Cruz. Este trabalho poderá servir de modelo para a implementação de fluxos simbióticos em outros parques industriais brasileiros.

**Palavras-chave:** Simbiose Industrial. Economia Circular. Dessulfurização de Gases de Combustão. Reutilização de Resíduos. Gesso FGD.

## ABSTRACT

This study proposes the implementation of an Industrial Symbiosis (IS) program in the Santa Cruz Industrial District (RJ), with emphasis on the integration between a steel plant and a drywall manufacturing facility. The methodological framework was based on the Denmark Kalundborg Industrial Symbiosis model and on knowledge acquired through the SACI (Systemic Approach to Clean Industry) Program, developed in partnership with the Kalundborg Symbiosis Institute. Technical site visits were conducted, and material and energy flows from 9 of the 15 companies operating in the district were systematically mapped and analyzed. Data were collected using structured questionnaires, and a dedicated assessment tool was developed to identify primary raw materials, waste streams, and potential synergies for resource exchange among the companies. The analysis identified more than 15 potential symbiotic exchanges. The most promising short-term opportunity involves the use of flue gas desulfurization (FGD) byproduct generated by the steel plant as a substitute for natural gypsum in gypsum board production. The proposed symbiotic exchanges demonstrate significant potential environmental and economic benefits, including reduced CO<sub>2</sub> emissions and decreased reliance on virgin raw materials. The findings indicate that the implementation of industrial symbiosis strategies can enhance resource efficiency and foster circular economy practices within the Santa Cruz Industrial District. Furthermore, the proposed framework may serve as a replicable model for the development of industrial symbiosis networks in other Brazilian industrial parks.

**Keywords:** Industrial Symbiosis. Circular Economy. Flue Gas Desulfurization. Resource Efficiency. FGD Gypsum.

## RESUMEN

El presente estudio propone la implementación de un Programa de Simbiosis Industrial (SI) en el Distrito Industrial de Santa Cruz (RJ), con énfasis en la articulación entre una planta siderúrgica y una unidad de fabricación de paneles de yeso. El marco metodológico se fundamentó en el modelo de la Dinamarca Simbiosis Industrial de Kalundborg y en los conocimientos adquiridos a través del Programa SACI (Systemic Approach to Clean Industry), desarrollado en colaboración con el Instituto de Simbiosis de Kalundborg. Se realizaron visitas técnicas y se llevó a cabo el mapeo sistemático de los flujos de materiales y energía correspondientes a 9 de las 15 empresas que operan en el distrito. La recolección de datos se efectuó mediante cuestionarios estructurados, y se desarrolló una herramienta de evaluación destinada a identificar materias primas, corrientes residuales y oportunidades potenciales de intercambio de recursos entre las empresas participantes. El análisis permitió identificar más de 15 posibles intercambios simbióticos. La oportunidad con mayor viabilidad de implementación a corto



plazo corresponde a la valorización del subproducto de la desulfuración de gases de combustión (FGD), generado en el proceso siderúrgico, como sustituto del yeso natural en la producción de paneles de yeso. Los resultados evidencian un potencial significativo de beneficios ambientales y económicos, incluyendo la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y la disminución de la dependencia de materias primas vírgenes. En este contexto, la adopción de estrategias de simbiosis industrial puede contribuir al incremento de la eficiencia en el uso de los recursos y al fortalecimiento de prácticas de economía circular en el Distrito Industrial de Santa Cruz. Asimismo, el marco propuesto presenta potencial de replicabilidad en otros parques industriales brasileños.

**Palabras clave:** Simbiosis Industrial. Economía Circular. Desulfuración de Gases de Combustión. Valorización de Resíduos. Yeso FGD.



## 1 INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) impulsionado pelo processo de industrialização representa um dos maiores desafios ambientais do século XXI. Acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, têm buscado mitigar esses impactos por meio da limitação de emissões e do incentivo ao uso eficiente de recursos naturais. Apesar de sua importância diplomática, muitos desses acordos enfrentam limitações em sua implementação efetiva, devido a barreiras políticas e técnicas (Mravcová, 2025).

A gestão de resíduos industriais inadequada, como o descarte em aterros e incineração é um dos principais fatores que contribuem para as mudanças climáticas, impactando a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Esse impacto ocorre devido a diversos fatores, como emissões diretas de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Sasmoko *et al.*, 2022), consumo de energia em processos de produção e transporte de resíduos, e liberação de substâncias químicas nocivas (Jayaraman *et al.*, 2022).

Tecnologias de Baixo Carbono, como a recuperação de energia a partir de resíduos com emprego de digestão anaeróbica, pirólise e gaseificação, são eficazes para converter resíduos em energia limpa, reduzindo a dependência de aterros e diminuindo significativamente as emissões de GEE (Hsu *et al.*, 2024). A adoção de práticas de economia circular na indústria tem o potencial de reduzir significativamente a pegada de carbono a partir da reutilização de materiais, reciclagem e integração de resíduos em novos ciclos produtivos (Chen *et al.*, 2023). A substituição de materiais industriais por reciclados ou subprodutos da própria cadeia de produção pode gerar reduções expressivas nas emissões de GEE. A utilização de escória industrial reciclada, por exemplo, pode reduzir até 88,6% das emissões em comparação com materiais virgens (Jang & Kim, 2022).

O modelo econômico atual, também chamado modelo linear, não é viável e vários estudos foram idealizados para o desenvolvimento de termos e conceitos direcionados à circularidade dos negócios, dentre eles: a Ecologia Industrial (EI) e a Economia Circular (EC). A EI surgiu no final dos anos 80 como uma estrutura de inspiração biológica para a indústria sustentável por meio do aumento dos fluxos cíclicos, cujos conceitos foram as bases para a construção da EC (Walmsley *et al.*, 2019). Estudos recentes reforçam essa transição, como aqueles que destacam a importância da simbiose industrial na economia circular e na sustentabilidade industrial (Keçi, 2024; Paché, 2024; Korevaar, 2022)

EI é aplicada às indústrias através da Simbiose industrial (SI), o termo originou-se da biologia e das relações simbióticas biológicas existentes na natureza, na qual duas ou mais espécies não relacionadas trocam materiais, energia ou informações de forma mutuamente benéfica. Dessa forma, o princípio da Simbiose Industrial é criar ligações físicas entre empresas independentes por meio da troca de energia, materiais, água e subprodutos (Chertow, 2000).



Estudos recentes também destacam o papel do setor industrial como o maior responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, reforçando a necessidade de transição energética, com ênfase em fontes renováveis e aumento da eficiência energética (Filonchyk *et al.*, 2024). Embora as emissões da indústria tenham diminuído drasticamente de 2015 a 2017, as emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da indústria ainda representaram quase 18% do total de emissões de CO<sub>2</sub> pelo uso de combustível fóssil (UNIDO, 2024).

Nesse contexto, a Simbiose Industrial (SI) é considerada como uma solução para o impacto ambiental da indústria e tem sido estudada desde os anos 90. A SI pode ser vista como uma forma de inovação do modelo de negócios que resulta de inovações técnicas pela troca de resíduos, recursos e energia por meio da colaboração com as partes interessadas para acelerar a implementação da Economia Circular (EC), cujo principal objetivo é manter o valor dos materiais o maior tempo possível, criando um sistema de ciclo fechado pelo qual os bens podem recuperar parte ou todo o seu valor durante seu ciclo de vida (Rincon, 2022). Um exemplo de simbiose industrial (SI) muito conhecido está localizado na cidade industrial costeira de Kalundborg, Dinamarca, cuja escassez de água subterrânea foi a força motriz que reuniu muitos dos parceiros e fez com que a refinaria Statoil concebesse um projeto para trazer suprimento de água do Lago Tissø, a cerca de 50 quilômetros de Kalundborg. Assim foi iniciada uma rede de cooperação entre as diversas indústrias consumidoras de água do distrito que hoje congrega empresas de diferentes segmentos de atividade (Ehrenfeld & Chertow, 2002).

O presente trabalho propõe a implementação de um Programa de Simbiose Industrial no Distrito Industrial de Santa Cruz, RJ, inspirada no modelo dinamarquês da cidade de Kalundborg. Para tanto foi desenvolvida e aplicada uma ferramenta de mapeamento simbiótico qualitativo para as empresas do Distrito Industrial de Santa Cruz, localizado no estado do Rio de Janeiro, foi elaborado um mapa de oportunidades simbióticas reais e potenciais e detalhado um fluxo simbiótico potencialmente relevante entre uma indústria siderúrgica e uma fabricante de gesso acartonado, a partir do conhecimento adquirido pelo Programa SACI (*Systemic Approach to Clean Industry*), em colaboração com o Instituto dinamarquês *Kalundborg Symbiosis*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 SIMBIOSE INDUSTRIAL: EVOLUÇÃO DO CONCEITO

A Simbiose Industrial teve origem na década de 1980, quando pesquisadores começaram a explorar a possibilidade de replicar interações naturais em sistemas industriais. As primeiras aplicações foram inspiradas por ecossistemas naturais, já que os resíduos de um organismo servem como recursos para outro (Chertow, 2000).



Um dos exemplos mais notáveis da implementação inicial do conceito foi o Parque Industrial de Kalundborg, na Dinamarca, onde várias indústrias estabeleceram trocas de energia e resíduos de forma mutuamente benéfica. Esse caso demonstrou que a simbiose industrial poderia ser economicamente viável e ambientalmente sustentável (Paquin & Howard-Grenville, 2012).

Nas décadas seguintes, a Simbiose Industrial (SI) se consolidou como um subcampo da Ecologia Industrial (EI). Pesquisas começaram a focar na evolução dos sistemas industriais e nas redes colaborativas necessárias para sua implementação. A SI passou a ser analisada sob a ótica da economia circular, que enfatiza a minimização de resíduos e a maximização do uso de recursos (Mandeep *et al.*, 2020; Mallawaarachchi *et al.*, 2020).

A SI normalmente é estruturada através do estabelecimento de Parques Industriais Ecológicos (PIEs) que contribuem para um modelo mais circular na medida em que (Saavedra *et al.*, 2018): Estudam os fluxos de materiais e energia e suas aplicações; introduzem os princípios dos ecossistemas biológicos no ecossistema industrial; transformam os fluxos lineares e semicirculares em fluxos circulares ou fechados; eliminam a dependência dos estoques finitos e reaproveitam os resíduos gerados no sistema; fornecem análise de fluxo de material em um sistema complexo; usam resíduos como subprodutos e utilizam estratégias como: reutilização, reciclagem, reparo e remanufatura entre outras características. Deve-se levar em consideração a diversidade industrial e infraestrutura para a conversão de parques industriais existentes em PIEs, além de propor reformas políticas para facilitar a transição para a economia circular (Bilyaminu *et al.*, 2024).

Em recente pesquisa sistemática realizada na base de dados *Web of Science* foi possível observar a existência de 4.827 referências com o uso da palavra-chave “*industrial symbiosis*” no período de 2000 à 2025. Apesar do baixo número de publicações encontradas, nesse período, observa-se um crescente interesse pelo assunto, já que 2.741 das referências registradas, cerca de 57%, foram publicadas nos últimos 5 anos, como mostra a Tabela 1.

Também foi possível verificar a existência de 786 publicações para as palavras-chaves “*industrial symbiosis*” e “*circular economy*” e, apenas 70 publicações com a inserção de “*eco-industrial park*”, sendo 17% dessas publicações provenientes da China e nenhuma de origem brasileira, o que ressalta a importância desse trabalho.

A China foi o país que registrou maior número de publicações sobre simbiose industrial nos últimos 25 anos, com 1050 referências, seguida da Índia (804), EUA (522), Japão (487), Itália (429), Inglaterra (345), Austrália (300) e França (267). O Brasil registrou 165 publicações sobre o assunto nesse período, sendo 14º país no ranking de publicações. Do número total de publicações brasileiras, 91 foram publicadas nos últimos 5 anos (*Web of Science*, 2026).



Tabela 1. Resultado da pesquisa sistemática na base de dados *Web of Science*.

Palavras-chaves	Total de referências	Ano de publicação
"industrial symbiosis"	4.827	2000-2025
"industrial symbiosis"	2.741	
"industrial symbiosis" AND "circular economy"	786	
"industrial symbiosis" AND "industrial park"	412	
"industrial symbiosis" AND "circular economy" AND "industrial park"	169	
"industrial symbiosis" AND "circular economy" AND "eco-industrial park"	70	

Fonte: Adaptado de *Web of Science*, 2026.

## 2.2 O PARQUE INDUSTRIAL DE KALUNDBORG – DINAMARCA

O Distrito Industrial de Kalundborg, na Dinamarca, é um PIE amplamente reconhecido como um exemplo prático de simbiose Industrial. As trocas simbióticas em Kalundborg iniciaram-se na década de 1960, quando empresas locais perceberam que poderiam reduzir custos compartilhando recursos e aproveitando subprodutos (Ehrenfeld & Gertler, 1997). O caso de Kalundborg continua sendo amplamente citado como o exemplo mais maduro de simbiose industrial, onde empresas trocam resíduos, calor, vapor e subprodutos de forma colaborativa, reduzindo emissões e economizando recursos. O sucesso é atribuído à confiança e colaboração entre organizações, proximidade geográfica e benefícios mútuos tangíveis (Paché, 2024). PIES como Kalundborg, ao integrar critérios de sustentabilidade econômica, ambiental e de resiliência, obtiveram maior eficiência e continuidade operacional mesmo diante de falhas na rede de empresas (Valenzuela-Venegas *et al.*, 2020). Já a mentalidade empresarial focada na resolução de problemas operacionais e a redução de custos foi o principal motor para a criação dessas parcerias (Chertow, 2007).

O conglomerado de empresas que formam o Distrito Industrial de Kalundborg foi evoluindo ao longo dos anos, desde seu início em 1961, devido a uma necessidade comum a todas as empresas da região: o acesso à água doce. Essa demanda incentivou a aproximação das indústrias, que, ao longo dos anos, passaram a identificar organicamente novas oportunidades de sinergias. Atualmente, Kalundborg é mantido por uma rede de 17 parceiros, entre organizações públicas e privadas, com cerca de 20 fluxos de troca de recursos (Kalundborg Symbiosis, 2025). Essa rede é responsável por economias significativas e pela criação de um ambiente mais sustentável. O modelo de Simbiose Industrial de Kalundborg gera benefícios substanciais para o meio ambiente e para os negócios tais como: economia de 4 milhões de metros cúbicos ( $m^3$ ) de água subterrânea ao utilizar água de superfície, redução de 586.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, com uma diminuição de 80% das emissões de CO<sub>2</sub> desde 2015, tornando o abastecimento energético local neutro em carbono (Kalundborg Symbiosis, 2025; Danielsson *et al.*, 2018). Esse modelo busca inspirar iniciativas globais, mostrando que sustentabilidade e lucro podem andar de mãos dadas, aliando benefícios ambientais e econômicos e impulsionando a capacidade de criar uma cultura de inovação contínua.



## 2.3 DISTRITO INDUSTRIAL DE SANTA CRUZ - RJ

Santa Cruz, localizado na Zona Oeste do Rio de Janeiro, é um bairro que combina uma rica importância histórica com os desafios contemporâneos de ordem social e ambiental. Fundado no período colonial, o bairro desempenhou um papel central na economia açucareira brasileira dos séculos XVII e XVIII. A Fazenda Santa Cruz, administrada inicialmente pelos jesuítas, foi um importante centro agrícola e social da época. Com a expulsão dos jesuítas em 1759, a fazenda tornou-se propriedade da Coroa Portuguesa, consolidando-se como um ponto de relevância política e econômica até o início do século XIX (BRASIL, 2025).

Ao longo do tempo, Santa Cruz transformou-se em um importante polo industrial, impulsionado especialmente pela instalação da ThyssenKrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico. Apesar de contribuir para o desenvolvimento econômico, a industrialização trouxe desafios significativos, como a degradação da qualidade do ar e problemas de saúde para os moradores locais (Quental, 2021).

Atualmente, Santa Cruz é um bairro densamente povoado, que abriga aproximadamente 250 mil habitantes (DATARIO, 2022). O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da região é de cerca de 0,5, em uma escala de 0 a 1, e indicadores sociais apontam desafios significativos: aproximadamente 76% dos domicílios possuem sistema de esgoto adequado; a taxa de analfabetismo entre crianças de 10 a 14 anos é de 3%; cerca de 68% da população possui rendimento per capita de até um salário-mínimo; e apenas 1,3% dos domicílios têm renda superior a cinco salários-mínimos mensais (DATARIO, 2010).

O Distrito industrial de Santa Cruz, situado no bairro de Santa Cruz é composto por 19 empresas implantadas, 3 em fase de implantação. Desse total, 15 fazem parte da Associação de Empresas do Distrito Industrial de Santa Cruz (AEDIN) e, no contexto desse projeto de industrialização sustentável, nove das quinze empresas associadas e participantes passaram por visitas técnicas para o mapeamento de fluxos simbióticos (AEDIN, 2025).

## 3 METODOLOGIA

O presente trabalho consistiu em pesquisa-ação, descritiva e qualitativa a partir da capacitação pelo Programa SACI (*Systemic Approach to Clean Industry*) em parceria com o instituto dinamarquês *Kalundborg Symbiosis* para elaboração e desenvolvimento de fluxos simbióticos entre as indústrias que compõe o Distrito Industrial de Santa Cruz, RJ, e especificamente uma siderúrgica e uma indústria de fabricação de gesso acartonado.

Para o desenvolvimento e possível implementação de um programa de simbiose industrial no Distrito de Santa Cruz, a AEDIN assumiu a função de organização facilitadora, visto ser uma associação presente no local desde o estabelecimento das primeiras indústrias do polo industrial de



Santa Cruz-RJ e, portanto, reconhecida como um agente inspiracional e de confiança para facilitar a rede de conhecimento entre as empresas do local. Foi estabelecido um comitê técnico para realização das visitas direcionadas às empresas para mapeamento qualitativo simples e identificação de soluções para recursos residuais com potencial simbiótico, porém ainda sem destinação adequada ou economicamente viável, ou oportunidades de fornecimento de insumos e matérias-primas ou coprodutos dentro do Distrito Industrial.

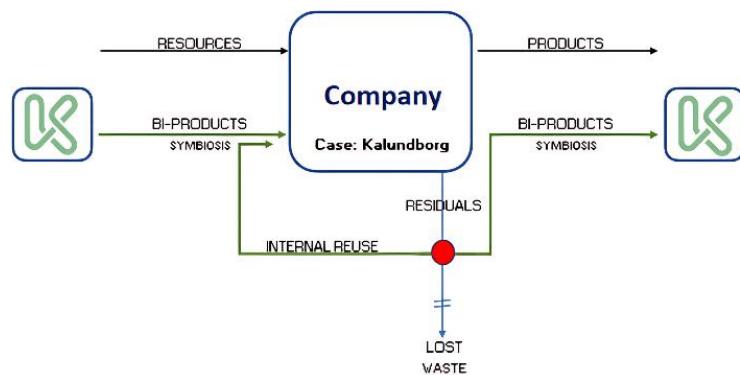
Das quinze (15) empresas associadas à AEDIN, dez (10) aderiram ao programa para a implantação da simbiose industrial e disponibilizaram pelo menos um colaborador para compor o comitê técnico. Desses, 9 empresas passaram por visitas técnicas e tiveram seus fluxos simbióticos mapeados. Para preservar os direitos de uso de marca, nesse trabalho não serão citados os nomes dessas empresas, mas apenas seu ramo de atuação: 1) Indústria Siderúrgica fabricante de chapas de aço; 2) Industria de Fabricação de Placas de Gesso Acartonado; 3) Empresa de Prestação de Serviços de Tratamento e Efluentes; 4) Indústria metalúrgica de aplicação de ligas anticorrosivas em tubulações; 5) Indústria Química Fabricante de Catalisadores para refino de derivados do petróleo e outras aplicações; 6) Indústria Fabricante de Moedas e Cédulas; 7) Indústria Química Fabricante de Sílica Coloidal; 8) Indústria Química fabricante de Tintas Especiais; 9) Indústria Química Fabricante de Sais de Potássio e Derivados do Cloro; 10) Indústria Farmacêutica fabricante de Vacinas (em fase de implantação no momento da realização do presente trabalho).

Para o mapeamento de oportunidades de simbiose industrial entre as indústrias do Distrito Industrial de Santa Cruz foram elaboradas visitas técnicas, com questionários previamente estruturados para coleta de informações, de acordo com as seguintes etapas: 1) Apresentação corporativa e mercadológica da empresa; 2) Apresentação do processo produtivo e das iniciativas de sustentabilidade ambiental pela empresa visitada; 3) Apresentação da ferramenta de mapeamento simbiótico pela Coordenadora do Programa de Simbiose Industrial da AEDIN para o comitê técnico da empresa visitada; 4) Visita técnica ao processo produtivo realizada por um time multidisciplinar, com o objetivo de identificar oportunidades de otimização de recursos e simbiose para os recursos excedentes; 5) Preenchimento dos diagramas de blocos e fluxos simbióticos, realizado logo após a visita técnica.

A partir das informações obtidas, foi elaborado o mapa de oportunidades de SI. Para realizar o mapeamento simbiótico foi desenvolvida uma ferramenta de apoio para identificação das principais entradas (matérias-primas) e saídas (produtos, coprodutos, descarte) dos processos produtivos, bem como possibilidades de reuso ou sinergias simbióticas, com base no modelo apresentado durante a capacitação pelo Programa SACI, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (Kalundborg Symbiosis, 2023). Essa ferramenta, assim como o modelo de simbiose industrial foram cunhados organicamente ao longo dos mais de 50 anos do Distrito Industrial de Kalundborg (Hewes & Lyons, 2008).



Figura 1. Modelo de ferramenta de apoio para mapeamento qualitativo simplificado.



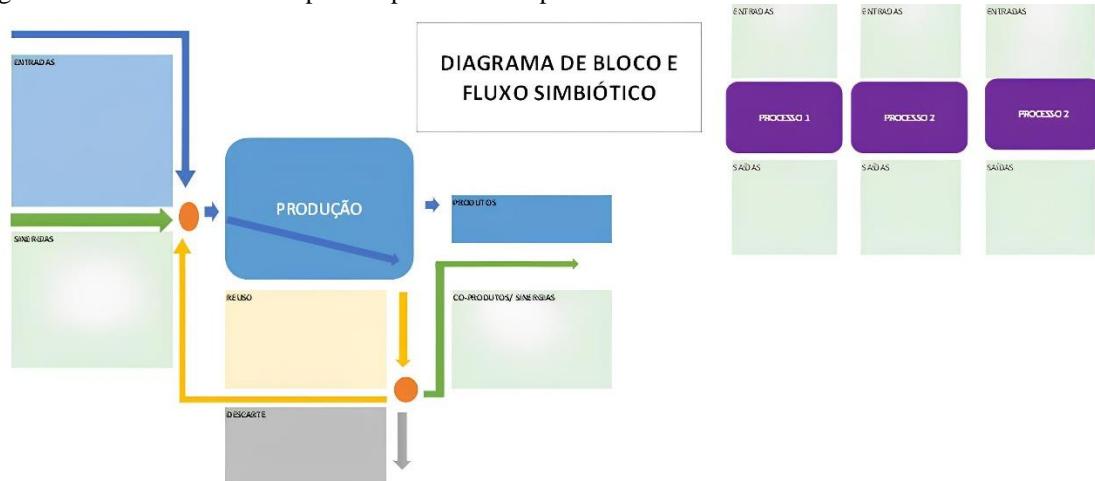
Fonte: Kalundborg Symbiosis, 2023

A partir da coleta de informações das empresas participantes para a implementação do programa de simbiose industrial no distrito industrial de Santa Cruz e da ferramenta desenvolvida para elaboração de fluxos simbióticos foi possível avaliar e propor fluxos sustentáveis entre as empresas do distrito.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o mapeamento qualitativo das empresas do Distrito Industrial de Santa Cruz, foi desenvolvida uma ferramenta a partir do modelo empregado pelo instituto dinamarquês *Kalundborg Symbiosis*, como mostra a Figura 2.

Figura 2. Ferramenta utilizada para mapeamento simplificado nas indústrias do Distrito Industrial de Santa Cruz.



Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

Sua principal vantagem foi permitir a coleta de informações a partir da identificação dos principais processos fabris com suas respectivas entradas e saídas, representadas no diagrama de blocos. Posteriormente, essas entradas foram transferidas para o fluxo simbiótico, garantindo a



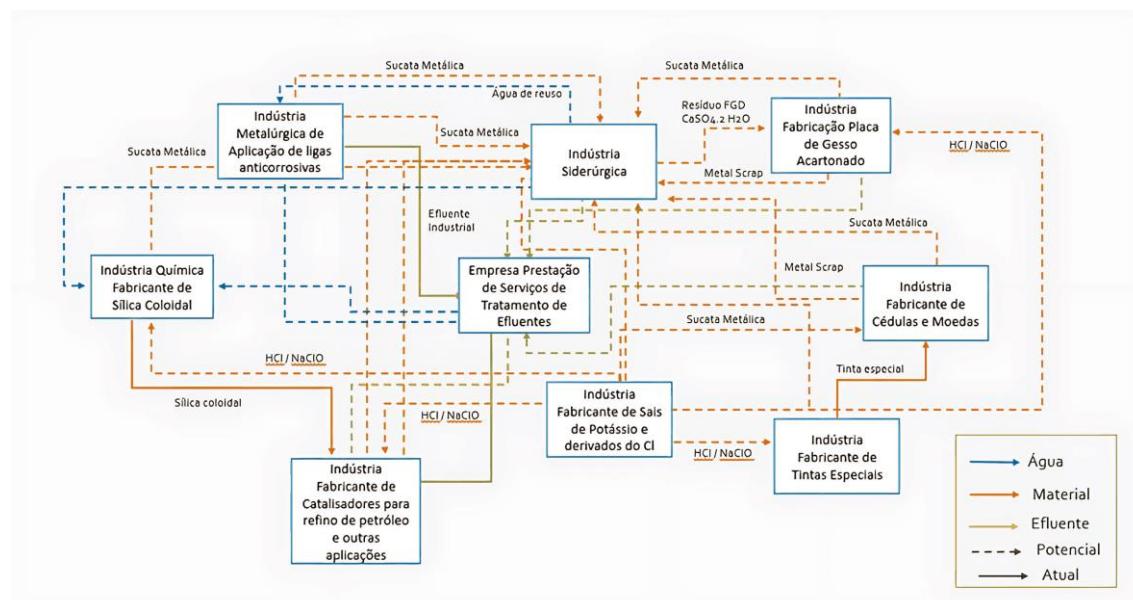
inclusão de todos os processos relevantes. As saídas foram classificadas em três categorias: produtos; coprodutos ou descarte. Os coprodutos representam os “resíduos” que são reaproveitados internamente ou externamente, quando retornam ao processo fabril são identificados no fluxo como “reuso”, já os resíduos sem possibilidade de reaproveitamento que geralmente são destinados para aterros ou incineração, foram identificados como “descarte”. Insumos ou matérias-primas provenientes de coprodutos externos são identificados como “sinergias”. Uma vez preenchido o fluxo, o foco principal foi dado ao descarte, ou seja, os resíduos que não eram reaproveitados (rejeitos) e, em seguida, foram avaliados os coprodutos que eram destinados para outras indústrias fora do Distrito Industrial de Santa Cruz.

Este trabalho propôs encontrar oportunidades de circular esses resíduos como insumos dentro do próprio Distrito Industrial, reduzindo custos de destinação, impactos ambientais adversos e emissões de CO<sub>2</sub> associado à destinação inadequada e ao processo logístico. Esse mapeamento representou uma etapa fundamental para o desenvolvimento do mapa geral de fluxos simbióticos reais e potenciais entre as empresas participantes, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Pode-se observar diferentes possibilidades de simbiose entre as empresas, cujos fluxos se dividem em três categorias: água, materiais (coprodutos ou matérias-primas) e efluentes. As linhas sólidas representam sinergias já existentes, enquanto as linhas pontilhadas indicam sinergias potenciais.

Parte dessas sinergias, assim como ocorreu em Kalundborg, surgiram organicamente devido à necessidade de proximidade entre as empresas. Um exemplo disso é a indústria fabricante de tintas especiais, que fornece matéria-prima para a indústria fabricante de moedas. Da mesma forma, observa-se a indústria produtora de sílica coloidal como fornecedora de matéria-prima para a indústria química de catalisadores.

Figura 1. Esquema Inicial de Mapeamento Simbiótico Real e Potencial das Empresas do Distrito de Santa Cruz





Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

No caso da empresa prestadora de serviços de tratamento de efluentes industriais, sua localização foi estrategicamente planejada para atender às grandes empresas da região. No entanto, com o tempo, muitas dessas empresas construíram suas próprias estações de tratamento, resultando em capacidade ociosa para a prestadora de serviços. Ainda assim, pelo menos duas empresas continuam enviando seus efluentes para tratamento externo. A retomada de um sistema compartilhado de tratamento de efluentes surge como uma solução viável, desde que as sinergias tornem o processo vantajoso. Esse modelo bem-sucedido pode ser observado em Kalundborg, onde a estação de tratamento compartilhada não apenas trata os efluentes, mas também disponibiliza água de reuso para diversas atividades, por meio de dutos e tubulações conectadas entre as empresas. Esse arranjo beneficiaria as indústrias, reduzindo custos operacionais com atividades secundárias e oferecendo acesso à água a um preço mais acessível, além de minimizar despesas com taxas de descarte de esgoto. A adoção de redes hídricas inspiradas em princípios ecológicos, como as observadas em Kalundborg, pode ainda aumentar a resiliência e reduzir os custos operacionais associados à gestão da água e dos efluentes, como demonstrado por Dave & Layton (2020).

O fluxo de materiais também apresenta diversas possibilidades mapeadas. Um exemplo é a sucata gerada por praticamente todas as empresas, que poderia ser encaminhada diretamente para a indústria siderúrgica, eliminando a necessidade de intermediários. Além disso, a indústria fabricante de sais de potássio e derivados de cloro poderia fornecer seus insumos para as indústrias que utilizam esses produtos químicos como matéria-prima.

Dentre os mais de 15 fluxos simbióticos mapeados, o mais relevante encontrado para ser implementado a curto prazo é o uso doresíduo da indústria siderúrgica como matéria-prima principal da indústria fabricante de placas de gesso acartonado. Esse tipo de simbiose já havia sido implantado no Distrito de Kalundborg, no início dos anos 2000, quando a refinaria Asnæs identificou a



possibilidade de fornecer gesso industrial para a Gyproc Nordic East, uma fabricante nórdica de placas de gesso. Em 1993, a Asnæs instalou um sistema de dessulfurização de gás de combustão (*Flue Gas Desulphurisation - FGD*), que removia emissões de SO<sub>2</sub>. O subproduto desse processo era o sulfato de cálcio, ou gesso industrial, que se tornou o principal ingrediente do gesso utilizado pela Gyproc. Assim, a Asnæs passou a suprir as necessidades de gesso da Gyproc (Ehrenfeld & Chertow, 2002; Baran *et al.*, 2024).

O gesso sintético proveniente do processo de dessulfurização de gases de combustão (*Flue Gas Desulphurisation – FGD*) apresenta vantagens ambientais significativas em relação ao gesso natural, especialmente no que diz respeito à redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e à menor dependência da atividade minerária. Estudos recentes indicam que a substituição do gesso natural por gesso FGD pode reduzir os impactos ambientais em até 30% ao longo de toda a cadeia produtiva (Aakriti *et al.*, 2023).

Com base nos fluxos simbióticos mapeados, a alternativa considerada mais promissora para implementação imediata como forma de validar o programa de simbiose industrial no contexto do Distrito Industrial de Santa Cruz consistiu em explorar a viabilidade do uso do coproducto FGD, gerado nos altos-fornos da indústria siderúrgica produtora de chapas de aço, como insumo principal para indústria de fabricação de placas de gesso acartonado. A viabilidade dessa sinergia é favorecida pela proximidade geográfica entre as duas empresas envolvidas, localizadas a cerca de 5 km de distância uma da outra, o que reduz os custos logísticos e potenciais impactos ambientais associados ao transporte do material.

A indústria siderúrgica produtora de chapas de aço é a maior do Distrito Industrial de Santa Cruz, tanto em área quanto em número de funcionários, e tem capacidade de produção de cerca de 5 milhões de toneladas de chapas de aço por ano, o diagrama de blocos e fluxo simbiótico propostos podem ser observados, respectivamente, nas Figura 4. Diagrama de blocos Indústria Siderúrgica e 5.

Figura 4. Diagrama de blocos Indústria Siderúrgica





Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

A análise do diagrama de blocos da Figura 4. Diagrama de blocos Indústria Siderúrgica , por meio do mapeamento de oito macroprocessos, permite visualizar a complexidade e a quantidade de etapas envolvidas na produção siderúrgica. Esses processos demandam um uso intensivo de matérias-primas, energia e insumos, resultando na geração expressiva de emissões e resíduos.

Um dos principais destaques do sistema analisado foi a presença de uma unidade termelétrica dentro da planta siderúrgica. Essa unidade recebe insumos energéticos, como gás de alto-forno (BFG) e vapor proveniente da coqueria, e os converte em energia elétrica e vapor, que são utilizados para abastecer outros processos industriais. A geração de energia dentro da própria planta representa um exemplo de sinergia industrial, reduzindo a dependência de fontes externas e otimizando o aproveitamento de gases residuais.

Os alto-fornos compõe um dos principais processos no ciclo de fabricação do aço, sendo responsáveis pela conversão de matérias-primas minerais e carbonáceas em ferro-gusa líquido. Os insumos utilizados incluem minério de ferro na forma de *sinter feed* e pelotas, briquetes, carvão coqueificável e fundentes, como calcário e cal calcítica/dolomítica.

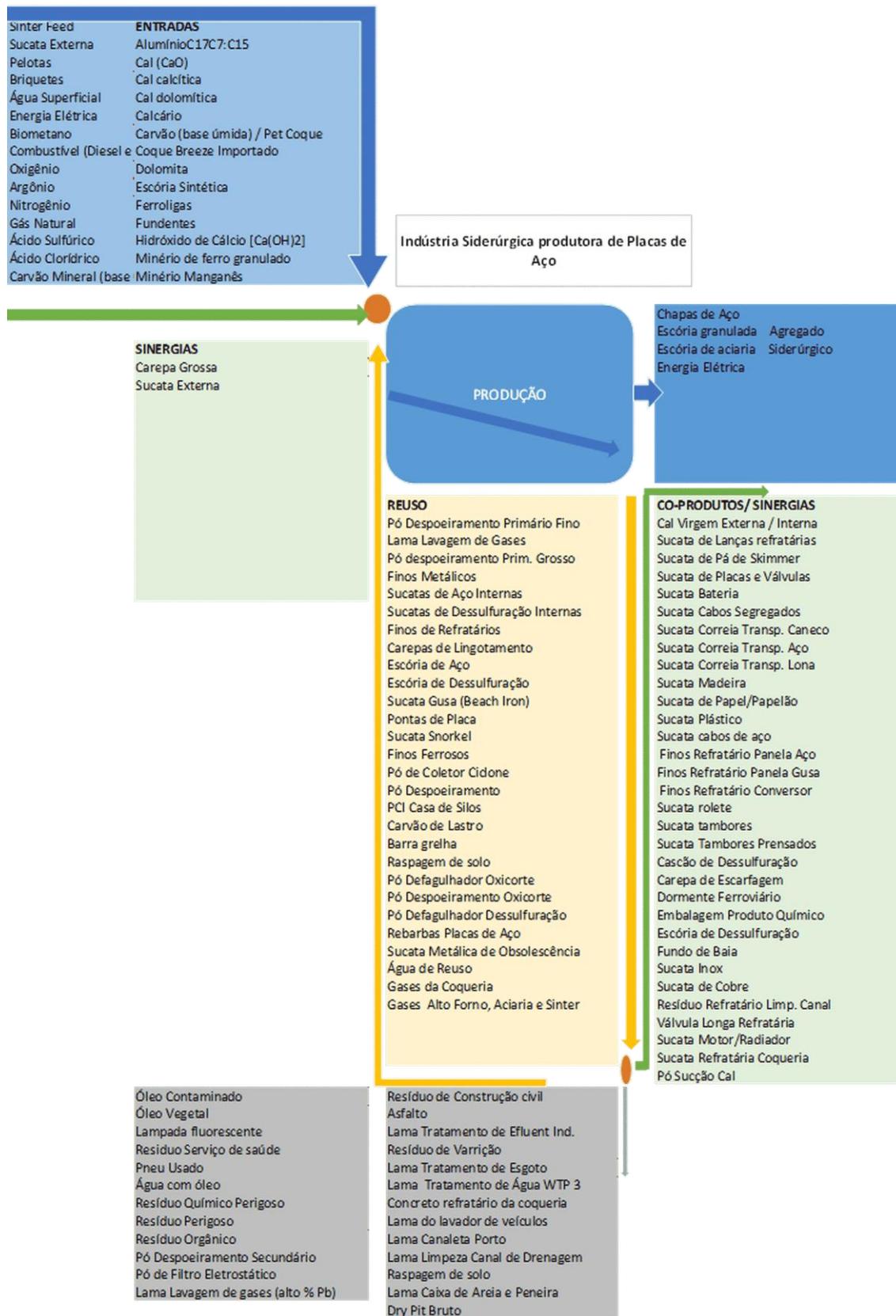
Após a produção do ferro-gusa no alto-forno, o material é transferido para a acaria, onde passa por processos de dessulfuração e conversão em aço líquido. As principais entradas desse processo incluem o próprio ferro-gusa líquido, sucata metálica, oxigênio e insumos refratários. A acaria, por sua vez, gera subprodutos como escórias e vapores, além de resíduos sólidos industriais. O aço líquido refinado segue para os processos de conformação, sendo convertido em produtos acabados, como chapas laminadas.

**A Erro! Fonte de referência não encontrada.,** apresenta os fluxos simbióticos analisados, destacando diversas sinergias presentes na planta siderúrgica. Entre elas, o reaproveitamento do gás de alto-forno (BFG) para a geração de energia na termelétrica. Além disso, resíduos da usina, como sucata de equipamentos e carepa de laminação, são reprocessados e reinseridos na cadeia produtiva.



Parte das escórias geradas na aciaria é destinada a setores como a construção civil, enquanto a empresa também adota um sistema robusto de tratamento, reuso de efluentes e recirculação de água industrial, reduzindo significativamente o consumo de recursos naturais.

Figura 5. Fluxo simbiótico Indústria Siderúrgica



Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

Para a Indústria de Fabricação de Placas de Gesso Acartonado, a utilização do resíduo FGD da indústria siderúrgica como matéria-prima na forma de gesso sintético, em substituição ao gesso natural ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), conforme ilustrado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 7. Fluxo simbiótico da Indústria de Placas de gesso acartonado , apresenta grandes vantagens econômicas e ambientais, pois o gesso natural é proveniente de minas de gipsita abastecidas tanto pelo mercado interno como por importação, que representa um elevado custo de compra e está associada a um grande impacto ambiental relacionado as atividades de mineração.

A Indústria Siderúrgica de Santa Cruz opera um alto-forno para a produção de ferro-gusa, obtido pela fusão de minérios de ferro em uma atmosfera redutora mantida pela queima de carvão mineral ou coque. Os gases provenientes desse alto-forno contêm enxofre, que precisa ser removido antes da liberação desses gases para a atmosfera. Para atender aos parâmetros regulamentares, a indústria siderúrgica já utiliza um sistema de lavadores de gases, que opera com pulverização de calcário úmido. O calcário reage com o enxofre, formando como subproduto o gesso industrial ou resíduo FGD ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Figura 6. Diagrama de blocos Indústria de fabricação de placas de gesso acartonado



Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

É importante ressaltar que, no contexto atual, esse processo na indústria siderúrgica serve apenas para atender às exigências legais de emissões, não trazendo nenhum benefício financeiro direto à organização. Contudo, ao considerar a possibilidade de utilizar o subproduto desse processo como matéria-prima para outra empresa geograficamente próxima, surgem benefícios reais, tanto ambientais



quanto financeiros. Ambientalmente, o reaproveitamento do resíduo reduz emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao transporte, reprocessamento ou descarte desse material e, financeiramente, o subproduto pode ser utilizado como a principal matéria-prima para a indústria de placas de gesso acartonado.

Figura 7. Fluxo simbiótico da Indústria de Placas de gesso acartonado



Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

Por outro lado, a indústria de gesso acartonado também obtém ganhos financeiros ao adquirir sua matéria-prima a um custo mais competitivo, além de ganhos ambientais significativos. A substituição do gesso industrial pelo subproduto da siderurgia minimiza os impactos ambientais associados à mineração e ao transporte da gipsita. A Indústria de Placas de Gesso acartonado utiliza gipsita provenientes de minas do nordeste do Brasil e também da Espanha.

No Brasil, a gipsita é extraída das minas de Araripina, em Pernambuco (Mergulhão *et al.*, 2010). Esse tipo de extração em áreas semiáridas vem causando impactos significativos ao meio ambiente e as comunidades. Um estudo conduzido por Pacheco *et al.* (2025) identificou uma redução



de 3,28% na vegetação e um aumento de 6,62% de áreas urbanas em regiões afetadas pela mineração de gipsita no semiárido de Pernambuco entre os anos de 2018 e 2023. Essa degradação foi especialmente intensa nas proximidades de corpos d'água e resultou em expansões desordenadas de mineração. Já a produção de gesso natural na Espanha, apesar de representar menor impacto ambiental quando comparada a outros países, ainda assim contribui significativamente para as emissões ambientais. Um estudo de avaliação do ciclo de vida mostrou que a substituição do gesso natural por reciclado pode reduzir os impactos ambientais em até 56% (Pedreño-Rojas *et al.*, 2020).

## 5 CONCLUSÃO

A aplicação do modelo de Simbiose Industrial (SI) no Distrito Industrial de Santa Cruz (RJ) demonstrou ser uma estratégia viável para otimizar a utilização de recursos, reduzir impactos ambientais e promover a economia circular nas indústrias avaliadas. O estudo evidenciou que a integração entre a indústria siderúrgica e a indústria de fabricação de placas de gesso acartonado, por meio do reaproveitamento do resíduo FGD (*Flue Gas Desulfurization*), tem o potencial de minimizar a extração de gipsita natural, reduzir custos de produção e mitigar a emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Os resultados obtidos a partir do mapeamento simbiótico indicam que a reutilização do FGD como matéria-prima para o setor de gesso representa uma solução sustentável e economicamente vantajosa para ambas as indústrias, seguindo o exemplo de Kalundborg, na Dinamarca. Além disso, o desenvolvimento da ferramenta de mapeamento simbiótico permitiu identificar fluxos adicionais de subprodutos que poderão ser explorados em futuras iniciativas de simbiose industrial na região. Entretanto, para a plena implementação desse fluxo simbiótico, desafios técnicos e regulatórios ainda precisam ser superados, incluindo ajustes nos processos de purificação do FGD, a certificação da qualidade do subproduto para uso industrial e a formalização de acordos entre as partes envolvidas. Além disso, incentivos governamentais e o fortalecimento da governança local podem acelerar a adoção de práticas sustentáveis e fomentar novas parcerias entre empresas do distrito.

Dessa forma, este estudo reforça a viabilidade da Simbiose Industrial, especialmente no Distrito Industrial de Santa Cruz, RJ, como um caminho estratégico para a redução de resíduos, a valorização de subprodutos industriais e a criação de um ecossistema produtivo mais eficiente e sustentável. A replicação desse modelo em outros parques industriais pode contribuir significativamente com a transição para um modelo de economia circular, promovendo o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e responsabilidade ambiental.



**REFERÊNCIAS**

AAKRITI; M. S.; JAIN, N.; MALIK, J. **A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications.** Construction and Building Materials, v. 393, p. 131918, 2023.

AEDIN. Associação das Empresas do Distrito Industrial de Santa Cruz, 2025. Quem somos. Disponível em: <https://aedin.com.br/>.

BARAN, E.; HYNOWSKI, M.; KOTWICA, Ł.; ROGOWSKI, J. **A Study of the Influence of Cement Addition and Humidity on the Mechanical Strength and Microstructure of Flue Gas Desulfurization Gypsum–Cement Plasters.** Materials, v. 17, n. 10, p. 1-18, 2024.

BILYAMINU, A.M.; RENE, E.R.; PANDEY, A.; BABEL, S.; CLEMENT, Q.B.; JAMES, A.; HERNANDEZ, H.G. **Industrial symbiosis and eco-industrial transformation opportunities for environmental protection in Nigeria.** Sustainable Production and Consumption, v. 49, p. 219–235, 2024.

BRASIL. Arquivo Nacional. **Superintendência da Fazenda de Santa Cruz (1889-1930).** Brasília, DF: Senado Federal, 2025.

CHEN, T.; IQBAL, W.; ARSHAD, I. **Assessing the supply chain management of waste-to-energy on green circular economy in China: An empirical study.** Environmental Science and Pollution Research, v. 30, p. 100149–100164, 2024.

CHERTOW, M. R. **Industrial symbiosis: Literature and taxonomy.** Annual Review of Energy and The Environment, v. 25, p. 313-337, 2000.

CHERTOW, M. R. **“Uncovering” industrial symbiosis.** Journal of Industrial Ecology, v. 11, n. 1, p. 11–30, 2007.

DANIELSSON, S. E.; MØLLER, P.; RANDERS, L., 2018. **Modelling CO<sub>2</sub> savings and economic benefits for the Kalundborg Symbiosis.** Disponível em: <https://www.symbiosis.dk/wp-content/uploads/2018/06/KalundborgSymbiosisPaperLCA2018-06.pdf>

DATARIO. Bairros Censo, 2022. Disponível em:  
[https://www.data.rio/datasets/fd354740f1934bf5bf8e9b0e2b509aa9\\_2/explore?showTable=true](https://www.data.rio/datasets/fd354740f1934bf5bf8e9b0e2b509aa9_2/explore?showTable=true)

DATARIO. Índice de Desenvolvimento Social (IDS) e seus indicadores constituintes, segundo as Áreas de Planejamento, Regiões de Planejamento, Regiões Administrativas e Bairros - Município do Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:  
<https://www.data.rio/documents/fa85ddc76a524380ad7fc60e3006ee97/about>.

DAVE, T.; LAYTON, A. **Designing ecologically-inspired robustness into a water distribution network.** Journal of Cleaner Production, v. 254, p. 1-16, 2020.

EHRENFELD, J. R.; CHERTOW, M. R. **Industrial symbiosis: The legacy of Kalundborg.** In: Ayres, R. U.; Ayres, L. W. (Eds), A handbook of industrial ecology. Edward Elgar, p. 334-348, Grã-Betanha: Elgaronline, 2002.

EHRENFELD, J.; GERTLER, N. **Industrial ecology in practice: The evolution of interdependence at Kalundborg.** Journal of Industrial Ecology, v. 1, n. 1, p. 67-79, 1997.



FILONCHYK, M.; PETERSON, M.P.; ZHANG, L.; HURYNOVICH, V.; HE, Y. **Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O.** Science of The Total Environment, v. 935, p. 1-7, 2024.

HSU, H.-W.; BINYET, E.; NUGROHO, R.A.A.; WANG, W.-C.; SRINOPHAKUN, P.; CHEIN, R.-Y.; DEMAELIS, R.; CHIARASUMRAN, N.; SAPUTRO, H.; ALHIKAMI, A.F.; SAKULSHAH, N.; LAEMTHONG, T. **Toward sustainability of Waste-to-Energy: An overview.** Energy Conversion and Management, v. 321, p. 1-22, 2024.

HEWES, A. K., LYONS I. D. **The Humanistic Side of Eco-Industrial Parks: Champions and the Role of Trust.** Regional Studies, v. 42, n. 10, p. 1329–1342, 2008.

JANG, J.; KIM, Y. **Material efficiency and greenhouse gas reduction effect of recycled industrial resources.** Journal of Environmental Materials, v. 11, n. 4, p. 327–339, 2022.

JAYARAMAN, V.; PARTHASARATHY, S.; LAKSHMINARAYANAN, A. R. Forecasting the Emission of Greenhouse Gases from the Waste using SARIMA Model. In: International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 6<sup>th</sup>, 2022, Tirunelveli, India, Anais. Tirunelveli: IEEE, 2022. p. 99-106.

KALUNDBORG SYMBIOSIS. Cooperation. Systemic Approach to Clean Industry, 2023. Disponível em: <https://www.symbiosis.dk/en/samarbejde/>.

KALUNDBORG SYMBIOSIS. Kalundborg Symbiose. Surplus from circular production, 2025. Disponível em: <https://www.symbiosis.dk/en/>.

KEÇİ, I. **Industrial Symbiosis in the Circular Economy: A Review.** Economicus, v. 23, n. 1, p. 19-34, 2024.

KOREVAAR, G. **Industrial Ecology in support of building a Circular Economy.** Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift, v. 37, n. 1, p. 24-25, 2022.

MALLAWAARACHCHI, H.; SANDANAYAKE, Y.; KARUNASENA, G.; LIU, C. **Unveiling the conceptual development of industrial symbiosis: Bibliometric analysis.** Journal of Cleaner Production, v. 258, n. 5, p. 1-9, 2020.

MANDEEP; GUPTA, G. K.; SHUKLA, P. **Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: challenges, perspectives and innovations.** Bioresource Technology, v. 297, p. 1-10, 2020.

MERGULHÃO, A. C. E. S.; BURITY, H. A.; SILVA, F. S. B.; PEREIRA, S. V.; MAIA, L. C. **Glomalin Production and Microbial Activity in Soils Impacted by Gypsum Mining in a Brazilian Semiarid Area.** American Journal of Agricultural and Biological Sciences, v. 5, n. 4, p. 422-429, 2010.

MRAVCOVÁ, A. **Assessing the effectiveness of international climate agreements in curbing emissions.** International Journal of Climate Policy and Strategy, v. 12, n. 1, p. 45–61, 2025.

PACHECO, A.D.P.; NASCIMENTO, J.A.S.D.; RUIZ-ARMENTEROS, A.M.; DA SILVA JUNIOR, U.J.; JUNIOR, J.A.D.S.; DE OLIVEIRA, L.M.M.; MELO DOS SANTOS, S.; FILHO, F.D.R.; PESSOA MELLO GALDINO, C.A. **Land Cover Transformations in Mining-Influenced Areas Using PlanetScope Imagery, Spectral Indices, and Machine Learning: A Case Study in the Hinterlands de Pernambuco, Brazil.** Land, v. 14, n.2, p. 1-25, 2025.



PEDREÑO-ROJAS, M.A.; FOŘT, J.; ČERNÝ, R.; RUBIO-DE-HITA, P. **Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context.** Journal of Cleaner Production, v. 253, p. 1-11, 2020.

RINCON, J.A. **A transition management methodological framework towards an industrial symbiosis within a circular economy.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Aplicada), Universidad de Navarra, Pamplona, 2022.

PACHÉ, G. **Kalundborg Industrial Symbiosis: Circular Strategy in the Light of Mutualism.** Journal of Strategic Innovation and Sustainability, v. 19, n. 3, p. 89-97, 2024.

PAQUIN, R. L.; HOWARD-GRENVILLE, J. **The Evolution of Facilitated Industrial Symbiosis.** Journal of Industrial Ecology, v. 16, n. 1, p. 83-93, 2012.

QUENTAL, P. A. **Ensino de geografia e formação profissional em saúde: Perspectivas de ensino-aprendizagem de enfoque integrador a partir do caso da TKCSA.** Revista Brasileira de Educação em Geografia, v. 11, n. 21, p. 5-31, 2021.

SAAVEDRA, Y. M. B. B.; IRITANI, D. R.; PAVAN, A. L. R.; OMETTO, A. R. **Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy.** Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 1514–1522, 2018.

SASMOKO, S.; ZAMAN, H.; HIDAYAT, A.; SUPIANTO, A.A. **Environmental effects of biowaste recycling on climate.** Journal of Cleaner Waste Technologies, v. 12, n. 4, p. 223–239, 2022.

UNIDO. United Nations Industrial Development Organization. **International Yearbook of Industrial Statistics,** 2024. Disponível em: <https://stat.unido.org/publications/international-yearbook-industrial-statistics-2024>.

VALENZUELA-VENEGAS, G.; VERA-HOFMANN, G.; DÍAZ-ALVARADO, F.A. **Design of sustainable and resilient eco-industrial parks: Planning the flows integration network through multi-objective optimization.** Journal of Cleaner Production, v. 243, p. 1-25, 2020.

WALMSLEY, T. G.; ONG, B. H. Y.; KLEMES, J. J.; TAN, R. R.; VARBANOV, P. S. **Circular Integration of processes, industries, and economies.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 107, p. 507-515, 2019.

Web of Science. **Portal de Periódicos da CAPES,** 2026. Disponível em: <https://www-webofscience-com.ez83.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/summary/3b1cbfc8-1d72-44a9-bcc8-8c099406084e-019ea4efb3/relevance/1>

