Introdução ao Desenvolvimento Sustentável



Centro de Desenvolvimento Sustentável UnB

UnB

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil

Introdução ao desenvolvimento sustentável [livro eletrônico] / [editores Tálita Floriano dos Santos...[et al.]]. -- 1. ed. -- Brasília, DF : Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2025.
PDF
Outros editores: Cristiane Gomes Barreto, Mauro Guilherme Maidana Cappellaro, José Augusto Drummond.
Bibliografia.
ISBN 978-65-85259-38-5
1. Desenvolvimento sustentável 2. Meio ambiente 3. Sustentabilidade ambiental I. Santos, Tálita Floriano dos. II. Barreto, Cristiane Gomes. III. Cappellaro, Mauro Guilherme Maidana. IV. Drummond, José Augusto.

25-266925 CDD-333.9516

Índices para catálogo sistemático:

1. Meio ambiente : Conservação e proteção 333.9516
Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ISBN: 978-65-85259-38-5
9 786585 259385

Expediente

Editores

Tálita Floriano dos Santos

Cristiane Gomes Barreto

Mauro Guilherme Maidana Cappellaro

José Augusto Drummond

Diagramação/Projeto gráfico/Infografia

Lidiane Holanda

Revisão

Stela Máris Zica

Colaboradores

Alessandro Roberto de Oliveira
Alexandre Strapasson
Ana Claudia Sanches Baptista
Ana Karine Pereira
Andrei Cechin
Andrés Burgos
Arnoldo Santos de Lima
Bernardo Carlos Spaulonci Chiachia Matos de Oliveira
Carlos Hiroo Saito
Cristiano Lenzi
Daniela Gonçalves Mattar
Daniela Nogueira
Diego Pereira Lindoso
Doris Sayago
Edel Nazaré Santiago de Moraes
Elimar Pinheiro do Nascimento
Fabiano Toni
Fernando Paiva Scardua
Gleidson Oliveira Silva
Izabel Cristina Bruno Bacellar Zaneti
José Luiz de Andrade Franco
Lígia Chicareli Kawata
Louis Philippe Patrick de Jongh Filho
Marcela Ibiapino
Marilia Telma Manjate
Maurício Amazonas
Nayara Rodrigues Marques
Oscar de Moraes Cordeiro Netto
Paulo Celso dos Reis Gomes
Renata Camargo de Araújo
Renata Távora
Romero Gomes P. da Silva
Saulo Rodrigues Filho
Stéphanie Nasuti
Tahinah Martins
Yasmin Oliveira

INTRODUÇÃO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Tálita Floriano dos Santos

Cristiane Gomes Barreto

Mauro Guilherme Maidana Cappellaro

José Augusto Drummond

Universidade de Brasília

Centro de Desenvolvimento Sustentável

Este livro foi patrocinado pela Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC)

FINATEC Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos

Centro de Desenvolvimento Sustentável

UnB

SUMÁRIO

PREFÁCIO 5

CARTA DOS EDITORES 14

CONCEITOS INICIAIS 16

1. O ANTROPOCENO E A GRANDE ACELERAÇÃO 17
2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: A TRAJETÓRIA DE UM CONCEITO 31
3. CIÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE 48
4. CRÍTICAS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 59
5. ALTERNATIVAS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: O PÓS-DESENVOLVIMENTO 70

FUNDAMENTOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 82

6. ECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE 83
7. ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE 93
8. SOCIEDADE E MEIO AMBIENTE 103
9. POLÍTICAS PÚBLICAS E SUSTENTABILIDADE 114

TÓPICOS CONTEMPORÂNEOS 125

10. BIODIVERSIDADE E ÁREAS PROTEGIDAS 126
11. ÁGUA E SUSTENTABILIDADE 135
12. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE: PARTE I 142
13. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE: PARTE II 152
14. CIDADES SUSTENTÁVEIS 162
15. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 168
16. ENERGIA E SUSTENTABILIDADE 178
17. EDUCAÇÃO AMBIENTAL 187
18. INJUSTIÇA, RACISMO, DIVERSIDADES E MEIO AMBIENTE 196
19. GÊNERO E SUSTENTABILIDADE 207
20. GOVERNANÇA AMBIENTAL 213
21. REDES E SUSTENTABILIDADE 221
22. ESG: ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE 230
23. ECOLOGIA INDUSTRIAL OU O USO EFICIENTE DE RECURSOS NATURAIS 240

SEÇÃO

03

TÓPICOS CONTEMPORÂNEOS



23. ECOLOGIA INDUSTRIAL OU O USO EFICIENTE DE RECURSOS NATURAIS

Armando Caldeira-Pires[1]

Resumo

Este texto discute o uso eficiente dos recursos naturais e o conceito de ecologia industrial. Ele enfatiza a importância de compreender os princípios da circularização da economia para otimizar a utilização de recursos em sistemas industriais. Além disso, explora ferramentas de diagnóstico e métodos de avaliação para caracterizar o nível de circularização dos ecossistemas industriais, incluindo a análise de fluxo de materiais, as tabelas de insumo-produto e a avaliação do ciclo de vida. Ao final do capítulo, será possível responder às seguintes questões: (i) O conceito de ecologia industrial e a sua relação com a sustentabilidade e a eficiência no uso dos recursos naturais ao longo dos processos de transformação nos ciclos produtivos; (ii) A importância da circularização da economia e das ferramentas de diagnóstico e controle dos fluxos de materiais em regiões industriais; e (iii) O conceito de avaliação do ciclo de vida (ACV) como o principal método para caracterizar a produção e o fornecimento de bens, e o grau de circularização de um setor econômico ou de toda uma estrutura econômica.

Introdução

Este capítulo aborda tópicos relacionados à transição para uma sociedade mais eficiente em termos de consumo e produção. Em vez de usar o termo "sustentável", ele enfoca a eficiência no uso dos recursos disponíveis para manter a qualidade de vida desejada pela sociedade. Essa opção deriva do fato de que sustentabilidade implica equilibrar as necessidades atuais com a capacidade do planeta de suprir essas necessidades em longo prazo. Isso exige encontrar formas de satisfazer as demandas humanas de energia, alimentos, água e materiais sem esgotar os recursos naturais e sem comprometer a capacidade de regeneração dos ecossistemas. Nesse contexto, a sustentabilidade é explicada aqui por meio do conceito do uso eficiente de recursos, que objetiva maximizar o valor obtido a partir dos recursos usados, minimizando o desperdício deles e reduzindo os impactos ambientais associados à sua extração, produção e descarte. O uso eficiente de recursos está fundamentado em alguns princípios-chave: (i) redução do consumo; (ii) eficiência na utilização; e (iii) operação de sistemas cíclicos de produção e consumo.

Os cinco tópicos a seguir abordam questões conceituais e metodológicas que podem auxiliar na transição para uma sociedade mais eficiente. A discussão começa com a era industrial, seguida pela análise de como o sistema natural usou os recursos naturais para a sua própria existência ao longo dos milhões de anos em que a vida existe na Terra. O terceiro tópico explora como aplicar em nosso sistema industrial a gestão de recursos de forma semelhante ao funcionamento da natureza. O quarto tópico apresenta as ferramentas de diagnóstico e controle do uso de recursos naturais adotadas no século XXI. Por fim, o quinto tópico aborda as interações potenciais entre o sistema humano e o ecossistema industrial.

1 Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília

A termodinâmica

No final do século XVIII e durante o século XIX ocorreram avanços significativos nas áreas de conversão de energia em trabalho e da metalurgia, coincidindo com a descoberta de minas de carvão na Inglaterra e com a sua exploração em grande escala. Essa combinação impulsionou um crescimento econômico sem precedentes da Inglaterra e em seguida de outros países, mas resultou também no aumento do consumo de recursos naturais e das emissões associadas a esse consumo. Estudos mostram que a transição da sociedade pré-industrial para a industrial multiplicou por quatro o uso de energia e materiais, um valor equivalente à transição para a sociedade da informação.

A pergunta econômica de como produzir mais com a mesma quantidade de recursos foi substituída pela pergunta de como produzir mais trabalho com a mesma quantidade de calor. A nova pergunta e a resposta a ela deram origem a um novo paradigma científico, a termodinâmica. A equação de eficiência térmica foi respaldada pela primeira lei da termodinâmica, que estabeleceu que a quantidade de energia que entra em um processo é igual à que sai, mais a variação da energia retida no processo, ou seja, a variação de energia em um sistema fechado é igual a zero. No entanto, a segunda lei da termodinâmica afirma que a qualidade dessa energia cai ao longo da sua passagem pelo processo (a seta do tempo) e que existe um limite máximo de eficiência prática para o aproveitamento dessa energia.

Em termos energéticos, existe uma quantidade disponível de energia, como 1 kJ (um quilojoule, a unidade de energia definida pelo Sistema Internacional). Se essa energia for utilizada em um processo com 25% de eficiência, apenas 0,25 kJ serão convertidos em trabalho útil. Enquanto a primeira lei nos diz que os outros 0,75 kJ ainda existem, a segunda lei impõe que esses 75% da energia inicial devem ser dissipados pelo processo produtivo e que, principalmente, serão dissipados sem a qualidade necessária para produzir mais em outro processo igual.

Em termos econômicos, uma unidade monetária foi gasta para adquirir uma quantidade de energia, mas apenas 25% dela foi efetivamente transformada em produto. Em termos materiais, uma unidade de massa de combustível é necessária para operar um processo, mas apenas 25% desse conteúdo energético é efetivamente utilizado. Os outros 75% do material são transformados obrigatoriamente, mas perdem a sua utilidade para operar aquele tipo de processo. A segunda lei da termodinâmica impõe que qualquer processo de conversão resulta na perda de qualidade do recurso original. Isso implica a destruição do recurso (em termos de qualidade) durante o seu processo de conversão.

O metabolismo de um ecossistema ou o uso eficiente de recursos

Apesar de cada material perder qualidade ao passar por um processo de conversão para sustentar a vida de um ser vivo, os sistemas naturais de vida continuam a existir ao longo de milhões de anos. Os seres vivos conseguem se manter vivos ao retirar qualidade daqueles de quem se alimentam. Os vegetais, como seres primários, são a fonte de alimento dos animais menores (herbívoros), que, por sua vez, servem de alimento para os animais maiores (carnívoros). Esses seres vivos usurpam a qualidade (vida) uns dos outros, formando uma cadeia alimentar. Além disso, os micro-organismos e organismos de decomposição desempenham um papel importante ao completarem os ciclos biogeoquímicos, transformando a qualidade dos compostos químicos constituintes da biomassa e produzindo as formas necessárias para susten-

tar os diferentes seres ao longo da cadeia alimentar. A diversidade ótima de tipos de seres vivos em um ecossistema garante a ciclagem eficiente dos elementos, pois ao longo do ciclo existem seres capazes de perceber a qualidade e se valer dos resíduos liberados pelos seres anteriores.

Nesse sistema cíclico não ocorre a destruição da qualidade da matéria, mas sim a sua transformação. Os seres a jusante no ciclo são capazes de processar essa nova qualidade em benefício próprio. Essa dinâmica segue a lei básica de Lavoisier, segundo a qual "nada se perde, nada se cria, tudo se transforma". Ao longo de milhões de anos, esse sistema vem se mantendo em um estado termodinamicamente estável.

Ecologia industrial ou ações para a circularização da economia

Antes da Revolução Industrial, os humanos já haviam criado um ecossistema industrial para sustentar as suas vidas, adaptando-se às necessidades de cada período histórico. Esse ecossistema consistia em seres tecnológicos, predominantemente agrícolas, com diversidade suficiente para suprir os produtos consumidos pela sociedade. Antes do século XVIII, esse ecossistema tecnológico produzia materiais sem qualidade em uma velocidade que podia ser absorvida pelo ciclo natural de transformação. Assim, parecia que os humanos faziam parte do ecossistema natural. No entanto, com a Revolução Industrial, a escala de tempo de produção desses materiais sem qualidade foi drasticamente acelerada, tornando-se muito maior do que a velocidade com que esses materiais poderiam ser absorvidos pelo ciclo natural. O ciclo humano de processos industriais separou-se do ciclo natural.

Em busca de desenvolvimento econômico, os humanos adotaram um caminho mais simples e linear. O ecossistema industrial retira do ecossistema natural os recursos necessários, com a qualidade necessária para impulsionar o processo econômico, e devolve ao ambiente natural esses materiais transformados, exauridos de sua qualidade original. Para acelerar o desenvolvimento econômico, cada vez mais materiais com qualidade são extraídos e processados, e cada vez mais materiais sem qualidade são devolvidos ao ecossistema natural, em quantidade e velocidade que os seres vivos que fazem parte desse sistema não conseguem processar.

Esse acúmulo de materiais que não podem ser utilizados, quer pelos humanos, quer pelo sistema natural, começou a ter seu custo. Por quanto tempo os habitantes de uma casa conseguiriam manter a sua qualidade de vida e a sua saúde se acumulassem continuamente lixo em casa sem descartá-lo? Continuando a analogia, imagine-se que uma família (i) consuma e descarte alimentos e embalagens de papel, plástico e vidro e (ii) consuma e descarte regularmente também carros, eletrodomésticos, computadores e celulares, acumulando tudo em seu quintal. Enquanto isso, fora dos limites da sua casa, outras pessoas consomem cada vez mais e acumulam resíduos não utilizados, e o número dessas pessoas não para de crescer. Em algum momento, o cidadão olha pela janela e vê uma floresta distante, onde animais se alimentam, as folhas caem e micro-organismos processam os materiais, enquanto crescem novas árvores, mas ele olha para o seu próprio quintal e vê que ele está cheio de coisas usadas inúteis e que não são processadas.

Isso coloca algumas perguntas: seria possível decompor todos esses computadores e extrair silício, prata, cobre e platina que fazem parte deles? Seria viável produzir novos computadores sem ter que buscar a matéria-prima desses componentes em jazidas minerais cada vez mais distantes e exauridas? Talvez seja mais fácil (e barato) explorar esses metais no próprio ambiente urbano onde foram descartados e onde a sua concentração é conhecida. Agregar qualidade a um material com essas características conhecidas e armazená-lo em um local de fácil acesso poderia ser mais econômico do que procurar jazidas com concentrações variáveis e localizadas em áreas longínquas e/ou de difícil acesso.

Essa adaptação do funcionamento do ecossistema natural é o que vai proporcionar novas ferramentas para o ecossistema industrial humano e dar origem à ecologia industrial, uma estrutura conceitual. A ecologia industrial aproveita a compreensão de como funcionam os ecossistemas naturais e usa os conceitos teóricos da ecologia, fornecendo um conjunto de ferramentas para a gestão otimizada dos ecossistemas industriais, especialmente em termos da eficiência no uso dos recursos naturais.

Na realidade, já existem regiões econômicas cujo ecossistema industrial apresenta características semelhantes aos ecossistemas naturais. Essas características incluem maior diversidade de tipos de seres industriais, identificação dos materiais utilizados como matérias-primas ou subprodutos dos processos de transformação, aplicação de processos tecnológicos para agregar qualidade a esses subprodutos e transformá-los em matérias-primas a serem usadas em outros processos, e identificação da cadeia logística necessária para manter a sustentabilidade do suprimento de matérias-primas e do consumo dos subprodutos. Essas regiões econômicas estão operando de forma mais circular, reduzindo significativamente o consumo de novos materiais em comparação com o modelo tradicional.

A nova realidade dessas regiões econômicas cíclicas é caracterizada pela redução do consumo de materiais, pela menor emissão de resíduos de baixa qualidade, pela introdução de uma maior quantidade e variedade de seres industriais, pelo aumento do número de empregos, pela melhoria na qualidade social e pelo crescimento do produto interno bruto local. Assim como em um ecossistema natural, esses novos ecossistemas industriais, operando de forma cíclica, aumentam a capacidade de sustentabilidade da região econômica onde estão inseridos. A estrutura conceitual da ecologia industrial permite o desenvolvimento de uma região econômica em direção à estabilidade termodinâmica, ou seja, à sua perenização.

Diagnóstico do grau de circularização: avaliação e ferramentas

A economia circular é baseada na importância da caracterização dos fluxos de materiais nos ecossistemas industriais, incluindo a sua disponibilidade, a evolução ao longo do tempo e a movimentação entre os locais de produção e uso. Para caracterizar o desempenho desses ecossistemas, as principais ferramentas se baseiam no diagnóstico e no controle dos balanços de massa dos materiais. Em uma região industrial, é essencial identificar a quantidade de matéria-prima necessária, a sua localização, a quantidade de produtos gerados e para onde devem ser enviados, além das emissões associadas ao transporte e à produção.

Uma região industrial pode ser decomposta em três escalas de fluxos de materiais. No nível mais básico vem a produção individual de bens principais, como chapas de aço, peças de alumínio, vidros planos, polímeros sintéticos e borrachas naturais. Em um nível intermediário, esses produtos básicos são agrupados em produtos mais complexos, como automóveis. O nível mais amplo é caracterizado por uma diversidade maior de sistemas tecnológicos, abrangendo desde alimentos, têxteis, eletricidade até combustíveis e preparação de infraestrutura, formando assim a região industrial completa.

Existem métodos de diagnóstico específicos para caracterizar os fluxos de massa em cada um desses níveis. Esses métodos foram desenvolvidos a partir dos anos 1970. Desde os anos 1980 eles têm sido ferramentas essenciais para o diagnóstico e o controle das principais regiões econômicas. Além dos métodos de balanço de massa, a certificação de qualidade (rótulos) e a caracterização da cadeia de suprimento também ajudam a compreender a evolução dos materiais dentro das grandes regiões econômicas.

O diagnóstico do primeiro nível, o nível dos produtos, é realizado por meio da "avaliação do ciclo de vida" (ACV), que permite caracterizar a produção e o fornecimento de um produto ou serviço desde a extração dos recursos e a sua transformação, chegando até o descarte final. A ACV é um padrão internacional definido pela ISO 14040 e envolve a conversão dos fluxos de massa em impactos ambientais.

A "Tabela de Insumo-Produto" mede o nível dos setores. Ela identifica as relações entre os setores e subsetores de uma região econômica. Esse método foi aprimorado para converter os fluxos econômicos em fluxos de massa de matérias-primas e emissões, permitindo assim avaliar o impacto ambiental causado pela variação da demanda de um setor nos outros.

No terceiro nível o instrumento apropriado é a "análise de fluxo material" (AFM). Ele quantifica o uso de recursos, a sua conversão em produtos e infraestrutura, e as emissões resultantes dos processos produtivos. A AFM fornece valores de massa *per capita* que podem ser relacionados com o produto interno bruto *per capita*, revelando uma relação entre a evolução econômica e a quantidade de materiais e emissões.

Esses três métodos dependem de um abrangente sistema de coleta de dados e da qualidade do processo produtivo e consumo. Esse sistema tem sido utilizado em diversas regiões econômicas, especialmente na União Europeia, para monitorar a evolução da sociedade em termos não apenas econômicos, mas também de eficiência no uso de recursos e de impactos ambientais. Esses métodos são empregados desde a década de 1990 e contribuem para o desenvolvimento de sistemas que convertem os fluxos de matérias-primas em impactos ambientais. Eles fornecem informações precisas e cientificamente comprováveis sobre os impactos ambientais de uma sociedade consumidora-produtiva e por isso são úteis para gestores ambientais, empresas e a sociedade em geral.

Além disso, ao longo dos primeiros anos do século XXI, esses métodos, especialmente a ACV, viabilizaram um novo desdobramento: o redesenho do sistema produtivo linear para instalar sistemas mais circulares. Nos sistemas circulares, os produtos são recuperados e as suas partes são reintroduzidas no sistema produtivo, evitando a necessidade de usar novas unidades de matérias-primas. A economia circular só é viável graças à identificação precisa desses fluxos de materiais.

Nesse contexto, os sistemas de certificação de qualidade nacionais e internacionais desempenham um papel cada vez mais importante. No modelo linear atual, esses sistemas garantem a qualidade das matérias-primas utilizadas no processo produtivo. No entanto, na economia circular, surgem novos desafios, pois a matéria-prima pode ser um produto que esteja chegando ao fim de sua vida útil, necessitando de recuperação. A qualidade de suas partes deve ser definida para garantir a sua reintrodução no sistema produtivo. Por exemplo, no processo de reciclagem do vidro transparente, se uma garrafa de vidro marrom for incluída sem ser detectada, toda a qualidade do vidro recuperado no forno será prejudicada. Será necessário vender o vidro como de qualidade inferior até que várias produções subsequentes de vidro totalmente transparente restaurem a sua qualidade original.

Esse ambiente econômico mais complexo exige um grande esforço por parte dos sistemas de certificação de qualidade. Por exemplo, a ISO 14040, associada à ACV, está ligada ao sistema de rotulagem ambiental descrito pela norma ISO 14025. Isso significa que deve existir um sistema de certificação de qualidade ligado à caracterização de um sistema tecnológico por meio da ACV. Na União Europeia, essa combinação tem sido utilizada para demonstrar a qualidade ambiental dos produtos para os consumidores exigentes da região e como uma barreira técnica contra produtos externos produzidos em regiões menos avançadas no controle dos fluxos de massa em seus sistemas tecnológicos.

Além disso, com a globalização do consumo, um produto novo gerado em um local pode chegar ao fim de sua vida em qualquer outro lugar do mundo. A agregação de valor e qualidade às matérias-primas ocorre em um local geográfico específico, mas o produto é distribuído e consumido em todo o mundo por ser parte de um sistema globalizado. Esse é um dos principais desafios para a implementação de uma economia circular global: criar um sistema de rastreamento capaz de garantir a evolução e o funcionamento da cadeia de suprimentos linear atual, transformando-a em uma cadeia de suprimentos circular, na qual seja possível identificar a origem do material, a sua associação com o produto original, as modificações pelas quais passou, etc. O rastreamento tem sido testado por meio de QR codes e do conceito de *blockchain*, aproveitando os sistemas de gestão de informação da Indústria 4.0, mas isso ainda está em estágio inicial ou experimental. No entanto, deve ficar claro que as ferramentas para garantir o funcionamento de uma economia circular já existem e estão sendo aplicadas com diferentes níveis de maturidade.

As camadas ambiental-econômico-social do ecossistema industrial circular

As camadas ambiental, econômica e social do ecossistema industrial circular podem ser descritas de forma semelhante à organização de uma região econômica em três níveis distintos: produtos, setores e a própria região. Além disso, essa organização aparece nos dois sistemas em que a região opera: o ecossistema natural e o sistema humano. O sistema humano faz com que a região funcione e obtenha os produtos necessários para manter a sua qualidade de vida. O ecossistema natural fornece os recursos necessários e atua como um reservatório para as emissões e resíduos gerados durante os ciclos produtivos e para as emissões e resíduos resultantes do uso desses produtos pelo sistema humano. Ocorre uma constante troca de informações de massa entre os três sistemas e essa interação afeta cada um deles de maneiras distintas.

Nos últimos dois séculos, o sistema humano adotou uma estratégia produtiva linear unidirecional. Ele retira recursos de alta qualidade do sistema natural, processa e utiliza esses recursos, e devolve ao sistema natural resíduos totalmente desprovidos de qualidade. No entanto, nos últimos 40 anos, empresários, gerentes e cientistas investiram em ferramentas para compreender melhor as relações entre o sistema humano e os outros dois sistemas e para identificar as implicações dessas relações na qualidade dos três sistemas.

O uso dessas ferramentas tem causado o reconhecimento de que o sistema linear de produção e consumo não é sustentável em longo prazo para nenhum dos três sistemas. Isso tem estimulado a adoção de uma estratégia baseada no funcionamento do sistema natural: a estratégia de produção e consumo circular. Ela busca devolver a qualidade aos materiais ao longo do ciclo produtivo por meio de várias etapas de processos de transformação, promovendo a eficiência no uso dos recursos mediante a reciclagem durante múltiplos ciclos de produção e uso.

A transição do sistema linear de produção e consumo para um sistema circular teve início há mais de 20 anos, impulsionada pelo uso das mencionadas ferramentas de diagnóstico e controle. Essas ferramentas permitem o redesenho dos processos produtivos, a identificação de novos setores industriais necessários para a reciclagem de materiais e o contínuo aumento da eficiência no uso dos recursos. Um exemplo destacado dessa otimização ocorre no sistema natural, em que átomos de carbono são incorporados repetidamente ao longo de diferentes ciclos de produção e uso, como ocorre com a cana-de-açúcar transformada em álcool e depois incorporada a um novo caule de cana.

A aplicação da estratégia circular tem se expandido paulatinamente a elementos presentes em diversos produtos, como o carbono presente em alimentos, roupas e plásticos, o silício do vidro das garrafas, o aço e alumínio dos carros, a prata e a platina dos processadores eletrônicos, e o lítio das baterias de carros elétricos. Cada exemplo requer a identificação dos locais adequados para o descarte final, dos processos de coleta, da logística de transporte para novos locais de reprocessamento e da agregação de qualidade para a sua reintrodução no sistema produtivo. Essa operacionalidade implica na criação de novos sistemas industriais, novas profissões e novas oportunidades de emprego.

As iniciativas bem-sucedidas de economia circular até o momento comprovam que há benefícios para os três sistemas envolvidos: o sistema natural é menos sobrecarregado em termos de extração de novos recursos e da redução de resíduos e emissões lançados nele; o sistema humano tem evoluído tanto como produtor quanto como consumidor; e o sistema ambiental tem sido menos impactado. No entanto, levará algum tempo para que o sistema ambiental responda de forma positiva a essa mudança no padrão de produção e consumo.

Três iniciativas exemplares de circularidade produtiva devem ser mencionadas. A primeira ocorre na região administrativa-industrial da cidade de Kalundborg, na Dinamarca. Essa região é reconhecida como a pioneira no uso dos conceitos de simbiose industrial, resultado de um esforço executado ao longo de mais de 30 anos. As outras duas iniciativas são de abrangência nacional e se baseiam em planos de desenvolvimento industrial: o Programa Nacional de Simbiose Industrial (*National Industrial Symbiosis Programme*, NISP), no Reino Unido, e a iniciativa da China de desenvolver uma rede de regiões industriais que operam de acordo com as diretrizes da economia circular.

Essas iniciativas têm sido operacionalizadas em âmbitos geograficamente localizados e requerem uma gestão otimizada. No entanto, elas demonstram com sucesso o potencial da economia circular para melhorar o desempenho econômico, reduzir os impactos ambientais e melhorar o tecido social.

Considerações finais

Este capítulo explorou a estrutura dinâmica de metabolismo de um ecossistema natural e a eficiência no uso de recursos naturais extraídos desses ecossistemas. Essa dinâmica é baseada na transformação e ciclagem de materiais, diferentemente do ecossistema industrial humano linear, que extrai materiais de qualidade do ambiente natural e devolve a ele materiais sem qualidade, levando ao acúmulo de resíduos não utilizados. A ecologia industrial surgiu como uma abordagem para a circularização da economia, inspirada nos ecossistemas naturais. Regiões econômicas com características mais circulares têm diversidade de seres industriais, processam subprodutos em matérias-primas para outros atos de transformação e implementam cadeias logísticas sustentáveis. Essa abordagem demonstrou que a extração de novos materiais e a emissão de resíduos são reduzidos e que ela contribui para o desenvolvimento econômico local.

Ferramentas, como balanços de massa, a ACV e a Tabela de Insumo-Produto, avaliam e controlam o desempenho dos ecossistemas industriais. Essas ferramentas permitem identificar a quantidade de matéria-prima necessária, a produção de bens, as emissões e a movimentação dos materiais ao longo da região industrial.

Os exemplos atuais de economia circular demonstram que os três sistemas envolvidos evoluem de forma positiva: o sistema natural é menos sobrecarregado por causa da redução da extração de novos recursos e da redução de resíduos e emissões; o sistema humano cresce tanto como produtor quanto como consumidor; e o somatório resulta num sistema ambiental menos impactado.

A evolução do sistema econômico na direção de um sistema circular é um processo em construção desde o início deste terceiro milênio. Um aprofundamento no uso dos conceitos da ecologia industrial no sentido de aumentar a circularização da economia numa escala global poderá ser um caminho para que todos os habitantes da Terra sejam capazes de atingir altos padrões de qualidade de vida.

LITERATURA COMPLEMENTAR E SUGESTÕES DE LEITURA

» BROADBENT, C. et al. Aggregated data development. In: Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases: a basis for greener processes and products. 1. ed. Paris: Imprimerie Escourbiac, 2011. v. 1, p. 59-74.

» CALDEIRA-PIRES, A. Competitividade industrial e declarações ambientais de produtos tipo III ISO 14025: a metrologia dos impactos ambientais das atividades econômicas. In: Metrologia: ideias inovadoras para o desenvolvimento industrial. 1. ed. Brasília: Senai, 2005. v. 1, p. 65-80.

» ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular Economy: rethinking value creation. Palgrave Macmillan, 2019.

» FITZSIMONS, D. Remanufacturing: the route to the circular economy. Gower Publishing, 2012.

» GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. Industrial Ecology. Prentice Hall, 2010.

» LACY, P.; RUTQVIST, J. Waste to Wealth: the circular economy advantage. Palgrave Macmillan, 2015.

» MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. Cradle to Cradle: remaking the way we make things. North Point Press, 2002.

» MULLIGAN, C. et al. (Ed.). Circular Economy: global perspectives on design, management, and policy. Elsevier, 2019.

» STAHEL, W. R. The Circular Economy: a user's guide. Edward Elgar Publishing, 2016.

» VISSER, W. et al. (Ed.). Closing the Loop: benchmarks for a sustainable future. Greenleaf Publishing, 2014.


FINATEC
Centro de Desenvolvimento
Sustentável UnB
UnB