

Ilustração: Goreti Braga

## A Ecologia Industrial e a sua Aplicação na Agroenergia

Gilmar Souza Santos<sup>1</sup>  
Sued Wilma Caldas Melo<sup>2</sup>

O aumento da população e do consumo, a crescente urbanização das cidades e o rápido avanço tecnológico contribuíram para a elevação da quantidade e da variedade dos resíduos sólidos. Frente a tais transformações, é imprescindível a disposição adequada desses, pois caso contrário pode ocorrer contaminação das águas superficiais e subterrâneas, do solo, causar danos à saúde humana e ao meio ambiente.

Este trabalho analisa a Ecologia Industrial (EI) como alternativa de destinação correta de recursos provenientes das atividades industriais, capaz de contribuir com a redução de custo e com a sustentabilidade ambiental. O foco recai sobre a importância da aplicação da EI na agroenergia, a partir da possibilidade do aproveitamento integral das biomassas. Agregação de valor, redução de passivos ambientais e aumento de benefícios sociais são alguns dos resultados de tal estratégia.

O objetivo da Ecologia Industrial, neste sentido, é estudar o fluxo industrial desde a entrada de insumos e energia, passando pela transformação até a saída de produtos e resíduos por meio de balanços de massa e energia. Busca-se identificar processos ineficientes que resultem em resíduos poluentes, para então promover alterações, arranjos, adoção de tecnologias ambientalmente mais adequadas e outras soluções capazes de diminuir o montante final de resíduos (AYRES; AYRES, 2002).

### ECOLOGIA INDUSTRIAL

A Ecologia Industrial busca a integração entre a indústria e o ecossistema natural. Envolve mecanismos de reuso de materiais, redução no consumo de energia, água e matéria-prima, como também minimização dos resíduos provenientes da atividade industrial. Para tanto, atua na substituição

<sup>1</sup> Economista, Doutor em Engenharia de Produção, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, e-mail: gilmar.santos@embrapa.br

<sup>2</sup> Bacharel e Mestre em Agronegócios, bolsista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, e-mail: sued.melo@colaborador.embrapa.br

de tecnologias tradicionais por tecnologias mais limpas dentro das cadeias produtivas.

O vocábulo ecologia da expressão “ecologia industrial” remete ao conceito de ecologia como encontrado na natureza, ou seja, ao estudo científico das interações entre os organismos e o seu ambiente (BEGON et al., 2008). O objetivo é aplicar na área industrial os princípios da Lei de Conservação das Massas de Lavoisier, no qual “Na natureza nada se cria e nada se perde, tudo se transforma”. Ricklefs (2010) esclarece que a ecologia apresenta cinco sistemas ecológicos que trocam, continuamente e de forma equilibrada, matéria e energia com os arredores: organismo individual, população (formada por indivíduos da mesma espécie), comunidade (que consiste em um número maior ou menor de populações), ecossistema (conjunto de organismos com seus ambientes físicos e químicos) e biosfera (inclui todos os ambientes e organismos da terra). Já o termo “industrial” da expressão remete à indústria, a qual se caracteriza por processos de transformação de insumos em produtos, gerando também coprodutos e resíduos.

O sistema produtivo, na visão da EI, é entendido como um subsistema da biosfera, isto é, uma organização particular de fluxos de matéria, energia e informação, tornando-se um ciclo quase inteiramente fechado. A figura 1 exemplifica como a EI promove o reaproveitamento de resíduos e conduz a um processo de ciclo fechado. Neste entram insumos e energia que, depois de transformados pelo processo industrial, dão origem a produtos, coprodutos e resíduos. A grande questão é que de acordo com os princípios da EI, em vez de serem descartados, os coprodutos e resíduos são reaproveitados dentro do próprio

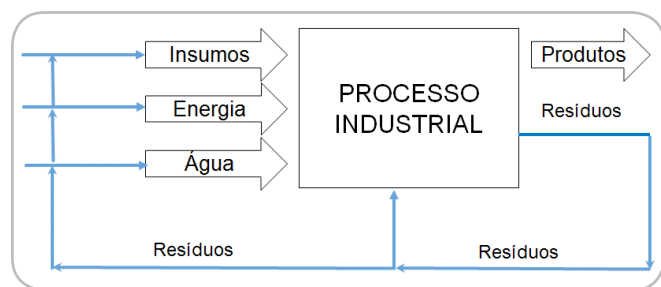


Figura 1. Reaproveitamento de Resíduos na Ecologia Industrial

Fonte: Elaborada pelos autores

processo industrial ou são reutilizados como insumo em outro processo.

Dentro da Ecologia Industrial, a analogia entre sistemas industriais e ecossistemas ganha força, pois são consideradas as interações entre o sistema e o meio ambiente, que frequentemente está em equilíbrio. Ricklefs (2010) alerta que os ecossistemas deveriam ser mantidos tão próximos de seu estado natural quanto possível, para manter os processos ecossistêmicos naturais intactos, embora seja inevitável que a maior parte do mundo caia sob a gestão humana. Segundo o autor, dois aspectos chaves da função ecossistêmica constituem melhor aproveitamento da energia e a contínua reciclagem dos materiais. A organização dos sistemas naturais de ciclos fechados, nos quais é necessária apenas a entrada de energia, é, portanto, a principal inspiração da ecologia para EI.

Para Gianetti e Almeida (2006), as atividades industriais, semelhantes aos ciclos biológicos, podem ser classificadas em três componentes: produtores, consumidores e decompositores. Nos sistemas naturais, os produtores ou autótrofos são organismos capazes de fabricar seu próprio alimento por meio da fotossíntese. Na indústria, os produtores são representados pelas atividades primárias de produção de energia e matéria-prima (combustíveis e agricultura, por exemplo). Os consumidores ou heterótrofos naturais são os organismos incapazes de produzir seu próprio alimento e, por isso, alimentam-se dos produtores ou de outros consumidores. No contexto industrial, os consumidores podem ser representados pelo sistema industrial propriamente dito. Os decompositores, por sua vez, são organismos que se nutrem de restos de plantas e animais mortos. Compreendem as bactérias e os fungos, que atuam como verdadeiras “unidades processadoras de lixo”, decompondo organismos mortos e transformando-os em substâncias simples (sais, gases e água). Seguindo a analogia, os decompositores são as atividades de aproveitamento de resíduos, reciclagem e tratamento de efluentes. O Quadro 1 exemplifica esta relação entre atividades da natureza e atividades industriais.

Do mesmo modo que o organismo, um sistema industrial também sintetiza e degrada substâncias. A principal diferença é que, ao contrário dos

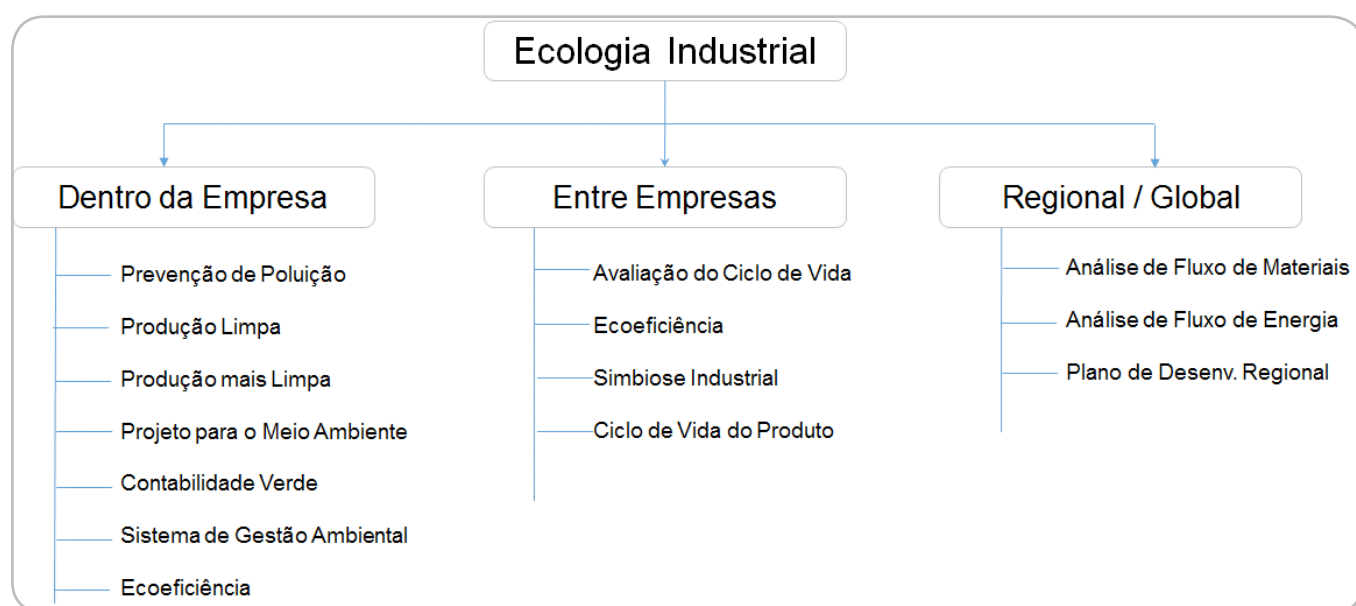
ecossistemas naturais em que o balanço entre o consumo de reservas e a produção de resíduos se mantém estável, no sistema industrial grande parte do material é metabolizada para que se obtenha uma quantidade relativamente pequena de produto final, o que resulta no elevado número de resíduos. É válido destacar que, apesar de o sistema industrial também possuir mecanismos reguladores, estes não atuam como os reguladores dos sistemas naturais, ou seja, possibilitando a sustentabilidade do sistema.

As ações da EI, visando a tornar o sistema produtivo um ciclo fechado, podem ser desenvolvidas em diferentes níveis de atuação: dentro da empresa, entre empresas ou em escala regional ou global (CHERTOW, 2000) (Figura 2). No nível interno, pode-se citar os programas de Prevenção da Poluição, Produção mais Limpa, Projeto para o Meio Ambiente, Contabilidade Verde, Química Verde. Entre empresas, têm-se Análise de Ciclo de Vida (pode ser utilizada também dentro da empresa), Simbiose Industrial, Atuação Responsável, entre outros. E em escala regional, observam-se a Análise de Fluxo de Substância e Energia, Planejamento Estratégico Institucional e Plano de Desenvolvimento Regional.

**Quadro 1.** Relação Ecossistema x Sistema Industrial

Ecossistema	Sistema Industrial
Organismo	Empresa
Reprodução	Produção
População	Indústria ou parque industrial
Proximidade bem definida entre produtor / consumidor / decompositor	Distância variável entre indústria, consumidor e reciclador
Ciclo fechado de matéria	Ciclo aberto
Alto índice de reaproveitamento de resíduos	Aproveitamento incipiente
Regulado pela quantidade de reservas do material	Regulado pela demanda do produto
Concentração e reuso de resíduos	Dissipação de resíduos
Competição interespecífica e intraespecífica regula o equilíbrio do ecossistema.	Competição por recursos disponíveis de forma não equilibrada.
Interage com o ambiente	Modifica o ambiente
Ajuda a reduzir os gases de efeito estufa	Aumenta os gases de efeito estufa

Fonte: Adaptado de Ricklefs (2010), Begon et al. (2008) e Gianetti e Almeida (2006).



**Figura 2.** Áreas de Abrangência da Ecologia Industrial

Fonte: Adaptado de Tanimoto (2004), Chertow (2000) e Ayres e Ayres (2002)

As áreas retratadas na Figura 2, ações dentro da empresa, entre empresas a nível regional ou global, são consideradas ferramentas da Ecologia Industrial e são apresentadas sumariamente no próximo tópico do trabalho.

## FERRAMENTAS UTILIZADAS NA ECOLOGIA INDUSTRIAL

### Simbiose Industrial (SI)

A simbiose industrial é uma ferramenta da Ecologia Industrial que estuda os fluxos de matéria e energia numa economia local, regional e global, onde tradicionalmente as instituições trabalham de forma isolada, e onde a abordagem coletiva, a colaboração e possibilidades sinérgicas oferecidas pelas proximidades geográficas entre essas instituições podem gerar vantagens competitivas (TANIMOTO, 2004).

No contexto da simbiose industrial, o resíduo de um processo é aproveitado como matéria-prima do processo seguinte. Chertow (2007) analisa a troca de materiais, energia, água e coprodutos entre essas instituições como fator importante para o processo. Para a autora, os fatores críticos de sucesso da simbiose industrial são a colaboração e a sinergia dentro de uma proximidade geográfica.

### Parques Ecoindustriais (Eco-Park)

Um parque ecoindustrial ou ecoparque segue o conceito de ciclo fechado da ecologia industrial. É formado por comunidades de negócios que cooperam entre si e com a sociedade local para compartilhar recursos (informações, materiais, energia, infraestrutura e recursos naturais) de forma eficiente com finalidades econômica, social e ambiental (PECK, 2001).

Um parque ecoindustrial pode iniciar com uma planta industrial já existente na região. A partir deste elemento principal, é realizado um diagnóstico acerca das entradas e saídas de cada negócio existente de modo a facilitar a integração das saídas entre as empresas (CHERTOW, 1998).

O exemplo clássico de parque ecoindustrial, de acordo com Giannetti e Almeida (2006) e

Haskins (2006) é o de Kalundborg, na Dinamarca (Figura 3). As empresas que o compõem utilizam resíduos umas das outras como fonte de energia e de matéria-prima e estão altamente integradas. Participam do parque grandes, médias e pequenas empresas. Além dos benefícios ambientais, o reaproveitamento de material e energia também favorece a sociedade local. Cabe ressaltar que esse processo simbiótico não resultou de um planejamento, mas do desenvolvimento gradual de cooperação entre as empresas da região e a cidade de Kalundborg. No Brasil, a empresa Natura instalou em 2014 um complexo industrial em Benevides, município de 50 mil habitantes localizado a 35 quilômetros de Belém do Pará, na Amazônia. Chamado Ecoparque, o projeto tem espaço para sediar outras empresas interessadas em compor um polo industrial sustentável. Baseado no conceito de simbiose industrial, o ecoparque conecta empresas de diferentes segmentos de mercado que possuem interesses comuns e necessidades complementares (NATURA, 2014).

### Prevenção de Poluição (P2)

A prevenção da poluição (P2) é a redução ou eliminação de resíduos na sua fonte, com a modificação de processos de produção. A P2 promove o uso de substâncias não tóxicas e a implementação de técnicas de reuso de resíduos (ESTADOS UNIDOS, 2014). A hierarquia para gerenciamento de resíduos do P2, conforme definido pela *US Environmental Protection Agency* (EPA), segue a lógica: *prevenção, reciclagem, tratamento e disposição*. O propósito dessa é combater a poluição antes de ser gerada e não apenas encontrar uma destinação para o resíduo.

### Produção Mais Limpa (P + L)

Produção mais Limpa (P + L) significa produzir com menos matérias-primas, água, energia e insumos em geral, e buscar incessantemente o uso de materiais menos tóxicos e, por meio de melhorias nos processos, a geração de menos resíduos, controlando-os. Trata-se da aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva e integrada, aplicada aos processos, produtos e serviços, para aumentar a ecoeficiência e reduzir os riscos para os seres humanos e o ambiente (UNEP, 2001).

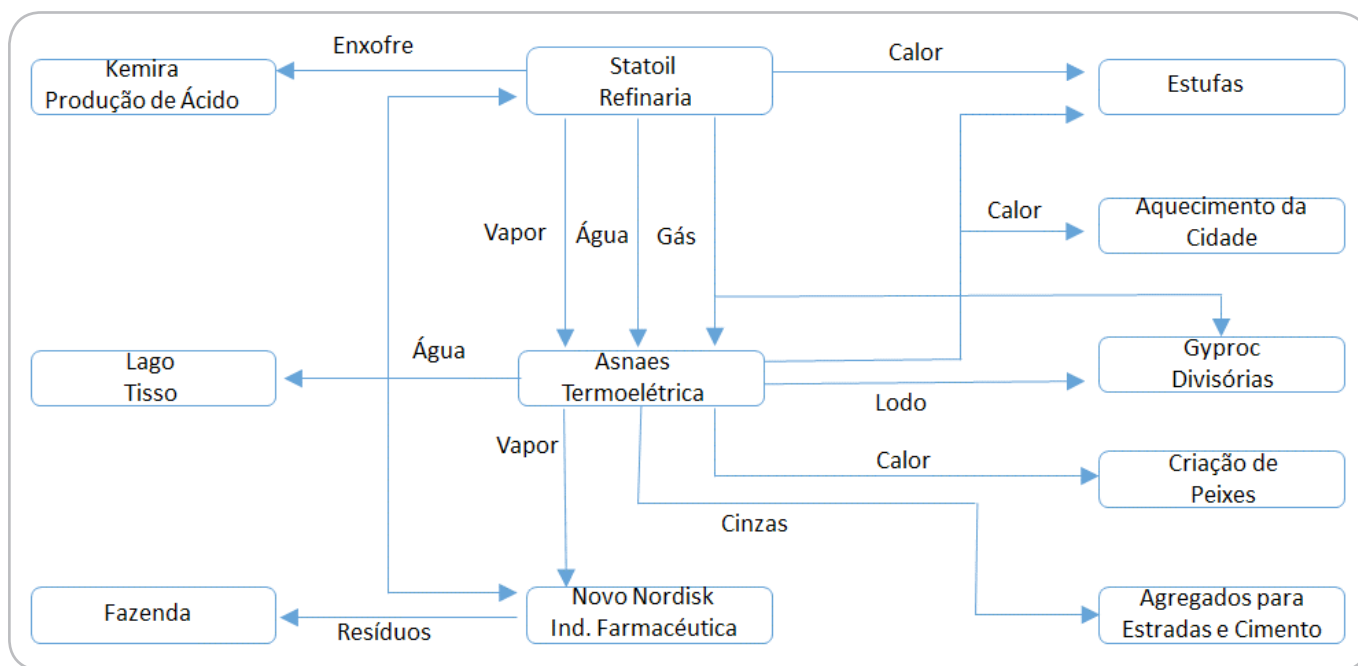


Figura 3. Fluxo de Processo do Parque de Kalundborg

Fonte: Adaptado de Gianetti e Almeida (2006)

## Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método para avaliar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade por meio da identificação e quantificação dos fluxos de energia e materiais ao longo do seu ciclo de vida. Inclui as fases de extração, processamento da matéria-prima, transporte, distribuição, uso, reuso, reciclagem e disposição final. Envolve quatro fases: a) definição de objetivo e escopo; b) análise de inventário; c) avaliação de impacto e d) interpretação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

A ACV permite uma visão abrangente dos impactos provocados e a identificação das medidas de mitigação mais adequadas. Tem como objetivos: identificar oportunidades de melhorias ambientais; auxiliar no planejamento estratégico e na tomada de decisão; auxiliar no design ecológico de produtos (*ecodesign*); as ações mercadológica e de rotulagem ambiental (declaração de que o produto apresenta vantagens ambientais em relação à concorrência).

## Análise de Fluxo de Massa (AFM)

A Análise de Fluxo de Massa (AFM) analisa os sistemas de fluxos e de estoques de materiais definidos no espaço e no tempo. Esta faz a vinculação entre as fontes e os destinos intermediários e finais, considerando todos os caminhos percorridos pelo material. Seguindo o princípio da conservação da matéria (Lei de Lavoisier), o resultado de uma AFM pode ser obtido por um simples balanço material, comparando-se todas as entradas, estoques e saídas de um processo. O que a torna atrativa como ferramenta de suporte para tomada de decisão no gerenciamento de recursos e na gestão de resíduos e do meio ambiente (TANIMOTO, 2010).

## Sistema de Gestão Ambiental (SGA)

Sistema de Gestão Ambiental (SGA), conforme a ISO 14001 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), parte do sistema de gestão de uma organização, é utilizado para desenvolver e implementar sua política ambiental e para gerenciar seus aspectos ambientais.

Inclui estrutura organizacional, atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos. Trata-se de uma ferramenta que ajuda a lidar com o impacto das atividades de uma empresa no ambiente, fornecendo uma visão estruturada para planejar e implementar medidas de proteção ambiental. O padrão para implantação do SGA é a norma ISO 14001, desenvolvida dentro da série ISO 14000.

## ECOLOGIA INDUSTRIAL E A AGROENERGIA

A aplicação da ecologia industrial à agroenergia, discutida neste trabalho, possui foco numa usina de cana-de-açúcar e numa usina de biodiesel, consolidadas em planta única com o uso de diversos processos industriais. A partir desta unidade central, são desencadeadas várias atividades cujo objetivo é tornar o uso da biomassa o mais eficiente possível. Partindo do conceito de ciclo fechado, o sistema produtivo é estruturado de modo que a biomassa energética gere coprodutos que serão introduzidos novamente no processo como insumos (Figura 4). Esse processo, junto à emissão mínima de poluentes, busca resíduo zero e sustentabilidade social e econômica.

A produção industrial de etanol, açúcar e biodiesel, a partir da cana-de-açúcar e das microalgas, pode

originar vários produtos e coprodutos que serão aproveitados internamente (tais como a vinhaça e glicerina) ou ainda acionar um processo de simbiose industrial, de modo que aproveite o material residual em outras cadeias agroindustriais ( $\text{CO}_2$  e leveduras). A Figura 5 apresenta um modelo de EI para a agroenergia a partir da cana-de-açúcar e da criação de microalgas. Todo o processo industrial segue os princípios de ciclo fechado da ecologia industrial. As entradas são os insumos, água e energia. Os principais processos industriais são a fermentação, destilação, cristalização, transesterificação, combustão, gaseificação, pirólise rápida e hidrotreatamento. Os produtos centrais são etanol, açúcar, butanol, biodiesel e bioquerosene de aviação. Alguns resíduos como a vinhaça,  $\text{CO}_2$ , levedura, glicerina, água, calor, bagaço e palha retornam ao processo industrial como entradas, complementando ou até suprimindo integralmente a demanda por insumos (como é o caso da energia). Então, a partir destas são gerados mais etanol, biogás, fertilizantes, ração animal, bioeletricidade, entre outros produtos.

Existem ainda resíduos que podem ser direcionados como insumos a outras cadeias produtivas, a exemplo da produção de microalgas as quais se alimentam do  $\text{CO}_2$  e servem para produção de biodiesel, gerando novos resíduos que por sua vez serão reintroduzidos ao processo de produção. No processo, o etanol é produto final e também atua como insumo (álcool) para a produção de

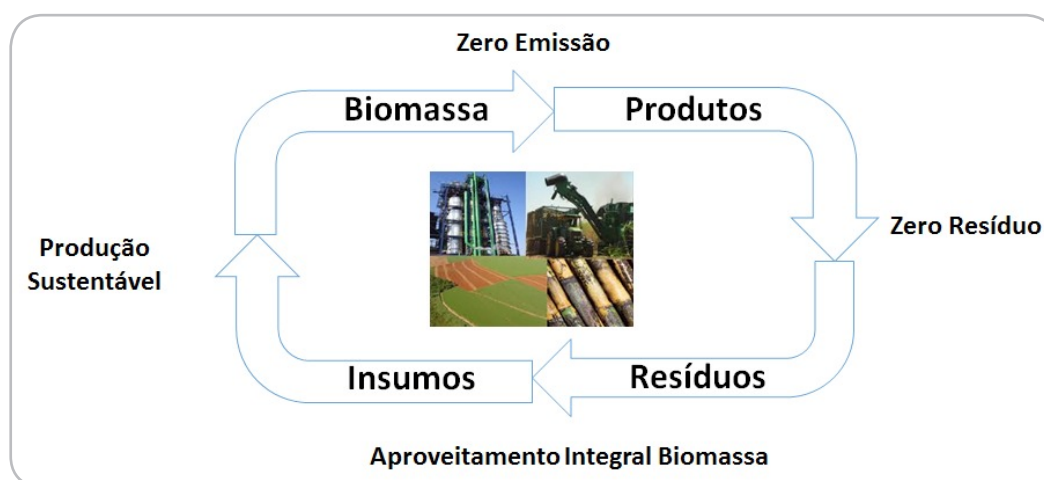


Figura 4. Exemplo de Ciclo Fechado na Agroenergia

Fonte: Elaborada pelos autores

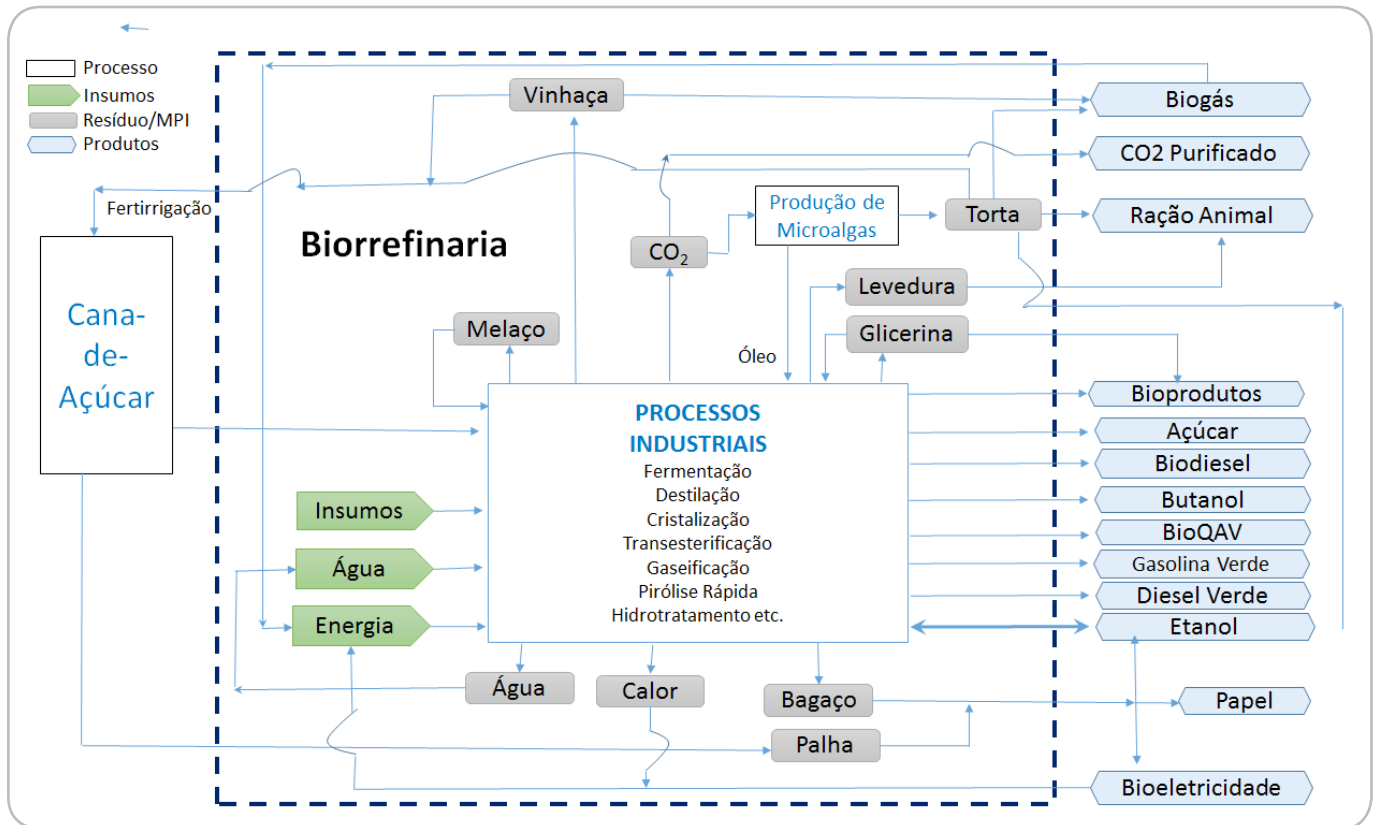


Figura 5. Modelo de Ecologia Industrial Aplicada na Agroenergia

Fonte: Elaborada pelos autores

biodiesel. O bagaço e a palha, além de gerar energia para os processos agrícolas e industriais, podem também ser utilizados para fabricação de papel. A abordagem da biorrefinaria poderia incluir bioproductos a partir do etanol, a exemplo de biomateriais e química fina. Importante ressaltar que o processo industrial apresentado envolve duas cadeias produtivas: bioetanol e biodiesel. Atualmente, existem usinas de biodiesel e usinas de etanol em localizações diferentes. Para que a ecologia industrial possa ser aplicada em sua plenitude, o modelo pressupõe a integração das duas cadeias em única planta industrial e localização física, com equipamentos e processos separados.

## SIMBIOSE INDUSTRIAL NA AGROENERGIA

A simbiose industrial, no contexto da agroenergia, é aplicada a partir da ideia de que é possível organizar todo o fluxo de matéria e de energia que circula no

sistema industrial de maneira a torná-lo um circuito quase fechado. O uso eficiente da biomassa é alcançado utilizando os conceitos de biorrefinarias (discutido no próximo tópico do trabalho), resíduo zero e redução de impactos ambientais. E ainda, por meio da aplicação conjunta de outras ferramentas de EI, como a produção mais limpa, parques ecoindustriais e avaliação do ciclo de vida.

O ciclo fechado da ecologia industrial, apresentado na figura 5, pode ser complementado com uma visão mais abrangente de aproveitamento dos resíduos gerados na cadeia produtiva de agroenergia no contexto regional, nacional ou até mesmo global. Neste aspecto, o uso de princípios da simbiose industrial é aplicado à obtenção de um valor agregado cada vez maior em benefício da sociedade. Seguindo a teoria encontrada em Chertow (2000) e Tanimoto (2004), relacionam-se no quadro 2 os cinco níveis de simbiose que podem ser aplicados em um ciclo fechado de agroenergia, a partir da cana-de-açúcar e das microalgas.

## Quadro 2. Simbiose Industrial e Agroenergia

Teoria da Simbiose Industrial	Exemplo de Aplicação na Agroenergia
<p><b>1 Tipo 1 - Intercâmbio Externo de Resíduos:</b> Caracteriza-se pela reciclagem, doação ou venda de material segregado por meio de um intermediário. A escala de negócios normalmente é local. Envolve um apelo mais ambiental do que econômico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glicerina gerada no processo industrial da produção de biodiesel. É destinada às empresas que possam purificá-la ou transformá-la em bioprodutos.</li> <li>• Venda de bagaço não utilizado pela usina para que outras empresas da região possam gerar bioeletricidade.</li> <li>• Doação de vinhaça entre usinas vizinhas para fertirrigação.</li> </ul>
<p><b>2 Tipo 2 - Intercâmbio Interno de Resíduos:</b> Caracteriza-se pela reciclagem ou reuso interno dos subprodutos dentro da unidade ou em outras empresas pertencentes à própria organização. Ganhos significativos podem ser obtidos quando for considerado o completo ciclo de vida da cadeia produtiva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reuso do melão gerado na produção de açúcar pode ser usado para produção de mais etanol.</li> <li>• Vinhaça reutilizada como fertirrigação nas áreas próximas à usina.</li> <li>• Uso da palha e do bagaço para bioeletricidade ou produção de etanol celulósico.</li> <li>• Reutilização da água residual dos processos de produção de biodiesel e do etanol (as duas cadeias estão integradas dentro da planta industrial).</li> </ul>
<p><b>3 Tipo 3 – Entre Firms e Comunidades Instaladas em Pólos Agroindustriais:</b> Essas empresas localizadas dentro de um polígono delimitado fisicamente trocam entre si desde subprodutos, até mesmo água e energia, e podem fazer uso de informações compartilhadas e serviços de vigilância patrimonial, transporte e marketing.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) gerado no ato de fermentar da fabricação do etanol pode ser usado como matéria-prima para produzir microalgas. Estas, por sua vez, podem ser utilizadas para produção de biodiesel na mesma planta industrial ou por outras empresas da mesma região geográfica da usina de cana-de-açúcar e de biodiesel.</li> <li>• A torta extraída das microalgas pode ser utilizada para produção de biogás na planta industrial ou dentro de empresas situadas na região.</li> </ul>
<p><b>4 Tipo 4 – Entre Empresas e Comunidades não Limitadas Fisicamente:</b> Este intercâmbio considera a simbiose entre firmas já existentes na região e o potencial de cada uma no atendimento às demandas recíprocas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) purificado pode ser matéria-prima para carbonatação de cerveja (estado gasoso), enchimento de cilindros (estado líquido) para empresas químicas fora dos limites da região da usina-de-açúcar (SANTOS <i>et al</i>, 2012).</li> <li>• Glicerina, gerada na produção de biodiesel (mesma planta industrial do bioetanol, porém com processos separados), pode ser utilizada em outras empresas fora da região geográfica que aproveitam esse resíduo para produção de bioprodutos.</li> <li>• Comercialização de torta de microalgas (usadas na produção do biodiesel) e bagaço de cana-de-açúcar como alimentação animal suplementar para pecuaristas da região.</li> </ul>
<p><b>5 Tipo 5 – Entre Empresas e Comunidades Organizadas Virtualmente (sem fronteiras):</b> Permite que os benefícios da simbiose industrial sejam expandidos para a economia regional, na qual o potencial para a identificação de trocas de subprodutos aumenta em virtude do número de empresas que podem ser associadas. Outra vantagem é a adesão de pequenas empresas que podem ser atendidas por transporte rodoviário.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na indústria sucroenergética, o bagaço gerado pode ser comercializado virtualmente, via internet, e transportado para outras regiões com a finalidade de ser utilizado para produção de bioeletricidade.</li> <li>• Exportação da levedura reaproveitada do processo de fermentação. Pode ser utilizada como insumo para outros produtos de fontes renováveis.</li> <li>• Comercialização no mercado nacional ou exportação da glicerina bruta (não purificada) e que foi gerada na produção de biodiesel a partir das microalgas, para servir como insumo de produtos químicos de fontes renováveis.</li> <li>• Comercialização da bioeletricidade pela comunidade local.</li> </ul>



A aplicação da simbiose industrial à agroenergia, considerando os cinco níveis de reaproveitamento de resíduos, resulta em processos mais limpos, prevenção de poluição e fabricação de produtos sem desperdícios. A implicação dessa abordagem está fundamentada na percepção de como os materiais extraídos do meio ambiente para a produção de agroenergia e bioprodutos podem retornar de forma eficiente ao processo produtivo.

## BIORREFINARIAS E ECOLOGIA INDUSTRIAL

As biorrefinarias assemelham-se às tradicionais refinarias de petróleo pela diversidade de produtos que geram na mesma planta industrial: combustíveis, energia, produtos químicos, biocombustíveis e materiais. Elas utilizam a biomassa como matéria-prima e almejam o seu aproveitamento integral. De modo a criar cadeias de valor similares àquelas dos derivados do petróleo, porém com menor impacto ao meio ambiente, visando contemplar sistemas sustentáveis (VAZ JUNIOR, 2011).

Nas biorrefinarias, as tecnologias são compiladas em processos relacionados às chamadas plataformas tecnológicas (plataforma bioquímica,

plataforma química e plataforma termoquímica) em busca do melhor aproveitamento da biomassa e da energia nela contida. Neste sentido, a produção e a industrialização da biomassa permitem produzir, a partir da matéria-prima, uma diversidade de produtos. De forma geral, haverá produtos de grande volume e de baixo valor econômico como a matéria-prima "in natura". Em contrapartida, haverá também produtos de pequeno volume, mas de alto valor agregado (como bioprodutos, especialidades químicas, aditivos etc.) (VAZ JUNIOR, 2011).

No contexto da agroenergia, existe uma relação bem próxima entre a ecologia industrial, e as biorrefinarias, principalmente quanto à busca pela otimização do uso de recursos, aproveitamento integral dos resíduos, maximização dos benefícios econômicos e redução de impactos ambientais. A Figura 6 mostra uma estratégia de integração entre as biorrefinarias e a ecologia industrial. A simbiose industrial, por exemplo, pode ser utilizada em interações com o ambiente em mais tempo e considerada em escala regional. A Avaliação do Ciclo de Vida permite analisar processos e produtos, identificando as fontes diretas e indiretas de geração de resíduos das biorrefinarias. A Produção mais Limpa pode melhorar a eficiência das biorrefinarias, com a análise contínua do processo, substituindo matérias-primas não renováveis

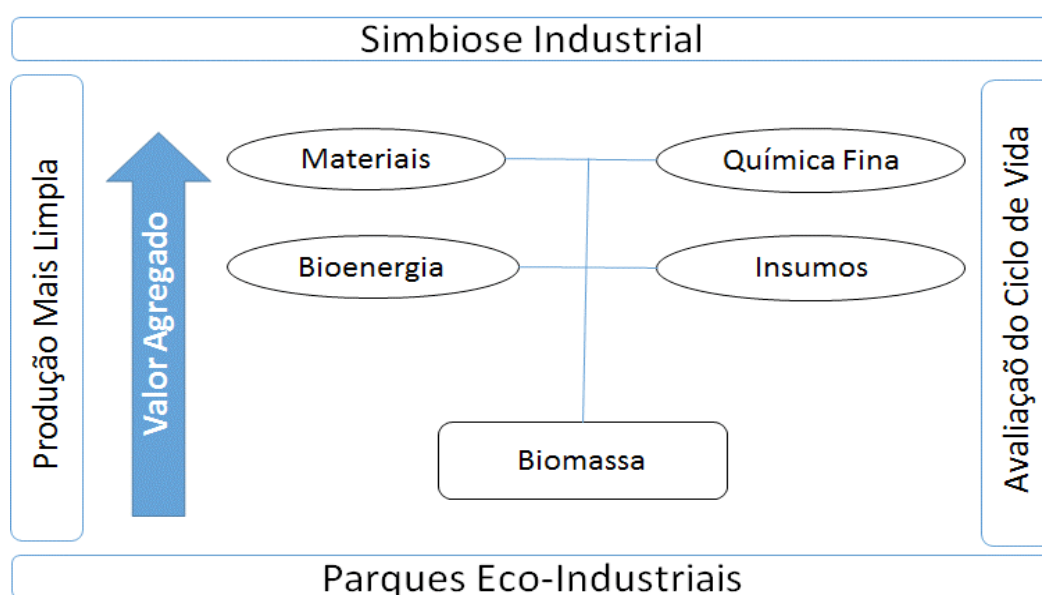


Figura 6. Sinergia Biorrefinarias e Ecologia Industrial.

Fonte: Adaptada de Vaz Junior (2011) e Ayres e Ayres (2002)

por outras renováveis. As biorrefinarias também podem ser ampliadas em um contexto de parques ecoindustriais.

Outro aspecto utilizado pelas biorrefinarias e que tem forte sinergia com a ecologia industrial é a química verde. Segundo os princípios da química verde, os produtos químicos desenvolvidos a partir de coprodutos e resíduos são ambientalmente menos impactantes e constituem alternativa interessante aos petroquímicos.

Os produtos da química verde e das biorrefinarias possuem maior potencial de agregar valor às cadeias produtivas da biomassa, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como petroquímico, farmacêutico, automotivo, construção, agronegócio, cosméticos, etc (VAZ JUNIOR, 2011). A partir dos coprodutos e resíduos da biomassa, criam-se produtos químicos renováveis que podem substituir os petroquímicos como insumos da indústria química.

No entendimento de Santos e Santos (2012), as biorrefinarias viabilizam a criação de produtos sustentáveis e que causam menores impactos ao meio ambiente. Para os autores, as estratégias como a avaliação do ciclo de vida, uma das ferramentas de ecologia industrial, apoiam os estudos de impactos ambientais associados à biomassa, aos produtos, aos processos e aos resíduos das biorrefinarias; identificam oportunidades de redução de impactos ambientais negativos do desenvolvimento de novos produtos e comparam alternativas com menor impacto ambiental dentro das biorrefinarias.

## CONCLUSÃO

O trabalho mostrou que as estratégias e ferramentas da Ecologia Industrial são fatores críticos para melhor aproveitamento da biomassa dentro da cadeia produtiva da agroenergia. Foram abordadas algumas alternativas mais eficientes dos resíduos e das matérias-primas intermediárias das cadeias da cana-de-açúcar e do biodiesel. Além dos produtos diretamente gerados pelo processo

industrial, a exemplo do etanol, açúcar e biodiesel, buscou-se também explorar produtos derivados de resíduos e matérias-primas intermediárias, dentro da lógica de mínimo desperdício de recursos e redução das externalidades e passivos ambientais. Algumas ferramentas de ecologia industrial, como a Avaliação do Ciclo de Vida, a Produção Mais Limpa e a Simbiose Industrial, foram utilizadas em um exemplo prático de ecossistema relacionado à agroenergia. O trabalho também apresentou o relacionamento entre os diversos conceitos da ecologia industrial e as biorrefinarias. Conclui-se que o desenvolvimento da Ecologia Industrial é uma tentativa de prover um novo conceito para melhor entender os impactos de sistemas produtivos no meio ambiente. Essa abordagem auxilia na identificação e posteriormente na implementação de estratégias para a minimização de impactos ambientais de produtos e processos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR ISO 14001**: sistema de gestão ambiental: requisitos com orientações para uso. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 27 p.
- AYRES, R.; AYRES, L. W. **Handbook of industrial ecology**. Northampton: EEPL, 2002.
- BEGON, M; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. **Ecologia de indivíduos a ecossistemas**. Porto Alegre: Artmed, 2008.
- CHERTOW, M. R. The Eco-industrial park model reconsidered. **Journal of Industrial Ecology**, Malden, v. 2, n. 3, p. 8-10, 1998.
- CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, Palo Alto, n. 25, p. 313-337, 2000.
- CHERTOW, M. R. Uncovering industrial symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, Cambridge, v. 11, n. 1, p. 11-30, 2007.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Pollution Prevention (P2)**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/p2/>>. Acesso em: 19 maio 2014.
- GIANETTI, B. G.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Ecologia industrial: conceitos, ferramentas e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2006.
- HASKINS, C. Multidisciplinary investigation of eco-industrial parks. **Systems Engineering**, Malden, v. 9, n. 4, p. 313-330, 2006.

NATURA. Natura inaugura complexo industrial sustentável na Amazônia. Disponível em: <<http://blogconsultoria.natura.net/natura-inaugura-complexo-industrial-sustentavel-na-amazonia/>>. Acesso em: 19 maio 2014.

PECK, S. When is an eco-industrial park not an eco-industrial park. *Journal of Industrial Ecology*, Malden, v. 5, n. 3, p. 3-5, 2001.

RICKLEFS, R. E. **Economia da natureza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2. ed. rev. ampl. Viçosa, MG, 2012.

SANTOS, G. S.; SANTOS, D. T. dos. Aspectos econômicos das biorrefinarias. *Agroenergia em Revista*, Brasília, DF, v. 3, n. 4, p. 35-37, maio 2012.

TANIMOTO, A. H. **Proposta de simbiose industrial para minimizar os resíduos sólidos do Polo Petroquímico de Camaçari**. 2004. 167 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, Bahia.

TANIMOTO, A. H. **A Economia medida pela Análise de Fluxo de Massa (AFM)**. 2010. 154 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, DF.

UNEP. United Nations Environment Programme. **International Declaration on Cleaner Production - Implementation Guidelines for Companies**. Paris: UNEP, 2001.

VAZ JUNIOR, S. (Ed.). **Biorrefinarias: cenários e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2011.

#### Comunicado Técnico, 07

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Agroenergia**  
**Endereço:** Parque Estação Biológica - PqEB s/n,  
Brasília, DF  
**Fone:** (61) 3448-4246  
**Fax:** (61) 3448-1589  
**www.embrapa.br/agroenergia**  
1ª edição 2014

#### Comitê de publicações

**Presidente:** José Manuel Cabral de Sousa Dias.  
**Secretária-Executiva:** Lorena Costa Garcia.  
**Membros:** Maria Iara Pereira Machado, Eduardo Fernandes Formighieri, Larissa Andreani Carvalho, Betania Ferraz Quirino, João Ricardo Moreira Machado, Felipe Brandão de Paiva Carvalho, Sílvia Belém Gonçalves e Diogo Keiji Nakai.

#### Expediente

**Supervisão editorial:** José Manuel Cabral de Sousa Dias.  
**Revisão de texto:** José Manuel Cabral de Sousa Dias e Isabela de Almeida Araújo (estagiária).  
**Editoração eletrônica:** Maria Goreti Braga dos Santos.  
**Normalização bibliográfica:** Maria Iara Pereira Machado.