

# Fechamento de Ciclo de Matéria e Energia no Setor Sucroalcooleiro

## *Closing the Matter and Energy Cycle in the Sugar/Alcohol Sector*

Jessé Moraes Pacheco\*, Debora Nayar Hoff\*\*

\*Mestre em Economia pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU).  
End. eletrônico: jessemp@outlook.com

\*\*Doutora em Agronegócios pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professora adjunta do Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia (IE-UFU).  
End. eletrônico: deborahoff@ie.ufu.br

Recebido em 08.08.13

Aceito em 14.11.13

ARTIGO

### Resumo

O desenvolvimento sustentável precisa ser encarado com o entendimento das múltiplas relações causais entre meio ambiente e os atores do sistema. Em sistemas agroindustriais, isso urge devido à dependência entre processos de produção, qualidade dos ecossistemas, regimes climáticos e condições físico-químicas do solo. O objetivo deste estudo é organizar, com base nos estudos publicados sobre o tema, os fluxos de Matéria e Energia já identificados para o setor sucroalcooleiro, apresentando um panorama geral de seu grau de fechamento de ciclo. Então, apresenta-se uma pesquisa descritiva com uso de fontes secundárias de dados e informações. Destacam-se nos resultados: i) reutilização do bagaço para cogeração de energia; ii) alta taxa de reutilização de água, que possibilita baixa captação deste insumo da base de recursos hídricos; e iii) possibilidade de tratamento da vinhaça, torta de filtro e cinzas, orientadas aos processos de fertirrigação e/ou biodigestão.

**Palavras-chave:** simbiose Industrial, setor sucroalcooleiro, Ecologia Industrial, fechamento de ciclo.

### Abstract

The sustainable development must be seen from the understanding of the multiple relation that occurs between the natural environment and the other actors of the system. In agroindustrial systems, this is a serious issue because of the close dependence between production processes and natural elements. The objective of this paper is to organize, from other published studies, the main energy and material flows already identified within the sugarcane sector. Then, it present an overview of the degree of closing cycle regarding that sector. This work is an descriptive research that uses secondary data and the results demonstrates: i) the high rates of reutilization of bagasse of sugar cane and water allows the cogeneration of energy and the low capitation of water from natural resources; ii) the possibility of treatment for by-products allows the reutilization in other processes, as biodigestion and fertigation.

**Keywords:** Industrial Symbiosis, Sugar and ethanol complex, Industrial Ecology, Closing Cycle.

## 1 Introdução

O desenvolvimento sustentável precisa ser encarado com base no entendimento das múltiplas relações causais entre meio ambiente e os atores que compõem o sistema. Aos agentes econômicos, sobretudo na sociedade industrial contemporânea, cabe a ressignificação das relações entre produção, consumo e base de recursos naturais. Ressalta-se a relevância que adquire a Ecologia Industrial (EI) em um contexto em que a sociedade exige planos e ações de cunho mais pragmático, para dar uma resposta rápida e concreta aos problemas cada vez mais manifestos em termos de poluição industrial e depleção de recursos naturais. A análise e posterior otimização de fluxos de matéria e energia (ME) dentro da cadeia produtiva, seus usos e reúsos, são elementos que contribuem para a melhoria da relação indústria-natureza.

Em sistemas agroindustriais, tal necessidade é ainda mais urgente, dada a dependência entre os processos produção e a qualidade dos ecossistemas locais, regimes climáticos e condições físico-químicas do solo. Isso aplica-se perfeitamente ao setor sucroalcooleiro, objeto de análise deste artigo. Inseridos em mercados amplos e altamente dinâmicos, os tomadores de decisão do referido setor agroindustrial necessitam agir de modo a respeitar os novos quadros institucional e mercadológico<sup>1</sup> que emergem em resposta à questão ambiental. Isso posto, uma das formas de se analisar como o setor se comporta perante as problemáticas ambientais é observando-o à luz da EI.

Este trabalho é inspirado pela seguinte problemática: como o setor sucroalcooleiro<sup>2</sup> comporta-se no que diz respeito ao fechamento de ciclo de matéria e energia à luz da Ecologia Industrial? A hipótese é de que o setor sucroalcooleiro, com vistas a responder a pressões mercadológicas e institucionais, vem atuando de maneira a reduzir a dependência de recursos naturais por meio de uma série de ações e inovações técnicas nos vários elos do setor. Isso traduz-se em maior fechamento do ciclo de matéria e energia graças ao reuso de uma série de subprodutos oriundos do processo de produção de açúcar e etanol.

O objetivo deste artigo é organizar, com base em estudos publicados sobre o tema, os fluxos de matéria e energia já identificados para o setor sucroalcooleiro, apresentando um panorama geral de seu grau de fechamento de ciclo. Para tanto, apresenta-se brevemente os pressupostos gerais da Ecologia Industrial enquanto corpo teórico-conceitual alternativo, o qual indica a redução de impactos ambientais graças à reutilização de matéria e energia dentro das unidades industriais (e destas com outras).

## 2 A Ecologia Industrial

A EI insere-se dentro de arcabouços mais gerais ligados à sustentabilidade – a exemplo do ambientalismo renovado discutido em Egri e Pinfield (2001). A novidade



dessas abordagens exprime-se no esforço da sociedade industrial em colocar o meio ambiente natural nos processo de tomada de decisão e, “nessa perspectiva, a tecnologia é o veículo para o progresso científico e econômico, bem como o meio para detectar e gerenciar os riscos ambientais que ameaçam a sobrevivência humana e seu bem-estar” (EGRI; PINFIELD, 2001, p. 372).

Campos de investigação e proposição como a EI ganham importância, na medida em que, uma vez entendidos o comportamento e a natureza de fluxos de matéria e energia, seria possível ampliar a eficiência de sua utilização, rumo a “sistemas de produção ambientalmente sustentáveis” (EGRI; PINFIELD, 2001, p. 372). Na concepção de Allenby (1992), a EI é um dos meios pelos quais o desenvolvimento sustentável pode ser abordado, com base no entendimento sistêmico da atividade econômica e suas relações com os sistemas biológicos, químicos e físicos.

Essas abordagens abrem margem para a incorporação dos diversos atores relacionados ao processo de tomada de decisão “tanto nas negociações como nas implementações de ações ambientalmente instruídas” (EGRI; PINFIELD, 2001, p. 380). Corroborando a ideia, Korhonen (2001a) sustenta que os problemas ambientais também são construções sociais, na medida em que é com base nos atores sociais que emergem as estratégias de ação envolvendo as questões ambientais. Somente após passarem pelo filtro da sociedade, por meio da observação, é que são elencados e encarados tais problemas.

Inserido no Paradigma Centrado na Sustentabilidade, a EI fornece, na *analogia* como os ecossistemas naturais, uma série de elementos teórico-conceituais que permitem uma abordagem mais pragmática – e mesmo mais progressista – para as externalidades advindas do processo de crescimento industrial. Tal abordagem inspira estratégias promotoras da redução dos impactos ambientais causados pela indústria, por meio de analogias com os sistemas naturais, ao considerar que o sistema industrial não está isolado de outros, mas inserido em outro, muito maior e complexo.

Enquanto o campo de investigação é um enfoque relativamente recente, oficialmente, a EI ganha relevância e interesse por parte da academia e de empresários somente a partir do final dos anos 1980. O trabalho de Frosch e Gallopoulos (1989) é considerado pela literatura como o artigo seminal do enfoque da Ecologia Industrial e da estratégia de ecossistemas industriais. Os autores, especialmente envolvidos com as questões industriais, sugeriram que a atividade industrial inserisse-se em um modelo mais integrado, de forma a reduzir o impacto sobre o meio ambiente.

O ambiente contemporâneo em que as firmas inserem-se é dinâmico. Isso exige abordagens que busquem soluções para além dos limites da indústria, da região, do país ou da cultura vigente. Andrews (1999) fornece uma bem colocada visão da abordagem proposta pela Ecologia Industrial. Segundo a sua análise, pode-se afirmar que os termos “holístico”, “sistêmico”, “visão quanto ao longo prazo” são aplicáveis

à EI. Em sua reflexão, a EI possui uma visão sistêmica dos impactos da utilização de matéria e energia (ME) nas sociedades industriais. O autor defende que a indústria talvez seja o ator ambiental mais relevante dentre os agentes econômicos e, por isso, deve ser o centro de qualquer análise. Andrews (1999) reforça a ideia de que a abordagem predominante dentro da EI é de analogia com o que ocorre na natureza, defendendo o manejo de materiais diversos por meio de caminhos alternativos como melhorias de *design*, reutilização, remanufaturamento e reciclagem.

Lifset e Graedel (2002) elencam quatro princípios que norteiam a abordagem da Ecologia Industrial: i) a utilização de uma perspectiva de ciclo de vida; ii) utilização de uma análise de fluxos de matéria e energia; iii) utilização de um modelo sistêmico; e iv) simpatia por formas de análise e pesquisa multi e interdisciplinares.

Despeisse *et al.* (2012) retomam essas questões. Esses autores concordam que a indústria é um grande viabilizador de mudanças; ressaltam a importância da EI para a redução dos impactos ambientais e dependência de recursos naturais. Ao mesmo tempo, sublinham o fato de a EI ser versátil o bastante para fornecer instrumentos de análise em vários níveis. Consideram que a análise ao nível da firma (micronível) é absolutamente relevante por permitir observar interações entre os componentes de determinada firma, enfatizando os fluxos de ME entre estes. Com base nisso, seria possível identificar as melhorias em termos de produtividade na utilização dos recursos que geram impactos positivos na “performance ambiental de um sistema produtivo” (DESPEISSE *et al.*, 2012, p. 32).

De acordo com o modelo conceitual proposto pelos autores, analisando os fluxos de processos com base em uma visão sistêmica (ecossistêmica, no caso), é possível identificar soluções para a redução do impacto ambiental ao mesmo tempo em que se geram ganhos econômicos. Para tanto, é imprescindível apreender as redes de ME que ligam os vários elos do processo. O importante “é a produtividade global dos recursos e como eles circulam dentro do sistema, em vez da eficiência de processos ou tecnologias individuais” (DESPEISSE *et al.* 2012, p. 35).

## 2.1 Fechamento do ciclo de matéria e energia

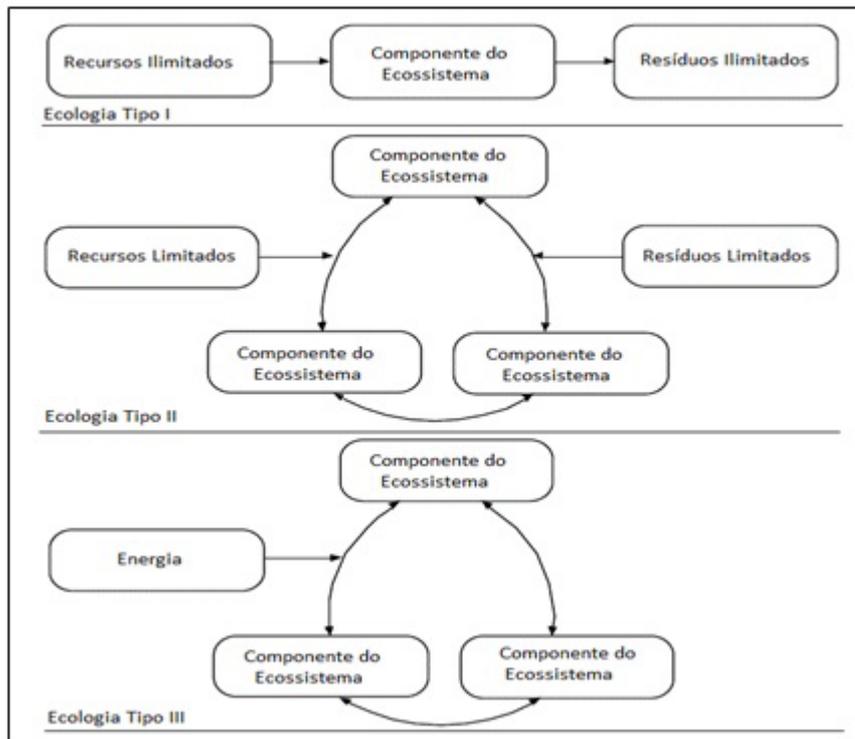
É importante ter em perspectiva que a EI busca o que se entende por *fechamento do ciclo de matéria e energia* (FCME). O ciclo de matéria e energia (CME) “pode ser visualizado em termos de um sistema de compartimentos contendo *estoques* de um ou mais nutrientes, ligados por certos *fluxos*” (AYRES, 1994, p. 25, grifos no original). Um sistema pode ser considerado totalmente fechado se não há fontes externas de recursos ou resíduos, ou seja, se os estoques em cada compartimento são constantes. Tal característica implica em que os *inputs* de cada compartimento devam ser balanceados pelos *outputs*. Se essa condição não for respeitada para dado compartimento, logo o estoque de alguns compartimentos aumenta, enquanto o de outros diminui<sup>3</sup>.



Com base em Allenby (1992) e Jelinski *et al.* (1992), a Figura 1 demonstra esquematicamente, numa analogia com um sistema biológico, como se comportaria um modelo industrial tradicional vigente desde a Revolução Industrial, estabelecido mundialmente, em especial ao longo do século XX, como panacéia para o desenvolvimento (o *modelo linear* de utilização de energia e recursos ou a ecologia tipo I). O modelo linear é utilizado como ilustração de formas ineficientes de metabolismo, a exemplo das formas mais primitivas de vida; demonstra que não há ligação entre os fluxos de matéria e energia entre uma fase e outra do processo. Krones (2007) sublinha que não há preocupação quanto à escassez de recursos ou destino final dos subprodutos do processo; os recursos são considerados ilimitados e as consequências do despejo de resíduos são desconsideradas.

Alternativamente, há o que propõe a ecologia tipo II com o modelo *quasi-cíclico* do fluxo de energia e matéria. Conforme também se vê na Figura 1, os recursos são considerados limitados e há alguma preocupação com a disposição dos resíduos. Graedel (1994) afirma que, em um ambiente de restrições – com base de recursos limitada –, o sistema evolui para um modelo mais complexo e menos dissipativo. Percebe-se maior interação entre os entes do sistema, uma vez que recursos são limitados e os agentes vêem-se na necessidade de realizar trocas. Conforme ressaltam Jelinski *et al.* (1992), tal sistema é muito mais eficiente que o do tipo I; o esquema pode ser observado, pelo menos em parte, em alguns setores industriais. Os autores sublinham, ainda, que há um movimento visível de convergência rumo a um padrão industrial mais semelhante ao tipo II, fugindo dos modos de operação lineares nos CME

**Figura 1 – Modelos de Ciclo de Matéria e Energia**



**Fonte: Elaboração própria com base em Allenby (1992)**

Contudo, assim como em Graedel (1994), em Jelinski *et al.* (1992) há o sentimento de que o esquema tipo II não é totalmente sustentável em razão de os fluxos ainda se orientarem em uma única direção. Para serem realmente sustentáveis, “ecossistemas biológicos evoluíram para algo completamente cíclico na natureza, com ‘recursos’ e ‘resíduos’ sendo indefinidos, uma vez que os resíduos de um componente do sistema representa os recursos de outro” (JELINSKI *et al.*, 1992, p. 793).

O que Jelinski *et al.* (1992) discutem nas últimas linhas do parágrafo acima é o *fluxo cíclico* de matéria e energia. Ali, o caráter cíclico foi atingido por meio de uma complexa teia de interações entre agentes e ecossistemas distintos, que, por sua vez, aproveitam apenas um *input* de energia – a radiação solar. Krones (2007) relaciona tal modelo a um setor esforço de reciclagem que estaria em consonância com as máximas da termodinâmica (considerando isso, o único sistema possível de ser alcançado é o *quasi-cíclico*), sendo necessários poucos recursos e energia solar – elementos exógenos – para manter o sistema em funcionamento. Assim, Krones (2007, p. 20) complementa a questão com pertinência, ao afirmar que “a transição rumo a uma estrutura industrial [relativamente mais fechada] é um problema tanto socioeconômico quanto tecnológico”.

## 2.2 A Simbiose Industrial

Também com base nas considerações feitas a respeito do processo de FCME, Graedel (1994) afirma que a EI busca aprimorar a utilização de matéria e energia na indústria, rumo ao tipo II ou III, por meio de interação dos fluxos dos agentes envolvidos, *num processo de simbiose*. Daí a centralidade da **simbiose industrial** (SI) em EI: é a com esta que se torna possível operacionalizar o fechamento do ciclo, reaproveitando os fluxos gerados no “metabolismo da indústria”<sup>4</sup> em uma relação de mutualismo. Tal como no conceito biológico, a SI relaciona-se à cooperação entre atores geograficamente próximos, trocando ou compartilhando *subprodutos*, estruturas físicas, informação, energia etc., de maneira beneficentemente mútua: “trabalhando juntas, as firmas empenham-se em obter benefícios coletivos maiores do que a soma dos benefícios que obteriam se trabalhassem de maneira individual” (CHERTOW, 2000, p. 314).

Chertow (2004) destaca que a simbiose industrial deve ocorrer em nível local e regional. Grandes distâncias entre os agentes representam um desincentivo, pois se ampliam os custos ou reduz-se o aproveitamento potencial em razão da especificidade dos materiais que são trocados – a exemplo de calor e vapor, que se dissipam rapidamente, ou água suja, que necessita de tubulações especiais; trocar esses elementos não é eficiente além dos limites locais e regionais. Com base nas constatações de que a SI deve ocorrer em uma escala espacial específica, Chertow (2004) elabora uma taxonomia para os tipos de relação simbiótica que podem ocorrer com vistas ao fechamento de ciclo de matéria e energia. Considerando aspectos organizacionais e espaciais, tal tipologia pode ser vislumbrada no Quadro 1.

Dentre as oportunidades advindas da relação SI – a exemplo dos ganhos em termos de negócios ou regularidade na disponibilidade de alguns tipos de recursos –, Chertow (2007) destaca três que, em sua concepção, são centrais: i) *reutilização de subprodutos* em substituição ao uso de matéria prima adquirida fora da relação (e.g. via mercado); ii) *compartilhamento de estruturas físicas*, uma vez que a infraestrutura existente pode servir ao uso de todos os envolvidos na relação; e iii) *prestação conjunta de serviços*, em termos de satisfação de necessidade comuns aos envolvidos.

**Quadro 1 – Tipos de Simbiose Industrial**

<b>Tipo de troca</b>	<b>Características</b>
Tipo 1 - Trocas de resíduos simples	Foco em produtos já no fim da vida-útil (e.g. doação de roupas, coleta de metais e papéis usados) Não há escala específica para ocorrerem as trocas (global, regional, local); Foco em troca de matéria - não se troca água ou energia Ocorre dentro das bordas de uma firma, não envolvendo agentes externos; Explora a reutilização e a reciclagem; Ocorre com mais frequência em grandes firmas; Considera ciclo de vida do produto, de processos e serviços
Tipo 2 - Dentro da firma	Firmas distintas espacialmente concentradas dentro das bordas de um parque trocam energia, matéria e água; Essa relação pode ir além e envolver troca e compartilhamento informação, serviços, transporte, marketing, etc. Pode envolver parceiros além das bordas do parque;
Tipo 3 - Entre firmas co-localizadas em um parque industrial	Comporta-se, em linhas gerais, como no tipo 3, contudo, os agentes envolvidos não são vizinhos próximos, mas estão localizados em uma área limitada (e.g. uma área urbana)
Tipo 4 - Entre firmas locais que não estão co-localizadas em um parque	Esse tipo de simbiose depende mais de vínculos "virtuais" que os de co-localização; Envolve maior número de empresas e setores; Insere-se em uma área geográfica maior, o que abre margem para arranjos regionais mais diversificados e integrados.
Tipo 5 - Entre firmas organizadas em uma região	

Fonte: Elaboração própria com base em Chertow (2004)

O conceito de *roundput* está estritamente relacionado ao FCME, conforme proposto pela Ecologia do tipo III (Figura 1). Ecossistemas naturais conseguem manter o fluxo de energia e matéria em um ciclo fechado, de modo que o subproduto do metabolismo de determinado organismo é aproveitado como *input* para o metabolismo de outros. Nesse caso, o reaproveitamento de energia acontece por meio de um fluxo “em cascata” entre as cadeias alimentares, iniciado por um *input* primário, a energia solar. Em suma, o *roundput* é relacionado à propriedade de determinado sistema em reaproveitar fluxos de energia por meio de um fluxo em cascata, permitindo-o agir em um ciclo fechado. No sistema industrial, o *roundput* promove uma das características mais marcantes de um ecossistema industrial<sup>5</sup>: a utilização de resíduos materiais e energéticos, diminuindo a dependência de recursos naturais não renováveis.

### 3. Considerações Metodológicas

Este trabalho adota a *pesquisa descritiva* para alcançar os objetivos. Utilizam-se *dados secundários* obtidos em levantamentos bibliográficos e documentais de fontes diversas<sup>6</sup>, caracterizando um *método de pesquisa qualitativo*. A análise dos FME é feita com base em um modelo estruturado no esquema da Ecologia Tipo II, apresentada na Figura 1. A referida representação estabelece a existência de componentes do sistema, recursos de entrada e recursos de saída. Considerando o setor sucroalcooleiro, os componentes do sistema são: Lavoura, Usina e Usuários de produtos advindos do setor. Consideram-se como recursos de entrada cana-de-açúcar, água e energia (elétrica, mecânica e térmica). Os recursos de saída são os produtos e subprodutos gerados no processamento dos recursos de entrada – apresentados na Figura 2 (bagaço, vinhaça, torta de filtro, leveduras e palha). Estes são caracterizados com indicações de quais ações existentes atualmente permitem o fechamento dos ciclos de ME.

O balanço energético e material é feito com base nos resultados de estudos prévios, de forma isolada, sobre as etapas do processo de produção característico do setor. Nessa reorganização das informações, faz-se um esforço de qualificar e quantificar dos recursos de saída que são reaproveitados pelos componentes do sistema, dando ênfase aos componentes “usina” e “lavoura”. Os números apresentados têm como base o processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar (estão todos disponíveis nas fontes referenciadas da Figura 4).

### 4. O Setor Sucroalcooleiro

O setor sucroalcooleiro atual é herdeiro de uma tradição secular advinda do auge do ciclo da cana-de-açúcar no Brasil-colônia a partir do século XVI. A planta, de origem asiática, encontrou nos solos brasileiros potencial para tornar-se a base de uma cadeia produtiva importante, condicionando os rumos da exploração econômica colonial. Já em fins do século XX, a cana-de-açúcar volta a ter relevância econômica ao fundamentar um novo setor industrial, baseado em uma diversidade de produtos. A evolução tecnoprodutiva permitiu ao setor, ainda na década de 1980, produzir o

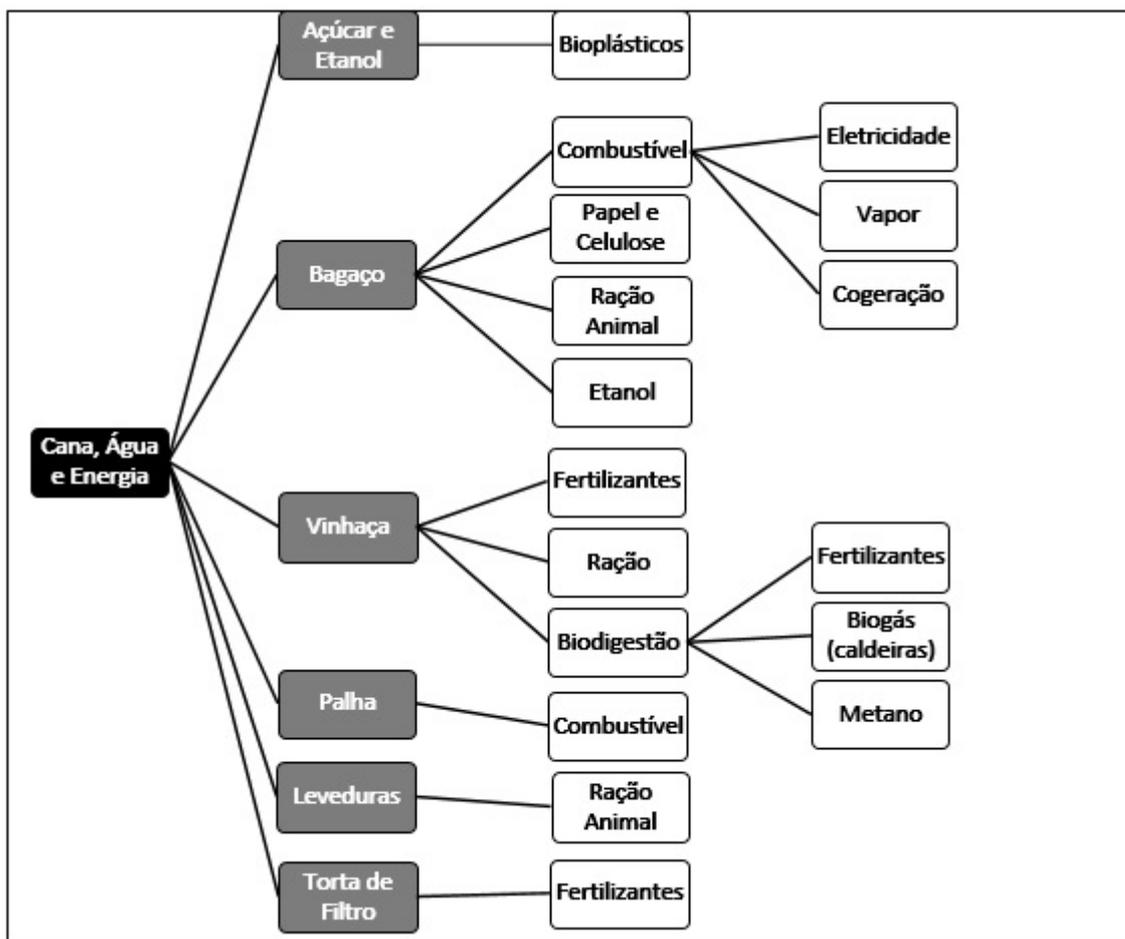
álcool combustível em escalas industriais, graças a iniciativas como o Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool).

Após alguns anos de estagnação – especialmente durante a década de 1990 – o setor, atualmente, beneficia-se uma vez mais da evolução tecnológica e institucional (a exemplo das inovações nos ramos da Química, da Mecânica, da Agronomia, os aspectos relacionados ao marco legal que regulamenta o setor e mesmo as pressões por matrizes energéticas mais limpas) que permitiu, a um só tempo: *i)* ganhos em produtividade na produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar; *ii)* ampliação da demanda por combustível e açúcar em função do advento dos motores automotivos do tipo *flex* e da alteração do perfil de consumo de alimentos em várias partes do mundo; *iii)* evolução de processos inerentes à cadeia produtiva, rumo a um padrão de produção mais eficiente e limpo, a exemplo da reutilização de subprodutos dentro da própria cadeia, reduzindo externalidades ambientais; e *iv)* diversificação dos produtos derivados da cadeia produtiva sucroalcooleira, com produtos mais sofisticados como o etanol celulósico, leveduras, polímeros, solventes e créditos de carbono – permitidos graças à evolução institucional no campo da proteção ambiental.

É esse setor, eficiente do ponto de vista econômico, que surge a partir do início da primeira década do século XXI. Conforme Souza e Macedo (2009), tal eficiência pode ser observada com o seguinte: para o ano de 2008, o setor gerou um produto valorado em cerca de US\$ 28 bilhões – cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional – movimentando, ao longo de todos os elos do setor, US\$ 86 bilhões. Aproximadamente 24% desse valor é produzido antes da e na fazenda, ajudando a dinamizar setores diversos, como o de fertilizantes e produtos químicos, autopeças, veículos tratores, implementos agrícolas, combustível, equipamentos diversos, construção civil e automação. Os 76% restantes do valor movimentado advêm do processo de transformação e agregação de valor após a fazenda, beneficiando setores relacionados à produção e serviços (equipamentos industriais, serviços de manutenção, produtos químicos, sacarias, materiais de laboratório, processos de pesquisa e desenvolvimento, automação e instrumentação etc.).

Os principais insumos, produtos e subprodutos do setor sucroalcooleiro são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Alguns insumos, produtos e subprodutos do setor sucroalcooleiro



Fonte: Elaboração própria

#### 4.1 O insumo água

Pode-se afirmar que o processo produtivo do setor sucroalcooleiro é intensivo na utilização de água. De acordo com ANA *et al.* (2009), considerando uma usina média que destina 50% da cana-de-açúcar processada à produção de etanol e 50% à produção de açúcar, a demanda por água (líquida e vapor) chega a 22 m<sup>3</sup> por tonelada de cana-de-açúcar (Tabela 1). Esse número muda conforme o tempo e a tecnologia adotada, comportando-se de maneira decrescente ao longo do tempo e alternando-se pouco de usina para usina. Destaca-se que grande parte da demanda de água advém das fases de transformação do caldo em açúcar e etanol: a fábrica de açúcar demanda 38% da água utilizada, ao passo que os processos relacionados exclusivamente ao etanol (fermentação e destilaria) usam 37%. As outras fases do processo produtivo, juntas, demandam ¼ da água total.

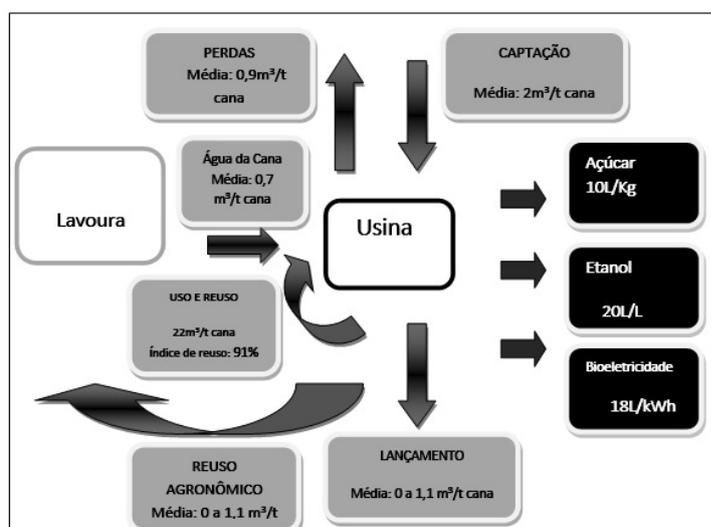
Tabela 1: Uso médio de água no processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar

Setor/Processo	Consumo (m <sup>3</sup> /t)	%
Alimentação, preparo e extração (lavagem da cana, embebição, resfriamentos, etc.)	2,61	11,80
Tratamento de caldo	0,57	2,60
Fábrica de açúcar	8,36	37,80
Fermentação	4,36	19,70
Destilaria	3,86	17,40
Geração de energia	2,26	10,20
Outros (consumo humano, limpeza, etc.)	0,08	0,40
<b>Total</b>	<b>22,12</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaboração própria com base em ANA *et al.* (2009, p. 69)

Apesar de demandar 22 m<sup>3</sup> de água por tonelada de cana-de-açúcar, o setor possui uma **alta taxa de reúso** – 91% a 95%, segundo ANA *et al.* (2009) – em razão da natureza relativamente simples dos processos de tratamento dos efluentes líquidos. Tal aspecto faz cair o *consumo efetivo* de água a níveis muito baixos: a retirada efetiva de água dos depósitos de superfície é de aproximadamente 2 m<sup>3</sup> por tonelada de cana-de-açúcar, sendo que, nas usinas mais eficientes, esse número chega a 1 m<sup>3</sup>/t<sup>7</sup>. A Figura 3 demonstra o balanço médio global da utilização de água nas usinas do setor sucroalcooleiro, colocando as quantidades médias de água utilizadas em alguns processos.

Figura 3: Balanço global de água no processamento de 1t de cana-de-açúcar



Fonte: Elaboração própria com base em ANA *et al.* (2009, p. 184)

## 4.2 O insumo energia

No que se refere ao insumo *energia*, ressalta-se o potencial de autossuficiência das unidades industriais do setor. Toda a energia consumida no processo “pode ser provida por um sistema de produção combinada de calor e potência (sistema de cogeração) instalado na própria usina, utilizando apenas bagaço como fonte de energia” (BNDES; CGEE, 2008, p. 82) – o que será discutido no próximo tópico. A demanda de energia no processamento da cana-de-açúcar pode ser subdividida em três tipos: *i)* térmica (que fornece vapor e aquecimento para os processos); *ii)* mecânica (para o acionamento de sistemas de preparo e moagem da cana-de-açúcar); e *iii)* elétrica (que alimenta motores e equipamentos diversos, serve para a iluminação etc.). Resumem-se alguns aspectos relacionados à demanda de energia na Tabela 2:

**Tabela 2: Demanda de energia para o processamento de 1t de cana-de-açúcar**

Energia	Unidade	Açúcar	Bioetanol Hidratado	Bioetanol Anidro
Térmica (vapor)	Kg/t cana	470-500	370-410	500-580
Mecânica	KWh/t cana	16	16	16
Elétrica	KWh/t cana	12	12	12

Fonte: BNDES; CGEE (2008, p. 82).

## 4.3 Bagaço e Bioeletricidade

Entrando na análise dos subprodutos do setor e como este utilizam-nos com vistas a fechar o ciclo de matéria e energia, ressalta-se a preponderância do bagaço da cana-de-açúcar em tais estratégias. O processamento industrial da cana-de-açúcar necessita, como já ressaltado, três tipos de energia. A cogeração é um processo que permite a geração dos três com a queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras de alta pressão (BNDES; CGEE, 2008).

O sistema de cogeração já se consagra como aspecto estratégico dentro das usinas, uma vez que permite, a um só tempo, a *autossuficiência* em termos de energia elétrica e, eventualmente, *oportunidade extra de negócio*, dado que o excedente produzido pode, no caso do Brasil, ser negociado e cedido às concessionárias do sistema elétrico nacional ou mesmo para consumidores livres (e.g. outras indústrias). Considerando o ano de 2010, a eletricidade produzida com a biomassa de cana-de-açúcar respondia por 5% da matriz brasileira de geração, sendo maior que a capacidade de geração combinada de fontes como a nuclear (1,7%), eólica (0,7%) e carvão mineral (1,3%) (CONAB, 2011). Para a safra de 2009/2010, foram gerados aproximadamente 20 terawatts (20 milhões de megawatts). Considerando todo o período da safra (218 dias, ou 4,468 mil horas), a geração chegou a cerca de 4,3 mil megawatts por hora. A região Centro-Sul responde por 90,7% do total

produzido de energia elétrica por biomassa de cana-de-açúcar, sendo que apenas o estado de São Paulo produz 63,1% do total do País

Os dados de CONAB (2011) mostram que, aproximadamente, 25% a 27% da cana-de-açúcar transforma-se em bagaço. Desse total, 91% é destinado à cogeração. Na safra 2009/2010, foram gerados 166,7 milhões de toneladas de bagaço, sendo que a produção média de energia elétrica de uma usina brasileira típica foi de 50,971 mil megawatt-hora (mWh).

A cogeração também serve à agregação de valor à cana-de-açúcar: A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011) estima que haveria um acréscimo de 6,3% nas receitas por tonelada de cana-de-açúcar – uma empresa que produz apenas açúcar e etanol conseguiria auferir uma receita de R\$ 72,94 por tonelada de cana-de-açúcar processada, ao passo que, com a cogeração, esse número subiria para R\$ 77,84. A despeito disso, uma parte substancial das usinas ainda não comercializa energia elétrica. A CONAB (2011) aponta que 71,8% das usinas brasileiras produzem energia por cogeração apenas para consumo próprio. Desse universo, a grande maioria das firmas é de pequeno ou médio porte, sugerindo um quadro de inserção de grandes unidades industriais dentro do esquema geral de comercialização da bioeletricidade.

É razoável afirmar que há uma oportunidade interessante de suprimento de energia elétrica para o sistema nacional de distribuição advindo do potencial de geração das usinas brasileiras: muitas usinas ainda não estão totalmente integradas ao sistema de cogeração além da possibilidade de ampliação da capacidade de geração via técnicas e equipamentos mais eficientes. Estimativas da CONAB (2011) demonstram que, caso todo o potencial de uso do bagaço fosse utilizado, poderia haver um incremento de 99,4% no total de energia produzido; em vez dos 20 terawatts gerados na safra 2009/2010, o número poderia ter chegado aos 39,9 terawatts. Um resumo desse cenário pode ser observado no Quadro 2:

**Quadro 2: Algumas características da cogeração com a biomassa de cana-de-açúcar**

<b>Permite a autossuficiência das usinas e comercialização de excedentes</b>	A partir da queima de um sub-produto, é possível gerar energia térmica, elétrica e mecânica para os processos industriais.
	Gera excedentes da ordem de 10 a 150 kWh por tonelada de cana-de-açúcar. Podem ser comercializados com o sistema nacional de distribuição ou consumidores livres.
<b>Energia renovável, relativamente limpa e eficiente</b>	Mais eficiente se comparado à outras formas de geração termelétricas (co-geração aproveita 85% do combustível, contra 30% a 50% das termelétricas convencionais).
	Menor impacto ambiental se comparado a outras formas (hidrelétricas, termelétricas a base de petróleo, etc.).
	Proporciona geração de créditos de carbono pelas emissões evitadas.
<b>Complemento ao ciclo hidrológico e à oferta de energia elétrica</b>	O período de co-geração, coincide com o período de seca dos reservatórios das usinas hidrelétricas do centro-sul, complementando a oferta de energia.
<b>Localização geográfica da oferta</b>	O centro dinâmico da produção sucroenergética está relativamente próximo ao "coração" do sistema elétrico interligado.
<b>Tempo de construção</b>	Tempo reduzido de instalação dos equipamentos de co-geração, se comparado à grandes usinas hidrelétricas
	Processo de licenciamento ambiental é menos complexo
<b>Natureza do projeto</b>	Projetos de menor porte, menor risco, etc.
	Fortalece indústria nacional de equipamentos.
	Promove geração de emprego.
<b>Desafios</b>	Inovações de processo rumo a maior eficiência energética (técnicas com utilização de turbinas e gaseificadores) poderiam elevar o excedente produzido a 180kWh por tonelada de cana-de-açúcar.
	Uso de pontas, palha e folhas como combustível adicional à biomassa.
	Infraestrutura: conexões elétricas, caldeiras, etc. mais acessíveis
	Aprimoramento de aspectos regulatórios para geradores e distribuidores

Fonte: Elaboração própria com base em BNDES; CGEE (2008) e Neves; Conejero (2010)

#### 4.4 Outputs do setor

A **vinhaça** é um subproduto relacionado à produção de etanol, derivado do processo de fermentação alcoólica do mosto (que advém do caldo); possui “elevada quantidade de matéria orgânica, altas concentrações de sólidos (2,5% em média), sendo reaproveitável como fertilizante pela riqueza em potássio e pelos teores de nitrogênio e micronutrientes interessantes para o solo agrícola” (ANA *et al.*, 2009, p. 167). Como é retirada do processo a altas temperaturas (aproximadamente 90°C), é utilizada para aquecer alguns fluidos, diminuindo a necessidade de energia térmica e elétrica no processo de produção, ao mesmo tempo em que se reduz sua temperatura para posterior uso na fertirrigação. A taxa de produção de vinhaça é, em média, de 12 litros por litro de etanol – variando de 7 a 18 l por litro de etanol (ANA *et al.*, 2009) ou 800 a 1.000 l por tonelada de cana-de-açúcar processada (BNDES; CGEE, 2008). O volume aplicado na fertirrigação depende do tipo de solo e das necessidades do tipo de cana-de-açúcar, mas varia entre 100 a 300 m<sup>3</sup> por hectare.

É razoável admitir que a fertirrigação da lavoura de cana-de-açúcar, com base na vinhaça e em outros efluentes líquidos, seja um dos processos responsáveis pela reduzida necessidade de lançamento de resíduos nos recursos hídricos. Ao mesmo tempo, vislumbra-se a possibilidade de reduzir progressivamente o volume de vinhaça gerado nos processos técnicos específicos – a exemplo de inovações relacionadas à otimização da fermentação e recirculação de parte da vinhaça com reaproveitamento da parte líquida desta (ANA *et al.*, 2009).

BNDES e CGEE (2008) destacam, ainda, a possibilidade de biodigestão da vinhaça em biogás e eletricidade, o que permitirá gerar excedentes elétricos da ordem de 170 kWh por metro cúbico de etanol produzido – ANA *et al.* (2009) calcula 142 kWh/m<sup>3</sup> de etanol). Além desse rendimento em eletricidade, os subprodutos decorrentes do processo de biodigestão da vinhaça ainda poderiam ser orientados da mesma maneira que a vinhaça comum. Em outros termos, a vinhaça mesmo biodigerida possui as características positivas (nutrição da cana-de-açúcar) e negativas (potencial de contaminação de água) que a vinhaça “comum”, tendo, portanto, que ser orientada à fertirrigação do solo (ANA *et al.*, 2009). Isso representa, portanto, *elemento estratégico para o fechamento de ciclo do setor sucroalcooleiro*, servindo a um só tempo à fertilização do solo e à geração de energia<sup>8</sup>.

Outro resíduo surge do processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar, o qual gera uma espécie de lodo como subproduto. É conhecido também como **torta de filtro**. Esse resíduo é rico em fósforo; puro ou misturado a outros resíduos sólidos (como a fuligem e cinzas advindas das caldeiras) pode ser direcionado às áreas de reforma do canal, servindo como fertilizante. A taxa de produção desse resíduo é, em média, de 40 kg por tonelada de cana-de-açúcar processada (ANA *et al.*, 2009). Tanto a torta de filtro quanto a vinhaça colaboram para o quadro de baixa utilização de fertilizantes nos canaviais (BNDES; CGEE, 2008) (os resíduos suprem de forma significativa a demanda por fósforo e potássio, praticamente restringindo-se à fertilização e a eventuais reposições de nitrogênio).

As **leveduras** são relevantes dentro do processamento da cana-de-açúcar para a produção de etanol; é com base nestas que ocorre a fermentação dos açúcares. Ao mosto produzido com base no caldo, são adicionados os fungos da espécie *Saccharomyces Cerevisae* que fermentarão tal solução, produzindo daí o vinho. Após a fermentação, o vinho é centrifugado, permitindo a recuperação das leveduras, que, depois de tratadas, serão reutilizadas em novas fermentações. Algumas usinas produzem a levedura seca, “suplemento protéico de baixo custo, empregado como componente de ração animal e na indústria de alimentos” (BNDES; CGEE, 2008, p. 118), a qual serve como elemento adicional de diversificação produtiva, pois tais subprodutos podem ser comercializados. Ressalta-se, portanto, o potencial de integração entre o setor sucroalcooleiro e os setores alimentícios (humano e animal) com base na produção de leveduras. Para cada litro de etanol, são produzidos entre 15 e 30 g de levedura seca. BNDES e CGEE (2008) destacam que tais leveduras têm sido, inclusive, exportadas para países do sudeste asiático, servindo como alimento para peixes e camarões, rendendo ao produtor de US\$ 187 a US\$ 375 por m<sup>3</sup> de etanol gerado.

Cabe destacar que inovações em termos de cepas de leveduras adaptadas permitem produzir maiores teores de etanol – trata-se da fermentação com alto teor alcoólico, que, a um só tempo, permite a ampliação do rendimento de etanol com redução da quantidade de vinhaça gerada (ANA *et al.*, 2009). Outro resíduo a ser considerado surge da produção da matéria-prima. Um terço da cana-de-açúcar é composto de **folhas, pontas e palha** (NEVES; CONEJERO, 2010). A utilização desses elementos é relevante porque: *i*) amplia a quantidade de biomassa disponível para queima e, automaticamente, incrementa o potencial de cogeração de energia<sup>9</sup>; *ii*) dependendo do uso que se faz desses componentes, reduz-se substancialmente as emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, sobretudo quando estes não são queimados na pré-colheita; e *iii*) a palha pode ser utilizada em técnicas agronômicas de forragem do solo, colaborando para a eliminação de plantas daninhas e redução da quantidade de herbicidas utilizada na lavoura. Nesse sentido, aliado a pressões legais, o recurso às queimadas deixa de ser interessante, pois destrói essa biomassa com potencial estratégico de uso. Vislumbra-se, ainda, a utilização das palhas, pontas e folhas, assim como a do bagaço, para a produção do *etanol de 2ª geração*, ou *etanol celulósico*. Trata-se de produzir etanol por meio das partes celulósicas da planta, com técnicas ainda em desenvolvimento, ampliando a produtividade de etanol por hectare de cana-de-açúcar.

Por fim, um último tipo de resíduo deve ser analisado. A **água residual** que sai do processo produtivo, e não é reutilizada neste, é composta de todos os efluentes líquidos advindos da lavagem da cana-de-açúcar, circuitos de resfriamento, sobras de águas condensadas, além da lavagem de pisos e equipamentos, somando em torno de 1,1 m<sup>3</sup> por tonelada de cana-de-açúcar processada (ANA *et al.*, 2009). Tais efluentes são ricos em matéria orgânica e sais, o que abre a possibilidade de reaproveitamento para irrigação dos canaviais – o que geralmente ocorre em conjunto com a aplicação da vinhaça no processo de fertirrigação. ANA *et al.* (2009) demonstram que aproximadamente 20% da lavoura pode ser irrigada usando a água residual do processamento da cana-de-açúcar, o que colabora para o fechamento do ciclo de matéria no setor sucroalcooleiro.

#### 4.5 O Fechamento de Ciclo Material e Energético

O que ocorre no setor sucroalcooleiro é bastante semelhante ao que propõe o modelo conceitual apresentado em Despeisse *et al.* (2012): a SI ocorre dentro da firma, ou dentro do que chamam de “tecnosfera”, um recorte que abarca a firma, seus processos e instalações. Os autores afirmam que, ao se analisarem os fluxos de maneira sistêmica, “interações potenciais entre os processos podem ser identificados para a recuperação de perdas de matéria e energia [e então] utilizá-los em outro processo” (DESPEISSE *et al.* 2012, p. 36); sustentam, também, que poucas firmas encaram seus sistemas produtivos como um ecossistema, sendo que a proposta deste artigo é encarar o setor sucroalcooleiro dessa maneira. Com essa constatação, a Figura 4 sintetiza o esforço de ilustrar como se dá o FCME no referido setor.

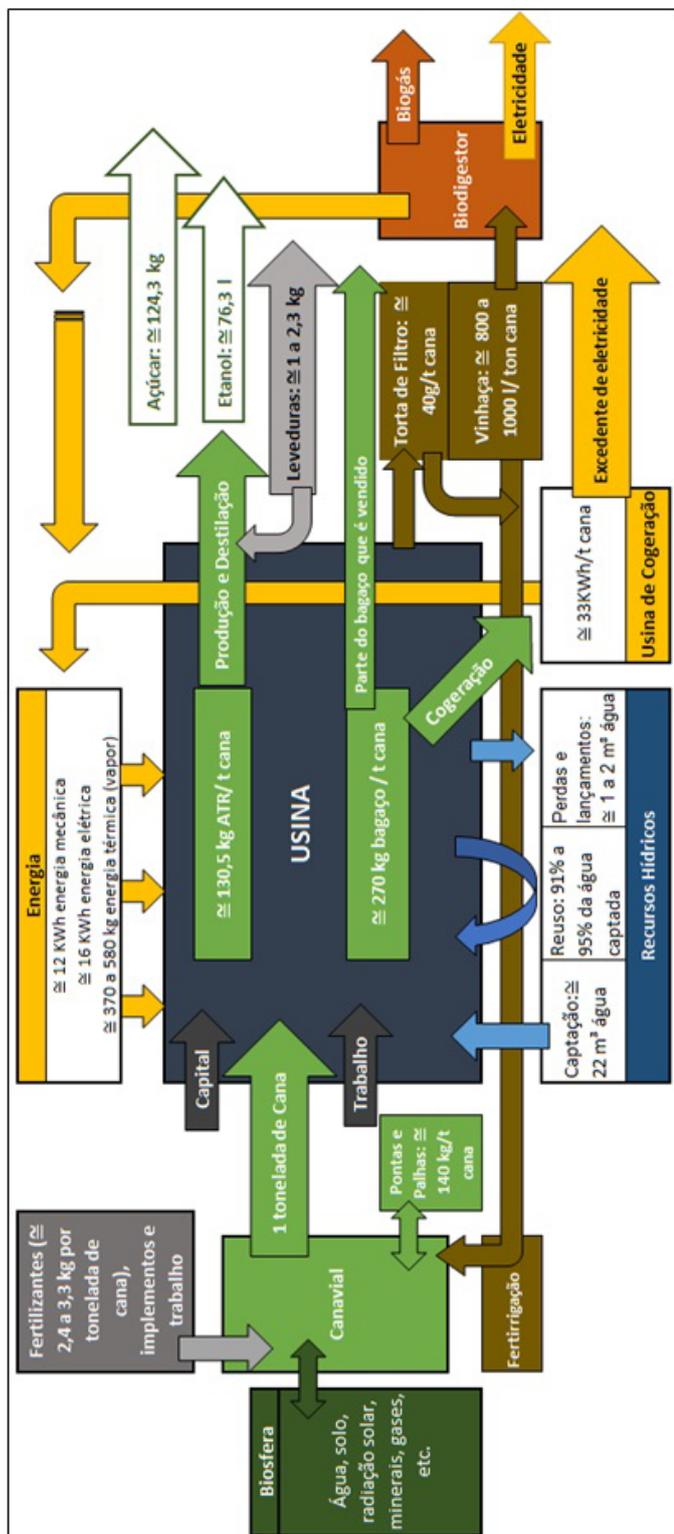
A Figura 4 mostra que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são necessários 22 m<sup>3</sup> de água, 12 kWh de energia mecânica, 16 kWh de energia elétrica e 370 a 580 kg de energia térmica em forma de vapor. Da água, 91% a 95% é reutilizada, sendo que a perda traduz-se em pouco mais de 1 m<sup>3</sup> de água – o que demonstra a grande eficiência no reuso desse insumo. O processamento da cana-de-açúcar produz aproximadamente 270kg de bagaço, sendo que grande parte serve de combustível para a cogeração – gerando aproximadamente 33 kWh por tonelada de cana processada. Parte da energia volta para alimentar os processos produtivos; o excedente pode ser vendido a terceiros. O processamento de uma tonelada de cana-de-açúcar gera, ainda, de 800 a mil litros de vinhaça, que volta para o canavial no processo de fertirrigação – em usinas mais complexas (que contam com biorrefinarias), parte da vinhaça alimenta processos de biodigestão, capazes de gerar ainda mais energia elétrica. Outros subprodutos também são quase que integralmente reutilizados dentro do setor, a exemplo das pontas e palhas da cana-de-açúcar, que voltam para forrar o solo dos canaviais e a torta de filtro, que é adicionada à vinhaça para o processo de fertirrigação.

À luz da EI, a análise do esquema da Figura 4 sugere que *a alta taxa de reuso não abre grandes margens para a simbiose industrial inter-firma*. Vinhaça, torta de filtro, água e bagaço, que representam grande parte dos resíduos (ou recursos de saída), são reutilizados de alguma forma dentro dos processos internos às atividades do setor. Nos termos de Chertow (2004), portanto, o setor sucroalcooleiro realiza a *simbiose do tipo II*.

A cogeração aparece como elemento absolutamente relevante para o resultado de alta taxa de reuso e, portanto, é imprescindível para o FCME. Com a destinação adequada dada ao bagaço da cana-de-açúcar, a unidade industrial torna-se autossuficiente em energia elétrica, térmica e mecânica, podendo, inclusive, exportar o excedente gerado para alimentar outros sistemas externos à usina. Quando não é totalmente queimado para a cogeração, o bagaço torna-se, ainda, oportunidade de negócio com os setores de pecuária, dado o valor nutritivo para suplemento alimentar dos animais. O mesmo ocorre com as leveduras, cujo excedente pode ser comercializado como componente para alimentação animal.

Alvarenga e Queiroz (2009), Ana *et al.* (2009) e Cetesb (2002) demonstram, de maneira bem objetiva, quais são os esforços do setor rumo a um processo de produção mais limpa que vá além da cogeração. Isso envolve, em termos concretos, medidas de *prevenção à poluição, reuso e reciclagem*, conceitos que Cetesb (2002) imputa como sendo de maior eficiência para redução dos impactos ambientais se comparados a outras ações, como o simples tratamento e disposição final de resíduos (ações do tipo *end-of-pipe*).

Figura 4: Esquema dos fluxos de matéria e energia dentro do setor sucroalcooleiro brasileiro (valores médios para o processamento de 1t de cana-de-açúcar)



Fonte: Elaboração própria com base em BNDES; CGEE (2008), CONAB (2012) e Neves; Conejero (2010)

Cabe observar que muitas dessas práticas de produção mais limpa são possíveis graças a um determinado pacote tecnológico externo ao setor. Dizer isso é afirmar que a aquisição de máquinas e equipamentos de fornecedores especializados é um elemento relevante que garante a eficiência dos reúsos, reciclagens e reduções. Assim, os esforços de inovação realizado nos setores de máquinas e equipamentos industriais e implementos agrícolas reverberam nos resultados ambientais do setor sucroalcooleiro.

## 5 Considerações Finais<sup>10</sup>

Argumentou-se que a redução da pressão sobre os sistemas naturais causada pelo setor sucroalcooleiro dá-se em resposta a elementos institucionais e mercadológicos. A maneira de responder a esses estímulos e realizar o fechamento do ciclo ocorre por meio de uma série de ações concretas realizadas no âmbito da firma – a exemplo da reutilização de água que aquece ou resfria determinadas fases da produção ou de fertirrigação do solo dos canaviais.

Demonstrou-se que tais ações têm contribuído de maneira importante ao FCME, conforme os pressupostos da EI. Destaca-se, portanto, i) a reutilização do bagaço para cogeração de energia; ii) a alta taxa de reutilização de água, que possibilita baixa captação deste insumo da base de recursos hídricos; e iii) a possibilidade de tratamento da vinhaça, torta de filtro e cinzas, que são orientadas aos processos de fertirrigação e/ou biodigestão. Esses elementos corroboram a hipótese apresentada na introdução deste artigo – a de que o setor sucroalcooleiro, com vistas a responder a pressões mercadológicas e institucionais, vem reduzindo a dependência de recursos naturais por meio de uma série de ações e inovações técnicas. De maneira concreta, isso apresenta-se como réuso de uma série de subprodutos oriundos do processo de produção de açúcar e etanol, colaborando, afinal, para o processo de fechamento de ciclo de matéria e energia.

O argumento que se defende, por fim, é a importância das tecnologias e da troca de informações como elementos que ajudam a ampliar a eficiência energética e racionalização no uso da matéria dentro do setor, rumo a um processo de produção mais limpa – um dos traços da ecologia industrial, que imputa papel importante às tecnologias, embora não seja a única das vias para a lida com a questão indústria-natureza. Mais ainda, busca-se um modelo integrado de geração e difusão de conhecimento técnico-científico (simbiótico, portanto) com vistas à redução dos impactos negativos gerados pelos sistemas produtivos sobre as bases de recursos naturais e comunidades.

A contribuição deste trabalho é a de aglutinar algumas informações e números a respeito do ciclo de matéria e energia, dentro do setor sucroalcooleiro, inspirado pela EI. Ao mesmo tempo, os resultados apontam para outros questionamentos que podem servir para novas pesquisas, como, por exemplo, quantificar *in loco* os fluxos e componentes do sistema com base em uma perspectiva de análise sobre o ciclo de vida.

## 6 Referências

- ALLENBY, B. R.. Achieving sustainable development through industrial ecology. *International Environmental Affair*, v. 4, n. 1, p. 56-68, 1992.
- ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R.. Produção mais limpa e aspectos ambientais na indústria sucroalcooleira. *International Workshop Advances in Cleaner Production*. Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change. São Paulo, 2009.
- ANA; FIESP; UNICA; CTC. *Manual de Conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética*. Brasília: ANA, 2009.
- ANDREWS, C. J. Putting Industrial Ecology into place – evolving roles for planners. *Journal of the American Planning Association*, v. 65, n. 4, p. 364-375, 1999.
- AYRES, R. U. Industrial metabolism: theory and policy. In: ALLENBY, B.R.; RICHARDS, D. J.. *The Greening of industrial ecosystems*. Washington: National Academy Press, 1994.
- BNDES; CGEE. *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.
- CECHIN, A. VEIGA, J. E.. O fundamento central da Economia Ecológica. In: May, P. (org.). *Economia do Meio Ambiente*. São Paulo: Editora Campus, 2009.
- CETESB. *A produção mais limpa (P+L) no setor sucroalcooleiro - informações gerais*. São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 25 jul. 2013.
- CHERTOW, M. R.. Industrial Symbiosis: Literature and taxonomy. *Annu. Rev. Energy Environ.*, v. 25, n.1, p. 313–337, 2000.
- CHERTOW, M. R.. Industrial symbiosis. *Encyclopedia of Energy*. v. 3, n. 1, p. 407-415, 2004.
- CHERTOW, M. R.. “Uncovering” industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 11, n. 1, p. 11-30, 2007.
- COHEN-ROSENTHAL. What is eco-industrial development?. 2003. Disponível em: <[www.greenleaf-publishing.com](http://www.greenleaf-publishing.com)>. Acesso em: 15 jul. 2013.
- CONAB. *Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil: Análise do Desempenho da Safra 2009-2010*. Brasília: CONAB, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 25 jul. 2013.

DESPEISSE, M.; BALL, P. D.; EVANS, S.; LEVERS, A.. Industrial Ecology at factory level – a conceptual model. *Journal of Cleaner Production*, v. 31, p.30-39, 2012.

EGRI, C.P.; PINFIELD, L.T.. As organizações e a biosfera: ecologia e meio ambiente. In: CLEGG, S. T.; NORD, W. R; HARDY, C. *Handbook de Estudos Organizacionais*. São Paulo: Atlas, 2001.

FROSCHE, R. A.; GALLOPOULOS, N. E.. Strategies for manufacturing. *Scientific American*. n.261, p. 144-152, 1989.

GEORGESCU-ROEGEN, N.. *The entropy law and the economic process*. Londres: Harvard University Press, 1971.

GRAEDEL, T. Industrial Ecology: definition and implementation. In SOCOLOW, R. *et al. Industrial Ecology and global change*. 1994.

JELINSKI, L.W.; GRAEDEL, T.E.; LAUDISE, R. A.; MCDALL, D.W.; PATTEL, C. K. N. Industrial ecology: concepts and approaches. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*. v. 89., p. 793-797, 1992.

KORHONEN, J.. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*. v. 9, n. 3 p. 253-259, 2001a.

KORHONEN, J.. Co-production of heat and power: an anchor tenant of a regional industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*. v. 9., n. 6, p. 509-517, 2001b.

KRONES, J.. *The best of both worlds: a beginner's guide to industrial ecology*. 2007.

LIFSET, R.; GRAEDEL, T. E.. Industrial Ecology: goals and definitions. In: *A handbook of industrial ecology*. 2002. Disponível em: <http://planet.botany.uwc.ac.za>. Acesso em: 11 jul. 2013.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A.. *Estratégias para a cana no Brasil: um negócio classe mundial*. São Paulo: Atlas, 2010.

SOUZA, E.L.; MACEDO, I.C. (coord.). Etanol e bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. *União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA)*. 2009.

## Notas

1. Busca estratégica de competitividade por parte das firmas e as tentativas de atender pressões vindas da demanda.
2. A nomenclatura adotada para identificar o setor produtor de álcool e açúcar vem adaptando-se às suas mudanças de complexidade. Estudos disponibilizados pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar vão identificar o setor de várias formas (setor da cana-de-

açúcar, cadeia sucroenergética, setor sucroenergético etc.). Neste trabalho, adota-se setor sucroalcooleiro por ser um recorte conceitual mais abrangente.

**3.** É importante inserir aqui algumas breves reflexões sobre a possibilidade física de um sistema fechado. Cechin e Veiga (2009) fazem considerações das leis físicas da termodinâmica e suas relações com o processo econômico – inspirados pela obra de Georgescu-Roegen (1971). Com isso, considerar um sistema *perfeitamente fechado* é uma impossibilidade física em razão das Leis da Termodinâmica. Em qualquer processo de transformação físico-energético, a energia de baixa entropia que entra no sistema é transformada e, em parte, dissipada, fazendo com que aumente a entropia – e, portanto, diminua a disponibilidade de energia potencial. Assim, um sistema que aproveite a totalidade da energia que entra é fisicamente impossível em razão de um processo entrópico – de depreciação energética do sistema. Para que o sistema continue a funcionar, faz-se necessário, portanto, sempre uma fonte de energia primária que, ao ser processada dentro deste, necessariamente dissipará alguma energia. Agradecimentos ao Prof. Dr. Daniel Andrade Caixeta (IE-UFU), por essas observações.

**4.** A concepção de metabolismo industrial pode ser encarada como sinônimo de “processo de produtivo”, ou seja, “conjunto de processos físicos que convertem matérias primas e energia, mais trabalho, em produtos acabados e resíduos, de maneira mais ou menos estável” (AYRES, 1994, p. 23).

**5.** Uma comunidade de negócios, agindo de forma simbiótica rumo ao FCME, com menor dependência de *inputs* externos e menor necessidade de despejo de *outputs* indesejáveis no sistema natural. A simbiose dá-se via troca de matéria, energia e informação entre diferentes tipos de agentes. Para mais, ver Korhonen (2001b) e Cohen-Rosenthal (2003).

**6.** Revistas científicas especializadas (a exemplo do *Journal of Industrial Ecology*), relatórios e bases de dados de grupos ligados ao complexo sucroalcooleiro (como os da União da Indústria da Cana-de-Açúcar) ou do governo brasileiro (CONAB e Ministérios), além de livros, teses e dissertações diversas, elencadas nas Referências.

**7.** Vislumbra-se a possibilidade de se utilizar a água da própria cana-de-açúcar (0,7 m<sup>3</sup> por tonelada) para suprir as necessidades hídricas de uma usina. Caso as técnicas permitam esse cenário, a captação de água pode ser reduzida ainda mais, chegando a 0,5m<sup>3</sup>/t de cana-de-açúcar, conforme ressalta ANA *et al.* (2009).

**8.** ANA *et al.* (2009) destacam, contudo, que o processo de biodigestão encontra barreiras em termos de custo, dado que a energia gerada por essa via não consegue competir com aquela obtida via contratos de longo prazo com concessionárias de energia elétrica. Atualmente, apenas uma usina tem gerado energia por meio de biodigestão da vinhaça.

**9.** BNDES e CGEE (2008) sugerem que, com a agregação da palha ao bagaço para a cogeração, o excedente de energia gerada seja, em média, superior a 100 kw por tonelada de cana-de-açúcar. CONAB (2011) destaca que essa agregação aumentaria em 50% o volume de biomassa disponível para queima, ampliando em 80% o potencial de cogeração.

**10.** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia (PROPP UFU), pelo suporte dado para a realização desta pesquisa.