

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

**Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na  
Economia do Meio Ambiente:**

Estudo de caso: Etanol Derivado do Bagaço da Cana-de-Açúcar

Silvia Palma Rojas

Orientador: Jorge Madeira Nogueira

Co-Orientador: Armando Caldeira-Pires

Tese de doutorado

Brasília, DF

Setembro de 2012

Palma-Rojas, Silvia

**Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na Economia do Meio Ambiente.** Estudo de Caso: Etanol Derivado de Bagaço da Cana-de-Açúcar

Silvia Palma Rojas

Brasília, 2012

183 p: il.

Tese de Doutorado. Departamento de Economia. Universidade de Brasília, Brasília

1. Análise de Insumo-Produto.
2. Análise *Structural Path*.
3. Avaliação de Ciclo de Vida.
4. Inventário de Ciclo de Vida.
5. Avaliação de Ciclo de Vida Híbrida.
6. Etanol Derivado de Bagaço.

I. Universidade de Brasília/ECO.

II Título (série)

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação, e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a sua autorização por escrito.

---

Silvia Palma-Rojas

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

**Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na  
Economia do Meio Ambiente**

Estudo de Caso: Etanol Derivado do Bagaço da Cana-de-Açúcar

Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Economia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Doutora em Economia, área de concentração em Economia do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais.

Aprovado por:

---

Jorge Madeira Nogueira – Doutor, Departamento de Economia – UnB  
(Orientador)

---

Armando Caldeira-Pires – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica – UnB  
(Co-orientador)

---

Pedro Zuchi da Conceição – Doutor, Departamento de Economia – UnB  
(Examinador Interno)

---

Moises Resende Filho – Doutor, Departamento de Economia – UnB  
(Examinador Interno)

---

Ricardo Coelho de Faria – Doutor, Departamento de Economia – UCB  
(Examinador Externo)

Brasília - DF, Setembro de 2012

*“Far from being a burden, sustainable development is an exceptional opportunity – economically, to built markets and create jobs; socially, to bring people in from the margins, and politically, to give every man and woman a voice, and a choice, in deciding their own future. ”.*

Kofi Annan (1938-)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Número de publicações relacionadas com ACV híbrida.....	8
Figura 2 - Fluxograma da base metodologica do objetivo da tese .....	10
Figura 3 - Etapas e aplicações de uma ACV .....	21
Figura 4 - Produção total das principais culturas brasileiras.....	61
Figura 5 - Ilustração da contribuição potencial do etanol derivado de bagaço na produção total de etanol brasileiro.....	62
Figura 6 – Comparativo do preços do etanol hidratado de cana-de-açúcar, gasolina e açúcar, e a produtividade da cana-de-açúcar .....	63
Figura 7 - Estrutura da economia brasileira em um nível de agregação de 18 setores .....	68
Figura 8 – Fluxograma de processo da produção de etanol segunda geração mediante hidrólise enzimática .....	72
Figura 9 – Caixa preta do processo de produção de etanol mediante hidrólise enzimática .....	73
Figura 10 - Matriz de coeficientes técnicos do setor de etanol SG .....	74
Figura 11 - Fluxograma de ciclo de vida da produção do etanol lignocelulósico e seu uso em um carro flex. Os processos de ciclo de vida incluem produção de combustível, distribuição e uso. Os módulos do <i>cradle-to-gate</i> para os principais insumos são incluídos no diagrama.....	100
Figura 12 - ICV <i>cradle-to-gate</i> de processo do etanol derivado de bagaço.....	105
Figura 13 - ICV processo do uso do carro flex 1.0 operado com etanol de bagaço.....	106
Figura 14 - Fluxograma de ciclo de vida do etanol de bagaço para uma análise híbrida integrada. Os processos de ciclo de vida incluem produção de combustível, distribuição e uso. Os módulos do berço-ao-portão para os principais insumos são incluídos no diagrama, bem como os módulo dos setores considerados do enfoque de insumo-produto.....	108
Figura 15 - Resultado para as emissões de CO <sub>2</sub> , consumo energético e geração de emprego dos principais insumos do ciclo de vida da operação de um carro flex 1.0 com etanol de bagaço .....	112

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Elementos da ecologia industrial e suas respectivas contribuições .....	17
Quadro 2 - Tabela de insumo-produto econômico para uma economia de dois setores.....	28
Quadro 3 - Tabela <i>Uso</i> do enfoque produto-indústria.....	34
Quadro 4 - Tabela <i>Produção</i> do enfoque produto-indústria .....	36
Quadro 5 - Conjunto completo dos dados do enfoque produto-indústria.....	37
Quadro 6 - Matrizes de requisito totais, enfoque SNA .....	39
Quadro 7 - Ilustração do enfoque ACV Híbrido <i>Tiered</i> .....	54
Quadro 8 - Ilustração do enfoque híbrido Integrado.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Códigos de classificação dos setores da economia brasileira .....	66
Tabela 2 - Consumo intermediário e demanda final de eletricidade.....	67
Tabela 3 - Coeficiente de conversão de unidade energética a conteúdo de carbono dos combustíveis mais usados na economia brasileira.....	69
Tabela 4 - Toneladas de CO <sub>2</sub> e consumo energético setorial base para a estimativa dos coeficientes da matriz de coeficiente de impactos B .....	70
Tabela 5 - Tecnologia de produção do setor etanol de segunda geração .....	71
Tabela 6 - Estrutura de insumo e produção do setor etanol SG para as condições do ano 2005 .....	73
Tabela 7 - Insumos e produtos da produção de Etanol SG .....	74
Tabela 8 - Multiplicadores econômicos diretos e indiretos dos setores.....	77
Tabela 9 - Multiplicadores ambientais diretos e indiretos dos setores econômicos.....	78
Tabela 10 - Elasticidades de fatores econômicos e ambientais.....	79
Tabela 11 - Comparação dos resultados dos diferentes cenários .....	81
Tabela 12 - Resultados da análise de sensibilidade relacionada à variação dos preços dos principais insumos do setor Etanol SG .....	84
Tabela 13 - Resultados com uma estrutura de insumos mais limitada para o setor Etanol SG .....	85
Tabela 14 - Principais rotas de fornecedores que influenciam no desempenho econômico .....	91
Tabela 15 - Principais rotas de fornecedores que influenciam na geração de emprego.....	92
Tabela 16 - Principais rotas de fornecedores relacionadas com o desempenho ambiental .....	93
Tabela 17 - Referências bibliográficas da construção dos respectivos ICVs dos insumos e dos processos principais para a obtenção dos balanços de emissão, consumo energético e emprego. ....	107
Tabela 18 - Referência para base de cálculo do preço unitário dos processos/produtos.....	110
Tabela 19 - Resultados do ciclo de vida <i>cradle-to-grave</i> da operação do carro flex 1.0.....	111
Tabela 20 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com as emissões de CO <sub>2</sub> da produção e uso do etanol derivado de bagaço. ....	114
Tabela 21 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com o consumo energético da produção e uso do etanol derivado de bagaço.....	115
Tabela 22 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com a geração de emprego no ciclo de vida do etanol SG.....	117
Tabela 23 - Efeito da variação dos preços usados nas categorias de impactos estudadas .....	118
Tabela 24 - Mudança na estrutura tecnológica de insumos para consolidação do balanço de geração de emprego no ciclo de vida .....	120
Tabela 25 - Análise “perda do setor” no ciclo de vida para consolidar a contribuição do setor comércio e serviço .....	121
Tabela 26 – Comparação de resultados de emissões de CO <sub>2</sub> das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida.....	126
Tabela 27 - Comparação de resultados do consumo energético das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida.....	127
Tabela 28 - Comparação de resultados da geração de emprego das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida.....	128
Tabela 29 - Taxa de variação dos enfoques ACV e ACV híbrida <i>cradle-to-gate</i> com o enfoque insumo-produto.....	129

## SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores e Florestas Plantadas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ACV Híbrida	Avaliação do Ciclo de Vida Híbrida
AFME	Análise de Fluxos Mássicos e Energéticos
CNAE	Classificação Nacional de Atividade Econômica
CENPES	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras
CH <sub>4</sub>	Gás Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Centro Tecnológico Canavieira
DAP	Fosfato de diamônio
EEI	Economia da Ecologia Industrial
EI	Ecologia Industrial
EIOLCA	Economic Input-Output Life Cycle Analysis
Eqs	Equações
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FMI	Fundo Monetário Internacional
GDP	Gross Domestic Product
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	Organização Internacional para Normalização

Kg	Quilograma
KWh	Quilowatt-hora
LCA	Life Cycle Assessment
MJ	MejaJoule
NTNU	Norwegian University of Science and Technology
PIB	Produto Interno Bruto
PNB	Produto Nacional Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCE	Retorno Constante de Escala
RED	Renewable Energy Directive
RFS2	Renewable Fuel Standard
SNA	Sistema de Contas Nacionais
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química
SPA	Structural Path Analysis
TJ	TeraJoule
Ton	Toneladas
TRU	Tabelas de Recursos e Uso
UnB	Universidade de Brasília
UNICA	União da Indústria da Cana-de-açúcar
USP	Universidade de São Paulo
VA	Valor Adicionado



## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	1
RESUMO.....	2
ABSTRACT.....	3
Introdução .....	4
Objetivo .....	9
Estrutura da Tese.....	11
1. Economia do meio ambiente e ecologia industrial: componentes específicos e elementos comuns ..	12
1.1 Ecologia industrial e a economia do meio ambiente.....	14
1.2 Avaliação de ciclo de vida .....	19
1.2.1 Análise de inventário de ciclo de vida .....	22
1.3 Análise Insumo-produto.....	26
1.3.1 Contexto da análise insumo-produto.....	27
1.3.2 Enfoque commodity- indústria.....	33
1.3.3 Análise insumo-produto estendida.....	40
1.3.4 Multiplicadores e elasticidades setoriais .....	42
1.4 Análise <i>Structural Path</i> (SPA).....	45
1.4.1 Análise structural path para sistemas de unidade de processo (ACV).....	48
1.5 Avaliação de ciclo de vida híbrida .....	51
2. Preparação da base de dados referente ao estudo de caso.....	58
2.1 Panorama do setor de etanol de segunda geração .....	58
2.2 Preparação da matriz insumo-produto brasileira.....	64
2.3 Incorporação do setor hipotético etanol segundo geração (Etanol SG) na matriz insumo-produto .....	70
3. Estudos de Caso .....	76
3.1 Etanol de segunda geração e a economia brasileira: enfoque de insumo-produto.....	76
3.1.1 Resultados da análise insumo-produto.....	76
3.1.1.1 Resultados de Cenários .....	80
3.1.2 Análise de sensibilidade da tecnologia do setor Etanol SG .....	83
3.1.3 Considerações finais da análise de insumo-produto .....	86
3.2 Contribuição econômica e ambiental da cadeia de fornecedores do etanol de segunda geração: uma análise <i>structural path</i> .....	88
3.2.1 Resultados da análise <i>structural path</i> .....	90
3.2.2 Considerações finais da análise structural path.....	94
3.3 Avaliação de ciclo de vida híbrida do etanol derivado de bagaço: perspectiva econômica e ambiental.....	96
3.3.1 Metodologia e preparação da base de dados .....	98
3.3.1.1 ACV de processo para o etanol derivado de bagaço.....	99
3.3.1.2 ACV Híbrido do etanol derivado de bagaço .....	107
3.3.2 Resultados da ACV Híbrida.....	110
3.3.3 Análise de sensibilidade.....	118
3.3.4 Considerações finais da ACV híbrida.....	122
3.4 Considerações finais dos estudos de caso .....	124
4. Considerações finais da tese .....	131
Referências.....	135
Apêndice .....	146
ANEXO .....	173

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por permitir-me concluir esta importante etapa da minha vida profissional...

Ao meu orientador prof. Jorge pelo seu conhecimento e pelos sempre tão sábios conselhos...

Ao meu orientador e mentor prof. Armando pelas oportunidades de crescimento profissional e apoio incansável durante estes últimos anos...

Aos meus e minhas colegas de curso por compartilhar todos os bons e “não tão bons” momentos juntos...

Aos meus e minhas colegas de trabalho pelas palavras de apoio...

A minha família querida que mesmo longe sempre apoiam minhas escolhas pessoais e profissionais. “Las(os) ama mucho y las(os) llevo siempre en mi corazón...”

A todas as pessoas que de uma maneira ou outra contribuíram com a minha formação como pesquisadora e profissional durante estes últimos anos....

E, por último, mas não menos importante, ao meu esposo por sua compreensão e apoio incondicional em todos os momentos durante esta trajetória...

## RESUMO

Desenvolvimento sustentável propõe mudanças fundamentais na maneira de como a sociedade fundamenta suas decisões. Para avaliar as políticas ou ações direcionadas a atingir o desenvolvimento sustentável, requer-se de métodos e ferramentas que quantifiquem e comparem, de forma robusta e consistente, os impactos econômicos, sociais e ambientais das diferentes atividades que provêm bens e serviços a uma economia, e que ajudem a identificar os caminhos chaves para alcançar a qualidade ambiental e a prosperidade econômica. Entre as ferramentas analíticas mais usadas para a análise ambiental das atividades econômicas estão o enfoque de insumo-produto da economia e a avaliação de ciclo de vida da ecologia industrial. O primeiro enfoque tem um contexto macroeconômico com uma perspectiva linear do fluxo de materiais, enquanto o enfoque de ciclo de vida apresenta dados micros em um contexto macro com uma perspectiva de sistema cíclica, onde é esperado que os resíduos continuem sendo parte da dinâmica setorial.

Esta tese tem como objetivo principal identificar as contribuições do enfoque de ciclo de vida da ecologia industrial na economia do meio ambiente. Para entender e identificar os fatores positivos da incorporação do enfoque de ciclo de vida na economia do meio ambiente, e alcançar assim o objetivo aqui definido, serão aplicadas quatro técnicas de análise diferentes para obter o desempenho ambiental e econômico do setor de etanol derivado de bagaço de cana-de-açúcar. Duas técnicas são da economia, isto é, enfoque insumo-produto e *structural path*, e duas da ecologia industrial, isto é ACV de processo e ACV híbrida. Cada técnica mostrará resultados de um estudo de caso sobre o setor de etanol derivado de bagaço de cana-de-açúcar, que representa o progresso tecnológico mediante o desenvolvimento de tecnologias limpas no setor de energia. Acredita-se que o enfoque de ciclo de vida traz uma nova visão de como analisar e visualizar as atividades econômicas, e assim alcançar os objetivos da macroeconomia ambiental e cumprir com os princípios do desenvolvimento sustentável. Conclui-se que pelo contexto abrangente e multidisciplinar do enfoque de ciclo de vida, ele pode ser inserido nas análises de sustentabilidade, no âmbito da economia do ambiente, para avaliar, de maneira robusta e consistente, ações, iniciativas e políticas públicas que visem alcançar os objetivos da macroeconomia ambiental e sustentabilidade.

Palavras-chaves: enfoque insumo-produto, análise *structural path*, enfoque ciclo de vida, avaliação de ciclo de vida híbrida, sustentabilidade, etanol derivado de bagaço.

## ABSTRACT

Sustainable development proposes fundamental changes in the way in which a society takes decisions. Therefore, in the process of assessing policies and actions towards sustainability, it is necessary methods and tools that quantify, compare and integrate, in a consistent way, economics and environmental impacts of economic activities to identify the key paths for attaining environmental quality and economic prosperity.

There are two methods that are the most frequently used in environmental analysis, the input-output and life cycle approach. The former is based on a macroeconomics context with a perspective of systems of linear flows of material, while the latter is focused on micro data into a macro context with a perspective of close system of materials flow, where residues are expected to continue in the market system.

This thesis aims to identify the contributions of life cycle approach from industrial ecology into environmental economics. To understand and identify the positive aspects of life cycle approach into economics, it is applied four different analytical techniques to characterize, from different perspectives, the environmental and economic performance of bagasse-derived ethanol sector. Two analytical techniques from economics, input-output analysis and structural path analysis, and two from industrial ecology, life cycle assessment and hybrid life cycle assessment. The bagasse-derived ethanol sector represents the technological progress by developing cleaner technologies, and its function is to be an ancillary tool to identify the main features of each approach.

It is believe that life cycle approach brings a new vision of how analyze and visualize economic activities, while are attained the macroeconomics objectives and fulfilled the principles of sustainable development. The wide and multidisciplinary context of life cycle approach make possible its incorporation into economics models to assess action, initiatives and public policies towards sustainability.

Keywords: input-output approach, structural path analysis, life cycle approach, hybrid life cycle assessment, sustainability, bagasse-derived ethanol.

## Introdução

O termo desenvolvimento sustentável tem estado presente em agendas políticas e debates tanto em nível nacional como internacional há mais de duas décadas. Ele pode ser definido como um processo de melhoramento das oportunidades que permitem ao indivíduo e às comunidades alcançar suas necessidades, bem como suas aspirações e potencial completo sobre um período de tempo contínuo e indefinido, enquanto mantém a resiliência dos sistemas econômico, social e ambiental (MUNASINGHE, 2004). Para Callan e Thomas (2010), o desenvolvimento sustentável propõe mudanças fundamentais na maneira de como a sociedade fundamenta suas decisões. O desafio é alcançar a prosperidade econômica alterando os padrões de produção e consumo para proteger os recursos naturais e o meio ambiente. Solow (1991) comenta que sustentabilidade está relacionado com a distribuição equitativa entre gerações, sendo uma obrigação moral deixar para as futuras gerações a opção ou capacidade de ser tão prósperos quanto as gerações atuais.

Portanto, para colocar a sustentabilidade em prática e, assim, cumprir seus princípios e objetivos, a UNEP (2011) determina que a sociedade deve incorporar estratégias e apoiar programas que incentivem as seguintes ações: a) Desenvolvimento de produtos, serviços e modelos de negócios “mais amigáveis” com o meio ambiente, chamados, também, como produtos, serviços e modelos de negócios “mais verdes”; b) compras de produtos e serviços “mais verdes” pela sociedade civil e pelo governo; c) implementação de leis e regulações que promovam o desenvolvimento e compras de produtos, serviços e modelos de negócios “mais verdes”; d) usar incentivos que não criem impactos ambientais não esperados; e) criar produtos que reduzam os impactos ambientais, mas que ao mesmo tempo, crie valor e adicione benefícios à sociedade mediante a melhoria do bem-estar humano e a igualdade social.

Qualquer que seja a alternativa escolhida para avaliar políticas ou ações direcionadas a atingir o desenvolvimento sustentável, ela requer métodos e ferramentas que quantifiquem e comparem, de forma robusta e consistente, os impactos econômicos, sociais e ambientais das diferentes atividades que provêm bens e serviços a uma economia, e que ajudem a identificar os caminhos chaves para alcançar a qualidade ambiental e a prosperidade econômica. De acordo com UNEP (2009), no começo da década dos anos 90, governos e organismos internacionais, em conjunto com o setor privado, foram chamados a desenvolver critérios e metodologias para avaliar os impactos ambientais e os requerimentos de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos/serviços e processos. Nesse período nasceu a filosofia

do pensamento de ciclo de vida, que visa ir além do foco tradicional limitado ao processo produtivo, nela são considerados os impactos ambientais e econômicos de um produto ao longo do seu ciclo de vida.

Todo bem e serviço tem um ciclo de vida composto de uma cadeia de fornecedores de matérias-primas e insumos. O ciclo de vida de um produto/serviço começa na etapa de *design* e desenvolvimento, e segue pelas etapas de extração e beneficiamento, produção, transporte e distribuição; uso ou consumo, reuso e manutenção; reciclagem, reutilização e, finalmente, sua disposição final.

Segundo Rebitzer *et al.* (2004), toda atividade econômica ao longo da vida resulta em impactos ambientais devido ao consumo de recursos naturais, emissões de substâncias e inadequada disposição dos rejeitos. Da mesma maneira, qualquer atividade econômica ao longo do seu ciclo de vida produz efeitos econômicos, como geração de emprego e renda, a um custo ambiental considerável (FORAN, 2010; UNEP, 2009; MUNASINGE, 2004), devido, principalmente, à estrutura linear e aberta do fluxo de materiais das atividades econômicas, que fluem em uma só direção, entrando no sistema econômico como insumos e saindo como resíduos e rejeitos (CALLAN e THOMAS, 2010).

A avaliação de ciclo de vida (ACV - conhecida na língua inglesa como *Life Cycle Assessment - LCA*) é uma ferramenta analítica para estimar, avaliar e interpretar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto. No jargão da área utiliza-se o termo *cradle-to-grave* ou do berço-ao-túmulo, para especificar quando são consideradas todas as etapas do ciclo de vida de um produto, incluindo as etapas de uso, geração de resíduo e disposição final; ou *cradle-to-cradle* – berço-ao-berço – quando a etapa de disposição final do produto é o processo de reciclagem. ACV é uma ferramenta da área de ecologia industrial padronizada pela Organização Internacional para Normalização nas séries da norma ISO 14040, que visa apoiar decisões com respeito a políticas públicas, *design* de produtos, compras, melhorias nos processos produtivos e projetos numa perspectiva ambiental.

A análise de insumo-produto estendida, por sua vez, é também uma ferramenta poderosa de análise ambiental da área de macroeconomia ambiental, embora, para Daly (1991) seja difícil classificá-la entre um contexto micro ou macro. O modelo convencional de insumo-produto analisa de forma agregada os produtos que compõem os setores econômicos. A partir de 1970, com a publicação do artigo de Leontief *Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach*, começam a ser incorporados fatores ambientais no enfoque insumo-produto. Nesse artigo, incorpora-se ao modelo convencional a análise dos “produtos indesejáveis”, isto é, subprodutos ou fluxos poluidores, dos processos

produtivos dos diversos setores. Leontief (1970) aponta que a interdependência técnica entre o nível de produto desejável e indesejável pode ser descrita em termos de coeficientes estruturais similares aos usados ao traçar a interdependência estrutural entre todos os setores regulares de produção e consumo. E podem, também, ser descritos e analisados conjuntamente como uma parte integral da rede.

O enfoque de insumo-produto convencional tem como base a estimativa dos indicadores básicos da macroeconomia, como o Produto Interno Bruto (PIB) ou o Produto Nacional Bruto (PNB). Na macroeconomia convencional assume-se que existe correlação entre o bem-estar da sociedade e a produção econômica, representada pelos indicadores macroeconômicos (HARRIS e CODUR, 2004; SOLOW, 1993). Mas, como apontado por Harris e Codur (2004) e Solow (1993), a relação entre bem-estar e produção econômica é mais complexa, sendo as medidas convencionais incompletas. De acordo com Daly (1991), o objetivo de uma política macroeconômica deve estar baseada em um crescimento limitado por uma escala econômica sustentável, no lugar de um crescimento exponencial. Isto porque as características do meio ambiente são parte integral do sistema econômico, no qual os efeitos dos impactos ambientais podem render políticas macroeconômicas insustentáveis (GIRMA, 1992; DALY, 1991).

Na perspectiva da teoria da economia neoclássica, a sustentabilidade pode ser definida em termos de maximização de bem-estar ao longo do tempo, em que a maximização de bem-estar é derivada do aumento do consumo de bens e serviços (RØPKE, 2005; MUNASINGHE, 2004; HARRIS, 2003). Para Harris (2003), um nível moderado de consumo em conjunto com fortes instituições sociais e um meio ambiente saudável apresenta melhor alternativa para o crescimento econômico do que uma meta de consumo continuamente crescente e ilimitada. No contexto da ecologia industrial, declara-se a necessidade de uma reorientação da estrutura e os objetivos do atual sistema econômico mediante políticas micro e macroeconômicas que apontem, por exemplo, a estabilidade, suficiência e equidade, no lugar de crescimento contínuo sem qualidade, e o incentivo a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias energéticas (MUNASINGHE, 2004; HARRIS e CODUR, 2004; HARRIS, 2003; GORGESCU-ROEGEN, 1971).

Para entender melhor essa relação entre economia e meio ambiente, muitos modelos econômicos têm sido integrados a modelos de outras áreas do conhecimento. Um exemplo dessa sinergia é a incorporação do enfoque de insumo-produto nas análises ambientais da ecologia industrial, objetivando que as análises ambientais de processos tenham uma perspectiva ambiental completa da economia.

O enfoque estendido de insumo-produto analisa os produtos numa perspectiva agregada da extração de matéria-prima ao portão da fábrica, sendo uma ACV *cradle-to-gate* ou do berço-ao-portão agregada. A análise de insumo-produto estendida provê resultados agregados dos fatores econômicos e/ou ambientais, em que maior nível de desagregação dos resultados pode ser obtido mediante a identificação da contribuição direta e indireta do resultado. A análise *structural path* tem uma estrutura metodológica capaz de desvendar ainda mais esses resultados. Ela ajuda computar a *performance* econômica e/ou ambiental de qualquer setor detalhando o percurso dos insumos, identificando, quantificando e hierarquizando as rotas de fornecedores que mais contribuem na *performance* econômica e/ou ambiental do setor analisado. (ROBERTS, 2005; LENZEN e MURRAY, 2010; BABOULET e LENZEN, 2010), se aproximando mais à abordagem micro da ACV.

Como ACV prove uma visão mais detalhada dos efeitos ambientais potenciais de um sistema completo associado à provisão de bens e serviços, ela fornece uma estrutura de dados mais robusta que a estrutura do enfoque detalhado do insumo-produto. Mas, por essa robustez e alto nível de detalhamento, ACV limita a fronteira de análise, deixando muitas vezes por fora de seu sistema, importantes atividades econômicas. Assim, para tentar eliminar a incompletude dos dados que pode estar presente em um ACV tradicional, surge na ecologia industrial, o modelo ACV híbrido, que incorpora a abordagem macroeconômica do enfoque insumo-produto na modelagem física de ACV. Como resultado, uma ACV híbrida é capaz de incorporar minúcias sobre um processo físico específico do ciclo de vida a ser modelado, superando, assim, a limitação associada ao problema de agregação setorial das tabelas econômicas de insumo-produto, e de truncamento de dados de uma ACV tradicional.

Suh e Huppel (2005) observam que a integração do enfoque insumo-produto na avaliação de ciclo de vida começou somente no início da década de 90, embora seus pilares tenham sido erguidos desde a década de 70, por Leontief. A primeira publicação integrando a análise insumo-produto e ACV foi em 1993, no artigo *Analyzing the life cycle impact of cars: the case of CO<sub>2</sub>*, de Moriguchi, Kondo e Shimizu. Na mesma década, essa abordagem foi enriquecida por diferentes estudos desenvolvidos, principalmente, pela Carnegie Mellon University nos Estados Unidos, a Leiden University na Holanda e a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia.



A figura 1 ilustra o número de trabalhos sobre o enfoque ACV híbrida publicados até o ano 2008 apresentado por Palma-Rojas *et al.* (2009)<sup>1</sup>.

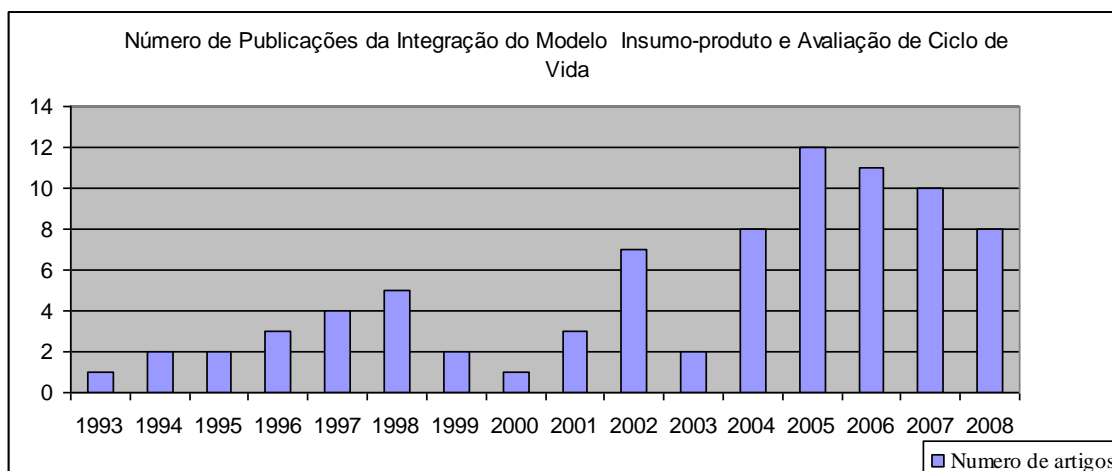


Figura 1-Número de publicações relacionadas com ACV híbrida  
Fonte: Palma-Rojas *et al.* (2009).

Segundo Palma-Rojas *et al.* (2009) foi contabilizado o total de 81 publicações até meados do ano 2008, contendo artigos publicados em revistas e congressos reconhecidos internacionalmente e teses de doutorado. Pode-se visualizar que, a partir de 2004, o número de publicações cresceu em relação ao número de publicações do início de 2000 e da década dos anos 90. Além da incorporação do enfoque insumo-produto na ecologia industrial, existem outras técnicas econômicas usadas na área: análise *structural path* e análise *Decomposition Strutral*.

Da mesma maneira, acredita-se que o enfoque de ciclo de vida da Ecologia Industrial pode trazer uma nova perspectiva analítica dentro da economia do meio ambiente, que objetiva colocar o sistema econômico em seu contexto ecológico mais abrangente (HARRIS e CODUR, 2004; HARRIS, 2003). De acordo com Callan e Thomas (2010), ACV permite rever a visão convencional da economia, em que a relação das atividades econômicas é vista como um sistema linear e aberto de fluxo de materiais, para um panorama de fluxo de materiais cíclico. Por exemplo, neste novo contexto, as atividades podem alterar, completamente, o ciclo de produção e consumo para reduzir os impactos ambientais associadas, podendo ser alcançado um fluxo de material fechado, no lugar de ter um sistema

<sup>1</sup> A principal fonte de informações na elaboração desse levantamento bibliográfico foi a base de dados da *ScienceDirect*, assim como outras bases de dados incorporadas principalmente ao pesquisador *Scirus*. Consideram-se artigos e trabalhos cujo *abstract* e palavras-chaves fizessem referência ao enfoque integrador da análise de insumo-produto e ACV. No caso de dúvidas sobre a relação do artigo com o enfoque integrador, foram lidas outras seções do trabalho.

linear que leva a controlar os resíduos somente depois de serem gerados (MAJEAU-BETTEZ *et al.* 2011; HARRIS e CODUR, 2004). A partir desse panorama, nasce a inquietude de conhecer mediante aplicações reais, a contribuição do enfoque ACV híbrido da EI na economia do meio ambiente para a análise de fatores ambientais e econômicos, surgindo, assim, o objetivo desta tese.

## **Objetivo**

Esta tese tem como objetivo principal identificar as contribuições do enfoque de ciclo de vida da ecologia industrial na economia do meio ambiente. Para entender e identificar os fatores positivos da incorporação do enfoque de ciclo de vida na economia do meio ambiente, e alcançar assim o objetivo aqui definido, serão aplicadas quatro técnicas de análise diferentes, duas da economia, isto é, enfoque insumo-produto e *structural path*, e duas da ecologia industrial, isto é ACV de processo e ACV híbrida. Cada técnica mostrará resultados de um estudo de caso sobre o setor de etanol derivado de bagaço de cana-de-açúcar, que representa o progresso tecnológico mediante o desenvolvimento de tecnologias limpas no setor de energia. Em decorrência desses exemplos, esta tese apresenta três objetivos específicos:

- aplicar o enfoque de insumo-produto para analisar o setor de etanol de segunda geração na perspectiva econômica e ambiental;
- aplicar o enfoque *structural path* para computar, identificar e hierarquizar as principais rotas de fornecedores que contribuem com o desempenho ambiental e econômico do setor etanol de segunda geração;
- aplicar o enfoque ACV de processo e ACV híbrida para calcular os impactos ambientais e econômicos no ciclo de vida do uso e produção do etanol de segunda geração, identificando e hierarquizando as principais rotas de insumos que contribuem no desempenho ambiental e econômico do setor. Nesse exercício propõe-se a aplicação de fatores econômicos na análise ACV híbrida, que originalmente é direcionada somente para analisar fatores ambientais.

Neste trabalho, o setor de etanol de segunda geração será considerado uma ferramenta auxiliar de grande relevância para entender o potencial analítico de cada técnica aqui usada, e assim, identificar a real contribuição do enfoque de ciclo de vida nas análises econômicas. No entanto, cabe destacar que o setor não será entendido como foco principal nas conclusões

desta tese. Assim, o escopo de cada análise relatada neste trabalho será limitado a um tema pontual de discussão sobre o setor identificado como marcante na literatura.

Apesar da limitação do escopo sobre o setor de etanol de segunda geração, todos os resultados aqui encontrados sobre o setor foram baseados em dados secundários significativos encontrados na literatura internacional e nacional, base de dados do governo do Brasil, associações setoriais brasileiras e empresas privadas representativas. Consequentemente, os resultados obtidos nos estudos de caso podem sim caracterizar a tendência comportamental real do setor, dentro das limitações e suposições que compõem um setor hipotético. Na figura 2, é apresentado um fluxograma da base metodológica da análise proposta pela autora para chegar a resultados ambientais e econômicos na perspectiva de ciclo de vida, ilustrando assim o objetivo deste trabalho.

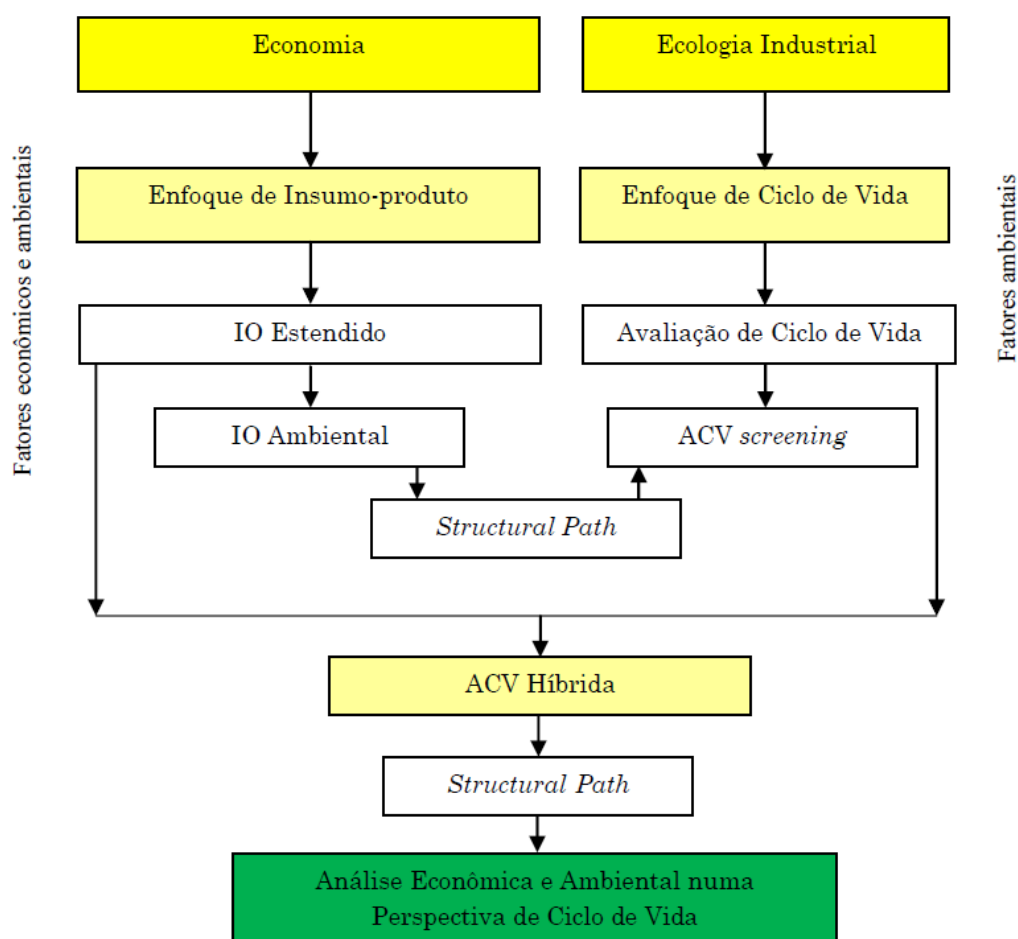


Figura 2 - Fluxograma da base metodológica do objetivo da tese

## **Estrutura da Tese**

Esta tese está dividida em 4 capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a revisão de literatura de cada um dos enfoques metodológicos utilizados e analisados neste trabalho. Tal revisão segue uma ordem cronológica para as respectivas aplicações e o resultado final do trabalho. O capítulo dois traz toda a informação referente ao setor hipotético de etanol de segunda geração analisado nos estudos de caso. Mediante uma revisão de literatura, foi elaborada uma modelagem hipotética do setor para inserir os dados potenciais na análise de insumo-produto, *structural path*, ACV e ACV híbrida. O terceiro capítulo está composto dos resultados dos três estudos de caso elaborados. O primeiro estudo mostra os resultados de diferentes cenários da economia brasileira numa análise de insumo-produto estendida. Os resultados estão divididos em fatores econômicos e ambientais. No segundo estudo são identificadas as principais rotas de fornecedores que influenciam na *performance* econômica e ambiental do setor etanol de segunda geração. O terceiro estudo de caso ilustra os resultados obtidos na ACV híbrida integrada da produção e uso do etanol de segunda geração. Nessa análise são avaliados tanto dados ambientais como dados econômicos do ciclo de vida do setor. No quarto capítulo, encontram-se as principais conclusões desta tese baseadas no objetivo principal estabelecido.

## **1. Economia do meio ambiente e ecologia industrial: componentes específicos e elementos comuns**

A representação do sistema econômico convencional mostra, mediante um diagrama de fluxo circular fechado, a troca de bens, serviços e fatores de produção com dois atores econômicos, os consumidores e os produtores. De acordo com Daly (1991) e Harris e Codur (2004), a macroeconomia é vista como um sistema isolado, no qual a troca de fluxos circula entre firmas e consumidores, não dependendo do meio ambiente e sem restrição, por exemplo, dos recursos naturais ou a poluição ambiental.

Harris e Codur (2004) apontam que, na segunda metade do século 19, os economistas estiveram focalizados, principalmente, em dois fatores de produção: trabalho e capital manufaturado, caracterizados como essenciais para o crescimento do setor industrial. Somente com o aumento dos problemas ambientais e o debate sobre a diminuição do estoque de recursos naturais no nível local, nacional e global nas décadas recentes, os economistas têm, novamente, prestado mais atenção às restrições dos recursos naturais e do meio ambiente, chamado na estrutura econômica original de fator de produção terra (HARRIS e CODUR, 2004; ENGLAND, 2000; GIRMA, 1992; DALY, 1991; STIGLITZ, 1974). Para Daly (1991), a visão convencional da macroeconomia deve sofrer alterações fundamentais, representando a macroeconomia como um subsistema aberto do ecossistema natural finito, e não como um fluxo circular isolado sem restrições do balanço de massa, energia, entropia e finitude.

As políticas macroeconômicas convencionais visam à estabilização econômica evitando excesso de inflação e recessão; eficiência; crescimento; e ultimamente, o bem-estar humano, que abrange emprego, educação e saúde universal. Da mesma maneira que Daly (1991), Harris (2001) aponta que mudanças substanciais nas políticas convencionais são necessárias para promover tanto a sustentabilidade quanto os objetivos econômicos tradicionais, como: eficiência, aumento no consumo baseado na distribuição e estabilidade macroeconômica, em que exista integração das dimensões ambientais e sociais nas políticas econômicas (CALLAN e THOMAS, 2010; RØPKE, 2005; MUNASINGHE, 2004).

Para Harris (2001), o objetivo da macroeconomia ambiental inclui, primeiramente, simplicidade e transparência, que devem ser focalizadas em um princípio básico: como os mercados não regulados são voláteis e com frequência, disruptivos social e ambientalmente, torna-se essencial a intervenção governamental informada usando ferramentas de políticas fiscal, monetária e outras. Como segundo preceito está a promoção de objetivos sociais, que na maioria dos casos podem ser alcançados por meio de ações coletivas usando instituições

democráticas com boa governança. Para Harris (2001), a necessidade da interferência governamental é mais do que um simples requerimento técnico para a estabilidade macroeconômica, ela representa a única maneira plausível de atingir os objetivos primordiais para o bem-estar, que não são oferecidos ou adequadamente fornecidos pelo mercado. Como terceiro item cita-se a preocupação com equidade, que demanda o aumento do consumo pelos mais pobres e moderado consumo pelos mais ricos. Como quarto objetivo está a proteção do meio ambiente e o limite do crescimento sem qualidade, que deve estar acompanhado do progresso tecnológico mediante o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e a implementação de regulações ambientais mais fortes. Em quinto lugar apresentam-se as políticas de comércio sustentáveis, que não provoquem afeitos ambientais e sociais negativos, e que não tendam a concentrar o poder. Por último, o objetivo de reforma institucional internacional, que focaliza na implementação de instituições globais que discutam sobre o meio ambiente e que estabeleçam políticas sobre o capital de recirculação e a disseminação de tecnologia que promova o desenvolvimento sustentável.

As estratégias para o desenvolvimento sustentável devem permitir contínuos melhoramentos na presente qualidade de vida com uso menos intensivo de recursos naturais, de tal maneira que proteja os bens produtivos para utilização futura. Com base nos objetivos da macroeconomia ambiental, para Harris (2003), o princípio da sustentabilidade inclui os seguintes aspectos:

- a. a conservação do capital natural é essencial para a produção econômica sustentável e para a equidade intergeracional;
- b. o total de população e a demanda total por recursos devem ser limitados em escala, na qual a integridade dos ecossistemas e a diversidade de espécies devem ser mantidas;
- c. as práticas consistentes com o desenvolvimento sustentável devem remediar a desigualdade social e o dano ambiental, mantendo uma base econômica sólida;
- d. a equidade social deve ter elementos como saúde básica e educação universal, e democracia participativa;
- e. o crescimento limitado da população deve ser o elemento central do desenvolvimento econômico;
- f. a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis requer mudanças no sistema produtivo e no padrão de consumo;
- g. o sistema de energias renováveis deve ser significativamente mais descentralizado, tornando-as adaptadas a condições locais como vento, biomassa e sol;

- h. por último, o conceito de ecologia industrial implica a reestruturação de todos os setores econômicos baseados no objetivo de reduzir as emissões e reusar materiais em todas as etapas do ciclo de vida da produção. Assim, urgem reformas corporativas e processos mais amigáveis com o meio ambiente, bem como se faz preciso um esforço cooperativo entre setor produtivo e governo para alcançar a sustentabilidade das atividades econômicas.

Na ecologia industrial, como na macroeconomia ambiental, a relação entre economia e meio ambiente geralmente é explicada na forma de modelos de balanço de materiais baseado na primeira e segunda leis da termodinâmica, que ditam a conservação da matéria e a entropia, respectivamente. Com base na segunda lei, explica-se como o processo econômico consiste em uma contínua transformação de recursos de baixa entropia em recursos de alta entropia, representada por resíduos.

Esses enfoques consideram o total de processos econômicos como um fluxo balanceado fisicamente entre entradas e saídas, com a diferença que na economia o modelo é visto como um sistema de fluxo linear de materiais, e na ecologia industrial propõe-se um sistema de fluxo de materiais circular (CALLAN e THOMAS, 2010). Essa diferença é explicada por Georgescu-Roegen (1971), que aponta que na visão da economia convencional, o produto da atividade econômica não é o fluxo físico transformado em resíduo, e sim, o bem-estar que ele fornece. Já a ecologia industrial, motivada pelo desenvolvimento sustentável, integra os objetivos econômicos com as metas ambientais, onde o fluxo físico transformado em resíduo tem valor no mercado e entra novamente na dinâmica econômica para maximizar o bem-estar e minimizar os impactos ambientais.

### 1.1 Ecologia industrial e a economia do meio ambiente

A ecologia industrial (EI) é definida como uma área do conhecimento na qual se estudam os fluxos de materiais e a energia das atividades industriais e de consumo, os efeitos desses fluxos sobre o meio ambiente e a influência dos fatores econômicos, sociais, políticos e regulatórios sobre o fluxo, o uso e a transformação dos recursos (LIFSET e GRAEDEL, 2002).

Como qualquer outra área do conhecimento, o começo da ecologia industrial (EI) veio precedido por ideias e atividades de outros campos de estudo. Erkman (2002) argumenta que o início da EI foi em meados da década dos anos 70, no contexto da grande atividade intelectual que marcou os primeiros anos do Programa das Nações Unidas para o Meio

Ambiente (PNUD). Lifset (2009) e Erkman (2002) explicam que o surgimento organizado e consciente da EI pode ser apontado no artigo *Estrategias for manufacturing* (FROSCHE e GALLOPOULOS, 1989) publicado na *Scientific American*, no qual foi introduzido o conceito de ecossistemas industriais e foram propostas muitas das ideias que fazem parte do contexto de EI na atualidade. Dentre elas, citam-se as seguintes: a analogia do sistema biológico e o sistema econômico, a necessidade da perspectiva de sistemas em análises ambientais, a gestão de políticas públicas e as oportunidades para ciclos fechados de materiais (DUCHIN e HERTWICH, 2003; ERKMAN, 2002; LIFSET e GRAEDEL, 2002; LIFSET, 2009). Para FROSCHE e GALLOPOULOS (1989), o conceito de ecossistemas industriais considera um modelo de atividade econômica integrado, no qual o consumo de energia e materiais é otimizado, a geração de resíduos é minimizada e os efluentes de um processo servem como matéria-prima ou insumo para outro processo.

Cabe sublinhar que ideias e conceitos de diferentes grupos de pesquisa foram contextualizando o que é hoje a EI. Por exemplo, Robert Ayres teve papel importante no desenvolvimento de muitos dos conceitos usados na área; pesquisadores belgas desenvolveram a noção de EI no início da década de 80; e no Japão existia desde 1970 um grupo de trabalho de ecologia industrial (DUCHIN e HERTWICH, 2003; ERKMAN, 2002; LIFSET e GRAEDEL, 2002; LIFSET, 2009).

Com a consolidação da área na década de 1990, algumas instituições de pesquisa introduziram em seus currículos programas com graus universitários em EI, como a Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU – Norwegian University of Science and Technology), que foi pioneira ao implementar o programa de ecologia industrial em 1996, e a Mount Royal College no Canadá (DUCHIN e HERTWICH, 2003). Em 1997, a escola de estudos ambientais e florestais da Universidade de Yale contratou Thomas Graedel como professor de EI e lançou o *Journal of Industrial Ecology* (LIFSET, 2009). Na Europa, a Universidade de Leiden e a Universidade de Tecnologia de Delft da Holanda, a Universidade de Surrey no Reino Unido têm programas de pós-graduação e grupos de pesquisa em EI, e na China, a Universidade de Wuhon entra no grupo dessas instituições. Muitas outras universidades possuem em sua grade curricular de escolas como engenharia, negócios, saúde pública, e recursos naturais disciplinas dentro do contexto da EI, como Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e Análise de Fluxos Mássicos e Energéticos (AFME).

Já aqui no Brasil, no Centro de Desenvolvimento Sustentável e no Departamento de Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília (UnB), existe um curso opcional de Ecologia Industrial. Cabe sublinhar que a UnB, em conjunto com universidades como a Universidade



de São Paulo, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a Universidade Federal da Bahia e a Universidade Federal de Santa Catarina têm grupos de pesquisa, especialmente na área de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

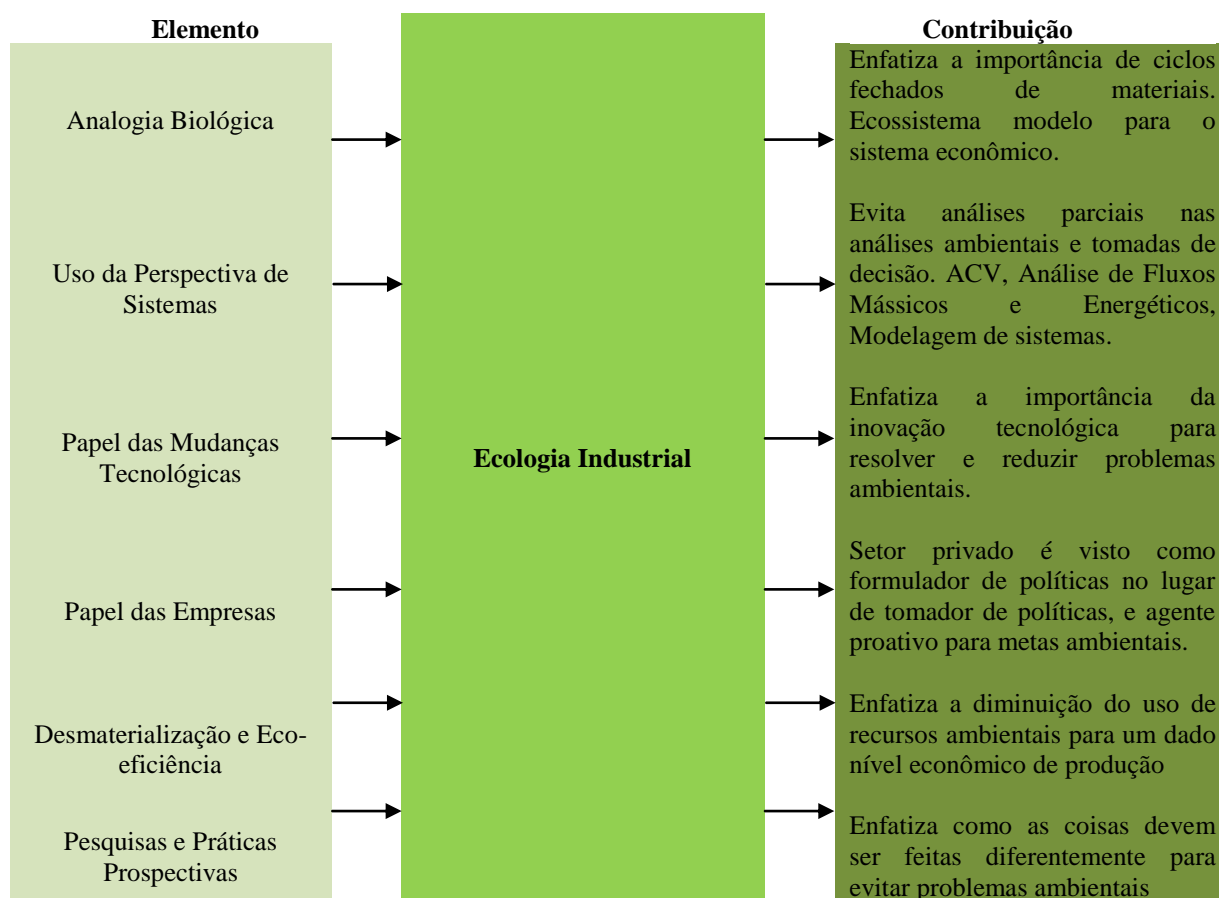
Para o entendimento do contexto da EI, Lifset e Graedel (2002) e Lifset (2009) definem que a EI é industrial porque ela se focaliza no design do produto e nos processos de manufatura. Isto porque as firmas são vistas como agentes de melhoria do meio ambiente, porque possuem o conhecimento tecnológico necessário para projetar produtos e processos informados ambientalmente.

Já EI é ecológica pelo menos por duas razões: primeiramente, vê a dinâmica do sistema natural como um modelo para a dinâmica das atividades econômicas, especialmente no tocante a sistemas de ciclos fechados de materiais, mais conhecido como *loop closing*. E em segundo lugar porque EI coloca o sistema econômico no contexto de um ecossistema maior que suporta todas as atividades econômicas, examinando as fontes de recursos usadas pela sociedade e a forma de absorver ou tratar os resíduos (LIFSET e GRAEDEL, 2002; LIFSET, 2009). Os diferentes elementos que formam a estrutura da EI são ilustrados na tabela 1, que apresenta cada princípio que constitui a EI, bem como sua respectiva contribuição na base conceitual de EI.

De acordo com Lifset e Graedel (2002) e Lifset (2009), o princípio “uso da perspectiva de sistemas” enfatiza em uma estrutura que inclui os componentes que interagem significativamente com um fenômeno, evitando análises estreitas e parciais. Tal princípio se manifesta mediante o uso de uma perspectiva de ciclo de vida, de análises AFME, de modelagem de sistemas e da sinergia de pesquisas e análises multidisciplinares e interdisciplinares.

A perspectiva de ciclo de vida é abordada pela metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV). A ACV é uma estrutura metodológica para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto ou serviço (FINNVEDEN, 2009; ISO 14040, 2006; REBITZER *et al.* 2004; UDO de HAES *et al.* 2004; BAUMMAN e TILLMAN, 2004; ISO 14040, 1997). Entre as principais aplicações de um estudo ACV, estão as seguintes: desenvolvimento de produtos mais “amigáveis” com o meio ambiente, comparação da performance ambiental de diferentes produtos, planejamento estratégico do país em temas ambientais, identificação de melhorias no produto (ISO 14040, 2006; BAUMMAN e TILLMAN, 2004).

Quadro 1- Elementos da ecologia industrial e suas respectivas contribuições



Fonte: elaboração própria baseada em Lifset e Graedel (2002) e Lifset (2009).

A perspectiva micro da EI está composta de balanços físicos para crescente número de materiais e unidades espaciais. Já a perspectiva macro da área está preocupada com a formulação e avaliação de opções para tomadores de decisões chave. Na tentativa de unir as duas vertentes num nível intermediário ou meso, aparece a integração de modelos econômicos com modelos físicos da EI, por exemplo, a integração do enfoque ACV e o enfoque econômica de insumo-produto, com suas crescentes conexões como as tabelas físicas de insumo-produto, a integração de contas ambientais nas contas econômicas e a *structural path analysis* (DUCHIN e HERTWICH, 2003). Como resultado, existe um crescente uso do enfoque insumo-produto econômico na EI, estando focalizado, principalmente, no desenvolvimento de dados. Apresentando, assim, uma diferença analítica com a economia, onde a ferramenta tem estado mais direcionado na modelagem.

A análise econômica de insumo-produto é o estudo da interdependência dos diferentes setores de uma economia. As tabelas de insumo-produto são convertidas mediante simples manipulação matricial numa matriz de entradas por unidades de produto, conhecida como matriz de coeficientes técnicos, que servem como parâmetros estruturais. Duchin e Hertwich

(2003) observam que esse passo permite a passagem de descrição e estatística descritiva à modelagem de cenários alternativos.

Suh e Kagawa (2009) ressaltam que, embora Duchin (1990), Duchin (1992), e Duchin (1994) tenham feito a primeira conexão explícita do enfoque de insumo-produto com a EI, Leontief (1970) e Leontief e Ford (1972) incorporaram na análise econômica de insumo-produto conceitos-chaves da EI, estendendo o modelo original à contabilidade dos produtos “não desejáveis” dos setores da economia (emissões, resíduos, poluição), bem como a incorporação do setor de abatimento da poluição dentro do mesmo modelo. A extensão ambiental do modelo original tornaria a análise de insumo-produto ambiental uma ACV *cradle-to-gate* ou do berço ao portão, em nível macro, conhecido também como ACV *screening*. Isto porque uma coluna numa matriz de coeficientes técnicos representa os insumos diretos necessários para produzir uma unidade monetária do produto do setor representando a coluna. Já a matriz de Leontief captura os insumos indiretos de todos os outros setores e os insumos diretos do setor. Esta característica é de especial interesse para ACV porque considera todos os processos do ciclo de vida *cradle-to-gate*.

Para Suh e Kagawa (2009), a análise de insumo-produto sempre teve a ambição de facilitar a pesquisa interdisciplinária pela conexão de diferentes áreas. Isto porque apesar da sua simplicidade conceitual e operacional, a estrutura de insumo-produto compreende desde relações de preço e quantidade, a fatores e tecnologia de produção, distribuição de renda, investimento de capital e trabalho, comércio internacional, mudanças dinâmicas e estruturais. Assim, muitas das questões levantadas pela EI demandam a cooperação de engenheiros e cientistas ambientais com economistas (SUH e KAGAWA, 2009; BERGH e JANSSEN, 2004; DUCHIN, 1994). Algumas das ferramentas analíticas e modelos desenvolvidos por especialistas de insumo-produto que tem relevância direta com a representação conceitual e analítica da EI são: análise *Structural Path*, análise de setores-chaves, análise *Decomposition Structural*, modelos de insumo-produto dinâmicos, modelos de escolha de ótima tecnologia, e modelos da economia mundial (SUH e KAGAWA, 2009; DUCHIN, 2009; BERGH e JANSSEN, 2004; DEFOURNY e THORBECKE, 1984; DEFOURNY 1982).

Como resultado, a economia do meio ambiente oferece várias estruturas conceituais e técnicas para estudar as dimensões físicas do sistema econômico, que podem ser perfeitamente relacionadas com as ideias e objetivos da EI (BERGH e JANSSEN, 2004; DUCHIN e HERTWICH, 2003). De acordo com Bergh e Janssen (2004), existem quatro razões pelas quais a incorporação de dimensões físicas em uma análise de eficácia de uma política ambiental pode melhorar os resultados de uma análise simplesmente econômica; esse

aspecto é chamado pelos autores como enfoque da economia física ou economia da ecologia industrial (EEI). As razões são as seguintes:

- primeira, o enfoque da EEI permite que a pesquisa seja conduzida sobre a coerência de problemas ambientais, mediante a incorporação de um contexto físico realista numa economia monetária;
- segunda, ela cria uma base para entender conceitos como “sustentabilidade” e “desenvolvimento sustentável”, porque esses conceitos têm estreita relação com as restrições físicas;
- terceira, o enfoque facilita o uso multidisciplinário de modelos e perspectivas econômicas;
- por último, a quarta razão é porque viabiliza sugestões robustas sobre políticas, já que permite a integração de vários panoramas em formato de modelos, testando oportunidade e limitações físicas, técnicas e econômicas (BERGH e JANSSEN, 2004).

## 1.2 Avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida é uma estrutura metodológica para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto ou serviço (ISO 14044, 2006; REBITZER *et al*; 2004; UDO de HAES *et al*; 2004; BAUMMAN e TILLMAN, 2004; FINNVEDEN *et al*; 2009; ISO 14040, 1997). O conjunto de processos na economia responsáveis por cumprir uma certa função do produto ou serviço definido é chamado sistema de produto (UDO de HAES *et al*; 2004).

Desde 1994, a Organização Internacional para Normalização tem tido importante papel na padronização da metodologia ACV. Como resultado, a estruturação de um estudo de ACV está baseado na série da norma ISO 14040. Além da ISO, a Sociedade de Toxicologia e Química (Setac) vem trabalhando no desenvolvimento metodológico de ACV desde 1990. E o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnud) tem se focado na disseminação do uso global da metodologia desde 1995.

A ferramenta possui uma estrutura técnica composta por quatro fases bem especificadas: a) definição de objetivo e escopo; b) análise de inventário de ciclo de vida; c) avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida; d) interpretação dos resultados (FINNVEDEN *et al*; 2009; ISO 14044, 2006; REBITZER *et al*; 2004; UDO de HAES *et al*; 2004; BAUMMAN e TILLMAN, 2004; ISO 14040,1997).

A fase de “definição de objetivo e escopo” começa com a especificação do propósito e abrangência do estudo, segue com a descrição da unidade funcional, que é a medida quantitativa da função a ser avaliada (todos os processos analisados numa ACV devem estar relacionados quantitativamente a essa unidade), a determinação da fronteira do sistema de produto, a definição da modelagem do inventário de ciclo de vida, a escolha do método de alocação para processos multifuncionais, e a delimitação do nível de detalhamento requerido para a aplicação pretendida dos resultados (BAUMMAN e TILLMAN, 2004; UDO de HAES *et al*; 2004; EC/JRC, 2010).

A fase de “análise de inventário de ciclo de vida” é a parte mais objetiva e a que consome mais tempo no estudo, pois envolve a coleta e a quantificação das entradas e saídas do sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida (SUH e HUPPES, 2009, 2005; BAUMMAN e TILLMAN, 2004; UDO de HAES *et al*; 2004). Já a fase de “avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida” interpreta a extração e emissões da tabela de inventários em termos ambientais (UDO de HAES *et al* 2004; BAUMMAN e TILLMAN; 2004). Na última etapa, “interpretação dos resultados do ciclo de vida”, os dados são relacionados ao objetivo definido no início do estudo.

Cada uma das etapas de uma ACV está em interação contínua com as outras. Entre as aplicações diretas de uma ACV, estão as seguintes: a) desenvolvimento e melhorias de produtos; b) planejamento estratégico de um país, região; c) formação de políticas públicas; d) publicidade; entre outras. A figura 2 resume as etapas e possíveis aplicações de uma ACV. Cabe destacar que todas as etapas estão contempladas na série das normas ISO 14040. A ISO 14040 (1997) descreve os princípios e a estrutura de uma ACV; a ISO 14041 (1998) define a etapa de objetivo e do alcance, como também, a análise de inventários de ciclo de vida; a ISO 14042 (2000) especifica a estrutura da avaliação de impacto do ciclo de vida; a ISO 14043 (2000) discrimina a interpretação dos resultados; e a ISO 14044 (1996) detalha os requerimentos e prove um guia de ACV, incorporando os estudos de ACVe ICV.

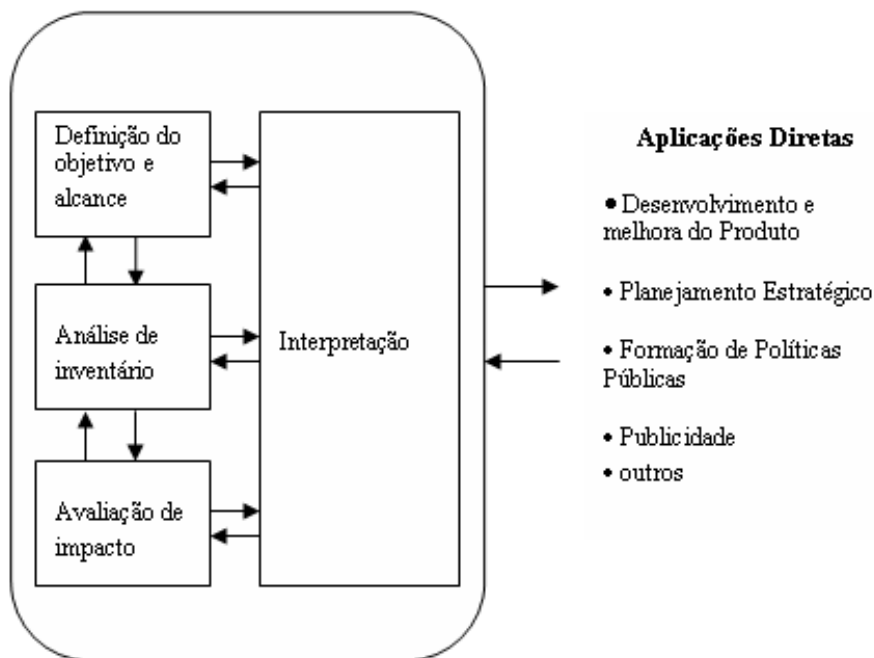


Figura 3 - Etapas e aplicações de uma ACV

Fonte: ISO 14040 (1997) e ISO 14044 (2006).

Suh e Huppés (2009, 2005) ressaltam que o inventário de ciclo de vida (ICV) é considerado o procedimento mais direto e trabalhoso de um estudo ACV, quando comparado com as outras etapas da metodologia. Numa descrição geral, as principais atividades de um ICV são: a) construção do fluxograma de acordo com as fronteiras do sistema apontadas na definição de objetivo e alcance; b) coleta de dados para todas as atividades no sistema, com sua respectiva documentação e cálculos<sup>2</sup>; e c) cálculo das intervenções ambientais do sistema com relação à unidade funcional (BAUMMAN e TILLMAN, 2004; HUIJBREGTS *et al*; 2010).

Em um ICV, tanto dados numéricos como qualitativos devem ser levantados. Os dados numéricos consistem em todos os insumos das atividades modeladas, isto é, entradas de matérias primas, energia, insumos, e todas as saídas, como produtos, emissões ao ar, água e superfície, bem como demais aspectos ambientais (EC/JRC, 2010; SUH e HUPPES, 2009, 2005; BAUMMAN e TILLMAN, 2004). A coleta de dados depende do tipo de modelagem de ICV, definido na primeira etapa de uma ACV, ou seja, modelagem atribucional ou consequential, e na definição das fronteiras do sistema, isto é, fronteiras em relação ao sistema natural, à localização geográfica, à referência temporal e ao sistema técnico (EC/JRC, 2010; BAUMMAN e TILLMAN, 2004).

<sup>2</sup> A coleta de dados é a fase que consome a maior parte do tempo no estudo de ACV, mas pouco pode ser dito de como realizar essa atividade, pois é meramente conhecimento de cada processo e de levantamento dos dados.

A modelagem atribucional é a mais usada por praticantes de ACV, e descreve um sistema de produto e os impactos ambientais potenciais atribuíveis a seu ciclo de vida (PALMA-ROJAS *et al*; 2011a; EC/JRC, 2010; BAUMMAN e TILLMAN, 2004). Já a modelagem consequencial detalha a consequência esperada de uma mudança na demanda (PALMA-ROJAS *et al*; 2011a; EC/JRC, 2010; BAUMMAN e TILLMAN, 2004), considerando dentro de seu sistema de fronteira, os processos marginais ou afetados pela mudança.

Com a definição da modelagem ICV, apresenta-se um dos temas de maior controvérsia na etapa de ICV, o método de alocação ou método para solucionar problemas de multifunções ou coprodutos nos processos. O método mais usado pelos analistas de ACV é o conhecido como alocação, que distribui, mediante certos critérios, os fluxos e as cargas ambientais correspondentes a cada multiproduto (EC/JRC, 2010; BAUMMAN e TILLMAN, 2004). A ISO 14044 (2006) estabelece uma ordem hierárquica de enfoques para solucionar problemas de multifuncionalidade. Primeiramente, especifica evitar alocação, mediante subdivisão, quer dizer, pelo aumento do nível de detalhamento do modelo, ou seja, subdividir uma unidade de processo<sup>3</sup> caixa-preta multifuncional<sup>4</sup> em uma unidade de processo de única operação. O segundo enfoque para evitar alocação é sistema de expansão, em que cargas ambientais evitadas de um processo alternativo de algumas das funções são acreditadas. A última alternativa é alocação, na qual se pondera, mediante diversos critérios físicos ou econômicos, a contribuição de cada produto ou função nas cargas ambientais (EC/JRC, 2010; BAUMMAN e TILLMAN, 2004).

Por último, a qualidade dos dados usados num ICV depende, de acordo com a ISO 14041 (1998), da relevância, isto é, cobertura temporal, localização geográfica, tecnológica, completeza, e representabilidade; da confiabilidade, isto é, precisão, exatidão e incertezas dos dados, e consistência; e da acessibilidade, ou seja, a reprodutividade e consistência.

### 1.2.1 Análise de inventário de ciclo de vida

Entre os principais métodos de compilação de dados ICV, citam-se os seguintes: enfoque de diagrama de fluxo de processos, enfoque de inversão matricial e enfoque insumo-produto.

---

<sup>3</sup> Unidade de processo é o menor elemento considerado numa análise de ICV, onde entradas e saídas são quantificadas (ISO 14040: 1997).

<sup>4</sup> Unidade de processo de caixa preta é uma unidade de processo que inclui mais de uma unidade de processo com uma única operação. A unidade de processo de uma única operação não pode ser subdividida em outros processos incluídos.

Um ICV de diagrama de fluxo de processos descreve graficamente o ciclo de vida do sistema produto e o modelo inerente que especifica a relação quantitativa dos diferentes elementos. O diagrama de fluxo de processos está composto de diferentes processos que intervêm quando um produto é produzido, transportado, usado e descartado. Segundo Huijbregts *et al.* (2010), devem-se seguir quatro passos para determinar as intervenções ambientais relacionadas a uma unidade funcional no método de diagrama de fluxo de processo: a) identificação dos processos no ciclo de vida; b) quantificação das intervenções ambientais de cada processo; c) cálculo do nível de produção dos diferentes processos segundo a unidade funcional; d) cálculo das intervenções ambientais agregadas segundo a unidade funcional. De acordo com Suh *et al.* (2004), na modelagem de um ICV, tanto o número de processos envolvido no sistema de produto como os processos *downstream* (uso, consumo e disposição final) são limitados, trazendo assim, problemas de incompleta no estudo de ACV.

De acordo com Suh e Huppés (2005, 2009), o método de matriz inversa foi introduzido em ACV por Heijungs (1994). Nele é utilizado um sistema de equações lineares para o cálculo final do total das intervenções ambientais, onde existe uma matriz tecnológica,  $\tilde{\mathbf{A}} = \|\tilde{a}_{ij}\|$ , e cada elemento ( $\tilde{a}_{ij}$ ) mostra as entradas (valores negativos) e saídas (valores positivos) do insumo  $i$  do processo  $j$  para determinado fator de escala  $s$  (SUH e HUPPES, 2009, 2005; HEIJUNGS e SUH, 2002). O fator de escala relaciona as entradas e saídas de uma unidade de processo com a respectiva unidade funcional do estudo definida na demanda final  $\mathbf{y}$  (SUH e HUPPES, 2009, 2005; HEIJUNGS e SUH, 2006; HEIJUNGS e SUH, 2002). Desde que no método de matriz inversa se assume tecnologia linear, o fator de escala é uma constante de cada unidade de processo.

$$\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{s}=\mathbf{y}\leftrightarrow\mathbf{s}=(\tilde{\mathbf{A}})^{-1}\mathbf{y} \quad (1)$$

Ao quantificar as intervenções ambientais de cada processo, pode-se estimar o vetor de fluxos ambientais referentes à unidade funcional.

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{A}})^{-1}\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{s} \quad (2)$$

Onde  $\tilde{\mathbf{B}}$  representa a matriz de intervenções ambientais e  $\tilde{\mathbf{x}}_{\mathbf{B}}$  o vetor do inventário de ciclo de vida ambiental. Com base em Huijungs e Suh (2002), apresenta-se um modelo formal genérico da estrutural computacional de ACV:



**Definição 1:** A matriz tecnológica  $\tilde{A}$  é um conjunto de vetores de processo que representa a troca entre processos. Cada vetor de processo  $\mathbf{p}$  é um espaço linear cuja base representa os fluxos de produtos ou serviços ou fluxos econômicos, e os coeficientes representam a quantidade desses fluxos absorvidos ou produzidos pela unidade de processo representada. Um coeficiente negativo indica uma entrada na unidade de processo, um coeficiente positivo representa uma saída da unidade de processo, e zero indica que não existe relação entre o fluxo com a unidade de processo específica.

**Definição 2:** A matriz de intervenções ambientais  $\tilde{B}$  é um conjunto de vetores de processo que representa a troca com o meio ambiente. Cada vetor de processo  $\mathbf{p}'$  é um espaço linear cuja base representa os fluxos de resíduos, emissões, recursos naturais ou fluxos ambientais, e os coeficientes significam a quantidade desses fluxos emitidos ou consumidos pela unidade de processo representada.

**Axioma 1:** Os processos representam tecnologias lineares, e não existem efeitos de escala na produção ou consumo. Assim, todo vetor de processo  $\mathbf{p}$  ou  $\mathbf{p}'$  deve ser multiplicado por uma constante chamada fator de escala  $s_j$ .

**Definição 3:** De acordo com o axioma 1, a constante  $s_j$  de cada unidade de processo pode ser organizada para formar um vetor de fatores de escala  $\mathbf{s}$ .

**Axioma 2:** Os fluxos podem ser agregados nos processos respeitando sempre o sinal do coeficiente.

**Definição 4:** O vetor de demanda final  $\mathbf{y}$  é um vetor de fluxos econômicos. Os coeficientes desse vetor indicam a quantidades dos fluxos econômicos que deve ser absorvida ou produzida pelo sistema analisado.

De acordo com Huijungs e Suh (2002), com base nas definições e nos axiomas estabelecidos, pode-se formular o problema de inventário:

**Lema 1:** Seja  $\tilde{A}$  uma matriz tecnológica de um sistema de produto. Para permitir que o sistema de produto absorva ou produza o vetor de demanda final  $\mathbf{y}$ , um vetor de fator de escala  $\mathbf{s}$  deveria ser encontrado para que a condição  $\tilde{A}\mathbf{s} = \mathbf{y}$  seja encontrada.

Prova: Seja  $\mathbf{y}_i$  vetor de demanda final do fluxo econômico  $i$ , e  $|\tilde{a}_{ij}|$  coeficientes da matriz tecnológica do sistema de produto. Pelos axiomas 1 e 2, deve-se mostrar que existe um vetor de fator de escala  $\mathbf{s}$  no sistema de produto que absorve ou produz o vetor de demanda final.

$$\text{Se } \tilde{y}_i = \tilde{a}_{i1}s_1 + \tilde{a}_{i2}s_2 + \dots$$

Ao aplicar essa equação a todos os fluxos econômicos,

$$\tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{s}$$

Assim, o sistema absorve ou produz o vetor  $\tilde{y}$ . Ao impor que o sistema absorve ou produz a demanda final  $y$ , pode-se encontrar o mesmo vetor  $s$  tal que,

$$\tilde{y} = y \text{ ou } y = \tilde{A}s$$

■

**Teorema 1:** *o lema 1 leva a uma única solução  $s = \tilde{A}^{-1}y$ , sendo  $\tilde{A}^{-1}$  uma matriz quadrada e não singular*

Prova: seja  $\tilde{A}_{n \times n}$  uma matriz de coeficientes técnicos com  $\text{rank}(\tilde{A}) = n$  e  $|\tilde{A}| \neq 0$ .

Pelo lema 1, deve-se demonstrar que  $s$  tem solução única.

$$\text{Seja } \tilde{A}s = y$$

Ao multiplicar ambos os lados por  $\tilde{A}^{-1}$

$$\tilde{A}^{-1}\tilde{A}s = \tilde{A}^{-1}y \rightarrow (\tilde{A}^{-1}\tilde{A})s = \tilde{A}^{-1}y \rightarrow s = \tilde{A}^{-1}y$$

Chega-se a solução do vetor  $s$ , cuja unicidade é demonstrada por

$$\tilde{A}s = \tilde{A}(\tilde{A}^{-1}y) = (\tilde{A}\tilde{A}^{-1})y = y$$

■

Mediante a demonstração do teorema 1 pode-se prosseguir para chegar à solução do problema de inventário e definir o vetor de inventário.

**Definição 5:** *Um vetor de inventário  $\tilde{x}$  é um vetor de fluxos ambientais. Os coeficientes desse vetor representam a quantidade deles que o sistema absorve ou produz.*

**Teorema 2:** *Seja  $\tilde{B}$  a matriz de intervenções ambientais de um dado sistema. Com determinado vetor de fator de escala  $s$ , o vetor de inventário é dado por  $\tilde{x}_B = \tilde{B}s$ .*

Prova: Seja  $\tilde{b}_{kj}$  um coeficiente qualquer da matriz de intervenções ambientais do fluxo ambiental  $k$ . Pelos axiomas 1 e 2, deve-se mostrar que existe um vetor de inventário  $\tilde{x}_B$  que o sistema absorve ou produz.

$$\text{Se } \tilde{x}_{Bk} = \tilde{b}_{k1}s_1 + \tilde{b}_{k2}s_2 + \dots$$

Ao aplicar essa equação a todos os fluxos ambientais, o teorema segue diretamente

$$\tilde{x}_B = \tilde{B}s$$

■

Como no caso do enfoque de diagrama de processos, existem também problemas de completudeza no enfoque matricial. Isto porque as relações incorporadas no sistema de equações são limitadas aos processos incluídos na fronteira do sistema.

### 1.3 Análise Insumo-produto

Leontief (1965) observa que o enfoque de insumo-produto é uma adaptação da teoria neoclássica do equilíbrio geral para o estudo empírico da interdependência quantitativa entre atividades econômicas interrelacionadas. Para Miller e Blair (2009), o modelo básico de insumo-produto de Wassily Leontief é construído, geralmente, a partir de dados econômicos observados para uma região geográfica específica, isto é, nação, estado, país, e se preocupa com a atividade de um grupo de indústrias que produzem “bens ou geram serviços” (denotado na língua inglesa como “*outputs*”) e ao mesmo tempo, consomem “bens ou serviços” de outras indústrias (denotado na língua inglesa como “*inputs*”) no processo de obter seu produto. Assim, de acordo com Leontief (1965), essa interdependência setorial de um dado sistema é descrita por um conjunto de equações lineares, em que suas características estruturais específicas se refletem na grandeza numérica dos coeficientes, representadas nas tabelas de insumo-produto.

Nas tabelas de insumo-produto se descreve o fluxo de bens e serviços entre todos os setores de uma economia durante um período de tempo (MILLER e BLAIR, 2009; LEONTIEF, 1965). Em termos monetários, pode-se descrever as transações monetárias entre os setores, por exemplo, quantos reais o setor de produtos de cana-de-açúcar comprou do setor químico no ano anterior. Em termos físicos, pode-se detalhar a troca de bens e serviços entre os setores, isto é, a venda e compra de bens físicos ou serviços, por exemplo, toneladas de produtos químicos compradas pelo setor agropecuário no ano anterior.

Tal dinâmica de transações intersetoriais possibilita, em princípio, registrar as trocas tanto em termos físicos, quanto em termos monetários. Mas nessa possibilidade de medição, Leontief (1965) aponta que, na prática, as tabelas de insumo-produto são medidas em termos monetários, uma vez que as quantidades físicas dos diferentes insumos consumidos em cada setor não podem ser significativamente agregadas (WAUGH, 1950). Noutras palavras, os termos físicos trazem consigo problemas de medida, isto por ser impraticável considerar o grande número de produtos e serviços produzidos numa economia, pois eles só estariam representando o produto físico que simbolizam. Já os termos monetários introduzem problemas devido à mudança nos preços que não refletem as mudanças no uso dos insumos físicos (MILLER e BLAIR, 2009; WAUGH, 1950).

Miller e Blair (2009) destacam que, embora, na atualidade, os termos monetários sejam usados no registro dos dados de insumo-produto e nos estudos de insumo-produto realizados, existe crescente interesse de modelos de unidades combinadas ou de tabela de

insumos-produtos tanto em unidades monetárias como em unidades físicas (SUH e HUPPES, 2009, 2005; BERGH e JANSSEN, 2004; HOEKSTRA e BERGH, 2004). Isto fato se deve à paulatina sinergia entre a ecologia industrial e a economia.

### 1.3.1 Contexto da análise insumo-produto

A região econômica é subdividida em  $n+1$  setores, com  $n$  indústrias ou setores de produção e um  $n+1$ -ésimo setor chamado de demanda final ou demanda exógena dos  $n$  setores industriais. A demanda final está composta pelo consumo de famílias ( $c_i$ ), consumo de governo ( $g_i$ ), compras com o propósito de investimento privado ( $i_i$ ), exportação ( $e_i$ ); a demanda final é representada por ( $f_i$ ), para  $i=1:n$  setores da economia. O valor monetário das transações entre pares de setores é representado por ( $z_{ij}$ ), isto é, o setor  $j$  compra insumos fornecidos pelo setor  $i$ . A soma das vendas do setor  $i$  aos outros setores  $j$  mais a demanda final do setor  $i$  é representada por ( $x_i$ ), conhecida também como produção total do setor  $i$ . A equação 3 representa o equilíbrio entre a produção total do setor  $i$  e a distribuição de seus produtos aos outros setores e ao setor exógeno.

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + f_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + f_i \quad (3)$$

Como descrito anteriormente, a região econômica é subdividida em  $n$  setores. Como resultado, existe um sistema linear de  $n$  equações do tipo eq. 3, como representado em equação 4.

$$\begin{aligned} x_1 &= z_{11} + z_{12} + \dots + z_{1j} + \dots + z_{1n} + f_1 \\ &\quad \vdots \\ x_n &= z_{n1} + z_{n2} + \dots + z_{nj} + \dots + z_{nn} + f_n \end{aligned} \quad (4)$$

Esse sistema de equações pode ser representado em forma matricial, sendo ( $\mathbf{x}$ ) o vetor de produção total; ( $\mathbf{f}$ ) o vetor de demanda final e; ( $\mathbf{Z}$ ) a matriz de transações monetárias entre os  $n$  setores. A equação 5 representa a notação matricial do sistema.

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z}\mathbf{i} + \mathbf{f} \quad (5)$$

Onde  $\mathbf{i}_{n \times 1}$  é um vetor coluna unitário, cuja multiplicação matricial  $\mathbf{Z}\mathbf{i}$  gera o vetor coluna da soma de cada linha da matriz  $\mathbf{Z}$ .

Além das transações intersetoriais e a produção total de cada setor, existe também o pagamento de outros itens e o uso de outros insumos. A contabilização desses insumos

primários é feita no chamado valor agregado do setor  $j$ , representado por  $(v_j)$ , por exemplo, salários  $(l_j)$ , e capital, pagamentos de impostos, aluguel, lucro  $(n_j)$ . Entenda-se como valor agregado aos pagamentos feitos aos setores exógenos. Ao valor agregado podem ser somadas às transações da compra de produtos importados em cada setor  $j$   $(m_j)$ .

Como resultado, representa-se no quadro 2 uma tabela de insumo-produto monetária para uma economia de dois setores. A economia está composta pelo setor 1 e 2; a demanda final desagregada em consumo das famílias, consumo do governo, investimentos, e as exportações; o valor agregado dividido em salários e valor agregado, bem como as importações dos setores econômicos e dos setores da demanda final, isto é,  $m_E$  representa os itens importados que são exportados; ao final, na última linha e coluna, apresenta-se o equilíbrio geral do sistema econômico, em que o valor monetário total da soma da produção total de cada setor se iguala ao valor monetário total da soma dos gastos para a produção de cada setor.

Quadro 2 - Tabela de insumo-produto econômico para uma economia de dois setores

		Setores produtores		Demanda final (f)				Produção total (x)
		1	2					
Setores produtores	1	$z_{11}$	$z_{12}$	$c_1$	$i_1$	$g_1$	$e_1$	$x_1$
	2	$z_{21}$	$z_{22}$	$c_2$	$i_2$	$g_2$	$e_2$	$x_2$
Setores de pagamentos	Valor agregado ( $v_j$ )	$l_1$	$l_2$	$l_C$	$l_I$	$l_G$	$L_E$	L
	Importações	$n_1$	$n_2$	$n_C$	$n_I$	$n_G$	$n_E$	N
Total despesa ( $x'$ )		$m_1$	$m_2$	$m_C$	$m_I$	$m_G$	$m_E$	M
		$x_1$	$x_2$	C	I	G	E	X

Fonte: Elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009).

Leontief (1965) apresenta o conceito de coeficiente do insumo  $a_{ij}$ , comumente conhecido como coeficiente técnico. Esse coeficiente representa a transação monetária do produto do setor  $i$  absorvido pelo setor  $j$  em dado período de tempo dividido pelo valor monetário da produção total do setor  $j$  para o mesmo período de tempo. O conjunto completo dos coeficientes técnicos de uma economia é chamado de matriz de coeficientes técnicos **A** (MILLER e BLAIR, 2009; LEONTIEF, 1965). A equação 6 apresenta o cálculo do coeficiente técnico.

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (6)$$

Por exemplo, no quadro 2, o coeficiente técnico  $a_{12}$  representa a transação monetária do setor de manufatura (1) e do setor de agropecuária (2) para o período de um ano, em

relação à produção total do setor gropecuário no mesmo período. Cada  $a_{ij}$  é visto como a relação fixa da medida entre o produção de um setor e seus insumos, e cuja proporção  $p_{ij}$ , definida como a relação entre os coeficientes técnicos, é fixa:

$$p_{ij} = \frac{z_{in}}{z_{jn}} = \frac{a_{in} \cdot x_n}{a_{jn} \cdot x_n} = \frac{a_{in}}{a_{jn}}$$

Como resultado, Miller e Blair (2009) destacam que a produção num sistema Leontief opera com retornos constantes de escala (RCE), assumindo que a mesma relação de insumos será usada pelos setores para a produção total do setor, sem considerar a quantidade produzida (MILLER e BLAIR, 2009; ARDENT *et al*, 2009). Mediante a eq. 6 observa-se que, quando algum  $a_{ij}=0$ , o produção total do setor  $j$  seria infinitamente grande. Consequentemente, a especificação mais usual da classe de função de produção incorporada no modelo de insumo-produto é a função de produção de proporções fixas, apresentada na equação 7.

$$x_j = \min \left( \frac{z_{1j}}{a_{1j}}, \frac{z_{2j}}{a_{2j}}, \dots, \frac{z_{nj}}{a_{nj}} \right) \quad (7)$$

Miller e Blair (2009) ressaltam que no modelo de insumo-produto, cujos coeficientes técnicos são diferentes de zero, as razões dentro da eq. 7 serão as mesmas e iguais a  $x_j$ , isto porque  $a_{ij} = z_{ij}/x_j$ . Já para os coeficientes técnicos iguais a zero, as relações dentro da eq. 7 seriam infinitamente grandes e consequentemente, estariam fora da razão mínima da função de produção. Como resultados, todas as especificações anteriormente descritas refletem a suposição de RCE no modelo de insumo-produto (MILLER e BLAIR, 2009; ARDENT *et al*; 2009).

Substituindo a relação exposta na eq. 6 e na eq. 4, representa-se o sistema de equações do modelo econômico com coeficientes técnicos, como mostrado na equação 8.

$$\begin{aligned} (1 - a_{11})x_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1i}x_i - \dots - a_{1n}x_n &= f_1 \\ &\vdots \\ -a_{21}x_1 + (1 - a_{22})x_2 - \dots - a_{2i}x_i - \dots - a_{2n}x_n &= f_2 \\ &\vdots \\ -a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots - a_{ni}x_i - \dots + (1 - a_{nn})x_n &= f_n \end{aligned} \quad (8)$$

Nessa perspectiva, a matriz de coeficientes técnicos pode ser representada pela equação 9:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (9)$$

Onde o vetor da produção total é expresso como uma matriz diagonal ( $n \times n$ ), cujos elementos da diagonal são a produção total de cada setor.

Cabe destacar que os coeficientes de cada uma das colunas da matriz  $\mathbf{A}$  refletem os insumos diretos requeridos para a produção de um R\$1 (um real) do produto final do setor representado pela respectiva coluna, isto é, requerimentos de primeira ordem. Não obstante, a matriz  $\mathbf{A}$  não reflete os insumos requeridos para a produção dos insumos diretos; isto é, para a produção dos insumos diretos, os setores que os fornecem requerem também insumos, e os novos insumos demandam também insumos e assim paulatinamente, criando um conjunto de conexões entre os diferentes setores econômicos. Wilting (1996) denota que os requerimentos de primeira ordem dos setores econômicos são expressos em  $\mathbf{A}$ , os de segunda ordem são expressos em  $\mathbf{A}^2$ , os de terceira ordem em  $\mathbf{A}^3$ .

Wilting (1996) destaca ainda que uns dos objetivos da análise insumo-produto é a determinação da produção total devido a determinada demanda final. Dessa maneira, cada setor tem que satisfazer não só a própria demanda final, se não também, os requerimentos diretos e indiretos necessários para satisfazer as outras demandas finais. A matriz  $\mathbf{L}$  expressa os requerimentos totais necessários para que cada setor produza R\$1 de demanda final.

$$\mathbf{L} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots$$

Onde os dos primeiros termos,  $(\mathbf{I} + \mathbf{A})$  representam os requerimentos diretos e os sucessivos termos os requerimentos indiretos. Note-se que todos os termos no lado direito da expressão  $\mathbf{L}$  são positivos, ainda se algum coeficiente técnico  $a_{ij}$  for zero, isto porque por definição  $\mathbf{A}$  é uma matriz não-negativa, com  $a_{ij} \geq 0 \forall i \text{ e } j$ , e o número crescente de produtos de  $\mathbf{A}$  virtualmente garante a não existência de zeros no final da somatória. Miller e Blair (2009) e Waugh (1950) demonstram matematicamente que a matriz de Leontief é análoga ao resultado de séries da álgebra ordinária onde  $1/(1-a) = 1 + a + a^2 + a^3 + \dots, \forall |a| < 1$ .

De acordo com Waugh (1950), assume-se que cada setor tem um valor adicionado positivo  $v_j > 0 \forall j$  (salários, lucros, impostos), onde

$$v_j \equiv x_j - \sum_{i=1}^n z_{ij} \tag{10}$$

Sabendo-se que  $z_{ij} = a_{ij}x_j$ , como resultados obtém-se a seguinte desigualdade:

$$x_j - \sum_{i=1}^n z_{ij} \equiv (1 - \sum_{i=1}^n a_{ij})x_j > 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n a_{ij} < 1 \tag{11}$$

Lembremos que a norma de  $\mathbf{A}$ ,  $N(\mathbf{A})$  está definida como a maior soma dos valores absolutos dos elementos de qualquer coluna da matrix,

$$N(\mathbf{A}) = \max_j \sum_i |a_{ij}| \quad (12)$$

Assim, mediante eq. 11, eq. 12 e pela propriedades da norma da não existência de um elemento de  $\mathbf{A}$  maior do que  $N(\mathbf{A})$ , como resultado  $N(\mathbf{A}) < 1$  e  $a_{ij} \leq N(\mathbf{A})$ . Considerando esse resultado, e pela propriedade da norma onde  $[N(\mathbf{A})]^k \geq N(\mathbf{A}^k)$ ,  $[N(\mathbf{A})]^k$  sempre tenderá a zero quando  $k$  tende ao infinito positivo, consequentemente,  $N(\mathbf{A}^k)$  tende a zero. De acordo com Waugh (1950), como  $N(\mathbf{A}^{k+1}) \leq N(\mathbf{A}^k)$  quando  $N(\mathbf{A}) \leq 1$ , a norma de cada termo sucessivo na série de potência é menor do que a norma do termo precedente. Como resultado, todo element de  $\mathbf{A}^k$  tende a zero quando  $k$  tende ao infinito positivo (MILLER e BLAIR, 2009; WAUGH, 1950). Como resultado,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{A})^k = 0 \quad (13)$$

Assim,

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots + \mathbf{A}^k \quad (14)$$

Para demonstrar a veracidade matemática da expressao na eq. 14, multiplicamos ambos os lados pela matriz  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ ,

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{A}) = (\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots + \mathbf{A}^k) (\mathbf{I} - \mathbf{A})$$

$$\mathbf{I} = (\mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots + \mathbf{A}^k) - (\mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \dots + \mathbf{A}^{k+1})$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{I} + \mathbf{A}^{k+1}$$

Pela eq. 13, sabe-se que  $\mathbf{A}^{k+1} \rightarrow 0$  quando  $k \rightarrow \infty$ , assim,

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}$$

Pelos resultados anteriores e a condição de Hawkins-Simon, todos os elementos da matriz de Leontief  $\mathbf{L}$  são não negativos. A condição de Hawkins-Simon diz que uma condição necessária e suficiente para um sistema de Leontief  $\mathbf{A}$  ter uma inversa positiva é que todos os menores principais de  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$  sejam positivos.

Numa perspectiva matricial, combinando os resultados das eqs. 5 e 9 se obtém o vetor de produção total de cada setor:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (15)$$



Como resultado,

$$(\mathbf{I}-\mathbf{A})\mathbf{x}=\mathbf{f} \rightarrow \mathbf{x}=(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}=\mathbf{f}+\mathbf{A}\mathbf{f}+\mathbf{A}^2\mathbf{f}+\dots+\mathbf{A}^\infty\mathbf{f} \quad (16)$$

Como mencionado anteriormente, na perspectiva da análise insumo-produto, a determinação da produção total necessária para determinada demanda final pode ser dividida em contribuições diretas e contribuições indiretas,

$$\mathbf{x}_{\text{direta}}=\mathbf{f}+\mathbf{A}\mathbf{f}$$

$$\mathbf{x}_{\text{indireta}}=\mathbf{A}^2\mathbf{f}+\mathbf{A}^3\mathbf{f}+\dots+\mathbf{A}^\infty\mathbf{f}$$

Como resultado, a solução geral do sistema de equações de equilíbrio para as incógnitas  $x$  em termos da demanda final  $f$  pode ser representada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} x_1 &= l_{11}f_1 + l_{12}f_2 + \dots + l_{1n}f_n \\ x_2 &= l_{21}f_1 + l_{22}f_2 + \dots + l_{2n}f_n \\ &\vdots \\ x_n &= l_{n1}f_1 + l_{n2}f_2 + \dots + l_{nn}f_n \end{aligned} \quad (17)$$

Leontief (1965) explica que a constante  $l_{ij}$  indica quanto a produção total  $x_i$  do  $i$ -ésimo setor aumentaria, se  $f_j$  aumentasse em uma unidade. Isto demonstra a dependência de cada produto bruto sobre os valores de cada uma das demandas finais.

$$\frac{\partial x_i}{\partial f_j} = l_{ij}$$

Consequentemente, para nova demanda final dos setores da economia, isto é, devido a mudanças nos gastos do governo, no gosto do consumidor, etc., quanto seria necessário de produção total de cada setor para poder satisfazer à nova demanda final? Assumindo que a tecnologia não muda, tal questão poderia ser respondida mediante a equação 18:

$$\mathbf{x}^{\text{novo}}=\mathbf{L}\mathbf{F}^{\text{novo}} \quad (18)$$

E como essa nova demanda final não só influencia diretamente a produção total de cada setor, como também provoca mudanças nos fluxos interindustriais da economia, a nova dinâmica interindustrial é representada por:

$$\mathbf{Z}^{\text{novo}}=\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}^{\text{novo}} \quad (19)$$

Cabe destacar que, na análise de insumo-produto, existem limitações que aumentam as incertezas dos resultados devido a suposições metodológicas impossíveis de evitar. Como mencionado anteriormente, os setores produtivos têm uma função de produção linear Leontief e as tecnologias são caracterizadas por coeficientes técnicos fixos (ARDENT *et al*; 2009; e VALADKANI, 2003); não há restrições de recursos onde se assume a oferta ser perfeitamente elástica; os recursos locais são perfeitamente usados, e existem problemas relacionados à atualização dos dados. Apesar dessas restrições metodológicas do modelo, ele tem diversas vantagens devido principalmente à simplicidade do método (ARDENT *et al*; 2009).

### 1.3.2 Enfoque *commodity*- indústria

O modelo de insumo-produto original é derivado das eqs. 3, 5 e 9, como estruturado por Leontief (1965). Quando o modelo de insumo-produto tem estruturas mais complicadas, registram-se variações do modelo, como o enfoque *commodity-indústria* ou produto-indústria (na língua inglesa conhecida como *commodity-industry*).

Miller e Blair (2009) destacam que dentro desse formato pode-se considerar o fato que as indústrias fazem mais de um produto, considerando os produtos secundários e coprodutos. Por exemplo, o caso mais simples do modelo é quando o número de produto iguala ao número de indústrias, isto é,  $m=n$ , e cada indústria ( $n$ ) fornece um produto ( $m$ ). Se ( $m \neq n$ ), os resultados podem se complicar, não gerando, em alguns casos, as matrizes de requisito direto pausível, e como resultado não podendo ser encontradas as matrizes de requisito total. Caso  $m > n$ , uma agregação da contabilidade de produtos poderia ser feita para que ( $m=n$ ); já para o caso de  $m < n$ , a contabilidade das indústrias poderia ser agregada (MILLER e BLAIR, 2009; EUROPEAN COMMISSION, 2008; SNA, 2008).

Na estrutura de *commodity-indústria* existem duas tabelas-chaves; a Tabela de *Uso* (na língua inglesa conhecida como *USE Table*) e a Tabela de *Produção* (na língua inglesa conhecida como *MAKE Table*). De acordo com a European Commission (2008), as matrizes de *Uso* e *Produção* provem um quadro detalhado do fornecimento de bens e serviços, isto mediante a produção doméstica e importada, bem como do uso dos bens e serviços no consumo intermediário e uso final, ou seja, consumo (C), formação de capital bruto (I), exportações (E), governo (G). A matrix de *Uso* mostra também como os componentes do valor adicionado, isto é, remuneração de empregados, impostos líquidos sobre produção, consumo de capital fixo são gerados pelas indústrias na economia doméstica.

Além do propósito estatístico que estas tabelas têm, existe um objetivo analítico, especialmente quando elas são transformadas em tabelas simétricas de insumo-produto (EUROPEAN COMMISSION, 2008, SNA, 2008). Isto mediante a aplicação de certas suposições na relação entre as entradas e as saídas. As matrizes simétricas de insumo-produto são a base para uma análise de insumo-produto.

Como anteriormente indicado, a matriz *Uso* provê informação sobre o consumo ou uso de produtos pelas indústrias ou setores da demanda final, isto é, famílias, governo, exportação; nela as colunas representam as indústrias e as categorias de demanda final, e as linhas indicam os produtos usados em cada respectivo setor ou categoria de demanda, bem como os componentes do valor adicionado para cada um desses setores.

Nessa perspectiva, a tabela simplificada *Uso* pode ser subdividida em três tabelas, ou seja, tabela uso intermediário, tabela uso final e tabela valor adicionado (EUROPEAN COMMISSION, 2008). Determina-se que a tabela de uso intermediário mostra o consumo intermediário dos produtos por indústria; a tabela de uso final expõe o uso dos produtos para consumo final, e a tabela de valor adicionado exhibe os componentes do valor adicionado por indústria. A Comissão Europeia (2008) especifica que a matriz *Uso* contém muito mais entradas do que a matriz *Produção*, isto porque alguns produtos são requeridos em muitas indústrias como insumos para fazer seus produtos, ou alguns produtos são necessários somente num grupo específico de indústrias, por exemplo, o petróleo é somente usado nas refinarias. No quadro 3 apresenta-se a tabela de *uso* do enfoque produto-indústria.

Quadro 3 - Tabela *Uso* do enfoque produto-indústria

	Indústrias							Demanda Final				Saída Total de Produtos
	R.N	C	M	T	IE	SF	OS	C	I	E	G	
<b>Produtos</b>												
Recursos naturais(R.N)	Tabela de Uso Intermediário <b>U</b>							Tabela de Uso Final				
Construção (C)												
Manufatura (M)												
Transporte (T)												
Infraestrutura (IE)												
Serv. Financeiros (SF)	Tabela de Valor Adicionado							Produto Interno Bruto				
Outros serviços (OS)												
<b>Valor Adicionado</b>												
Renumeração empregado												
Impostos indiretos												
Outros valores adicionados												
<b>Produto total da indústria</b>												

Fonte: elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009) e European Commission (2008).

Miller e Blair (2009) observam que no enfoque produto-indústria a matriz de transações industriais  $Z$  é substituída pela matriz *Uso*  $U_{m \times n} = [u_{ij}]$ , onde cada elemento é o

valor das compras do produto  $i$  pela indústria  $j$ . Em conjunto com a produção total da indústria, o paralelo do coeficiente técnico é mostrado na equação 20, chamada matriz de coeficiente setor *versus* produto.

$$b_{ij} = u_{ij}/x_j$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (20)$$

Miller e Blair (2009) apontam que na estrutura do enfoque produto-indústria explica-se detalhadamente a saída total de produto insumos ( $\mathbf{q}$ ) na matriz *Usa*. Consequentemente, o uso total de qualquer produto pode ser encontrado pela soma das linhas da matriz ( $\mathbf{U}$ ) mais os produtos consumidos pelos setores da demanda final ( $\mathbf{e}$ ).

$$q_j = u_{j1} + \dots + u_{jn} + e_j \quad (21)$$

A matriz *produção* é uma tabela baseada em produto por indústria. Ela provê informação sobre a fabricação de produtos em cada indústria, onde as colunas representam a geração de produtos na economia e as linhas indicam a obtenção de cada produto pelas diferentes indústrias domésticas e as importações (MILLER e BLAIR, 2009, EUROPEAN COMMISSION, 2008).

A European Commission (2008) destaca que as atividades principais das indústrias são registradas na diagonal principal da matriz *produção*, enquanto as atividades secundárias das indústrias são reportadas fora da diagonal principal da matriz. Nessa perspectiva, cada indústria pode produzir não somente produtos característicos dela, mas também outros diferenciados. Consequentemente, a matriz *produção* tem elementos tanto na diagonal principal como na área fora dela (MILLER e BLAIR, 2009, EUROPEAN COMMISSION, 2008).

Os produtos característicos da indústria são chamados de produtos primários, enquanto a geração de produtos não característicos da indústria é conhecida como produtos secundários. Numa economia em que não exista produção secundária, a matriz *produção* será diagonal, e todos os resultados do enfoque produto-indústria se reduzem ao enfoque original de Leontief baseado na indústria (MILLER e BLAIR, 2009).

A matriz transposta da matriz *Produção* é conhecida como matriz *Fornecimento* (na língua inglesa conhecida como *Supply Matrix*). A European Commission (2008) assinala que a matriz *Fornecimento* mostra a oferta de bens e serviços mediante produto e tipo de fornecedor, distinguindo o fornecimento pela indústria doméstica e indústria externa –

importações. A Matriz *Produção* é representada por  $V_{n \times m} = [v_{ij}]$ , onde cada elemento representa o valor da produção do produto  $j$  gerado pela indústria  $i$ . Já  $V'$  é a matriz *Fornecimento*. No quadro 4, apresenta-se a tabela *Produção* do enfoque produto–indústria para os mesmos setores representados no quadro 3.

Quadro 4 - Tabela *Produção* do enfoque produto–indústria

	Produtos							Produção Total da Indústria
	RN	C	M	T	IE	SF	OS	
<b>Indústrias</b>								
RN								
C								
M								
T								
IE								
SF								
OS								
<b>Importação</b>								
<b>Produção</b>								

Fonte: Elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009) e European Commission (2008).

Miller e Blair (2009) ressaltam que na estrutura do enfoque produto–indústria é explicada detalhadamente a produção total da indústria ( $\mathbf{x}$ ), expressa na matriz *Produção*. Mediante essa tabela, a produção total de qualquer indústria pode ser encontrada somando as linhas da matriz  $\mathbf{V}$ . Noutras palavras, a produção total de qualquer indústria pode ser encontrada somando todos os produtos gerados pela indústria analisada.

$$x_j = v_{j1} + \dots + v_{jm} \quad (22)$$

Em forma matricial, expresso como

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{i}$$

No quadro 5, expõe-se o conjunto completo dos dados do enfoque produto–indústria, sendo uma integração conceitual do quadro 3 e do quadro 4, para uma economia de dois setores. Como ilustrado no quadro 5, o vetor de uso total de produto  $\mathbf{q}$  pode ser encontrado com a soma do uso do produto em cada indústria, somando assim, os elementos das linhas da matriz  $\mathbf{U}$ .

$$\mathbf{q} = \mathbf{U}\mathbf{i} + \mathbf{e} \quad (23)$$

Quadro 5 - Conjunto completo dos dados do enfoque produto-indústria

	Produto		Indústria		Demanda Final	Produção Total
	1	2	1	2		
Produtos	1		$U_{11}$	$U_{12}$	$e_1$	$q_1$
	2		$U_{21}$	$U_{22}$	$e_2$	$q_2$
Indústria	1	$V_{11}$	$V_{12}$			$x_1$
	2	$V_{21}$	$V_{22}$			$x_2$
Valor agregado			$v_1$	$v_2$	$\Sigma v' = \Sigma e = \text{PIB}$	
Total de insumos	$q_1$	$q_2$	$x_1$	$x_2$		

Fonte: Elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009).

Mas, pelo balanço do produto, o mesmo vetor de uso total de produto  $q$  pode ser encontrado somando os elementos das colunas da matriz *Produção*  $V$ , ou seja, adicionando a geração do produto em toda a economia.

$$q_j = v_{1j} + \dots + v_{nj} \quad (24)$$

Em forma matricial, expressa como

$$q = V'i$$

Com base no enfoque original do modelo insumo-produto, a matriz de requisito total dentro do enfoque produto-indústria se obteria substituindo a eq. 20 na expressão anterior.

$$q = Bx + e \quad (25)$$

Não obstante, Miller e Blair (2009) explicam que a expressão da eq. 25 apresenta um problema, porque seu lado esquerdo contém o uso total de produtos e o lado direito, a produção total da indústria. Assim, deve-se encontrar uma expressão que transforme a produção da indústria em uso de produtos, ou inversamente, que transforme o uso de produtos e demanda final ( $e$ ) em termos industriais.

De acordo com Miller e Blair (2009), para obter essa transformação, são introduzidas duas matrizes importantes do enfoque produto-indústria: a matriz parcela de mercado ou *market share matrix*  $D$ , e a matriz de misturas de produtos  $C$ .

Cada elemento  $d_{ij} = v_{ij}/q_j$  especifica a parcela do produto  $j$  gerado pela indústria  $i$ .

$$D = V\hat{q}^{-1} \quad (26)$$

Por definição, a soma de cada coluna da matriz  $D$  é a unidade.

Cada elemento  $c_{ij}=v_{ij}/x_i$  denota a parcela da produção total da indústria  $i$  que está na forma do produto  $j$ .

$$\mathbf{C}_{(pxi)}=\mathbf{V}'\mathbf{x}^{-1} \quad (27)$$

Usando esses dois resultados em conjunto com a versão matricial das eqs. 22 e 24, obtem-se as transformações lineares

$$\mathbf{Dq}=\mathbf{x} \quad (28)$$

$$\mathbf{x}=\mathbf{C}^{-1}\mathbf{q} \quad (29)$$

Com as relações das eqs. 29 e 25, tem-se a representação matricial parcionada,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{D} \\ -\mathbf{B} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix}$$

E com as relações das eqs. 29 e 25, obtem-se,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & -\mathbf{I} \\ -\mathbf{B} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix}$$

A partir de agora, é possível encontrar as matrizes de coeficiente técnico e consequentemente, as matrizes de requerimento total para uma estrutura econômica de produto-produto, indústria-indústria, indústria-produto ou produto-indústria. Existem dois enfoques principais que geram as matrizes: o enfoque baseado na tecnologia industrial e o enfoque baseado na tecnologia do produto (MILLER e BLAIR, 2009; STRØMMAN e HERTWICH, 2004).

O enfoque baseado na tecnologia industrial assume que todos os produtos gerados pela mesma indústria têm a mesma tecnologia de insumos (MILLER e BLAIR, 2009; STRØMMAN e HERTWICH, 2004). Assim, derivada da primeira representação matricial que relaciona  $\mathbf{e}$  e  $\mathbf{q}$ , a estrutura produto-produto é definida por:

$$\mathbf{q}=(\mathbf{BD})\mathbf{q}+\mathbf{e} \quad (30)$$

Já, a estrutura indústria-indústria é definida por,

$$\mathbf{x}=(\mathbf{DB})\mathbf{x}+\mathbf{De} \quad (31)$$

No enfoque de tecnologia de produto, um dado item terá a mesma estrutura de insumo em todas as indústrias (MILLER e BLAIR, 2009; STRØMMAN e HERTWICH, 2004). Assim, derivada da segunda representação matricial que relaciona  $\mathbf{e}$  e  $\mathbf{q}$ , anteriormente definida, a estrutura produto-produto é representada por

$$\mathbf{q} = (\mathbf{BC}^{-1})\mathbf{q} + \mathbf{e} \quad (32)$$

e a estrutura indústria-indústria é expressa por

$$\mathbf{x} = (\mathbf{C}^{-1}\mathbf{B})\mathbf{x} + \mathbf{C}^{-1}\mathbf{e} \quad (33)$$

Quando o choque exógeno dado no modelo é na demanda final de produtos, ver eqs. 30 e 32, o resultado é chamado de modelo baseado na demanda de produto. Já naqueles em que o choque é dado na demanda final da indústria, o resultado é chamado de modelo baseado na demanda da indústria.  $\mathbf{f} = \mathbf{De}$  para eq. 30, e  $\mathbf{f} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{e}$  para eq. 33. Cabe destacar que como  $\mathbf{C}$  pode ou não ser uma matriz singular, existe um enfoque para evitar o cálculo das matrizes de coeficientes técnicos e de requerimentos totais com a  $\mathbf{C}^{-1}$ ; para entender esse enfoque, ver Miller e Blair (2009). No quadro 6 ilustram-se as diferentes matrizes de requerimentos totais dentro do enfoque produto-indústria.

Quadro 6 - Matrizes de requisito totais, enfoque SNA

	Tecnologia Industrial	Tecnologia do produto
<i>Modelos baseados na demanda de produtos</i>		
Produto-por-produto	$(\mathbf{I} - \mathbf{BD})^{-1}$	$(\mathbf{I} - \mathbf{BC}^{-1})^{-1}$
<i>Modelos baseados por demanda da Indústria</i>		
Indústria-por-indústria	$(\mathbf{I} - \mathbf{DB})^{-1}$	$(\mathbf{I} - \mathbf{C}^{-1}\mathbf{B})^{-1}$

Fonte: Elaboração própria baseada em Miller e Blair (2009).

Para estruturas econômicas de indústria-produto ou produto-indústria, ver Miller e Blair (2009). Cabe destacar que Miller e Blair (2009) ressaltam que para gerar a matriz de transações indústria-indústria ou produto-produto desde os dados de transações do enfoque produto-indústria, deve-se ajustar a matriz  $\mathbf{U}$ .

Como pode ser visualizado no quadro 6, a matriz de coeficientes técnicos produto-produto dentro do enfoque tecnologia industrial é definida por  $\mathbf{A}_{\text{ppp}} = \mathbf{BD}$ . Assim, a matriz de transações produto-produto pode ser definida por

$$\mathbf{Z}_{\text{ppp}}^i = (\mathbf{BD})\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{x}}^{-1}\mathbf{V} = \mathbf{UC}' \quad (34)$$



Da mesma maneira, a matriz de coeficientes técnicos indústria-indústria dentro do enfoque tecnologia industrial é definida por  $\mathbf{A}_{ixi}=\mathbf{DB}$ . Assim, a matriz de transações indústria-indústria pode ser definida por

$$\mathbf{Z}_{ixi}^i=(\mathbf{DB})\hat{\mathbf{x}}=\mathbf{DU} \quad (35)$$

Para o enfoque tecnologia de produto, a matriz de transações de produto-produto é  $\mathbf{Z}_{p \times p}=\mathbf{U}(\mathbf{D}')^{-1}$  e a matriz de transações indústria-indústria é gerada por  $\mathbf{Z}_{ixi}=\mathbf{C}^{-1}\mathbf{U}$ .

### 1.3.3 Análise insumo-produto estendida

Além de Wassily Leontief haver introduzido o enfoque original de insumo-produto, ele foi pioneiro na modelagem do enfoque ambiental de insumo-produto. Em 1970, ele incorporou ao modelo original a poluição e outros fluxos não desejáveis ou efeitos externos das atividades produtivas para serem considerados como parte do sistema econômico. Leontief (1970) enfatiza que a dependência quantitativa de cada fluxo não desejável no nível de uma ou mais atividades econômicas em que ele está relacionado deve ser descrita pelo apropriado coeficiente técnico, e deve ser incorporados na matriz estrutural da economia.

Miller e Blair (2009) observam que, em muitos casos, o valor em reais (R\$) da produção total de cada setor poderia não ser a medida mais importante do impacto econômico devido a uma mudança na demanda exógena. Eles apontam que a produção total poderia ser traduzida em, por exemplo, efeito emprego (isto é, pessoas por ano), ou efeitos sobre o valor adicionado (R\$ PIB), ou consumo de energia (isto é, TeraJoule = TJ), ou emissões poluidoras (isto é, kg de emissão de CO<sub>2</sub>). Para isso, é necessário estabelecer um conjunto de coeficientes apropriados para converter os produtos nos efeitos associados (MILLER e BLAIR, 2009; LEONTIEF, 1970). Cabe mencionar que tal extensão do modelo insumo-produto pode combinar unidades monetárias com unidade físicas dentro da análise. Quando os produtos externos são fluxos ambientais, o modelo é chamado de insumo-produto ambiental; quando os produtos externos são fluxos energéticos, o modelo é chamado de insumo-produto energético; quando o modelo combina diferentes fatores, é chamado de generalizado; e quando integra dados físicos de um setor específico num modelo econômico de insumo-produto desagregado, este modelo é chamado híbrido, muito usado em análises energéticas (MILLER e BLAIR, 2009; SUH e HUPPES, 2009).

O modelo estendido está estruturado na incorporação de uma nova matriz ou vetor linha com coeficientes estruturais no modelo econômico de insumo-produto. A nova matriz

$\underline{\mathbf{B}}_{k,j}$  ou vetor linha  $\underline{\mathbf{b}}_{1,j}$ ,  $\forall k=1,..m$ -fator, e  $j=1,..,n$ -setores, se compõe de coeficientes estruturais dos fatores como nível de trabalho por setor, geração VA setorial, consumo de TJ por setor, emissões de CO<sub>2</sub> setoriais, entre outros fatores.

Por exemplo, você tem informação sobre o consumo energético de combustíveis numa economia de dois setores. O consumo energético TJ nos dois setores da economia é denotado como

$$e = [e_1 \ e_2]$$

Como resultado, cada elemento do vetor de coeficientes de consumo energético é resultado do consumo TJ em cada respectivo setor no ano base dividido pela produção total do mesmo respectivo setor no mesmo ano base,  $\mathbf{x}^0$ .

$$\underline{\mathbf{b}}^e = [e_1/x_1^0 \ e_2/x_2^0] = [\underline{\mathbf{b}}^{e1} \ \underline{\mathbf{b}}^{e2}]$$

Assim, o impacto total ou o nível de produção do fator analisado é estimado mediante

$$\mathbf{x}_b^e = \underline{\mathbf{b}}^e \mathbf{x} \quad (36)$$

Pelas eqs.17 e 18, pode-se calcular o impacto total do consumo energético como uma função das demandas finais

$$\mathbf{x}_b^e = [\underline{\mathbf{b}}^e \mathbf{L}] \mathbf{f} \quad (37)$$

Onde  $\underline{\mathbf{b}}^e \mathbf{L}$  é a matriz de coeficientes de impacto total do consumo energético setorial. Quando acrescentamos outros coeficientes de fatores como nível de emprego (E), valor adicionado (VA), emissões de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) formamos a matriz de impactos diretos dos fatores

$\underline{\mathbf{B}}$

$$\underline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{b}}^E \\ \underline{\mathbf{b}}^{VA} \\ \underline{\mathbf{b}}^e \\ \underline{\mathbf{b}}^{CO_2} \end{bmatrix}$$

Como definido na eq.36, Miller e Blair (2009) definem o vetor de impactos totais,  $\mathbf{x}_B$ , como

$$\mathbf{x}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_b^E \\ \mathbf{x}_b^{VA} \\ \mathbf{x}_b^e \\ \mathbf{x}_b^{CO_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{b}}^E \\ \underline{\mathbf{b}}^{PIB} \\ \underline{\mathbf{b}}^e \\ \underline{\mathbf{b}}^{CO_2} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \underline{\mathbf{B}} \mathbf{x}$$

Da mesma maneira, a eq. 37 pode ser expressa como:

$$\mathbf{x}_B = [\mathbf{BL}]f \quad (38)$$

Onde a matriz  $\mathbf{BL}$  é a matriz de impacto total. Assim, pode-se incorporar o vetor de produção total da análise econômica e o vetor de impacto total da análise dos fatores num mesmo vetor  $\mathbf{x}'$ .

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_B \\ \mathbf{x} \end{bmatrix}$$

Esse vetor pode ser encontrado diretamente ao formar a matriz global de impactos totais  $\mathbf{H}$ , onde é concatenada a matriz de impactos totais e a inversa de Leontief

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Conseqüentemente,

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_B \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{BL}]f \\ \mathbf{L}f \end{bmatrix} = \mathbf{H}f \quad (40)$$

#### 1.3.4 Multiplicadores e elasticidades setoriais

De acordo com Miller e Blair (2009), na realização de uma *análise de impacto* são utilizados os multiplicadores, isto é, derivados da matriz de requisitos totais para captar os efeitos diretos e indiretos de uma variação na demanda final sobre as variáveis de interesse: produção total, números de empregos gerados, VA gerado, emissões de CO<sub>2</sub>, uso energético de combustível. Miller e Blair (2009) explicam que a noção de multiplicadores está baseada na diferença entre o efeito inicial de uma mudança ou força exógena e o efeito total de dita mudança no sistema endógeno. O multiplicador de produção do setor  $j$  é estimado na seguinte equação:

$$m_j^x = \sum_{i=1}^{n+1} l_{i,j} = \frac{\partial x}{\partial f_j} \quad (41)$$

Observe-se que os elementos  $l_{i,j}$  são os coeficientes da matriz de Leontief da coluna  $j$ .

Com o mesmo princípio, podemos calcular também o multiplicador de emprego, de emissão CO<sub>2</sub>, de consumo energético de combustíveis, de VA de cada setor em resposta ao choque inicial (MILLER e BLAIR, 2009), para mensurar o impacto de cada setor. O

multiplicador de emprego pode ser interpretado como o impacto sobre o emprego agregado, se a demanda exógena do setor  $j$  aumentar uma unidade:

$$m_j^E = \sum_{i=1}^{n+1} E_i l_{ij} \quad (42)$$

Entretanto, alguns pesquisadores apontam que a análise de impacto baseada somente nos multiplicadores de produção (de emissão CO<sub>2</sub>, de consumo energético de combustíveis, de emprego e de VA) pode levar a erros de decisão sobre a identificação dos setores chaves, porque o *ranking* setorial pode identificar pequenos setores como muito importantes ou grandes setores como irrelevantes (VALADKHANI, 2003). Para evitar esses erros de decisão, estuda-se a sensibilidade dos fatores a mudanças nos parâmetros e nas variáveis. Tais elasticidades mensuram a mudança percentual na produção total (nível de emprego, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético de combustível, VA) devido a uma mudança percentual na demanda final em dado setor da economia ou na tecnologia ( $a_{ij}$ ) (MILLER e BLAIR, 2009; CRUZ, 2009).

A elasticidade de produção total (nível de emprego, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético de combustível, VA) do setor  $j$  é obtida mediante a seguinte equação:

$$\varepsilon_j^x = \frac{\partial x}{\partial f_j} \frac{f_j}{x} \quad (43)$$

Pelo resultado da eq. 41, a derivada parcial da eq. 43 é o multiplicador de produção do setor  $j$ , e assim a eq. 43 pode ser reescrita como:

$$\varepsilon_j^x = m_j^x \frac{f_j}{x} \quad (44)$$

A elasticidade da produção total (nível de emprego, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético de combustível, VA) com relação a uma mudança percentual dos coeficientes técnicos do setor  $i$  é estimada pelas equações 45 (ver CRUZ, 2009 para demonstração):

$$\varepsilon_{a_{i,j}}^x = \frac{\frac{\partial x}{\partial a_{i,j}}}{\frac{x}{a_{i,j}}} = \frac{\frac{\partial(1-A)^{-1}F}{\partial a_{i,j}}}{\frac{x}{a_{i,j}}} = \frac{[(1-A)^{-1}]_i x_j a_{i,j}}{x} = m_i^x \frac{x_j a_{i,j}}{x} \quad (45)$$

A elasticidade dos fatores pela tecnologia de insumos demandados pelo setor  $j$  pode ser expressa como a soma das elasticidades dos fatores do comércio intermediário dos insumos demandados pelo setor  $j$ .

$$\varepsilon_{a_{i,j}}^x = \sum_{i=1}^{n+1} \varepsilon_{a_{i,j}}^x \quad (46)$$

A elasticidade dos fatores devido a uma mudança tecnológica no uso dos produtos do setor  $i$  na economia é expressa na equação 47:

$$\varepsilon_{a_i}^x = \sum_{j=1}^{n+1} \varepsilon_{a_i,j}^x \quad (47)$$

Da mesma forma, a elasticidade da estrutura da geração de empregos (emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético de combustível, VA) com relação a uma mudança percentual do coeficiente estrutural do setor  $i$  é estimada pela equação 48. Tal elasticidade pode ajudar a visualizar, por exemplo, como uma mudança na produtividade do emprego impactado no número de ocupações em cada setor pode influenciar no resultado final do fator analisado. Como resultado, a elasticidade do fator emprego pode ser representado por:

$$\varepsilon_{b_i^E}^{x^E} = \frac{\frac{\partial x^E}{\partial b_i^E}}{\frac{x^E}{b_i^E}} = \frac{\frac{\partial b^E \cdot (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1} \mathbf{F}}{\partial b_i^E}}{\frac{x^E}{b_i^E}} \quad (48)$$

Seguindo o trabalho de Cruz (2009), obtém-se a derivada do vetor de coeficiente emprego  $\mathbf{b}^E$  da equação 48. Supondo que todo setor aqui representado gera emprego, e onde  $\mathbf{C} = \mathbf{b}^E (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$  é uma matriz não singular

$$[\hat{\mathbf{C}}] \cdot [\hat{\mathbf{C}}]^{-1} = \mathbf{I}$$

Onde  $\hat{\mathbf{C}}$  é a matriz diagonal do vetor  $\mathbf{C}_{1 \times n}$  de emprego. Derivando ambos os lados obtém-se,

$$\frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}] [\hat{\mathbf{C}}]^{-1}}{\partial b_i^E} = 0 \rightarrow \frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]}{\partial b_i^E} [\hat{\mathbf{C}}]^{-1} + [\hat{\mathbf{C}}] \frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]^{-1}}{\partial b_i^E} = 0 \rightarrow \frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]}{\partial b_i^E} [\hat{\mathbf{C}}]^{-1} = -[\hat{\mathbf{C}}] \frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]^{-1}}{\partial b_i^E}$$

Ao multiplicar ambos os lados por  $\hat{\mathbf{C}}$ , chega-se a,

$$\frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]}{\partial b_i^E} = -[\hat{\mathbf{C}}] \frac{\partial [\hat{\mathbf{C}}]^{-1}}{\partial b_i^E} [\hat{\mathbf{C}}] = [\hat{\mathbf{C}}] (-\mathbf{F}^{ij}) [\hat{\mathbf{C}}]$$

Onde:

$$\mathbf{F}^{ij}_{k,l} = \begin{cases} 1, & i = k \text{ e } j = l \text{ e } i = j \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases}$$

Cruz (2009) aponta que a matriz  $\mathbf{F}^{ij}$  está composta por um só elemento, que é o elemento que se deseja derivar. Assim, substituindo a matriz  $\mathbf{C} = \mathbf{b}^E (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$  e mediante as eqs. 37, 38 e 48 obtém-se,

$$\varepsilon_{\underline{b}_i^E}^{x_i^E} = \frac{[\underline{b}^E(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}]_i [\underline{b}^E(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}f]_i \underline{b}_i^E}{x} = m_i^E \frac{x_i^E \underline{b}_i^E}{x^E} \quad (49)$$

#### 1.4 Análise *Structural Path* (SPA)

Na análise generalizada de insumo-produto observam-se os efeitos globais dos fatores estudados. Esses efeitos globais são detalhados com a análise *structural path* (DEFOURNY, 1982). A análise *structural path* (SPA) computa a performance econômica e/ou ambiental de qualquer setor econômico mediante o detalhamento da cadeia completa de fornecedores numa perspectiva do *cradle-to-gate* agregada, sendo identificadas, quantificadas e hierarquizadas as rotas de fornecedores que mais contribuem com a performance de determinado setor (LENZEN e MURRAY, 2010; BABOULET e LENZEN, 2010; ROBERTS, 2005).

SPA está baseada no processo de desvendar a matriz inversa de Leontief mediante as diversas interações setoriais representadas pelos coeficientes técnicos (WOOD e LENZEN, 2009; LENZEN 2007; SUH e HEIJUNGS, 2007; LENZEN, 2003), e na incorporação do conceito de multiplicador da rota (*path multiplier*). Como mostrado nas eqs. 14 e 16, a matriz inversa de Leontief pode ser representada por sua expansão de Taylor, onde se capturam as influências diretas e indiretas dos resultados e se criam as rotas de insumo (*input paths*) que ilustram a mudança na produção do setor  $j$  induzida pela mudança unitária no setor  $i$ , em *ceteris paribus*.

Com base na eq. 41, o multiplicador do fator- $e$  do setor  $i$  pode ser dividido em rotas individuais:

$$m_i^e = \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e (\delta_{j,i} + a_{j,i} + \sum_{k=1}^n a_{j,k} a_{k,i} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n a_{j,l} a_{l,k} a_{k,i} + \dots) \quad (50)$$

$$m_i^e = \underline{b}_i^e + \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,i} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,k} a_{k,i} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,l} a_{l,k} a_{k,i} + \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,h} a_{h,l} a_{l,k} a_{k,i} + \dots$$

Onde  $h, l, k$ , e  $j$  denotam os setores;  $\delta_{j,i}$  representa o delta de Kronecker,  $\delta_{j,i}=1$  se  $i=j$  e  $\delta_{j,i}=0$  caso contrário. Para obter o resultado final das rotas individuais de um setor, a eq. 50 é multiplicada pela demanda final do setor  $i$

$$x_i^e = \left( \underline{b}_i^e + \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,i} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,k} a_{k,i} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,l} a_{l,k} a_{k,i} + \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,h} a_{h,l} a_{l,k} a_{k,i} + \dots \right) f_i$$

Assim,  $x_i$  é uma soma de um insumo direto do fator e das rotas de insumos de ordem maior multiplicada pela demanda final do setor analisado. Para Acquaye *et al.* (2011), cada somatória na eq. 50 representa a contribuição de uma rota individual da cadeia de fornecedores. Segundo Lenzen e Crawford (2009), o resultado de uma execução de um algoritmo SPA para um fator de produção particular é uma lista de rotas estruturais, hierarquizadas em termos de sua contribuição ao multiplicador total do fator,  $m^e$ .

Uma rota de insumo consiste de um ou mais arcos que interconectam o setor de origem  $i$ , onde o choque exógeno acontece, com o setor de destino  $j$ , onde a mudança é avaliada (ROBERTS, 2005; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984; DEFOURNEY, 1982). Por exemplo, a rota de fornecedores “etanol>cana-de-açúcar>transporte” é uma rota de insumo de segunda ordem com três atores intermediários e dois arcos que expressam a influência de um choque exógeno no setor de etanol sobre o setor de transporte via a nova demanda do setor de etanol cana-de-açúcar. Segundo eq. 50, a rota de fornecedores de segunda ordem anteriormente mencionada é  $\underline{b}_{\text{transporte}} \cdot a_{\text{transporte,cana-de-açúcar}} \cdot a_{\text{cana-de-açúcar,etanol}} \cdot f_{\text{etanol}}$  representando, por exemplo, as emissões de CO<sub>2</sub> pelo diesel consumido no transporte de cana-de-açúcar ou a número de empregos criados no setor de transporte devido a um aumento marginal na demanda exógena do setor etanol.

Existem rotas de insumos de ordem zero, de primeira ordem, de segunda ordem e até ordem  $n^{\text{th}}$ ; numa economia de  $n$  setores temos  $n^n$  rotas estruturais de ordem  $n^{\text{th}}$  (BABOULET e LENZEN, 2010; LENZEN e CRAWFORD, 2009).

Contudo, o resultado da soma de todas as rotas é um número finito porque o valor de uma rota de insumo decresce com o aumento do comprimento da rota (LENZEN e MURRAY, 2010; BABOULET e LENZEN, 2010; LENZEN, 2007; LENZEN 2003; LENZEN, 2002; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984). Isto pode ser demonstrado dentro do contexto apresentado nas eqs. 10, 11 e 12, onde  $N(\mathbf{A}^{k+1}) \leq N(\mathbf{A}^k)$  quando  $N(\mathbf{A}) \leq 1$ , assim a norma de cada termo sucessivo na série de potência é menor do que a norma do termo precedente. Como resultado, cada somatória do lado direito da eq. 50 é menor que um,  $\forall a_{j,i} \geq 0$ . Logo, a primeira somatória da eq. 50 é menor que um.

$$\sum_{j=1}^n a_{j,i} < 1$$

Mas, ela é maior ou igual à segunda somatória:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} a_{j,k} a_{k,Sge} \leq \sum_{j=1}^{n+1} a_{j,Sge} < 1$$

E a segunda somatória é menor que um, porém maior que o terceiro elemento somatório da eq. 50, que é menor que um, contudo maior que a quarta somatória, e assim sucessivamente. Como resultado, o produto dos elementos infinitos de  $\mathbf{A}$  tendem a zero, tal que a soma dessas rotas resulte em um número finito (MILLER e BLAIR, 2009; WAUHG, 1950). Portanto, uma SPA deve conter somente até uma ordem máxima de rotas de insumos que reflete *per se* o grau de completeza desejado (LENZEN, 2007; LENZEN, 2003; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984).

A estrutura original do enfoque *structural path* proposta por Defourney (1982) consiste em três medidas de influência do setor de origem  $i$  sobre o setor de destino  $j$ : influência direta, influência total e influência global (ARNDT *et al*; 2011; ROBERTS, 2005; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984; DEFOURNEY, 1982).

A influência direta do setor de origem  $i$  sobre o setor  $j$  para uma rota de insumo de primeira ordem é o coeficiente técnico  $a_{ji}$  da matriz  $\mathbf{A}$ , como mostra a equação 51:

$$I_{i \rightarrow j}^D = a_{ji} \quad (51)$$

Para as rotas de insumo de ordem maior, com múltiplos arcos entre  $i$  e  $j$ , a influência direta é igual ao produto das intensidades dos arcos ao longo da rota de insumo, como mostrada na eq. 50:

$$I_{i \dots j}^D = a_{jk} \dots a_{ki}$$

A influência total vai além da informação contida na expansão de Taylor da matriz de Leontief; tal influência considera a multitude de interações entre setores. Defourney e Thorbecke (1984) definem que a influência total é a influência transmitida do setor  $i$  ao setor  $j$  ao longo da rota de insumo ( $p$ ), amplificada pelas conexões indiretas imediatamente adjacentes à rota de insumo  $p$ . Essa amplificação é chamada de multiplicador da rota  $M_p$ :

$$I_{(i \rightarrow j)_p}^T = I_{i \rightarrow j}^D M_p \quad (52)$$

O multiplicador da rota captura os efeitos indiretos, e ele é estimado pela relação de dois determinantes  $\Delta p / \Delta$ , onde  $\Delta$  é o determinante  $|\mathbf{I} - \mathbf{A}|$ , e  $\Delta p$  é o determinante da estrutura econômica que exclui os setores que constituem a rota de insumo  $p$  (ARNDT *et al*; 2011; ROBERTS, 2005; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984; DEFOURNEY, 1982).

A influência global de  $i$  sobre  $j$  é o crescimento total unitário da produção de  $j$  como resultado do crescimento unitário de  $i$ .



$$I_{i \rightarrow j}^G = m_{ji} = \sum_{p=1}^{n+1} I_{(i \rightarrow j)p}^T \quad (53)$$

Com esse resultado, podemos chamar a matriz de Leontief como matriz de influência global, sendo igual à soma das influências totais do setor  $i$  sobre o setor  $j$ .

#### 1.4.1 Análise *structural path* para sistemas de unidade de processo (ACV)

Antes de elaborar uma análise *structural path* sobre uma matriz de processo, deve-se satisfazer a certas condições matemáticas para que a inversa da matriz, representada nas eqs. 1 e 2, possa ter sua expansão de séries de potência, como a apresentada nas eqs. 14 e 50 para a matriz inversa de Leontief do modelo de insumo-produto.

Suh e Heijungs (2007) indicam a base matemática por trás das condições de expansão de séries de potência para qualquer sistema linear generalizado, como o sistema matricial de ACV, das tabelas físicas de insumo-produto, do sistema de insumo-produto com unidades monetárias e físicas, e dos modelos de rede ecológica:

**Lema 2:** *a inversa de uma matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  real quadrada e indecomponível pode ser expressa como  $\mathbf{I} + (\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}}) + (\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}})^2 + \dots$  se e somente se todos os autovalores da matriz  $(\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}})$  têm um módulo menor que a unidade.*

Prova: Considere uma matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  real e de tamanho  $n \times n$ . Mediante as eqs. 13 e 14, e pela substituição de  $\underline{\mathbf{D}} = \mathbf{I} - \mathbf{A}$ , a inversa da matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  pode ser expressa com uma série de potência:

$$\underline{\mathbf{D}}^{-1} = \mathbf{I} + (\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}}) + (\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}})^2 + (\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}})^3 + \dots \quad (54)$$

Se e somente se, a matrix  $(\mathbf{I} - \underline{\mathbf{D}})^m$  converge para uma matriz nula, quando  $m \rightarrow \infty$ . Um autovalor  $\lambda_i$  de  $\mathbf{A}$  é definido como um valor complexo que possivelmente satisfaz  $\mathbf{A}x_i = \lambda_i x_i$ . Ao colocar autovetores  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  em cada coluna de  $\mathbf{X}$ , tem-se  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{X}\hat{\lambda}$ , onde  $\hat{\lambda}$  é uma matriz quadrada com os autovalores  $\lambda_i$  na diagonal, e fora dela os elementos são nulos. Logo, se  $\mathbf{X}$  é uma matriz não singular, então  $\mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{X} = \hat{\lambda}$ . Ao elevar a potência  $m$ , tem-se que:

$$(\mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{X})^m = (\mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{X}) \cdot (\mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{X}) \dots (\mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{X}) = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{A}^m\mathbf{X} = \hat{\lambda}^m \quad (55)$$

A expressão 55 é verdadeira porque  $\mathbf{X}^{-1}$  e  $\mathbf{X}$  são matrizes independentes de  $m$ . Então  $\mathbf{A}^m$  converge para zero quando  $m \rightarrow \infty$ , se e somente se, cada elemento  $\lambda_i^m$  converge para zero. Assim,  $\mathbf{A}^m$  converge para a matriz nula  $\leftrightarrow |\lambda_i| < 1 \forall i$ .

■

Quando o número de autovetores linearmente independentes de  $\underline{\mathbf{D}}$  é menor do que  $n$ , a matriz  $\mathbf{X}$  não tem inversa, e a eq. 55 não é verdadeira. Para a prova do lema 2, utiliza-se a forma canônica de Jordan; para a demonstração, ver Suh e Heijungs (2007).

**Corolário 1:** *Todos os autovalores de uma matriz real e quadrada  $\underline{\mathbf{D}}$  que cumpre com a condição do lema 2 encontram-se dentro do intervalo aberto (0,2).*

Prova:  $\mathbf{Ax}=(\mathbf{I}-\underline{\mathbf{D}})\mathbf{x}=\mathbf{x}-\underline{\mathbf{D}}\mathbf{x}=\lambda\mathbf{x}\leftrightarrow\underline{\mathbf{D}}\mathbf{x}=(1-\lambda)\mathbf{x}=\mu\mathbf{x}\leftrightarrow(1-\mu)=\lambda$ , e como  $|\mu_i|<1 \forall i$  se a matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  cumpre com a condição do lema 1, todos os autovalores de  $\underline{\mathbf{D}}$  estão dentro do intervalo (1,2).

■

**Corolário 2:** *Para uma matriz  $\mathbf{A}$  real e não negativa, a condição de lema 2 é reduzida para ter o maior autovalor real de  $\mathbf{A}$  dentro do intervalo aberto (0,1).*

Prova: Demonstração (Frobenius, 1908 *apud* Suh e Heijungs, 2007 ). De acordo com o teorema Frobenius (Frobenius, 1908 *apud* Suh e Heijungs, 2007), como o autovalor com maior módulo da matriz  $\mathbf{A}$  não negativa é real, positiva e simples, a condição suficiente e necessária para uma matriz  $\mathbf{A}$  real e não negativa ser a matriz nula quando  $m \rightarrow \infty$ , é que o autovalor maior real de  $\mathbf{A}$  esteja dentro do intervalo aberto (0,1).

■

**Lema 3:** *Considere  $\underline{\mathbf{D}}$  uma matriz quadrada, real e inversível, onde  $\mathbf{A}=\mathbf{I}-\underline{\mathbf{D}}$  é uma matriz não negativa, então, as seguintes declarações são equivalentes: a)  $(\mathbf{A}^m)=0$  quando  $m \rightarrow \infty$ ; b)  $r_\sigma(\mathbf{A}^m)<1$ , onde  $r_\sigma$  é o módulo do maior autovalor; c)  $N(\mathbf{A}^m) \rightarrow 0$ ; d)  $\underline{\mathbf{D}}^{-1}$  existe e é igual a  $\mathbf{I}+\mathbf{A}+\mathbf{A}^2+\dots$  (ver a demonstração em Atkinson, 1989 e Issacson e Keller, 1966 *apud* Suh e Heijungs, 2007).*

**Corolário 3:** *A condição necessária e suficiente para uma matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  real e inversível ser utilizada numa análise structural, usando sua forma de série de potência,  $\underline{\mathbf{D}}^{-1}=\mathbf{I}+(\mathbf{I}-\underline{\mathbf{D}})+(\mathbf{I}-\underline{\mathbf{D}})^2+\dots$  tem que satisfazer às seguintes condições: a)  $\underline{d}_{ii}=1$ ; b)  $\underline{d}_{ij} \leq 0 \forall i,j$  e  $i \neq j$ ; c) todos os autovalores têm  $N(\mathbf{A})<1$ .*

No contexto de ACV, as condições a) e b) implicam que o sistema é monofuncional e a produção de cada unidade de processo é colocada na diagonal, e que cada coluna está relacionada com o valor da produção bruta da coluna (SUH e HEIJUNGS, 2007).

Suh e Heijungs (2007) observam que a condição Hawkins-Simon (HAWKINS e SIMONS, 1949 *apud* SUH e HEIJUNGS, 2007) estabelece que a condição suficiente e necessária para a matriz de Leontief  $\mathbf{L}$  ser positiva é que todos os menores principais de  $(\mathbf{I}-\mathbf{A})$

sejam positivos. Suh e Heijungs (2006) apresentam a condição Hawkins-Simon para sistemas lineares generalizados:

**Definição 6:** *Se todos os menores principais de uma matriz real e quadrada são positivos, então ela cumpre com a condição Hawkins-Simon.*

**Corolário 4:** *Quaquer matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  real e quadrada que satisfaz à condição de lema 2, satisfaz à condição generalizada Hawkins-Simon.*

Prova: a condição Hawkins-Simon é cumprida, se e somente se, todos os autovalores reais de  $\underline{\mathbf{D}}$  são positivos, e pelo corolário 1, todos os autovalores reais de  $\underline{\mathbf{D}}$  que satisfazem ao lema 2 estão dentro do intervalo aberto (0,2). ■

**Lema 4:** *Para qualquer matriz real e quadrada  $\underline{\mathbf{D}}$  que satisfaz as condições a) e b) do corolário 3, a condição c) é equivalente à condição generalizada Hawkins-Simon.*

Prova: Fiedler e Ptak (1962) mostram que as condições do corolário 3 levam a uma solução positiva. Como resultado, a condição generalizada Hawkins-Simon é uma condição necessária para que qualquer matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  que satisfaz às condições a) e b) de corolário 3, possa ser usada para uma análise *structural*. Logo, suponha-se que: a)  $\underline{\mathbf{D}}$  satisfaz  $d_{ij} \leq 0$  e  $d_{ii} = 1$ , b)  $\exists$  escalar  $c > 0$ , e c)  $\underline{\mathbf{D}} = \mathbf{I} - \mathbf{A}$  é uma matriz não negativa tal que  $\underline{\mathbf{D}} = \mathbf{cI} - \mathbf{A}$ . Seja  $\lambda$  o autovalor real e não negativo de  $\mathbf{A}$  tal que  $\lambda_{\max} \geq |\lambda| \forall \lambda$ , e  $\mu$  o autovalor de  $\underline{\mathbf{D}}$  tal que  $\mu_{\min} \leq \mu \forall \mu$ , tem-se então que  $\lambda = c - \mu$ . Como  $\lambda_{\max}$  é determinado por  $\mu_{\min}$ ,  $\lambda_{\max} = c - \mu_{\min}$ , e como  $\mu_{\min} > 0$  e  $|\lambda| < c \forall \underline{\mathbf{D}}$  que satisfaz à condição generalizada Hawkins-Simon, então, sem perda de generalidade, ao estabelecer que  $c = 1$ , e  $d_{ii} \leq 1$  para  $\underline{\mathbf{D}} \rightarrow |\lambda| < 1 \forall \lambda$ . Como resultado, pela definição da condição generalizada Hawkins-Simon, qualquer matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  que satisfaz à condição a) e b) do corolário 3 e que satisfaz à condição generalizada Hawkins-Simon, então satisfaz à condição c) e vice-versa. ■

**Corolário 5:** *Para qualquer matriz que satisfaz às condições do corolário 3 tem-se  $0 < \det(\underline{\mathbf{D}}) \leq 1$ .*

Prova: como  $a_{ii} > 0$  e  $a_{ij} \leq 0 \forall \underline{\mathbf{D}}$  que satisfaz às condições do corolário 3, ao triangularizar a matriz  $\underline{\mathbf{D}}$ , adicionam-se valores não positivos a cada diagonal; sem embargo, o resultado da triangularização precisará conter toda sua diagonal positiva para ter todos seus menores principais positivos, como resultado, todo elemento da diagonal da matriz  $\underline{\mathbf{D}}$  triangularizada é igual ou menor que 1. Assim o  $\det(\underline{\mathbf{D}}) = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdots t_n$ , onde  $t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdots t_n$  são

os elementos da diagonal da matriz triangularizada  $\underline{\mathbf{D}}$ , satisfaz às condições do corolário 3 e é menor que um.

■

Como resultado, pode-se estabelecer que uma matriz de unidades de processo  $\tilde{\mathbf{A}}$  que cumpra com as condições do corolário 3, e onde  $\mathbf{S}=(\mathbf{I}-\tilde{\mathbf{A}})$ , sua inversa pode ser representada pela expansão de série de potência da equação 56:

$$\tilde{\mathbf{A}}^{-1}=\mathbf{I}+\mathbf{S}+\mathbf{S}^2+\mathbf{S}^3 \quad (56)$$

Logo, a base de uma análise *structural path* de uma matriz de unidade de processo para a intervenção ambiental do e-fator está apoiada na seguinte expressão:

$$\tilde{x}_i^e = \left( \tilde{b}_i^e + \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j^e s_{j,i} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{b}_j^e s_{j,k} s_{k,i} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{b}_l^e s_{l,k} s_{k,j} s_{j,i} + \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{b}_h^e s_{h,l} s_{l,k} s_{k,j} s_{j,i} + \dots \right) y_i$$

E pelas eqs. 51, 52, e 53 obtêm-se as influencias totais e globais das rotas de fornecedores considerados dentro da fronteira do sistema modelado pela matriz de unidade de processo.

### 1.5 Avaliação de ciclo de vida híbrida

O enfoque de insumo-produto é uma ferramenta que observa as atividades produtivas numa perspectiva setorial. Contrariamente, o enfoque de avaliação de ciclo de vida analisa, de forma holística, um produto/serviço baseado na estrutura micro de um sistema econômico. O nível de detalhamento requerido num estudo ACV/ICV estabelece uma estrutura em dados específicos de processos e observa o sistema de produto como um sistema isolado, especialmente na modelagem atribucional, no lugar de ser tratado como um sistema interdependente do amplo sistema econômico (SUH, 2004). Isto porque, em princípio, todos os processos numa economia são direta ou indiretamente conectados uns com os outros. Nesse sentido, uma análise de ACV baseada em dados de unidades de processos é sempre truncada em algum grau. Isto porque, praticamente, não é possível coletar detalhadamente todos os dados específicos de cada unidade de processo que conforma uma economia.

Já o enfoque ambiental de insumo-produto é mais completo nas fronteiras do sistema, mas apresenta erros devidos à agregação de produtos e setores e à falta de especificidade dos processos (MAJEAU-BETTEZ *et al*; 2011). Rebitzer *et al*. (2004) apontam que as limitações

e as vantagens do enfoque ambiental de insumo-produto fazem com que ele seja considerado um método de preavaliação ou *screening* de ACV. Na área de ACV, ele é conhecido como avaliação de ciclo de vida de insumo-produto econômico (*Economic Input-output Life-cycle Analysis -EIOLCA* <sup>5</sup>).

Nessa perspectiva, nasce a inquietude de encontrar enfoques simplificadores de compilação de dados ICV que eliminem os problemas de truncamentos inerentes às análises de processos, e conseqüentemente, de delimitação da fronteira do sistema, e que apresentem a capacidade de relacionar todos os setores de uma economia, como no modelo ambiental de insumo-produto. Assim, o enfoque híbrido de ACV, que integra o enfoque insumo-produto numa ACV, aparece como um meio de combinar as fortalezas de ambos os métodos e de eliminar as deficiências de cada um deles para aumentar a precisão das análises (MAJEAU-BETTEZ *et al*; 2011; WEIDMANN *et al*; 2011).

No entanto, para que um método simplificador de inventário ICV seja considerado um estudo de ACV/ICV, ele deve ter consistência com as normas estabelecidas pela ISO 14041. Rebitzer *et al.* (2004) propõem alguns dos critérios que deveriam ser considerados nos métodos ICV: **relevância** - compatibilidade em relação às decisões para ser apoiadas por uma ACV; **validade** - deve dar a mesma visão e resultado de uma ACV detalhada, sendo aceitáveis as resoluções menores; **compatibilidade com procedimentos computacionais** - somente se o método pode ser implementado em algoritmos de *software* é possível integrá-lo às bases de dados e ambientes de tecnologia de informação já existentes; **reprodutibilidade** - um método deveria ser estabelecido de tal maneira que diferentes usuários ou pesquisadores possam chegar ao mesmo nível de resultado, isto é, para definições de objetivos e alcance idênticos; e **transparência** - para os resultados terem credibilidade e poderem identificar melhoras potenciais. Logo, a ACV híbrida é um modelo simplificador de ICV que possibilita a diminuição dos vazios nos inventários com as informações da análise de insumo-produto (REBITZER *et al*; 2004).

O enfoque híbrido de ACV teve início na primeira metade da década dos anos 90 com a publicação de Moriguchi *et al.* (1993), que introduz ACV no método conhecido como análise híbrida *tiered*, usada em análises energéticas. A partir dessa publicação e de outros estudos de ACV usando as técnicas de insumo-produto, começou o desenvolvimento do enfoque híbrido em ACV. Entre essas publicações, encontram-se as seguintes: *Using input-output analysis to estimate economy wide discharges* de Lave *et al.* (1995), *Extracting*

---

<sup>5</sup> Disponível em: <http://www.eiolca.net/>. Acesso em Setembro, 2008.

*embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method* de Treolar (1997), *Application of a hybrid-approach to the life cycle inventory analysis of a freight transport task* de Marheineke *et al.* (1998), *Economics input-output models for environmental life cycle assessment* de Hendrickson *et al.* (1998), e *Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques* de Joshi (2000). O enfoque híbrido de ACV está dividido em três métodos: a análise híbrida *tiered*, a análise híbrida baseada em insumo-produto e, a análise híbrida integrada.

O método híbrido *tiered* apareceu desde a segunda metade da década dos anos 1970, quando se realizaram as análises energéticas baseadas em insumo-produto. Os pesquisadores Bullard e Pillati (1976), no artigo *Reducing uncertainty in energy analysis*, e Bullard *et al.* (1978) em *Net energy analysis – handbook for combining process and input-output analysis*, combinaram a análise de processos baseada em diagrama de fluxos de processos com análises de insumo-produto para calcular a energia líquida requerida na economia dos Estados Unidos.

Já em 1993, Moriguchi *et al.* (1993) introduziram o enfoque *tiered* em ACV, em que calcularam as emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida de um automóvel mediante a combinação de ICV baseada em processo e insumo-produto. Eles utilizaram as tabelas de insumo-produto do Japão para as etapas de pré-uso (*upstream*) do ciclo de vida, e o ICV de processos nas etapas de uso e disposição final (*downstream*) (SUH e HUPPES, 2009, 2005; SUH, 2004; RIBITZER *et al.*; 2004).

Nesse enfoque, os dados baseados em processos são coletados para as fases de uso, disposição final e alguns dos processos *upstream*. Os outros processos *upstream*, isto é, processos *background*, são modelados usando o enfoque insumo-produto. Conseqüentemente, os dois conjuntos de dados são combinados simultaneamente, mediante a soma do sistema de cargas ambientais dos dados baseados em processos, isto é, ACV de processo, e do sistema de cargas ambientais dos dados baseados no enfoque insumo-produto.

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_{LCA} + \mathbf{x}_{IO} = \tilde{\mathbf{x}}_{\tilde{\mathbf{B}}} + \mathbf{x}_{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{A}})^{-1}\mathbf{y} + \mathbf{B}[\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{f} \quad (57)$$

Onde  $\mathbf{x}^*$  representa a matrix de inventário de ciclo de vida ambiental da análise ACV híbrida *tiered*. A forma matricial da eq. 57 é representada por:

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}} & 0 \\ 0 & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix}$$

Pode-se acrescentar ao modelo ACV híbrida *tiered* a matriz  $A_{bf}$ , que expressa a relação dos setores *background*, das tabelas insumo-produto, com os setores do enfoque ACV, mediante o fornecimento de insumos monetários dos setores *backgorund* aos setores do enfoque ACV. Para este modelo  $f$  é considerado igual a zero. Nessa perspectiva, a eq. 57 pode ser expressa de forma matricial pela equação 58.

$$x^{**} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}} & 0 \\ 0 & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & 0 \\ \mathbf{A}_{bf} & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

Com base na eq. 58, o quadro 7 ilustra a organização da informação no enfoque ACV híbrida *tiered*.

Quadro 7 - Ilustração do enfoque ACV Híbrido *Tiered*

Tabela de requerimentos diretos <i>Tiered</i> híbrido	Produtos usados	Produtos usados
Produtos fornecidos	Tabela de requerimentos diretos de processos	
Produtos fornecidos	↑	Tabela insumo-produto

Fonte: Elaboração própria baseada em Weidema *et al* (2009).

Segundo Suh e Huppés (2005, 2009) e Suh (2004), esse modelo integrador provê resultados de inventários relativamente rápidos e razoavelmente completos. Eles ressaltam que existem três fatores de atenção no momento de aplicar o método ACV híbrida *tiered*. O primeiro é devido à agregação dos dados da análise de insumo-produto. Erros significativos podem ser obtidos, se forem modelados processos importantes usando as tabelas insumo-produto. Enfatiza-se, dessa maneira, a importância da seleção das fronteiras entre os dois modelos. Como alguns fluxos de produtos do ICV de processos estão já contabilizados nas tabelas de insumo-produto, essas parcelas devem ser subtraídas da parte da análise de insumo-produto para evitar dupla contagem. E o terceiro ponto a destacar é reconhecer que os dois métodos trabalham com modelagens diferentes, logo, a interação entre ambos não pode ser avaliada de maneira sistemática (FERRÃO e NHAMBIU, 2009; SUH e HUPPES, 2009, 2005; SUH, 2004).

O método análise híbrida baseada em insumo-produto dessagrega parte da tabela de insumo-produto para melhorar a especificidade do processo. Treolar (1997) usou esse enfoque para analisar os requerimentos energéticos da Austrália e Joshi (2000) desagregou parte da tabela de insumo-produto dos Estados Unidos para analisar os diferentes tanques de combustíveis (SUH e HUPPES, 2009, 2005; REBITZER *et al*; 2004). Para considerar a etapa de uso e de disposição final do produto, o método híbrido baseado em insumo-produto deve ser modelado baseado no método híbrido *tiered*. Como resultado, segundo Rebitzer *et al*.

(2004), o enfoque híbrido baseado em insumo-produto pode ser considerado como uma forma especial do método híbrido *tiered*, no qual a resolução dos elementos de insumo-produto é melhorada. Com os novos elementos desagregados da parte de insumo-produto da eq. 57, a nova matrix  $\mathbf{A}'$  e o vetor  $\mathbf{f}'$  desagregado calculam a respectiva matriz de inventário de ciclo de vida ambiental:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}_{LCA} + \mathbf{x}_{IO} = \tilde{\mathbf{x}}_{\underline{\mathbf{B}}} + \mathbf{x}_{\underline{\mathbf{B}}} = \tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{A}})^{-1}\mathbf{y} + \underline{\mathbf{B}}'[\mathbf{I} - \mathbf{A}']^{-1}\mathbf{f}' \quad (59)$$

Por último, o método de ACV híbrida integrada foi proposto por Suh (2004) e Heijungs e Suh (2002), e incorpora a estrutura computacional de insumo-produto e de ACV dentro de um contexto consistente e matematicamente flexível, evitando os problemas de incompletude e permitindo o uso de ferramentas analíticas desenvolvidas para ACV e insumo-produto para análises posteriores (SUH, 2004).

Suh e Huppes (2009, 2005) e Suh (2004), observam que a tabela insumo-produto é interconectada com a matriz de processo somente nas matrizes de truncamento dos processos *upstream* e *downstream*, expressas em unidades mistas, onde não existe disponibilidade de dados mais precisos. De forma similar ao modelo híbrido *tiered*, a representação matricial deste modelo integrador é expressa na equação 60.

$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}} & 0 \\ 0 & \underline{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & -\mathbf{C}^d \\ -\mathbf{C}^u & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (60)$$

Onde a matriz  $\mathbf{C}_{n \times m}^u$  representa a conexão do sistema de insumo-produto  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})_{n \times n}$  com o sistema de unidade de processo (representado por  $\tilde{\mathbf{A}}_{m \times m}$ ), nela os fluxos truncados dos processos *upstream* da matriz de processo são conectados com os setores relevantes da tabela insumo-produto (setores *background*), onde cada elemento  $c_{ij}^u$  tem unidade monetária/unidade física. Por outra parte, a matriz  $\mathbf{C}_{m \times n}^d$  representa a conexão do sistema de unidade de processos com o sistema insumo-produto, cada elemento  $c_{ij}^d$  tem unidade física/valor monetária e representa o fornecimento de insumos das unidades de processo à economia representada na matrix  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})$ . Segundo Acquaye *et al.* (2011), Strømman *et al.* (2009), e Peters e Hertwich (2006), os fluxos da matriz  $\mathbf{C}^d$  são, na sua maioria, menores se comparados com a troca de fluxos do sistema *background* da economia.

Para obter os coeficientes da matriz de truncamentos *upstream*  $\mathbf{C}^u$ , deve-se, primeiramente, obter o multiplicador  $k$ :

$$k_j = p_j * v_j \quad (61)$$



Onde  $p_j$  é o custo de produção do produto do processo  $j$  da matriz de processos, em R\$/unidade física, e  $v_j$  é o insumo do produto do processo  $j$  na matriz de unidade de processos. Os coeficientes técnicos  $a_{il}$  da matriz de coeficientes técnicos do sistema de insumo-produto são posicionados como elementos da matriz de truncamentos *upstream*, onde  $i$  é o setor do sistema insumo-produto e  $l$  é o setor correspondente ao processo  $j$ . Subsequentemente, esses coeficientes são ponderados pelo multiplicador  $k$ , e cada campo da matriz se torna  $c_{ij}^u$ . Para corrigir dupla contagem, todos os insumos *upstream* de  $C^u$  devem ser eliminados em vista de já estarem representados na matriz de unidade de processo em termos físicos, como resultado:

$$c_{ij}^u = 0 \rightarrow \tilde{a}_{kj} \neq 0$$

Onde  $k$  representa o produto da coluna  $j$  da matriz de processo.

Para a matriz de truncamentos *downstream*  $C^d$ , o coeficiente técnico  $a_{il}$  é multiplicado pelo custo de produção do produto  $k$  representado na matriz de unidade de processo,  $1/p_i$ , os coeficientes  $c_{kl}^d$  para os produtos da matriz de unidades de processo que ainda não sejam contabilizados no sistema econômico. O quadro 8 apresenta o enfoque híbrido integrado onde a relação e conexão dos sistemas *foreground* e *background* são representados.

Quadro 8 - Ilustração do enfoque híbrido Integrado

<b>Tabela de requerimentos diretos híbrido integrado</b>	Produtos usados	Produtos usados
Produtos fornecidos	Tabela de requerimentos diretos de processos	↓
Produtos fornecidos	↑	Tabela insumo-produto

Fonte: Elaboração própria baseada em Weidema *et al* (2009).

Desde que ACV híbrida integrada possui uma estrutura computacional baseada no enfoque de insumo-produto e ACV/ICV matricial, faz que seja permitido a incorporação também de fatores econômicos nas matrizes de cargas ambientais (**B** e **B̃**), de maneira consistente; podendo ser chamadas de matrizes de cargas ambientais e econômicas. Alguns dos fatores econômicos presentes nas bases de dados das contas econômicas são: geração de emprego, geração de renda e valor adicionado. A identificação dos respectivos coeficientes econômicos para os processos físicos representados nas colunas da matriz ACV de processos é necessária para esta proposta. Visa-se incorporar no enfoque de ciclo de vida híbrido a análise das três dimensões do desenvolvimento sustentável, economia, meio ambiente e social. Obtém-se, assim, o ciclo de vida de fluxos econômicos de um produto/serviço dentro

das diretrizes das normas ISO 14040/14044, mediante uma ferramenta robusta que analisa a sustentabilidade das atividades econômicas pela interconexão entre os diferentes fatores, e que suporta, dessa maneira, o processo de tomada de decisão.

Nesse contexto, para estimar o coeficiente de emprego do produto  $k$  fabricado no processo  $j$ , para um período de tempo definido, utiliza-se a equação 62:

$$C_j^E = \frac{\text{empregos processo } j}{\text{Produção física } k_j} + \sum_{k=1, \forall k \neq k_j}^n \frac{\text{empregos processo insumo } k}{\text{Produção física insumo } k} * \frac{\text{consumo insumo } k}{\text{Unidade funcional processo } j} \quad (62)$$

Para  $n$  número de insumos e um coeficiente de unidade igual ao número de empregos por unidade funcional do processo representado pela coluna estimada.

## 2. Preparação da base de dados referente ao estudo de caso

### 2.1 Panorama do setor de etanol de segunda geração

As projeções de crescimento na demanda global de biocombustíveis refletem, principalmente, os objetivos das políticas de transporte e energéticas adotadas por importantes mercados energéticos, como a União Europeia e os Estados Unidos. Essas políticas visam ao aumento da produção e uso de fontes energéticas derivadas de recursos naturais renováveis<sup>6</sup> (CARRIQUIRY *et al.*; 2011; ACQUAYE *et al.*; 2011; AJANOVIC e HAAS, 2010; OECD/IEA, 2010; PIRES e SCHECHTMAN, 2010). À guisa de exemplos, a *Renewable Fuel Standard* (RFS2) propõe o aumento de recursos energéticos renováveis nos Estados Unidos e estipula importante participação de biocombustíveis derivados de biomassa lignocelulósica<sup>7</sup>(chamados também biocombustíveis de segunda geração) para 2022. Já a *Renewable Energy Directive* (RED) promove o uso de energia de recursos renováveis na União Europeia, em que se estipula que, para 2020, os biocombustíveis de segunda geração estejam comercialmente disponíveis e que 10% da energia do setor de transporte sejam originárias de fontes renováveis (CARRIQUIRY *et al.*; 2011; PIRES e SCHECHTMAN, 2010; REN21, 2009; EREC, 2008).

O interesse pelo desenvolvimento de tecnologias competitivas na produção de biocombustíveis derivados de biomassa lignocelulósica é impulsionado pelas críticas aos biocombustíveis de primeira geração, derivados de biomassa com quantidades significativas de amido ou açúcares para o etanol, e óleos vegetais ou gorduras para o biodiesel. Essas críticas são, em especial, relacionadas ao uso intensivo do solo e concorrência com os alimentos e a natureza que os biocombustíveis de primeira geração causariam (CARRIQUIRY *et al.*; 2011; DIAS *et al.*; 2011; AJANOVIC e HASS, 2010; IEA/OECD, 2008;). Em contrapartida, nos debates sobre a introdução dos biocombustíveis de segunda geração no setor de transporte se discutem vantagens como segurança e diversificação energética, desenvolvimento econômico em áreas rurais de países emergentes, reduções nas

---

<sup>6</sup> Pires e Schechtman (2010) lembram que a maioria das políticas promotoras de uso e produção de recursos energéticos renováveis é justificada por trazer benefícios fora do sistema de mercado, por exemplo: aumento na segurança da oferta nacional de energia; redução de impactos ambientais locais e globais; criação de novos mercados para os produtos agrícolas; e estímulo ao desenvolvimento regional e nacional.

<sup>7</sup> A biomassa lignocelulósica é um termo botânico usado para a biomassa de materiais de fibra, como resíduos agrícolas ou bagaço, ou produtos e resíduos da silvicultura, sendo uma combinação de polímeros de lignina, celulose e hemicelulose interligado numa matriz heterogênea. O processo de obtenção de etanol se deriva da fermentação de açúcares de origem hemicelulósica e celulósica através de um pré-tratamento adequado e enzimático de hidrólise da celulose. Esse produto é conhecido como etanol lignocelulósico, celulósico ou etanol de segunda geração.

emissões de gases de efeito estufa, entre outros impactos ambientais (OECD/IEA, 2010; IEA/OECD, 2008). Esses combustíveis seriam, então, considerados como um meio para prover ao setor de transporte uma fonte energética mais sustentável, interligando os aspectos econômicos, ambientais e de bem-estar social (OECD/IEA, 2010; IEA/OECD, 2008).

A controvérsia entre defensores e acusadores de biocombustíveis de primeira geração *versus* suas contrapartes dos biocombustíveis de segunda geração parece não esmorecer. Para Ajanovic e Hass (2010), os biocombustíveis devem ser produzidos de maneira que não danifiquem o meio ambiente e não criem conflitos sociais, assegurando os benefícios ambientais, econômicos e sociais de seu uso no setor de transporte. Por sua vez, Kuchler (2010) apresenta uma análise crítica sobre a produção de bioenergia nos países emergentes. Nela é analisada a maneira como os organismos internacionais, especificamente a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), a IEA (International Energy Agency) e o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) defendem a produção de energia derivada de biomassa nos países emergentes para satisfazer às demandas energéticas dos países economicamente mais ricos. Kuchler (2010) ressalta que os organismos internacionais mencionados advogam políticas globais que são estruturadas, principalmente, sobre os requerimentos dos países mais ricos, criando somente benefícios socioeconômicos temporários para os países emergentes, como o Brasil.

Para OECD/IEA (2010), a sustentabilidade esperada na produção de biocombustíveis de segunda geração em países emergentes está ligada, principalmente, à geração de emprego qualificado, ao desenvolvimento socioeconômico na área rural de países emergentes, à não substituição de área fértil para a produção de alimentos, à preservação da natureza e à redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte (OECD/IEA, 2010; AJANOVIC E HASS, 2010; LUO *et al.*; 2009b; IEA/OECD, 2008). Cabe destacar que, desde meados de 2009, a ISO estabeleceu um comitê técnico (ISO/TC 248) para a padronização dos critérios de sustentabilidade na produção, cadeia de fornecedores e aplicações da bioenergia. O ISO/TC 248 está composto por quatro grupos de trabalho que discutem sobre: terminologia, verificação e auditoria; emissões de gases de efeito estufa; aspectos ambientais, econômicos e sociais; e efeitos indiretos.

No contexto brasileiro, a estrutura de mercado e a competitividade do setor de biocombustível, especificamente etanol de primeira geração, bem como do setor agrícola, possibilitam que o país se torne importante produtor de biocombustíveis avançados como o etanol de segunda geração, que representaria o progresso tecnológico no setor de transporte, procurando cumprir com os princípios do desenvolvimento sustentável. Isso possibilitaria o

aumento da capacidade de produção de biocombustíveis no Brasil, sem apresentar uma relação linear com a demanda por terra para a sua produção e sem depender dos preços internacionais dos alimentos, como açúcar e óleos vegetais (LA ROVERE *et al*; 2011; GOLDEMBERG *et al*; 2008).

Uma das vantagens brasileiras apontada pela literatura é a possibilidade que plantas de etanol de biomassa lignocelulósica sejam acopladas às plantas já existentes de produção de etanol, reduzindo os custos em infraestrutura e logística (OECD/IEA, 2010; IEA/OECD, 2008), e conseqüentemente, diminuindo o custo de produção do etanol (DIAS *et al*; 2011). De acordo com estimativas do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (Cenpes), a tecnologia de etanol derivado de bagaço de cana-de-açúcar pode aumentar a produção de etanol em 40% (JAGGER, 2009).

Atualmente, no Brasil existem vários projetos pilotos relacionados à produção de biocombustíveis de segunda geração, e entre as principais instituições pesquisadoras citam-se as seguintes: Petrobras, Centro Tecnológico Canavieira (CTC), Empresa Dedini, a empresa americana de biotecnologia Amyris, e diversos centros de pesquisas de universidades, além de outras. A maioria dos projetos está focalizada na produção de etanol de bagaço de cana-de-açúcar (JAGGER, 2009), devido à vantagem competitiva que o bagaço de cana-de-açúcar tem, quando comparado a outros resíduos agrícolas no Brasil. Ilustra-se, na figura 4, a relevância produtiva de cana-de-açúcar no Brasil para a série temporal dos anos safras 2005/2006-2008/2009, e as respectivas previsões e estimativas para o ano safra 2010/2011. Observa-se, também, que as principais culturas da produção agrícola brasileira são cana-de-açúcar, soja e milho.

Nos anos safras 2008/2009 e 2009/2010, a produção de cana-de-açúcar foi de 571 milhões e 604 milhões de toneladas, respectivamente. Supondo que uma tonelada de cana-de-açúcar produz entre 25%-30% de bagaço (WALTER e ENSINAS, 2010; FERREIRA-LEITÃO *et al*; 2010), para o ano safra 2009/2010 produziram-se aproximadamente 151 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Além da cana-de-açúcar, ilustra-se a importância nacional da soja. O Brasil é o principal país produtor desse grão e sua produção está projetada para crescer nos próximos anos devido, entre outros fatores, ao marcante papel que a soja tem na produção de biodiesel e alimentos. Contudo, apesar de a soja ter um panorama promissor para a produção de resíduo, a literatura aponta que a obtenção de resíduo derivado de soja é limitada para a fabricação de biocombustível de segunda geração (SHAHBAZI e LI, 2006). Isto porque a geração de resíduo no setor é pequena e necessária

para prevenir a erosão do solo, que é degradado rapidamente no campo (HATTI-KAUL, 2010; SHAHBAZI e LI, 2006).

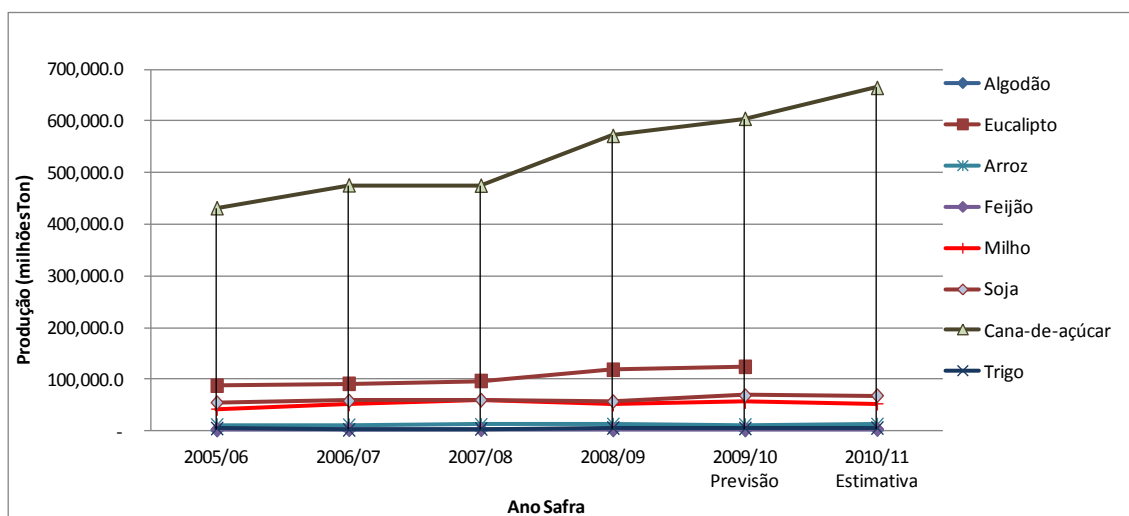


Figura 4 - Produção total das principais culturas brasileiras

Fonte: Palma-Rojas *et al.* (2011b).

Com base no potencial de insumos para a produção de etanol derivado de bagaço, com a produtividade de 149,3 litros etanol/tonelada de bagaço do modelo produtivo de Walter e Ensinas (2010), a figura 5 ilustra a contribuição potencial do etanol derivado de bagaço na produção total de etanol no Brasil para a série temporal de 2005-2012, e como esse crescimento potencial na produção de etanol manteria sem alteração a demanda por área plantada com cana-de-açúcar. Os resultados mostrados na fig. 5 mostram que a taxa de crescimento da produção total de etanol para os dois últimos anos safra analisados teria aumento potencial do 60% com a incorporação da produção de etanol derivado de bagaço com taxa de utilização de 76% do bagaço total.

Cabe destacar que, segundo dados da UNICA e MAPA, nos anos 2010 e 2011 o consumo do etanol hidratado sofreu queda no mercado brasileiro, sendo que no ano 2011 a taxa de redução foi de aproximadamente 28%. Esse resultado veio acompanhado do aumento do preço do etanol hidratado e da política do governo de assegurar o preço da gasolina e o diesel para o consumidor, chegando, assim, a uma paridade de preços do etanol e gasolina superior a 70%<sup>8</sup>. Ressalte-se que o preço do etanol recebe influência principalmente da produtividade da cana de açúcar (a produção de cana-de-açúcar equivale a 2/3 dos custos do etanol) e do preço do açúcar determinado pelas variações no mercado internacional, onde, segundo a agência USP de Notícias da Universidade de São Paulo, o açúcar internacional tem

<sup>8</sup> O uso de etanol compensa energeticamente quando o preço do etanol é menor ou igual a 70% do preço da gasolina.

seu preço explicado pela liquidez, pelo índice de preços de commodities CRB-Reuters e pelo preço do petróleo.

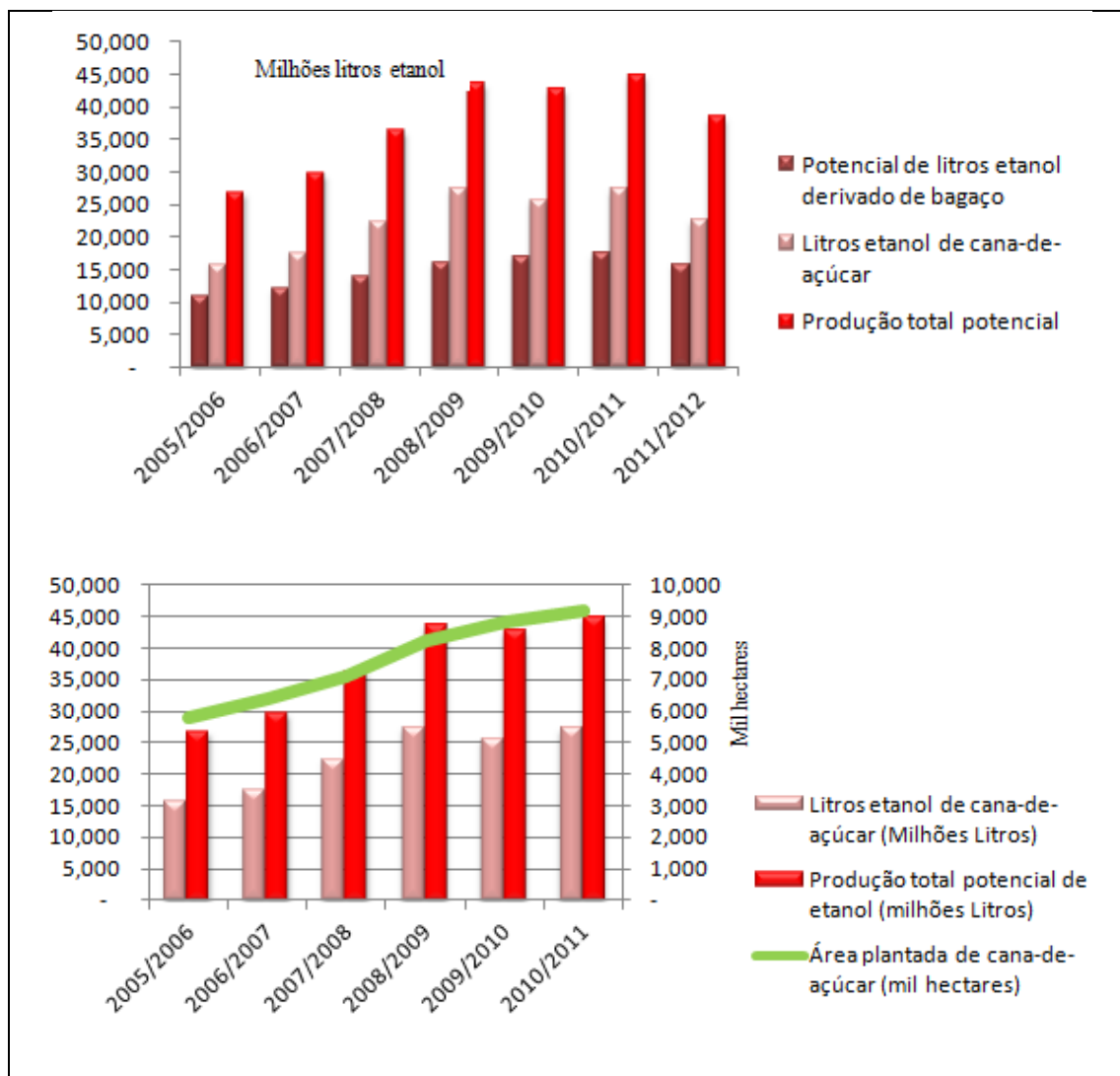


Figura 5 - Ilustração da contribuição potencial do etanol derivado de bagaço na produção total de etanol brasileiro

Fonte: Elaboração própria baseada em dados do MAPA, UNICA e Walter e Ensinas (2010).

A figura 6 mostra o comportamento dos preços ao consumidor do etanol hidratado e o comparativo percentual do etanol e da gasolina para os anos 2001-2012, o histórico médio anual do preço do açúcar, indicador baseado no açúcar cristal por saca de 50 kg, com imposto e sem frete, bem como, ilustra-se, e a produtividade da cana-de-açúcar.

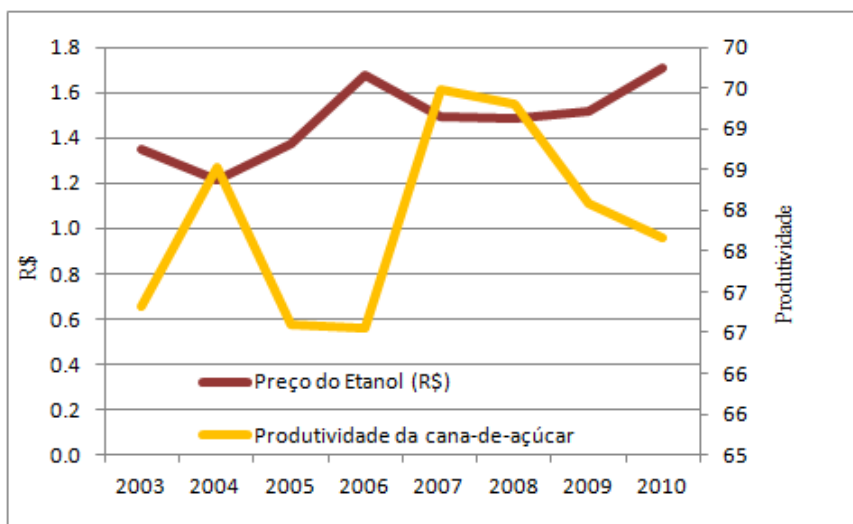
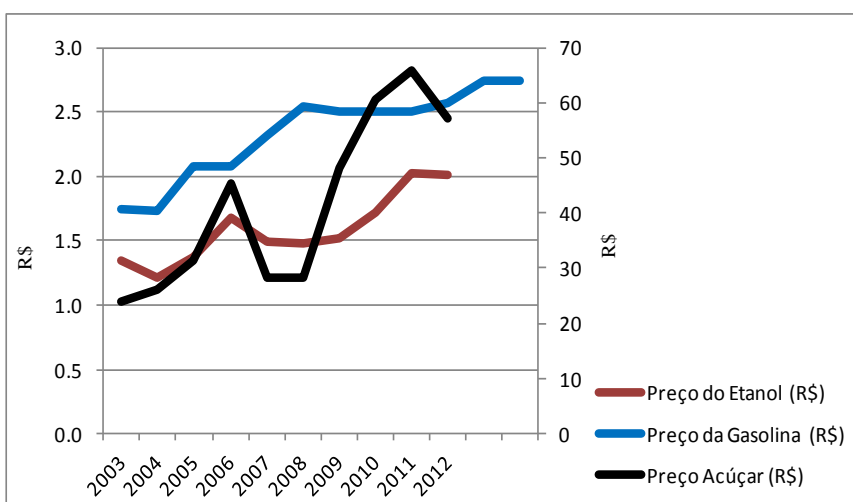
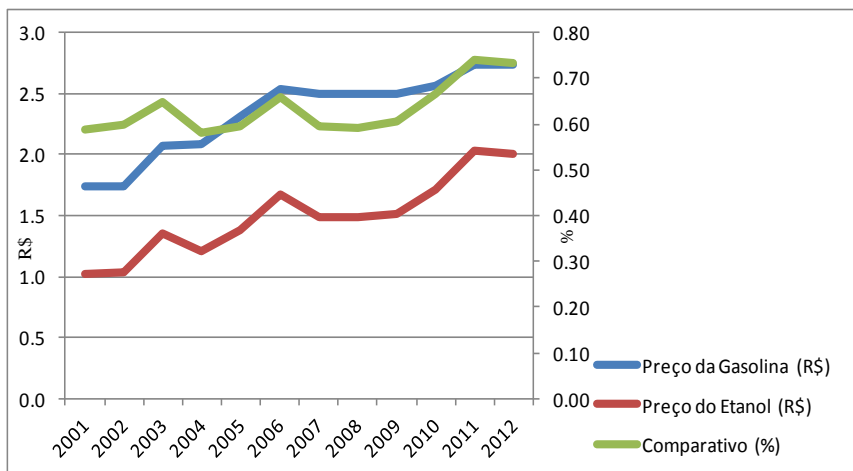


Figura 6 – Comparativo do preços do etanol hidratado de cana-de-açúcar, gasolina e açúcar, e a produtividade da cana-de-açúcar

Fonte: Elaboração própria baseada em UNICA, MAPA e CEPEA (ESALQ/USP).



Observa-se que, nos recentes anos, o comparativo mínimo de 70% é ultrapassado, o que torna o etanol hidratado no Brasil, um combustível pouco atraente para o consumidor, e assim, um combustível pouco competitivo no mercado energético nacional. A série temporal do indicador preço do açúcar mostra uma tendência crescente a partir do ano 2008, comportamento acompanhado de uma diminuição no crescimento da produção anual total de etanol, como ilustrado na fig. 5, e de uma tendência contínua dos preços da gasolina e uma paridade crescente, como ilustrado na fig. 6.

Como resultado, para o etanol voltar a ser competitivo, devem existir políticas que viabilizem a paridade do etanol e gasolina e que incentivem o investimento em novas tecnologias no setor. Dentro deste contexto, acredita-se que a introdução do etanol derivado de bagaço no mercado nacional pode ser um meio para mudar o panorama atual do setor, e aumentar as exportações de etanol devido à tendência mundial de crescimento do consumo de biocombustíveis produzidos dentro de critérios de sustentabilidade definidos pelos grandes mercados energéticos.

## 2.2 Preparação da matriz insumo-produto brasileira

Para poder aplicar as técnicas econômicas de insumo-produto e *structural path*, bem como a ACV híbrida para a análise de fatores econômicos e ambientais do setor de etanol derivado de bagaço, tornou-se necessária a adequação da base de dados original da matriz de coeficientes técnicos brasileira para uma economia agregada primeiramente em 18 setores. No processo de agregação e obtenção da matriz de coeficientes técnicos e a matriz de Leontief, foram utilizadas a matriz de produção (*Supply V'*) e a matriz de consumo intermediário (*Use U*) das tabelas de recursos e uso (TRU) do Sistema de Contas Nacionais. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)<sup>9</sup> disponibiliza uma série de matrizes do Sistema de Contas Nacionais, como a matriz de oferta e a matriz de consumo intermediário em um nível de agregação da economia brasileira de 55 setores e 110 produtos, em preços básicos de 2005 em milhões de reais (ver apêndice A1 para encontrar a estrutural original das tabelas de produção e uso TRU da economia brasileira).

De acordo com o IBGE (2005), "... As TRU consideram no consumo intermediário e na demanda final o valor total dos bens e serviços sem a distinção entre nacional e importado. Como o modelo de insumo-produto estima o impacto de variações na demanda final por produto nacional sobre o nível de produção, é necessário, inicialmente, o detalhamento do consumo, intermediário e final, por origem. O modelo de insumo-produto baseia-se no coeficiente técnico de produção, ou seja, uma medida das relações entre

---

<sup>9</sup> Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em Agosto, 2011.

quantidades consumidas e produzidas. A melhor aproximação para as relações em quantidades é obtida pela adoção do preço básico. A opção por este nível de mensuração produz maior homogeneidade entre os valores, uma vez que estão excluídos os impostos, subsídios e margens de distribuição incidentes sobre os produtos, os quais são sujeitos a variações não relacionadas com o processo de produção”.

A agregação da economia em 18 setores foi necessária para poder integrar nas análises a informação dos fatores econômicos, isto é, produção total (X), valor adicionado (VA) e geração de emprego (E), com a informação dos fatores ambientais, isto é, emissões CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>) e consumo energético de combustível (F) que conformaram a matriz de coeficientes de impactos **B**.

Para a obtenção da nova matriz de coeficientes técnicos e de Leontief agregado em 18 setores, o modelo manteve o formato das TRU. A agregação e desagregação dos setores econômicos requerem a separação e união de ambos os dados do uso e da oferta dos produtos e setores. Primeiramente foi feita uma agrupação dos 110 produtos em 56 setores baseada na Classificação Nacional de Atividade Econômica (CNAE) e desagregando o setor de cana-de-açúcar do setor de agricultura. Para a desagregação do setor de cana-de-açúcar do setor agrícola, considerou-se a produção total do produto cana-de-açúcar do setor agrícola como a produção total do setor de cana-de-açúcar na matriz de produção.

Segundo dados da TRU, a produção da cana-de-açúcar no setor agrícola equivale a 6% da sua produção total. Como resultado, foi feita a suposição que 6% dos insumos consumidos pelo setor agrícola foram derivados do setor cana-de-açúcar, excluindo dessa hipótese os insumos provenientes do setor energia. De acordo com Neves *et al.* (2010) e UNICA (portal), o setor cana-de-açúcar gastou com óleo diesel um total ao preço do consumidor de aproximadamente de R\$1.000 milhões em 2005, e o total ao preço básico foi de R\$724 milhões. Mediante a suposição estabelecida e o valor de óleo diesel consumido, realizou-se a desagregação da matriz de uso da TRU.

A agregação de 18 setores econômicos na TRU foi baseada na classificação usada no balanço energético nacional e no relatório de carbono. A tabela 1 mostra a classificação setorial utilizada nas análises para uma economia de 18 setores com suas respectivas abreviaturas. A correspondência da classificação aqui usada com a classificação da TRU e do balanço energético nacional é apresentada no apêndice A2.

Tabela 1 - Códigos de classificação dos setores da economia brasileira

Abreviatura	Sector
Alf	Agropecuária-silvicultura-pesca
SC	Cana de açúcar
Min	Mineração
A&B	Alimentos e Bebidas
Tex	Têxteis
Pp	Celulose e papel
En	Energia
Etanol FG (FGe)	Álcool
Etanol SG (SGe)	Etanol de segunda geração
Quim	Químicos
Oquim	Outros químicos – produção de enzimas
Cim	Cimento
Cer	Cerâmica
Met	Metalúrgica
Tra	Transporte
Os	Outros setores
SIUP	Serviço Industrial para Utilidade Pública
Co	Comércio e Serviços
Pu	Público

Fonte: Elaboração própria baseada BEN/MME (2010).

Por último, para finalizar a estrutura 18x18 da TRU, foi realizada a desagregação do setor de geração de eletricidade do setor de geração e distribuição de eletricidade, água, esgoto e limpeza urbana, e posteriormente, sua agregação no setor de energia. Para isso foi feito um levantamento da demanda de eletricidade setorial e da geração total mediante os dados fornecidos no balanço energético nacional para o ano de 2005 (ver anexo A). Para a conversão da unidade física à unidade monetária foi considerado um preço básico de R\$0,05/KWh (ITAIPU, portal). Como resultado, a geração total de eletricidade usada na agregação da tabela de produção foi de R\$20.146 milhões em 2005. Na tabela 2 apresenta-se a distribuição do consumo intermediário por setor e da demanda final de eletricidade com base na informação do BEN/MME (2010) e da TRU.

Depois da desagregado o setor eletricidade nas tabelas de produção e uso foi realizada a respectiva agregação do setor no setor de energia. Na figura 7 apresenta-se a tabela TRU da economia brasileira em 18x18 setores.

O formato TRU apresenta a tabela produção, com o vetor de importação, oferta total a preço do consumidor, margem de transporte e margem de comércio, impostos sobre o produto, e oferta total a preço básico. O formato também apresenta a tabela de uso e a matriz de valor adicionado com o vetor de número de ocupações setoriais. Cabe destacar que as duas últimas informações serão a base dos coeficientes dos fatores econômicos: valor adicionado (VA) e geração de emprego (E).

Tabela 2 - Consumo intermediário e demanda final de eletricidade

Setores	KWh consumidos	milhões R\$
Setor energia	1,76E+09	87,96
Eletricidade	1,16E+10	581,86
Alcool (Etanol FG)	8,80E+06	0,44
Famílias	8,32E+10	4.158,89
Comercial	1,98E+10	989,42
Público	3,27E+10	1.636,25
SIUP	3,37E+10	1.684,69
Agropecuária e pesca	1,47E+10	737,06
Cana	9,41E+08	47,05
Transporte	1,19E+09	59,39
Cerâmica	3,14E+09	156,77
Cimento	4,01E+09	200,36
Metalúrgico	5,89E+10	2.942,32
Mineração	9,63E+09	481,61
Química	1,86E+10	927,97
Outros quimicos	2,53E+09	126,54
Alimentos e Bebida	2,07E+10	1.032,71
Têxtil	7,67E+09	383,43
Papel e Celulose	1,48E+10	738,52
Outros setores industriais	3,55E+10	1.776,68
<b>TOTAL</b>		<b>18.750,00</b>

Fonte: Elaboração própria baseada em BEN/MME (2010) e tabelas TRU.

Para a obtenção da matrizes de coeficiente técnico e Leontief, utilizou-se o enfoque de tecnologia da indústria, na qual se assume que todos os produtos gerados pelo mesmo setor possuem a mesma estrutura de insumos. Tal enfoque está baseado no cálculo da matriz de coeficiente de setor x produtos **B** e da matriz de parcela de mercado **D**. Assim:

$$\mathbf{A}=\mathbf{DB}$$

$$\mathbf{F}=\mathbf{De}$$

Sendo **F** o vetor de demanda final, e **e** o vetor de demanda final da matriz de uso.

Cabe ressaltar que nesta tese foi adotado o ano base 2005 para a obtenção da matriz de coeficientes técnicos porque ele corresponde às tabelas de insumo-produto e TRU mais atualizadas publicadas pelos IBGE. Embora a estrutura tecnológica setorial possa mudar ao longo do tempo, neste trabalho se assume que essas mudanças não acontecem em uma escala que mude significativamente os resultados obtidos nas análises que usam como bases de dados a matriz de coeficientes técnicos (PAIXÃO, 2010). Existem metodologias que podem projetar e atualizar os coeficientes técnicos para anos futuros, como o enfoque RAS (*Reiterative Assessment System*).

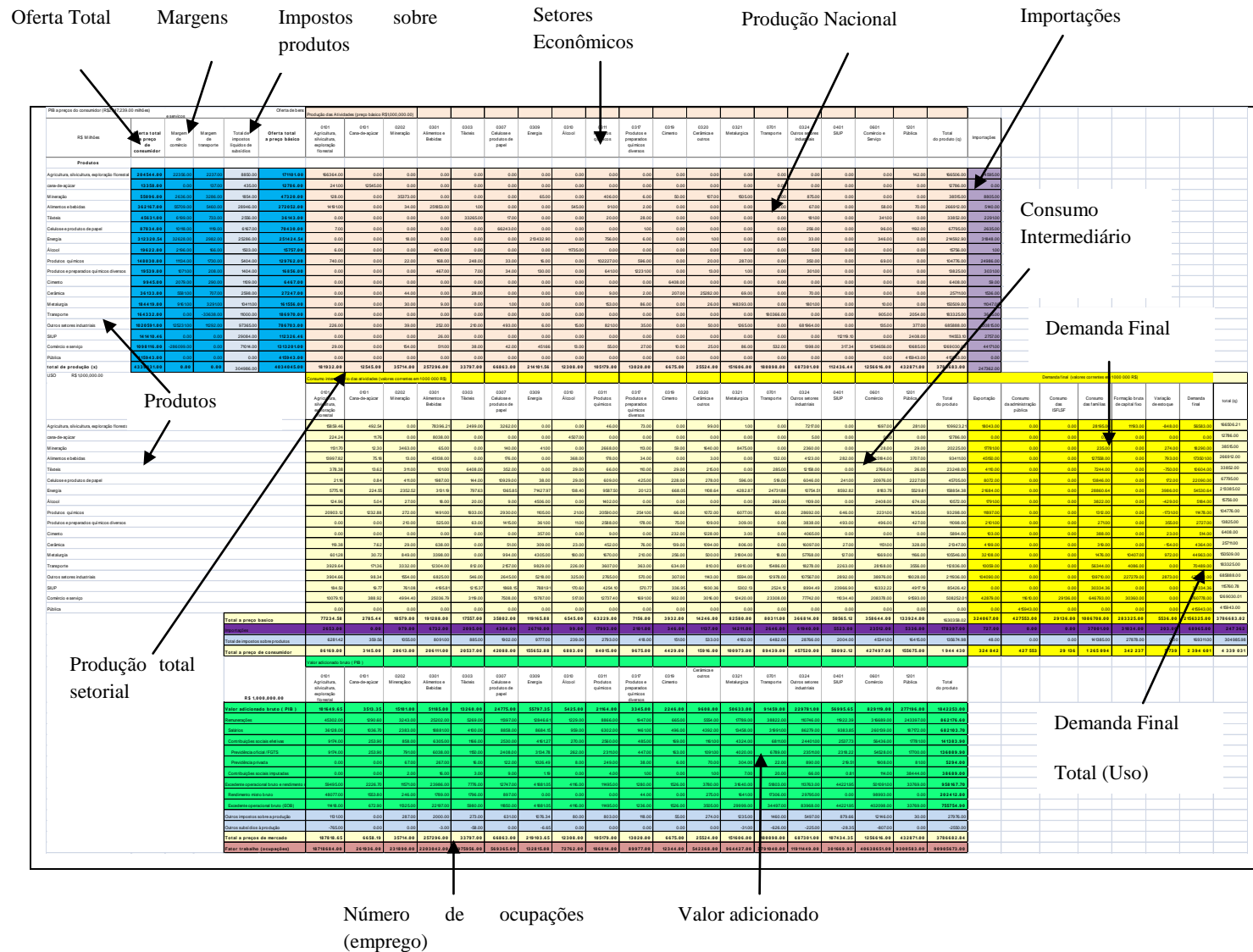


Figura 7 - Estrutura da economia brasileira em um nível de agregação de 18 setores  
 Fonte: elaboração própria baseada no IBGE, Miller e Blair (2009), Paixão (2010).

De acordo com Miller e Blair (2009), a técnica RAS gera uma estimativa dos coeficientes mediante três blocos de informação do ano de interesse: a) Produção total bruta; b) Total de vendas intersetoriais por setor; e c) Total de compras intersetoriais por setor. Mas a incorporação dessas suposições poderia introduzir outros erros, que segundo Paixão (2010), poderiam ser equivalentes ou ainda piores que os erros provocados ao usar como base a informação já publicada pelo IBGE para o ano-base 2005. Assim, o ano-base para a obtenção da matriz 18x18 de coeficientes técnicos e Leontief usados para as diferentes análises desta tese foi o usado nas publicações mais recentes do IBGE, ou seja, 2005.

No apêndice A4, apresenta-se a matriz de coeficientes técnicos para o nível de agregação de 18x18 da economia brasileira, e no apêndice A5, mostra-se a matriz de Leontief 18x18 resultante da economia brasileira.

Para a análise ambiental, os dados dos fatores de emissões de CO<sub>2</sub> e consumo energético setorial estão baseados no relatório do balanço de carbono (E&E/MCT, 2007) e no balanço energético nacional (BEN/MME, 2010). Para obter os dois vetores foi considerado o consumo setorial dos principais combustíveis brasileiros: diesel, gasolina, óleo combustível, etanol, carvão vegetal, gás liquefeito de petróleo (GLP) e querosene.

O consumo energético de combustível setorial foi obtido do balanço energético nacional para o ano 2005, expresso em terajoules (TJ). Já o cálculo das emissões setoriais de CO<sub>2</sub> teve como base o vetor do consumo energético, a conversão de TJ em toneladas de carbono e de toneladas de carbono em toneladas de CO<sub>2</sub>. Para essa estimativa foram usados os coeficientes de conteúdo de carbono por TJ, apresentados no relatório do balanço de carbono (E&E/MCT, 2007), como mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Coeficiente de conversão de unidade energética a conteúdo de carbono dos combustíveis mais usados na economia brasileira

Combustível	(TC/TJ)
Diesel	20,2
Gasolina	18,9
Óleo combustivel	21,1
Etanol	20,0
Carvão vegetal	29,9
GLP	17,2
Querosene	19,5

Fonte: E&E/MCT (2007)

Por último, de acordo com E&E/MCT (2007), para cada tonelada de carbono são emitidas 3,67 toneladas de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente a essas emissões de CO<sub>2</sub>, são contabilizadas também as emissões de CO<sub>2</sub> devido ao consumo de energia hidrelétrica, que em 2005 representava 74,6% da geração total usada em cada setor. O indicador utilizado foi de 57,6 gr

CO<sub>2</sub>/KWh (COELHO, 2008; COLTRO, 2003). Na tabela 4 apresentam-se os valores que servem como base para o cálculo dos coeficientes dos fatores ambientais avaliados nas diferentes análises.

Tabela 4 - Toneladas de CO<sub>2</sub> e consumo energético setorial base para a estimativa dos coeficientes da matriz de coeficiente de impactos **B**

Setores	Emissões TCO <sub>2</sub>	Consumo energético (TJ)
Agropecuária-silvicultura-pesca	14.719.327	189.804
Cana-de-açúcar	2.288.683	30.317
Mineração	3.045.838	34.645
Alimentos e Bebidas	3.028.298	28.324
Têxteis	723.315	5.100
Celulose e papel	3.033.332	31.541
Energia	4.707.222	53.816
Álcool (Etanol FG)	210.054	2.708
Químicos	3.310.959	32.441
Outros químicos	161.796	662
Cimento	1.535.156	13.179
Cerâmica	1.543.933	19.770
Metalúrgica	32.524.832	291.851
Transporte	178.382.158	2.452.297
Outros setores	3.678.650	29.124
SIUP <sup>1</sup>	2.490.200	14.240
Comércio e Serviços	1.841.565	13.682
Público	3.529.083	31.975

Fonte: elaboração própria baseada em BEN/MME (2010), IBGE, E&E/MCT (2007).

<sup>1</sup>SIUP: Serviço industrial de utilidade pública

Mediante o resultado obtido da estrutura TRU e os dados da tabela 4, os coeficientes dos fatores ambientais e econômicos da economia em 18 setores são apresentados no apêndice 6.

### 2.3 Incorporação do setor hipotético etanol segundo geração (Etanol SG) na matriz insumo-produto

O enfoque de insumo-produto provê uma estrutura para avaliar os impactos associados a introdução de um novo setor na economia. De acordo com Miller e Blair (2009), a literatura de insumo-produto discute, principalmente, dois aspectos para inserir uma nova atividade econômica: o enfoque da demanda final e o enfoque da inclusão completa na matriz de coeficientes técnicos. O último foi considerado o mais apropriado para poder realizar todas as técnicas de análise usadas nesta tese. Isto porque foi definido uma estrutura de insumos, produtos e demanda final hipotética do setor, podendo ser estimados e inseridos os coeficientes técnicos da nova coluna e linha representando o setor.

Segundo Miller e Blair (2009), o impacto completo de um novo setor é refletido não somente pela compras de insumos produzidos pelos setores já existentes, como também pela

vendas de seus novos produtos como insumos para as outras atividades econômicas. Assim, será necessário incorporar outra coluna e outra linha na matriz 18x18 de coeficientes técnicos diretos associados às compras e vendas do novo setor (MILLER e BLAIR, 2009; SUH e HUPPES, 2009, 2005).

Como explicam Miller e Blair (2009), para quantificar os impactos do novo setor na economia deve ser especificado o nível de produção do setor ( $x_{n+1}$ ) ou as vendas para a demanda final ( $f_{n+1}$ ) do novo setor. A estimativa dos novos coeficientes técnicos pode ser baseada em outras matrizes de coeficientes técnicos ou de pesquisas que estimem os insumos entrando no novo setor ( $a_{i,n+1}$ ) e suas vendas intermediárias ( $a_{n+1,j}$ ). De acordo com Miller e Blair (2009), quando o nível de vendas para a demanda final é especificado no lugar da produção total setorial, tem-se um modelo padrão do enfoque insumo-produto para estimar os impactos do novo setor.

Assim, para a incorporação do setor hipotético de Etanol SG na matriz de coeficientes técnicos foi necessário, primeiramente, estimar o potencial dos requerimentos de insumos do setor e o potencial de vendas do setor Etanol SG para os setores existentes. Para obter essa informação, foi construído um panorama setorial hipotético da capacidade potencial de produção de bagaço e etanol derivado de bagaço de cana-de-açúcar, este modelo está baseado no modelo tecnológico de Walter e Ensinas (2010), e na tecnologia de insumos de MacLean e Spatari (2009), Spatari *et al.* (2005), Gonzales-García *et al.* (2009), Fu *et al.* (2003), e Kadam (2002). A tabela 5 apresenta as principais características da tecnologia de produção para as estimativas do potencial do produto do setor hipotético etanol derivado de bagaço.

Tabela 5 - Tecnologia de produção do setor etanol de segunda geração

Tecnologia de produção	Valor	Unidades
Bagaço disponível	0,25	Toneladas/tonelada de cana-de-açúcar
SCAR disponível	0,22	Toneladas/tonelada de cana-de-açúcar
Produtividade	149,3	Litros/tonelada bagaço
Bagaço para etanol	76	% do total disponível
Bagaço para cogeração	24	% do total disponível
SCAR para cogeração	50	% do total disponível

Fonte: Elaboração própria baseada em PIPPO *et al.* (2011), Walter e Ensinas (2010), Ferreira-Leitão *et al.* (2010).

Quando o bagaço é a fibra resultante da recuperação do caldo de cana-de-açúcar mediante o processo de moagem e extração (PIPPO *et al.*; 2011), ele contém aproximadamente um terço da energia total da cana-de-açúcar, outro terço fica na palha e talos (SCAR), e o terço restante fica no caldo da cana. Atualmente, parte desse conteúdo de



energia disponível nos resíduos, especialmente no bagaço, é usada em processos de cogeração na indústria sucroalcooleira durante o período de moagem (DIAS *et al*; 2011; WALTER e ENSINAS, 2010). Já o SCAR é deixado no campo para evitar erosão e proteger as propriedades do solo, principalmente em estabelecimentos rurais com o sistema mecanizado de colheita.

Para as estimativas potenciais de etanol, assume-se que o potencial de matéria-prima é de 76% do bagaço disponível (WALTER e ENSINAS, 2010), os restantes 24% do bagaço e 50% das folhas, dos talos e da palha (SCAR) é para o processo de cogeração, e o outro 50% para a proteção do solo e algum outro uso; considera-se que uma tonelada de cana-de-açúcar produz aproximadamente 25% de bagaço e 22% de SCAR (MACEDO *et al*; 2011); e supõe-se que a produção de etanol é por hidrólise, em que uma tonelada de bagaço produz 149,3 litros de etanol (WALTER e ENSINAS, 2010).

No modelo usado por Walter e Ensinas (2010), usa-se uma hidrólise enzimática para quebrar a celulose da biomassa e obter açúcar. Esses açúcares são fermentados para produzir etanol que é, então, purificado através da destilação e depois desidratado para obter uma concentração superior a 97,2% em volume. Baseada em Walter e Ensinas (2010) e Mc Lean e Sparati (2009), a tecnologia industrial para a conversão da biomassa lignocelulósica em etanol usada neste estudo utiliza um processo de pretratamento de ácido diluído, desenvolvido pela NREL, que adiciona ácido sulfúrico e cal hidratada, em combinação com a sacarificação simultânea, hidrólise enzimática e a fermentação. A figura 8 apresenta o fluxograma de processo da produção de etanol de segunda geração mediante hidrólise enzimática.

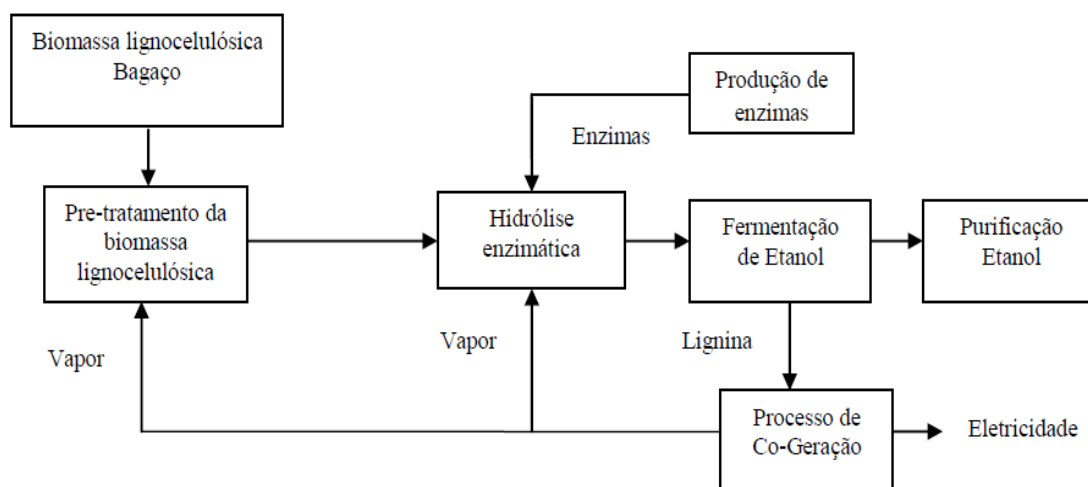


Figura 8 – Fluxograma de processo da produção de etanol segunda geração mediante hidrólise enzimática

Fonte: Elaboração própria

Os principais insumos para a produção de Etanol SG mediante hidrólise enzimática são enzimas, cal hidratada, ácido sulfúrico, Fosfato diamônio (DAP), vapor e eletricidade. A figura 9 mostra uma caixa preta do processo de produção de etanol mediante hidrólise enzimática, em que são especificados as principais entradas e a principal saída do processo.

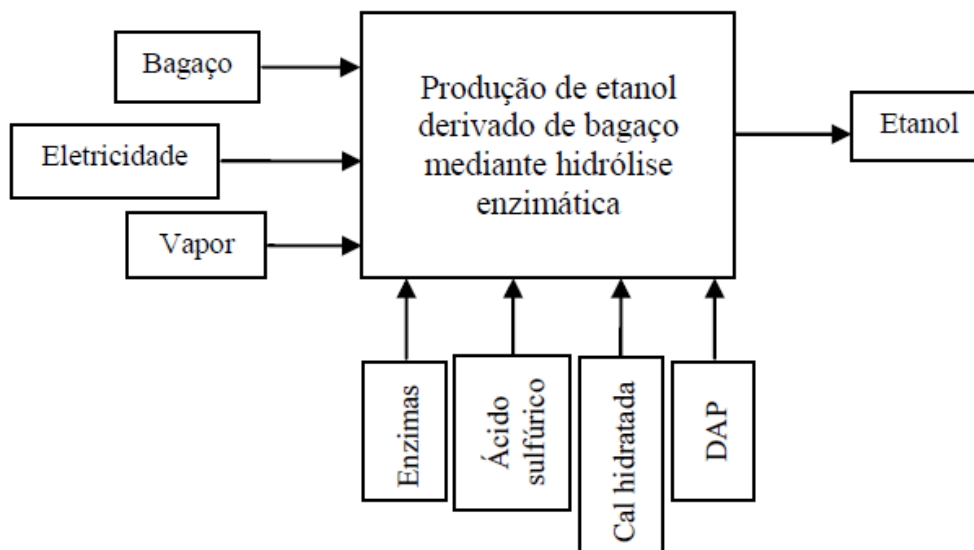


Figura 9 – Caixa preta do processo de produção de etanol mediante hidrólise enzimática  
Fonte: Elaboração própria

A tabela 6 apresenta a estrutura do consumo intermediário dos principais insumos e da produção em que serão baseados os coeficientes técnicos do setor etanol SG com relação à capacidade produtiva de cana-de-açúcar em 2005.

Tabela 6 - Estrutura de insumo e produção do setor etanol SG para as condições do ano 2005

	Quantidade	Referência
Cana-de-açúcar produzida 2005	387.345.224 Toneladas	UNICA, MAPA
Insumos 2005		
Bagaço para etanol	73.595.592,56 Toneladas	Walter e Ensinas (2010)
Enzimas	677.079.451,6 kg	Mc Lean e Sparati (2009), Walter e Ensinas (2010)
Ácido sulfúrico	1.913.485.406,56 kg	Mc Lean e Sparati (2009), Walter e Ensinas (2010)
Cal hidratada	2.134.272.184,24 kg	Mc Lean e Sparati (2009), Walter e Ensinas (2010)
Diamonio de fosfato (DAP)	139.831.625,9 kg	Mc Lean e Sparati (2009), Walter e Ensinas (2010)
Eletricidade	6.807,59 GWh	Walter e Ensinas (2010)
Produção 2005		
Etanol SG	10.987.821.969,21 litros	Walter e Ensinas (2010)
Eletricidade usina etanol FG	10.845,67 GWh	Walter e Ensinas (2010)
Eletricidade externa	16.174,3 GWh	Walter e Ensinas (2010)

Fonte: Resultado da pesquisa.

Para o potencial de matéria-prima no processo de cogeração do setor, considerou-se um poder calorífico de 7,52 MJ/kg bagaço e 12,96 MJ/kg SCAR e 12,97 MJ/kg lignina (WALTER e ENSINAS, 2010). A lignina é um combustível potencial obtido do processo de hidrólise. A conversão dos dados físicos apresentados na tab. 6 são convertidos em dados monetários mediante a aplicação do preço de produção de cada um dos fluxos analisados. A tabela 7 apresenta os preços básicos assumidos neste estudo para os insumos e produtos do setor etanol SG.

Tabela 7 - Insumos e produtos da produção de Etanol SG

Insumos e produtos potenciais	Preços básicos 2005	Referência
Bagaço	R\$7,7/ton bagaço*	OECD/IEA (2010)
Etanol	R\$0,72/litros etanol	UNICA (portal); TRU
Eletricidade para fonte externa	R\$0,05/KWh	Itaipu (portal)
Eletricidade para setor de álcool	R\$0,05/KWh	Itaipu (portal)
Eletricidade para etanol SGsector	R\$0,05/KWh	Itaipu (portal)
Enzimas	R\$3,254/kg	Novozymes (2011); Fu <i>et al</i> (2003); Maclean e sparati (2009)
Acido sulfúrico	R\$0,514/kg	MAPA (2009); ANDA (portal); Kulaif (2009)
Cal hidratada	R\$0,280/kg	ABPC (2008)
Diamônio de Fosfato	R\$1,028/kg	ANDA (2008); Kulaif (2009)

\*taxa de câmbio 2005: R\$2,57/\$ 1.00

Para a estimativa dos coeficientes técnicos de um novo setor, Paixão (2010) propõe inserir o novo setor na estrutura TRU. Seguindo esse enfoque, para calcular os novos coeficientes técnicos das principais relações intersetoriais do setor etanol SG, criou-se uma TRU de 6 setores: setor etanol SG, etanol FG, químicos, outros químicos, SIUP e um setor agregado representando o resto da economia, dentro da estrutura TRU de 2005 da economia brasileira. O apêndice A7 ilustra a matriz uso e matriz produção usadas para a estimativa dos coeficientes na estrutura de 6 setores num formato simplificado de TRU. Na figura 10, mostra-se a matriz de coeficientes técnicos 6x6 com destaque nos coeficientes técnicos do setor Etanol SG.

A	Etanol SG	Etanol FG	Químicos	Oquim	SIUP	Restante
Etanol SG	0,035	0,036	0,000	0,000	0,006	0,000
Etanol FG	0,054	0,000	0,010	0,000	0,000	0,002
Químicos	0,216	0,002	0,193	0,193	0,006	0,019
Oquim <sup>1</sup>	0,226	0,001	0,020	0,011	0,004	0,002
SIUP <sup>2</sup>	0,000	0,013	0,039	0,043	0,207	0,015
Restante <sup>3</sup>	0,000	0,516	0,341	0,298	0,227	0,441

Figura 10 - Matriz de coeficientes técnicos do setor de etanol SG

Fonte: Resultado da pesquisa.

<sup>1</sup> setor "outros químicos"; <sup>2</sup> setor "serviço industrial de utilidade pública"; <sup>3</sup> setor "restante da economia".

Os respectivos coeficientes foram inseridos na matriz de coeficientes técnicos de 19 setores da economia brasileira para as análises correspondentes. Para a obtenção da matriz de Leontief, assume-se que a estrutura de insumos do setor Etanol SG para os setores agricultura-pesca-silvicultura, mineração, cana-de-açúcar, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cimento, cerâmica, metalúrgica, transporte, outros setores industriais, comércio e serviços, e setor público é a mesma que a do setor Etanol FG. Devido aos dois setores produzirem o mesmo produto, e a tendência de acoplar ambas as plantas produtivas faz que no futuro, o setor Etanol SG tenda a ser agregado na estrutura setorial do setor Etanol FG, assim assume-se que ambos os setores compartilhem a mesma tecnologia de insumos relacionada a esses setores auxiliares. A matriz de coeficientes técnicos e de Leontief da economia brasileira com o setor Etanol SG se encontra nos apêndices A8 e A9, respectivamente.

Para a estimativa do coeficiente dos fatores ambientais e econômico, considerou-se a estrutura tecnológica do setor hipotético Etanol SG, assim, como no seu processo produtivo não se usa fontes energéticas externas, adotou-se que os fatores ambientais diretos do setor são zero, desde que esses fatores dependem do consumo de fontes energéticas externas. Em contrapartida, os fatores de valor adicionado e de geração de emprego foram considerados como os mesmos que os coeficientes do setor etanol FG. Justifica-se tal suposição pelo fato que eles produziram o mesmo produto, e por compartilhar, potencialmente, parte do processos produtivo. No apêndice A10 apresenta-se a matriz com os coeficientes dos fatores econômicos e ambientais analisados para a economia brasileira com o setor de etanol SG.

### 3. Estudos de Caso

#### 3.1 Etanol de segunda geração e a economia brasileira: enfoque de insumo-produto

O enfoque de insumo-produto é uma ferramenta de planejamento baseada na demanda final que examina a interrelação entre as atividades de uma economia. A análise de insumo-produto é uma representação simplificada do lado produtivo de uma economia, onde o conjunto de produtores de bens semelhantes formam uma indústria homogênea, sendo uma técnica útil para analisar recursos e produtos de uma economia. Nesse contexto, mediante uma análise *ex-ante* de insumo-produto, este ensaio estuda o impacto do setor etanol derivado de bagaço na economia brasileira, bem como os efeitos econômicos e ambientais da sua produção direcionada à exportação. Os fatores analisados são produção total, emissões de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>), consumo energético de combustível (Fuel), nível de emprego (E), e valor adicionado (VA) setorial. Entenda-se como valor adicionado o total das remunerações, das contribuições sociais, do excedente operacional bruto e rendimento misto bruto, dos outros impostos e subsídios ao produto setorial, que conformam o Produto Interno Bruto (PIB) setorial bruto.

Uma vez que o setor etanol segunda geração não existe ainda na estrutura produtiva setorial brasileira, desenvolveu-se um modelo no qual simula-se a inserção de um setor produtivo hipotético e competitivo chamado Etanol SG na estrutura econômica, como mostrado no capítulo 2. Cabe destacar que, desde que o setor hipotético foi estruturado por meio de valores de pesquisas e de projetos pilotos, os resultados aqui obtidos mostram a tendência do setor e não os valores absolutos dos fatores analisados.

##### 3.1.1 Resultados da análise insumo-produto

A técnica de insumo-produto pode ser usada para avaliar a significância relativa de um setor em termos de seu impacto na produção, emprego, renda, emissões e consumo energético por meio da distinção dos efeitos diretos e indiretos. Assim, a partir da matriz de coeficientes técnicos descrita no capítulo 2, calcularam-se os multiplicadores setoriais da economia brasileira para identificar a contribuição real de cada setor na produção total, nas emissões de CO<sub>2</sub>, no consumo energético de combustíveis e na geração de emprego e no valor adicionado (VA); eles são apresentados na tabela 8.

Observa-se que no setor Etanol SG a contribuição indireta na produção é representada por uma parcela de aproximadamente 59% do total do setor. Isto quer dizer que

a produção total do setor Etanol SG está influenciada principalmente pela produção dos setores que lhe fornecem os insumos ou pela produção dos setores que fornecem insumos a esses setores para satisfazer à demanda do setor Etanol SG.

Da mesma maneira, o número de empregos diretos do setor tem uma parcela de quase 25%, enquanto o número de empregos indiretos representa 75%, que são os empregos criados na economia para satisfazer à demanda final do setor Etanol SG, por exemplo, os empregos criados na indústria de enzimas, setor de comércio e serviço, transporte, e químico para fornecer insumos na produção de Etanol SG.

O setor de Etanol FG apresenta comportamento semelhante ao de Etanol SG na geração de emprego, onde a parcela indireta representa 77%, devido, principalmente, à importante contribuição na geração de empregos do setor de cana-de-açúcar, setor intensivo em mão de obra, e principal matéria-prima do setor. De acordo com Dias de Moraes *et al.* (2010), para 2007, 29% dos empregos no setor alcooleiro vinham diretamente do setor Etanol FG e 71% provinham da lavoura da cana-de-açúcar (UNICA, 2010). Já no total do valor adicionado do setor Etanol SG, a contribuição direta e indireta representam 47% e 53%, respectivamente.

Tabela 8 - Multiplicadores econômicos diretos e indiretos dos setores

Setores <sup>1</sup>	Direta I	Indireta (A+A <sup>2</sup> +..)	m <sub>x</sub> <sup>2</sup>	Direta E	Indireta E (A+A <sup>2</sup> +..)	m <sub>E</sub> <sup>3</sup>	Direta VA	Indireta VA (A+A <sup>2</sup> +..)	m <sub>VA</sub> <sup>4</sup>
Alf	1,000	0,852	1,852	0,103	0,023	0,126	0,559	0,334	0,893
SC	1,000	0,539	1,539	0,021	0,010	0,031	0,280	0,199	0,479
Min	1,000	0,954	1,954	0,006	0,016	0,022	0,423	0,430	0,853
A&B	1,000	1,440	2,440	0,009	0,060	0,068	0,199	0,629	0,828
Tex	1,000	0,971	1,971	0,029	0,027	0,056	0,392	0,428	0,820
Pp	1,000	1,009	2,009	0,009	0,021	0,030	0,371	0,439	0,810
En	1,000	1,109	2,109	0,000	0,011	0,011	0,244	0,409	0,653
Etanol FG	1,000	0,970	1,970	0,006	0,019	0,025	0,441	0,349	0,790
<b>Etanol SG</b>	<b>1,000</b>	<b>1,425</b>	<b>2,425</b>	<b>0,006</b>	<b>0,018</b>	<b>0,024</b>	<b>0,441</b>	<b>0,506</b>	<b>0,947</b>
Qui	1,000	1,171	2,171	0,002	0,015	0,017	0,201	0,456	0,657
Oqui	1,000	1,053	2,053	0,007	0,016	0,023	0,257	0,428	0,684
Cim	1,000	1,100	2,100	0,002	0,017	0,019	0,336	0,478	0,815
Cer	1,000	1,050	2,050	0,021	0,016	0,037	0,376	0,459	0,835
Met	1,000	1,046	2,046	0,006	0,014	0,020	0,334	0,434	0,768
Tra	1,000	0,822	1,822	0,021	0,013	0,034	0,506	0,353	0,859
Os	1,000	1,016	2,016	0,017	0,018	0,036	0,334	0,426	0,760
SIUP	1,000	0,831	1,831	0,003	0,010	0,014	0,538	0,389	0,927
Co	1,000	0,484	1,484	0,032	0,012	0,044	0,660	0,245	0,905
Pu	1,000	0,513	1,513	0,021	0,012	0,034	0,640	0,267	0,908

Fonte: Resultados da pesquisa.

<sup>1</sup> ver tabela 1 para a classificação setorial; <sup>2</sup> multiplicar total da produção total; <sup>3</sup> multiplicador total do emprego; <sup>4</sup> multiplicador total do valor adicionado.

Na tabela 9 se exibem os efeitos diretos e indiretos setoriais para as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo energético de combustível. Em ambos os fatores, a contribuição do setor etanol SG é somente indireta, porque na estrutura hipotética do setor não foi considerado o consumo de combustível e eletricidade da rede externa, suposição baseada na literatura do setor. Por conseguinte, as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo energético são devido à produção dos insumos e dos insumos dos insumos necessários para cumprir com a demanda exógena do setor etanol de segunda geração. Um panorama semelhante é encontrado no setor Etanol FG, apesar do consumo direto de óleo combustível no processo industrial, para ambos os fatores ambientais a contribuição indireta representa aproximadamente 88% no desempenho ambiental do setor.

Tabela 9 - Multiplicadores ambientais diretos e indiretos dos setores econômicos

Setores <sup>1</sup>	Direta CO <sub>2</sub>	Indireta CO <sub>2</sub> (A+A <sup>2</sup> +..)	m <sub>CO2</sub> <sup>2</sup>	Direta Fuel	Indireta Fuel (A+A <sup>2</sup> +..)	M <sub>Fuel</sub> <sup>3</sup>
Alf	0,081	0,079	0,160	1,043	1,012	2,055
SC	0,182	0,049	0,231	2,417	0,623	3,040
Min	0,085	0,162	0,248	0,970	2,120	3,090
A&B	0,012	0,156	0,167	0,110	2,021	2,131
Tx	0,021	0,078	0,100	0,151	0,985	1,136
Pp	0,045	0,097	0,142	0,472	1,218	1,690
En	0,022	0,119	0,141	0,251	1,525	1,776
Etanol FG	0,017	0,127	0,144	0,220	1,650	1,870
<b>Etanol SG</b>	<b>0,000</b>	<b>0,104</b>	<b>0,104</b>	<b>0,000</b>	<b>1,266</b>	<b>1,266</b>
Qui	0,031	0,109	0,140	0,308	1,369	1,678
Oqui	0,012	0,092	0,104	0,051	1,139	1,190
Cim	0,230	0,177	0,407	1,974	2,256	4,230
Cer	0,060	0,117	0,178	0,775	1,426	2,201
Met	0,215	0,164	0,379	1,925	1,918	3,843
Tra	0,986	0,129	1,115	13,556	1,723	15,279
Os	0,005	0,106	0,111	0,042	1,261	1,304
SIUP	0,022	0,061	0,083	0,127	0,754	0,881
Co	0,001	0,045	0,046	0,011	0,584	0,595
Pu	0,008	0,030	0,039	0,074	0,387	0,460

Fonte: resultados da pesquisa.

<sup>1</sup> ver tabela 1 para a classificação setorial; <sup>2</sup> multiplicar total das emissões de CO<sub>2</sub>; <sup>3</sup> multiplicador total do consumo energético.

Na tabela 10 são identificados os setores da economia brasileira que mais geram emprego e contribuem com o crescimento econômico, bem como os setores que mais influenciam com o desempenho ambiental do setor. Observa-se forte equivalência entre as elasticidades do VA e produção total. A elasticidade do valor adicionado varia entre 0,001 e 0,37 e da produção total entre 0,001 e 0,30. O setor que mais contribui nos dois fatores é o comércio e serviço, seguido por outros setores industriais na elasticidade de produção total e setor público na de VA, sendo levemente superior ao setor de outros

setores industriais. Um aumento de 10% na demanda final do setor comércio e serviços leva ao aumento de 3,7% no valor adicionado total da economia. No panorama estabelecido, um aumento nas exportações de etanol de bagaço resulta em uma das menores taxas de aumento do agregado de VA e produção total.

As elasticidades de emprego variam entre 0,001 e 0,365, com os setores comércio e serviços e outros setores industriais como os maiores contribuidores no crescimento do emprego. Um aumento de 10% na demanda final do setor de comércio e serviços levaria a uma expansão de 3,65% no número total de empregos na economia. Seguindo a mesma tendência dos fatores econômicos, o impacto da demanda final do setor Etanol SG na geração de emprego total encontra-se entre os menores da economia.

Como esperado, os principais contribuidores do aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> são o setor de transporte e o setor industrial, nos quais um aumento de 10% na demanda final do setor de transporte aumenta as emissões agregadas em um 2,1% e o consumo energético total em 3,3%. Segundo os resultados da tab. 10, na perspectiva ambiental, o aumento nas exportações do setor Etanol SG não prejudica significativamente o desempenho ambiental da economia brasileira.

Tabela 10 - Elasticidades de fatores econômicos e ambientais

Setores $\Delta$ %	<sup>1</sup> <sub>DFIÉ</sub> <sup>X</sup>	Rank	<sup>2</sup> <sub>DFIÉ</sub> <sup>E</sup>	Rank	<sup>3</sup> <sub>DFIÉ</sub> <sup>CO<sub>2</sub></sup>	Rank	<sup>4</sup> <sub>DFIÉ</sub> <sup>Fuel</sup>	Rank	<sup>5</sup> <sub>DFIÉ</sub> <sup>VA</sup>	Rank
Alf	0,032	6	0,092	5	0,0408	7	0,042	7	0,032	6
SC	0,000	19	0,000	19	0,000	19	0,000	19	0,000	19
Mn	0,009	11	0,004	12	0,016	9	0,016	9	0,008	11
Ab	0,107	4	0,125	4	0,107	4	0,108	4	0,075	4
Tx	0,006	13	0,007	10	0,004	13	0,004	13	0,005	12
Pp	0,012	10	0,007	8	0,012	10	0,011	10	0,010	10
En	0,031	7	0,007	9	0,030	8	0,030	8	0,020	7
Etanol FG	0,001	16	0,001	15	0,001	15	0,001	15	0,001	15
<b>Etanol SG</b>	<b>0,001</b>	<b>17</b>	<b>0,001</b>	<b>17</b>	<b>0,001</b>	<b>18</b>	<b>0,001</b>	<b>18</b>	<b>0,001</b>	<b>17</b>
Qui	0,007	12	0,002	13	0,007	12	0,006	12	0,004	13
Oqui	0,001	15	0,001	16	0,001	16	0,001	16	0,001	16
Cim	0,000	18	0,000	18	0,001	17	0,001	17	0,000	18
Cer	0,002	14	0,002	14	0,003	14	0,003	14	0,002	14
Met	0,025	8	0,010	7	0,067	5	0,054	6	0,019	8
Tra	0,034	5	0,026	6	0,210	1	0,327	1	0,032	5
Os	0,252	2	0,187	2	0,203	2	0,189	2	0,196	3
SIUP	0,014	9	0,004	11	0,010	11	0,008	11	0,015	9
Co	0,296	1	0,365	1	0,134	3	0,137	3	0,370	1
Pu	0,170	3	0,159	3	0,063	6	0,060	5	0,210	2

Fonte: resultados da pesquisa.

<sup>1</sup> elasticidade da produção total; <sup>2</sup> elasticidade do emprego; <sup>3</sup> elasticidade das emissões; <sup>4</sup> elasticidade do consumo energético; <sup>5</sup> elasticidade do valor adicionado.



Observa-se na tab. 10 que a expansão econômica provocada pelo aumento na demanda exógena do setor Etanol FG é em todos os fatores econômicos superior à expansão obtida do aumento na demanda do setor Etanol SG.

A estrutura econômica brasileira representada na base de dados usada neste estudo mostra que as atividades econômicas que mais contribuem com o PIB bruto total são comércio e serviços, público, outros setores industriais, agricultura, e transporte. Tal comportamento é semelhante para o fator emprego, onde os setores que mais contribuem são comércio e serviço, agricultura, público, outros setores industriais, e transporte.

### 3.1.1.1 Resultados de Cenários

Nesta seção se apresentam os resultados dos diferentes cenários da economia brasileira analisados na pesquisa. Eles são baseados, principalmente, em estimativas de consumo para o mercado externo de etanol até 2020, apresentadas por Filho e Macedo (2010). Eles estimaram que para 2010 as exportações de etanol anidro seriam de 5 milhões m<sup>3</sup>, para 2015 de 10 milhões m<sup>3</sup>, e para 2020 seriam de 15 milhões m<sup>3</sup>. Segundo os dados do balanço energético nacional 2011, as exportações de etanol para 2010 foram aproximadamente 1,9 milhões de m<sup>3</sup>. Por conseguinte, o valor das exportações para 2010 estimadas por Filho e Macedo (2010) estão muito a cima do valor real. Optou-se por considerar essa estimativa de 2010 para o ano 2011. Assim, obteve-se uma taxa de crescimento das exportações de etanol anidro de 163% de 2010 a 2011, taxa de 100% de 2011 a 2015, e taxa de 50% de 2015 a 2020. Cabe ressaltar que, como apontado por Filho e Macedo (2010), as projeções das exportações estão fortemente sujeitas a alterações, em função das políticas públicas adotadas nos grandes mercados energéticos que tradicionalmente protegem seus mercados com altas tarifas de importação.

O primeiro cenário analisado é chamado de *baseline* e considera uma economia sem o setor hipotético Etanol SG, com taxas de crescimento da demanda final baseadas nas projeções de crescimento econômico do Fundo Monetário Internacional<sup>10</sup> (FMI) para 2010, 2011, 2015 e 2020. Já os dados das exportações de etanol anidro seguem as tendências internacionais com as percentagens de crescimento de 163% (2010-2011), de 100% (2011-2015), e de 50% (2015-2020). O cenário I considera o mesmo panorama de crescimento de *baseline*, mas em uma economia com setor Etanol SG e Etanol FG. O setor Etanol SG será o encarregado das exportações de etanol anidro, observando as tendências dos mercados

---

<sup>10</sup> Disponível em <<http://www.imf.org/>> Acesso em junho, 2011.

energéticos internacionais. A tabela 11 traz os resultados dos cenários com seus diferentes choques nas exportações de etanol anidro.

Tabela 11 - Comparação dos resultados dos diferentes cenários

Cenários	X (R\$1.000.000)	E (10 <sup>3</sup> ocupações)	CO <sub>2</sub> (10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> )	Fuel (TJ)	VA (R\$1.000.000)
<i>Baseline – 2010</i>	4.690.564,23	112.604,02	322.995,98	4.057.332,12	2.281.998,79
I – 2010	4.683.353,87	112.269,12	321.340,60	4.036.424,94	2.278.734,61
Δ%	-0,154%	-0,297%	-0,513%	-0,515%	-0,143%
<i>Baseline – 2011</i>	4.906.438,52	117.713,43	337.901,07	4.244.772,13	2.386.459,78
I – 2011	4.900.806,52	117.362,31	336.040,26	4.220.941,70	2.383.720,03
Δ%	-0,115%	-0,298%	-0,551%	-0,561%	-0,115%
<i>Baseline – 2015</i>	5.851.100,62	140.280,52	403.011,77	5.062.981,41	2.845.189,00
I – 2015	5.847.032,29	139.861,86	400.625,93	5.032.018,02	2.842.861,21
Δ%	-0,070%	-0,298%	-0,592%	-0,612%	-0,082%
<i>Baseline – 2020</i>	7.283.447,45	174.560,65	501.701,86	6.302.984,48	3.541.222,97
I – 2020	7.280.126,93	174.040,45	498.631,77	6.262.900,49	3.538.947,23
Δ%	-0,046%	-0,298%	-0,612%	-0,636%	-0,064%

Fonte: Resultados da pesquisa.

A incorporação do setor Etanol SG na estrutura econômica brasileira direcionada para a exportação nos anos 2010 e 2011 teria resultado em diminuição da produção total de 0,154% e 0,115%, respectivamente, se comparada com a mesma demanda final para exportação de etanol do cenário baseline. Na terminologia do enfoque insumo-produto, a produção total de uma economia contabiliza a soma das vendas de cada setor para satisfazer à demanda intermediária e à demanda final do modelo. Como resultado, esse comportamento é explicado pela relação direta do setor Etanol FG com setores que contribuem significativamente com a produção total da economia, como a estreita relação entre o setor cana-de-açúcar e o setor Etanol FG. Por outro lado, o setor Etanol SG tem uma menor relação com o setor cana-de-açúcar, pois somente, 25% da sua produção é alocada para a obtenção de bagaço. Mas, pela relação intersetorial do setor Etanol SG com o setor Etanol FG, químicos e “outros químicos” e o aumento significativo da produção para exportação, a partir do ano 2015, o modelo projetou o mesmo desempenho anterior, mas com menores taxas de redução para a produção total, mostrando uma tendência de mudança comportamental, no longo prazo.

Pela correlação existente entre os fatores econômicos, o total do valor adicionado mostra também redução para o cenário I; para os anos 2010 e 2011, a variação negativa seria

de 0,143% e 0,115%, respectivamente. No futuro próximo, a produção de Etanol FG tende a diminuir as vantagens econômicas sobre seu substituto, o Etanol SG, com diferença negativa de 0,08% e 0,06%, para 2015 e 2020.

Os resultados do panorama econômico indicam que para satisfazer à demanda de exportação é mais conveniente para o Brasil, em termos econômicos, produzir etanol derivado de cana-de-açúcar do que etanol derivado de bagaço. Mas, pela tendência dos resultados, acredita-se que, no longo prazo, a introdução do setor Etanol SG pode contribuir positivamente para o desempenho econômico do país.

Na geração de emprego, o panorama parece mais promissor quando o etanol para exportação segue a estrutura do cenário *baseline*, não mudando essa tendência ao longo do tempo. Tal resultado pode ser explicado pela relação direta do setor Etanol FG com o setor de cana-de-açúcar, setor intensivo na geração de emprego e principal criador de empregos do setor sucroalcooleiro, especialmente direcionado a tarefas com baixo nível de qualificação técnica. Embora a base da matéria-prima do setor Etanol SG venha também do setor cana-de-açúcar, a matéria-prima é o bagaço obtido da produção do setor Etanol FG. Segundo Dias de Moraes *et al.* (2010) em 2007, a escolaridade média do trabalhador do setor de cana-de-açúcar era de 4,2 anos e no setor de Etanol FG era de 7,7 anos. Acredita-se que o nível de escolaridade do setor Etanol SG esteja na mesma faixa de escolaridade do setor de Etanol FG (OECD/IEA, 2010; AJANOVIC e HASS, 2010; KUCHLER, 2010; IEA/OECD, 2008 e GOLDEMBERG *et al.*, 2008).

Assim, embora o número de empregos seja um indicador social importante, a geração de renda e a qualificação do trabalho devem ser tomadas em conta para identificar ações efetivas da incorporação do setor Etanol SG na economia brasileira, visando a sustentabilidade do setor. Com a introdução do setor de etanol SG, o país abre as portas para a indústria de enzimas para biocombustíveis avançados. O grande potencial do Brasil no setor de biocombustíveis avançados faz com que empresas líderes mundiais em enzimas procurem instalar suas plantas de produção e pesquisa no país, criando emprego com alto nível de qualificação técnica e gerando mais pesquisa e desenvolvimento no país (NOVAZYMES, 2011).

Como observado por OECD/IEA (2010), Pires e Schechtman (2010) e IEA/OECD (2008), o desempenho ambiental do agregado da economia brasileira com a estrutura do cenário I melhora, se comparado ao desempenho no cenário *baseline*. Isto porque o setor Etanol SG reduziria o consumo total de combustíveis no processo produtivo, e consequentemente, as emissões de CO<sub>2</sub> devido a sua queima. No cenário *baseline*, um dos

principais contribuintes dos impactos ambientais é o alto consumo de combustível no setor de cana-de-açúcar. Assim, para satisfazer à demanda de exportação de etanol do cenário *baseline* no longo prazo, torna-se necessário produzir mais cana-de-açúcar, e conseqüentemente, consumir mais combustíveis fósseis. Já para a estrutura do cenário I, a crescente demanda de exportação seria satisfeita com o resíduo do setor Etanol FG ou do setor produtor de açúcar, ou de algum outro setor que gere resíduo de biomassa.

### 3.1.2 Análise de sensibilidade da tecnologia do setor Etanol SG

Existem vários elementos que podem influenciar as incertezas dos resultados em uma análise de insumo-produto. Entre eles estão as suposições metodológicas do enfoque, desatualização da base de dados, alocação dos fluxos monetários, tecnologia de insumo do setor hipotético, entre outros. Acredita-se que uns dos principais fatores que podem influenciar nas incertezas dos resultados deste estudo são os preços básicos determinados para os principais insumos do processo produtivo do setor Etanol SG que ajudam a caracterizar a tecnologia de insumo do setor. Por exemplo, a indústria de enzimas para biocombustíveis avançados, ainda em etapa de pesquisa, pode variar os preços deste importante insumo conforme os resultados e avanços das pesquisas, e as expectativas de produção do novo mercado. Outra grande incerteza pode estar relacionada à suposição de igualar os coeficientes técnicos de setores secundários que se relacionam com o setor Etanol FG no setor Etanol SG.

Para estabelecer a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos na modelagem que incorpora o Etanol SG, é necessário realizar uma análise de sensibilidade dos coeficientes técnicos hipotéticos definidos para o setor. Tal análise avalia a influência de variações de  $\pm 20\%$  nos preços e assim nos coeficientes técnicos resultantes. A tabela 12 apresenta os resultados da análise de sensibilidade que analisa à variação dos preços nos principais insumos do setor Etanol SG (bagaço, químicos, enzimas, eletricidade) comparados com os resultados do cenário *baseline*.

Tabela 12 - Resultados da análise de sensibilidade relacionada à variação dos preços dos principais insumos do setor Etanol SG

Cenários I	X (R\$1.000.000)	E (10 <sup>3</sup> ocupações)	CO <sub>2</sub> (10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> -equiv)	Fuel (TJ)	VA (R\$1.000.000)
<b>Baseline - 2010</b>	<b>4.690.564,23</b>	<b>112.604,02</b>	<b>322.995,98</b>	<b>4.057.332,12</b>	<b>2.281.998,79</b>
I – 2010 (+20%)	4.683.875,44	112.274,27	321.362,34	4.036.692,35	2.278.941,80
Δ%	-0,143%	-0,293%	-0,506%	-0,509%	-0,134%
I – 2010 (-20%)	4.682.861,74	112.264,30	321.320,15	4.036.173,70	2.278.539,70
Δ%	-0,164%	-0,302%	-0,519%	-0,521%	-0,152%
<b>Baseline - 2011</b>	<b>4.906.438,52</b>	<b>117.713,43</b>	<b>337.901,07</b>	<b>4.244.772,13</b>	<b>2.386.459,78</b>
I – 2011 (+20%)	4.901.303,12	117.367,18	336.060,38	4.221.191,28	2.383.920,90
Δ%	-0,105%	-0,294%	-0,545%	-0,556%	-0,106%
I – 2011 (-20%)	4.891.764,21	117.272,41	335.654,24	4.216.227,41	2.380.185,30
Δ%	-0,299%	-0,375%	-0,665%	-0,672%	-0,263%
<b>Baseline - 2015</b>	<b>5.851.100,62</b>	<b>140.280,52</b>	<b>403.011,77</b>	<b>5.062.981,41</b>	<b>2.845.189,00</b>
I – 2015 (+20%)	5.847.558,86	139.866,97	400.646,39	5.032.275,24	2.843.079,50
Δ%	-0,061%	-0,295%	-0,587%	-0,606%	-0,074%
I – 2015 (-20%)	5.846.560,49	139.857,46	400.608,10	5.031.794,22	2.842.666,10
Δ%	-0,078%	-0,302%	-0,596%	-0,616%	-0,089%
<b>Baseline - 2020</b>	<b>7.283.447,45</b>	<b>174.560,65</b>	<b>501.701,86</b>	<b>6.302.984,48</b>	<b>3.541.222,97</b>
I – 2020 (+20%)	7.280.740,92	174.046,37	498.655,02	6.263.195,14	3.539.205,50
Δ%	-0,037%	-0,295%	-0,607%	-0,631%	-0,057%
I – 2020 (-20%)	7.279.587,16	174.035,51	498.612,15	6.262.651,87	3.538.720,50
Δ%	-0,053%	-0,301%	-0,616%	-0,640%	-0,071%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os resultados mostram que variações nos preços dos insumos do setor hipotético não influenciam de modo relevante a tendência dos resultados da tabela 11. Assim, quando aumenta-se em 20% o preço de insumos estimados do setor Etanol SG, a tendência comportamental da economia do cenário I com relação ao cenário *baseline* se manteria constante. Quando diminui-se em 20% os preços dos insumos, o panorama continua sem apresentar alterações da modelagem original.

Observa-se que, da mesma maneira que nos resultados da tabela 11, os fatores econômicos apresentam diminuição significativa entre a diferença dos resultados dos cenários a partir de 2015, confirmando a tendência de que, no longo prazo, o setor Etanol SG pode exibir uma *performance* econômica melhor para a economia brasileira do que o setor Etanol FG.

Na modelagem original, estabeleceu-se que o setor Etanol SG assumiria os mesmos coeficientes técnicos dos insumos do setor Etanol FG dos setores de agricultura-pesca-silvicultura, mineração, cana-de-açúcar, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cimento, cerâmica, metalúrgica, transporte, outros setores industriais, comércio e serviços e setor público. Os dois cenários foram avaliados eliminando essa suposição e considerando que o setor Etanol SG tem somente uma relação direta com os setores considerados na modelagem básica: setor Etanol FG, químico, outros químicos, Etanol SG e SIUP. Na figura 13 mostra-se os resultados dos cenários para uma estrutura de insumos mais limitada para o setor Etanol SG, pois a suposição que alguns dos coeficientes técnicos do setor Etanol SG são equivalentes aos do setor Etanol FG é eliminada.

Tabela 13 - Resultados com uma estrutura de insumos mais limitada para o setor Etanol SG

Cenários	X (R\$1.000.000)	E (10 <sup>3</sup> ocupações)	CO <sub>2</sub> (10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> )	Fuel (TJ)	VA (R\$1.000.000)
<b>Baseline - 2010</b>	<b>4.690.564,23</b>	<b>112.604,02</b>	<b>322.995,98</b>	<b>4.057.332,12</b>	<b>2.281.998,79</b>
I – 2010	4.682.263,76	112.242,94	321.201,27	4.034.650,75	2.278.249,10
Δ%	-0,177%	-0,321%	-0,556%	-0,559%	-0,164%
<b>Baseline - 2011</b>	<b>4.906.438,52</b>	<b>117.713,43</b>	<b>337.901,07</b>	<b>4.244.772,13</b>	<b>2.386.459,78</b>
I – 2011	4.898.569,68	117.308,58	335.754,37	4.217.301,17	2.382.723,9
Δ%	-0,160%	-0,344%	-0,635%	-0,647%	-0,157%
<b>Baseline - 2015</b>	<b>5.851.100,62</b>	<b>140.280,52</b>	<b>403.011,77</b>	<b>5.062.981,41</b>	<b>2.845.189,00</b>
I – 2015	5.842.894,63	139.762,48	400.097,09	5.025.283,82	2.841.018,5
Δ%	-0,140%	-0,369%	-0,723%	-0,745%	-0,147%
<b>Baseline - 2020</b>	<b>7.283.447,45</b>	<b>174.560,65</b>	<b>501.701,86</b>	<b>6.302.984,48</b>	<b>3.541.222,97</b>
I – 2020	7.274.047,07	173.894,42	497.854,69	6.253.005,28	3.536.239,6
Δ%	-0,129%	-0,382%	-0,767%	-0,793%	-0,141%

Fonte: Resultado da pesquisa.

Na última modelagem, a tendência comportamental das outras análises continua sendo consistente, embora a queda significativa da diferença dos resultados entre os cenários para os fatores econômicos a partir do ano 2015 não tenha sido observada. Logo, os resultados aqui encontrados e verificados pela análise de sensibilidade representam a tendência comportamental potencial do setor até 2020, ano inicial do cumprimento de muitas das exigências das políticas energéticas externas predeterminadas.

### 3.1.3 Considerações finais da análise de insumo-produto

Os biocombustíveis de segunda geração se apresentam como o progresso tecnológico direcionado a tecnologias mais limpas no setor de energia, que supera qualquer limitações de escassez de recursos e de problemas relacionados ao controle de poluição. Para ser consistente com o contexto de desenvolvimento sustentável ou da sustentabilidade das atividades econômicas, ou mais especificamente, do setor hipotético Etanol SG, neste exercício tentou-se combinar fatores econômicos e ambientais para identificar a real contribuição potencial do setor na economia brasileira.

Os resultados aqui apresentados demonstraram que até 2020, a introdução do setor Etanol SG como meio de satisfazer à demanda por exportação de biocombustíveis avançados dos próximos anos não traria maiores benefícios econômicos do que os obtidos com a exportação do etanol de cana-de-açúcar. Mas observa-se que, no longo prazo, existe uma tendência positiva na taxa de variação da *performance* econômica para a exportação de Etanol SG. Ou seja, quando o valor das exportações de etanol cresce significativamente, como esperado pelas projeções de consumo de biocombustíveis no mercado internacional a partir de 2020, ano-base para o cumprimento das ações especificadas nas políticas energéticas dos grandes mercados internacionais, o setor etanol SG tende a superar o desempenho econômico do setor Etanol FG.

O fator geração de emprego obteve resultados mais favoráveis para a exportação de etanol derivado de cana-de-açúcar. Tal fator pode ser explicado pela relação direta que o setor etanol FG tem com setores intensivos em mão de obra, como o setor de cana-de-açúcar. Sem embargo, não se pode ignorar que o setor Etanol SG abre a porta para outras importantes atividades econômicas, como a indústria de enzimas para biocombustíveis avançados, que podem gerar empregos qualificados e incentivar o desenvolvimento tecnológico e o serviço de transferência de conhecimento do país para o mundo.

O desempenho ambiental da introdução do setor Etanol SG era o esperado, uma taxa de variação positiva para a substituição de Etanol FG por Etanol SG nas exportações. Como resultado, no curto e no longo prazo, a economia brasileira apresenta diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub> referente à queima de combustíveis e consumo hidrelétrico, bem como redução no consumo energético.

A tendência do desempenho econômico e ambiental da economia é confirmada com a análise de sensibilidade. Nela ficou evidenciado que uma alteração nos preços dos insumos

principais do setor Etanol SG não altera significativamente os resultados obtidos na análise original.

Acredita-se que o Brasil possui uma ferramenta de desenvolvimento econômico promissora no longo prazo com a introdução do setor Etanol SG, que pode levar o país a se consolidar como líder mundial na produção de tecnologia avançada de biocombustíveis e energia renovável, de modo sustentável, onde dominem práticas dentro dos princípios da sustentabilidade como preservação ambiental, sistema agrícola mais sustentável, aproveitamento das condições locais para a geração de energia renovável, e práticas industriais baseadas na redução de emissões e reuso de materiais no seu processo produtivo.



### 3.2 Contribuição econômica e ambiental da cadeia de fornecedores do etanol de segunda geração: uma análise *structural path*

A análise de insumo-produto apresenta os resultados setoriais dos fatores analisados de maneira agregada, em que o maior nível de desagregação é a subdivisão dos resultados em diretos e indiretos. A decomposição dos efeitos indiretos não pode ser conhecida pela aplicação básica da matriz de Leontief. Para desvendar de maneira transparente a rede de canais pela qual o sistema setorial é influenciado, aplica-se uma análise *structural path*.

A análise *structural path* (SPA) pode computar o desempenho econômico e ambiental na perspectiva *cradle-to-gate* de qualquer setor econômico. Mediante o detalhamento da completa cadeia de fornecedores, identificam-se, quantificam-se e hierarquizam-se as principais rotas de fornecedores que contribuem com a *performance* econômica e ambiental de um setor (LENZEN e MURRAY, 2010; BABOULET e LENZEN, 2010; ROBERTS, 2005). Como resultado, a análise *structural path* auxilia na identificação e priorização dos esforços direcionados a mudanças que levem à sustentabilidade do setor de etanol no Brasil (DEFOURNEY e THORBECKE, 1984; DEFOURNEY 1982).

O Brasil tem o desafio de alcançar a sustentabilidade do setor de etanol para continuar se posicionando como líder mundial no setor de biocombustíveis e principal fornecedor de etanol ao mercado energético mundial, nesta nova era de procura por recursos energéticas sustentáveis. Assim, as tendências energéticas do mercado internacional apontam o biocombustível de segunda geração como importante fonte energética para cumprir com os critérios de sustentabilidade estabelecidos nas políticas energéticas internacionais, e a identificação das principais rotas de fornecedores que contribuem com o desempenho econômico e ambiental do setor Etanol SG é essencial para implementar políticas e iniciativas efetivas no Brasil.

Para análise do desempenho ambiental e econômico do setor Etanol SG, a SPA desvenda a matriz inversa de Leontief mediante as diversas interações setoriais representadas pelos coeficientes técnicos (WOOD e LENZEN, 2009; LENZEN 2007; SUH e HEIJUNGS, 2007; LENZEN, 2003), e incorpora o conceito de multiplicador da rota. Como mostrado nas eqs. 14 e 16, a matriz inversa de Leontief pode ser representada por sua expansão de Taylor, onde se capturam as influências diretas e indiretas dos resultados e se criam as rotas de fornecedores que ilustram a mudança na produção de todos os setores induzida pela mudança unitária no setor Etanol SG, em *ceteris paribus*.

Com base na eq. 50, o multiplicador do fator- $e$  do setor Etanol SG pode ser dividido em rotas individuais:

$$m_{Etanol\ SG}^e = \underline{b}_{Etanol\ SG}^e + \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,Etanol\ SG} + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,k} a_{k,Etanol\ SG} + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \underline{b}_j^e a_{j,l} a_{l,k} a_{k,Etanol\ SG} + h=1nl=1nk=1nj=1nbjeaj,hah,lal,kak,Etanol\ SG+\dots$$

(63)

Onde  $h$ ,  $l$ ,  $k$ , e  $j$  denotam os setores. Para obter o resultado final das rotas individuais de um setor, a eq. 63 é multiplicada pela demanda final do setor Etanol SG. Cada um dos elementos da eq. 63 representa a influência direta do setor de origem da mudança, Etanol SG, sobre o setor  $j$ . Para uma rota de insumo de primeira ordem, o coeficiente técnico  $a_{j,Etanol\ SG}$  da matriz  $\mathbf{A}$  é representado pela equação 64:

$$I_{Etanol\ SG \rightarrow j}^D = a_{j,Etanol\ SG} \quad (64)$$

Para as rotas de insumo de ordem maior, com múltiplas arcos entre o setor Etanol SG e o setor  $j$ , a influência direta é igual ao produto das intensidades dos arcos ao longo da rota de insumo, como mostrada na eq. 63:

$$I_{Etanol\ SG \dots j}^D = a_{jk} \dots a_{k,Etanol\ SG}$$

A influência total vai além da informação contida na expansão de Taylor da matriz de Leontief; tal influência considera a multitudine de interações entre setores. Defourney e Thorbecke (1984) definem que a influência total é a influência transmitida do setor Etanol SG ao setor  $j$  ao longo da rota de insumo ( $p$ ), amplificada pelas conexões indiretas imediatamente adjacentes à rota de insumo  $p$ . Essa amplificação é chamada de multiplicador da rota  $M_p$ :

$$I_{(Etanol\ SG \rightarrow j)_p}^T = I_{Etanol\ SG \rightarrow j}^D M_p \quad (65)$$

O multiplicador da rota captura os efeitos indiretos, e ele é estimado pela relação de dois determinantes  $\Delta p/\Delta$ , onde  $\Delta$  é o determinante  $|\mathbf{I}-\mathbf{A}|$ , e  $\Delta p$  é o determinante da estrutura econômica que exclui os setores que constituem a rota de insumo  $p$  (ARNDT *et al*; 2011; ROBERTS, 2005; DEFOURNEY e THORBECKE, 1984; DEFOURNEY, 1982).

Por último, a influência global de Etanol SG sobre  $j$  é o crescimento total unitário da produção de  $j$  como resultado do crescimento unitário do setor Etanol SG.

$$I_{Etanol\ SG \rightarrow j}^G = m_{j,Etanol\ SG} = \sum_{p=1}^{n+1} I_{(Etanol\ SG \rightarrow j)_p}^T \quad (66)$$

Neste estudo de caso foi realizado uma análise *structural path* do setor Etanol SG à procura de identificar, quantificar e hierarquizar as principais rotas de fornecedores que influenciam no desempenho econômico e ambiental do setor. A base de dados usada nesta análise é a matriz de coeficientes técnicos **A** derivada na seção 2, que incorpora dentro da estrutura econômica brasileira o setor hipotético de Etanol SG. Na análise foram considerados os mesmos fatores estudados na análise de insumo-produto: produção total (x), emprego (E), emissões CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>), consumo energético (TJ) e valor adicionado (VA).

### 3.2.1 Resultados da análise *structural path*

Neste estudo foram decompostos os efeitos dos multiplicadores das tabs. 8 e 9 usando as eqs 63,64,65 e 66 para avaliar os impactos dos fatores de produção das diferentes rotas de fornecedores da estrutura econômica do setor Etanol SG. Para isso foi desenvolvido um algoritmo no Matlab baseado na eq. 63 e nos conceitos de influência direta, influência total e influência global das eqs. 64,65 e 66, para estimar as principais rotas de fornecedores e hierarquizar em termos de sua contribuição ao multiplicar total do fator. Como explicado no capítulo 2, os coeficientes **b** e **A** são derivados das publicações das contas econômicas nacionais, matrizes TRUs, e de relatórios energéticos governamentais.

De acordo com a estrutura metodológica apresentada na eq. 63, a técnica *structural path* permite identificar as 19<sup>18</sup> rotas de fornecedores que tem o potencial de participar da dinâmica econômico do setor Etanol SG para cada fator analisado. Mas como mencionado por Defourny (1982) e Defourny e Thorbecke (1984), uma SPA é praticável se, e somente se, ela considera as rotas de fornecedores mais influentes para o resultado final do fator analisado. Assim, neste exercício foram observadas todas as rotas de fornecedores de primeira e de segunda ordem. Assume-se que as rotas de terceira ordem mais influentes são aquelas com um multiplicador total maior que 0,07. Como resultado, foram identificadas, calculadas e hierarquizadas 1.684 rotas de fornecedores para cada fator, representando mais do 90% do valor total de cada multiplicador.

Para obter os resultados em valores finais para um ano de referência, todos os multiplicadores foram multiplicados por uma demanda final do setor Etanol SG de R\$2.219 milhões, que corresponde ao valor assumido como o produto total exportado pelo setor Etanol SG no ano 2010. A tabela 14 traz a lista das principais rotas de fornecedores dos fatores econômicos, que representam mais de 70% do valor total de cada fator.

Tabela 14 - Principais rotas de fornecedores que influenciam no desempenho econômico

Rank	Rota	Valor da rota Milhões R\$	Fator analisado	Ordem da rota	Impacto total %
1	Etanol SG	2.218,51	X	0	41,24
2	Etanol SG >Quim	627,54	X	1	11,67
3	Etanol SG >Oquim	532,08	X	1	9,89
4	Etanol SG>Oquim>Quim	127,29	X	2	2,37
5	Etanol SG>Etanol FG	124,73	X	1	2,32
6	Etanol SG>Co	118,81	X	1	2,21
7	Etanol SG>Quim>Co	92,24	X	2	1,71
8	Etanol SG>Quim>En	88,77	X	2	1,65
9	Etanol SG>Oquim>Co	84,21	X	2	1,57
10	Etanol SG>A&B	80,35	X	1	1,49
	Restante das rotas	1.274,71	X	1,2,3	23,88
	TOTAL	5.379,26			100
1	Etanol SG	977,85	VA	0	46,5
2	Etanol SG>Oquim	136,70	VA	1	6,51
3	Etanol SG>Quim	126,27	VA	1	6,01
4	Etanol SG>Co	78,39	VA	1	3,73
5	Etanol SG>Quim>Co	60,86	VA	2	2,90
6	Etanol SG>Oquim>Co	55,56	VA	2	2,64
7	Etanol SG>Etanol FG	54,98	VA	1	2,62
8	Etanol SG>Oquim>Quim	25,61	VA	2	1,22
9	Etanol SG>Os	25,38	VA	1	1,21
10	Etanol SG>Tra	23,42	VA	1	1,11
	Restante das rotas	1.565,03	VA	1,2,3	25,51
	TOTAL	2.101,10			100

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas da tabela: VA representa o fator valor adicionado; X o fator produção total. Oquim - setor “outros químicos”; Quim - setor químicos, Co - setor “comércio e serviços”; A&B - setor bebidas e alimentos; Os - setor “outros setores industriais”; En - setor de energia; Tra - setor transporte.

As dez principais rotas de fornecedores do setor Etanol SG analisadas para a produção total e o fator de valor adicionado ou PIB setorial representam 76% e 74%, respectivamente. As restantes 1.674 rotas contribuem com 23% e 25% do valor total do fator analisado, respectivamente.

A estrutura hipotética do setor Etanol SG na economia brasileira aponta que a contribuição direta do setor na sua *performance* econômica representa quase 50% da contribuição total, sendo 41% para o fator produção total e 46% para o valor adicionado, localizando essa contribuição entre as principais rotas. A modelagem do setor Etanol SG apresentada por Gonzales-García *et al.* (2009), Mac Lean e Sparati, (2009), Sparati *et al.* (2005), Fu *et al.* (2003), Kadam (2002) indicam a relevância dos insumos do setor de químico e as enzimas (geradas no setor de outros químicos) para a produção do etanol de segunda geração. Como esperado, os principais setores que influenciam na produção total do setor Etanol SG, segundo a análise *structural path*, são o setor químico e o setor “outros químicos”. Cabe destacar que o fornecimento de insumos do setor químico ao setor “outros químicos” para satisfazer à demanda do setor Etanol SG é apontada entre as principais rotas de fornecedores da produção total, bem como a rota de fornecedores de primeira ordem

conformada pelo setor Etanol FG que fornece bagaço ao setor Etanol SG. Já para o fator de valor adicionado, identificam-se o setor “outros químicos” e o setor químico como os principais contribuidores.

Observa-se que a influência econômica do setor de comércio e serviço na economia brasileira é ilustrada também na *performance* econômica do setor Etanol SG, pois a relação intersetorial do setor com o setor comércio e serviços para diferentes ordens das rotas de fornecedores aparece como relevante nos resultados das categorias de impactos econômico analisadas. Para a produção total, as rotas Etanol SG>Co, Etanol SG>Quim, e Etanol SG>Oquim representam juntas 5,5%; para o valor adicionado, as mesmas rotas perfazem 9,27%.

A tabela 15 lista as principais rotas de fornecedores que influenciam com a geração de emprego do setor. As 10 principais rotas de fornecedores equivalem aproximadamente 66% do valor total dos empregos do setor. Como nos outros fatores econômicos, a influência direta do setor Etanol SG representa 24,58% do total da geração do setor.

Tabela 15 - Principais rotas de fornecedores que influenciam na geração de emprego

Rank	Rota	Valor da rota 1.000 ocupações	Fator analisado	Ordem da rota	Impacto total %
1	Etanol SG	13,158	Emprego	0	24,58
2	Etanol SG>Co	3,842	Emprego	1	7,18
3	Etanol SG>Cim	3,678	Emprego	1	6,87
4	Etanol SG>Quim>Co	2,983	Emprego	2	5,57
5	Etanol SG> A&B>Alf	2,864	Emprego	2	5,35
6	Etanol SG>Oquim>Co	2,723	Emprego	2	5,09
7	Etanol SG>Alf	2,434	Emprego	1	4,55
8	Etanol SG>Os	1,315	Emprego	1	2,46
9	Etanol SG>Oquim	1,116	Emprego	1	2,08
10	Etanol SG>Tra	0,971	Emprego	1	1,81
	Restante das rotas	18,44	Emprego	1,2,3	34,35
	<b>TOTAL</b>	<b>53,53</b>			<b>100</b>

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas da tabela: Oquim - setor “outros químicos”; Quim - setor de químicos; Co- setor de comércio e serviços; A&B - setor bebidas e alimentos; Os - setor de “outros setores industriais”; Cim o setor de cimento; Alf - setor agricultura, silvicultura e pesca; Tra - setor de transporte.

O papel relevante do setor de comércio e serviços na geração de emprego na economia brasileira aparece também na decomposição do multiplicador de emprego do setor Etanol SG. Como esperado, a presença da relação intersetorial entre as diferentes atividades econômicas com o setor “comércio e serviços” aparece entre as principais rotas de fornecedores para diferentes ordens; por exemplo, Etanol SG>Co, Etanol SG>Quim>Co, Etanol SG>Oquim>Co perfazem juntas 17,84% do total de geração de emprego. Isto quer dizer que o fornecimento de insumos do setor “comércio e serviços” ao setor Etanol SG e a dois setores com forte relação setorial com o setor hipotético ilustra o comportamento esperado da economia brasileira, representando, assim, importante parcela da criação de

emprego do setor Etanol SG. A soma da contribuição do próprio setor Etanol SG e das rotas de fornecedores anteriormente descritas conformam aproximadamente 50% da criação de emprego do setor, podendo ser vagas com um perfil de qualificação técnico ou superior, pelo contexto setorial das atividades.

Faz-se oportuno ressaltar que a produção de enzimas para biocombustíveis avançados é um mercado que surge com a incorporação do setor Etanol SG no Brasil, e o país é visto pelas grandes empresas internacionais e nacionais como um lugar estratégico para a implementação de novas plantas de produção desse tipo de enzimas (NOVAZYMES, 2011), podendo criar novas atividades potenciais e gerar empregos qualificados. Como exemplo, neste exercício, a geração de emprego no setor de produção de enzimas aparece como importante contribuidor com 2,08% do total de empregos derivados do setor Etanol SG.

A tabela 16 identifica as principais rotas de fornecedores relacionadas com as categorias de impacto ambiental de emissões de CO<sub>2</sub> e consumo energético do setor Etanol SG.

Tabela 16 - Principais rotas de fornecedores relacionadas com o desempenho ambiental

Rank	Rota	Valor da rota	Fator analisado	Ordem da rota	Impacto total %
1	Etanol SG>Tra	45,68	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	1	19,86
2	Etanol SG>Quim>Tra	23,47	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	2	10,20
3	Etanol SG>Quim	19,76	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	1	8,59
4	Etanol SG>Oquim>Tra	15,81	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	2	6,88
5	Etanol SG>Met	8,88	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	1	3,86
6	Etanol SG>Etanol FG>SC	8,18	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	2	3,56
7	Etanol SG>Oquim	6,62	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	1	2,88
8	Etanol SG>Oquim>Quim>Tra	4,76	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	3	2,07
9	Etanol SG>Quim>En>Tra	4,34	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	3	1,89
10	Etanol SG>A&B>Tra	4,16	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	2	1,81
	Resto das rotas	88,36	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	1,2,3	38,42
	<b>TOTAL</b>	<b>230,01</b>			<b>100</b>
1	Etanol SG>Tra	627,93	TJ	1	22,36
2	Etanol SG>Quim>Tra	322,68	TJ	2	11,49
3	Etanol SG>Oquim>Tra	217,41	TJ	2	7,74
4	Etanol SG>Quim	193,56	TJ	1	6,89
5	Etanol SG>Etanol SG>SC	108,38	TJ	2	3,86
6	Etanol SG>Met	79,63	TJ	1	2,84
7	Etanol SG>Oquim>Quim>Tra	65,45	TJ	3	2,33
8	Etanol SG>Quim>En>Tra	59,66	TJ	3	2,12
9	Etanol SG>A&B>Tra	57,12	TJ	2	2,03
10	Etanol SG>Co>Tra	39,32	TJ	2	1,40
	Resto das rotas	1.771, 15	TJ	1,2,3	36,92
	<b>TOTAL</b>	<b>2.808,05</b>			<b>100</b>

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: Tra – setor transporte; Quim – setor químico; Oquim – setor “outros químicos”; Met – setor metalúrgico; SC – setor cana-de-açúcar; A&B – setor alimentos e bebidas; En – setor energia; Co – “setor comércio e serviço”.

As 10 principais rotas de fornecedores que contribuem com o total das emissões CO<sub>2</sub> relacionado ao setor Etanol SG representam 62% do total das emissões do setor. Como

esperado, o setor de transporte nas suas diferentes ordens das rotas de fornecedores é o principal contribuidor. No agregado do total de emissões CO<sub>2</sub> da economia brasileira para o ano 2010, segundo exercício da seção 3.1, foi o setor de transporte com 30% do total, maior contribuição das emissões para a estrutura econômica existente. Assim, as rotas Etanol SG>Tra, Etanol>Quim>Tra, Etanol SG>Oquim>Tra, Etanol SG>Oquim>Quim>Tra e Etanol SG>Quim>En>Tra representam na estrutura do setor Etanol SG 42,71%.

Confirmando os resultados obtidos por MacLean e Sparati (2009) e Gonzales-García *et al.* (2009), Singh *et al.* (2010), e Fu *et al.* (2003), os químicos e as enzimas usadas na produção do setor Etanol SG, em conjunto com o transporte, são os maiores contribuidores de emissões. A fase agrícola do bagaço usado na produção do etanol representada pela rota Etanol SG>Etanol FG>cana-de-açúcar contribui com 3,56% das emissões do setor. Isto devido à grande quantidade de diesel queimado nas operações produtivas do setor de cana-de-açúcar (NEVES *et al.*; 2010; MACEDO *et al.*; 2008). A produção dos materiais metalúrgicos usados nas operações de manutenção e instalação dentro de uma usina de etanol participam com 3,86% das emissões do setor (NEVES *et al.*; 2010).

Da mesma maneira que no fator de emissões, as 10 principais rotas de fornecedores que contribuem com o consumo energético relacionado ao setor Etanol SG representam 63% do total. A relevância do setor transporte ficou fortemente evidenciada com quase 50% do total do consumo energético, representado por diferentes rotas de fornecedores, desde rotas de zero ordem até rotas de terceira ordem.

O importante papel dos combustíveis fósseis nas atividades econômicas no Brasil ficou ressaltado nos resultados da tabela 16. Por exemplo, o consumo de combustíveis na produção química ficou representada pela rota composta do fornecimento de insumos do setor químico ao setor Etanol SG, com uma parcela de responsabilidade do 6,90% do consumo energético total do setor Etanol SG. Por outra parte, o alto consumo de diesel no setor de cana-de-açúcar posicionou a rota Etanol SG>Etanol FG>CS entre as principais rotas, contribuindo com 3,86%. Por último, o setor metalúrgico também apresentou uma parcela expressiva no total do consumo energético com 2,82% do total do setor Etanol SG.

### 3.2.2 Considerações finais da análise *structural path*

O Brasil tem o desafio de alcançar a sustentabilidade do setor de etanol para continuar se posicionando como líder mundial no setor de biocombustíveis e se consolidar como maior fornecedor de etanol no mercado energético mundial nesta nova era de políticas de recursos

energéticas sustentáveis. Assim, as tendências energéticas do mercado internacional apontam o biocombustível de segunda geração como importante fonte energética para cumprir com os critérios de sustentabilidade estabelecidos nos principais mercados energéticos. Nesse sentido, a identificação das principais rotas de fornecedores que contribuem com a *performance* econômica e ambiental do setor é essencial para implementar políticas e iniciativas efetivas que levem a práticas mais sustentáveis nas atividades econômicas no Brasil e a competitividade do etanol.

Os resultados econômicos desta análise identificaram que a contribuição direta do setor Etanol SG é a principal na produção total, na geração de valor adicionado e de emprego no setor. Observa-se também a relevância do setor de comércio e serviços nos três fatores, situação que se deve à estrutura econômica do Brasil, onde o setor comércio e serviço é o que mais participa na geração do PIB e de emprego no país. Conseqüentemente, esse nível de contribuição indireta para o desempenho econômico do setor Etanol SG era esperado.

A identificação da relevância econômica do setor de produção de enzimas para biocombustíveis avançados é essencial para focalizar os esforços e incentivar o crescimento desta nova atividade econômica no país, que precisa de mão de obra qualificada e abre novos mercados, não só domésticos, mas também externos, sendo um potencial setor de exportação para os outros países produtores de biocombustíveis de segunda geração.

O incentivo para a instalação de plantas produtoras de enzimas para biocombustíveis no Brasil não se traduz, somente, na geração de emprego qualificado e transferência de conhecimento, mas também interfere na competitividade do Etanol SG brasileiro no mercado internacional, pois como as enzimas são um insumo básico na produção de etanol, pesquisas e melhorias de seu processo produtivo trazem consigo competitividade no custo de produção, e conseqüentemente, no preço final do etanol de segunda geração.

Na *performance* ambiental, as principais rotas de fornecedores estão relacionadas com a atividade de transporte e a atividade agrícola do bagaço. Essas rotas consomem e queimam grandes quantidade de combustíveis fósseis, especialmente diesel.

Mediante esse resultado, ressalta-se a necessidade de mudanças nos combustíveis usados no setor de transporte e no setor de cana-de-açúcar ou no modelo produtivo. Pois tais setores não somente contribuem com a *performance* ambiental do setor Etanol SG, mas também com outros importantes setores da economia. Os resultados aqui encontrados confirmam os resultados encontrados na literatura sobre a avaliação ambiental do ciclo de vida do etanol de segunda geração, que apontam a relevância dos insumos químico, da fase agrícola da biomassa e das enzimas no desempenho ambiental do setor Etanol SG.



### 3.3 Avaliação de ciclo de vida híbrida do etanol derivado de bagaço: perspectiva econômica e ambiental

Avaliação de ciclo de vida tem provado ser uma valiosa ferramenta para analisar aspectos ambientais de um sistema de produto ou serviço. Especialistas apontam ACV como um recurso fundamental para ser incorporado no processo de tomada de decisão focada na sustentabilidade (GONZALES-GARCÍA *et al*; 2009; REBITZER, *et al*; 2004). Assim, define-se avaliação de ciclo de vida (ACV) como uma estrutura metodológica usada para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto/serviço. Entre as categorias de impactos ambientais, estão mudanças climáticas, acidificação, eutroficação, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo energético, uso de água, uso da terra, e outras.

A avaliação de ciclo de vida tem sido muito usada para avaliar o real desempenho ambiental dos biocombustíveis de primeira geração (ACQUAYE *et al*; 2011; GARCIA e VON SPERLING, 2010; MACEDO *et al*; 2008; LUO *et al*; 2009b; OMETTO *et al*; 2009; MACEDO *et al*; 2004). Assim, a nova tendência mundial energética direcionada à tecnologias avançadas de biocombustíveis de segunda geração trouxe consigo vários estudos de ACV analisando o desempenho ambiental de diferentes matérias-primas lignocelulósicas (GONZALES-GARCÍA *et al*; 2012; GONZALES-GARCÍA *et al*; 2011; BAI *et al*; 2010; GONZALES-GARCÍA *et al*; 2009; BRIGHT *et al*; 2010; LUO *et al*; 2009a; MACLEAN e SPARATI, 2009; SPARATI *et al*; 2005; FU *et al*; 2003; KADAM, 2002).

Kadam (2002) quantificou os fluxos de entrada e saída associados à produção de etanol derivado de excesso de bagaço para obter E10<sup>11</sup> e comparou os resultados com a avaliação de ciclo de vida do descarte e queima do excesso de bagaço. Os resultados obtidos mostraram significativo benefício ambiental potencial ao usar etanol derivado de excesso de bagaço. Fu *et al.* (2003) focalizaram o estudo em determinar o potencial de reduzir emissões de gases de efeito estufa com E10 derivado de pinheiros referente a quatro diferentes cenários de produção, e usando ou não a lignina para cogeração. Os resultados indicaram que E10 emite menos gases de efeito estufa que a gasolina tradicional, mas quando no processo de cogeração da usina é usada uma fonte fóssil, a gasolina aparece com melhor *performance*. Sparati *et al.* (2005) desenvolveram um modelo de ACV para avaliar a produção de etanol derivado de biomassa celulósica provindo de plantações energéticas de *switchgrass* e de

---

<sup>11</sup> E10 é um termo usado para expressar um combustível com mistura de 90% gasolina e 10% etanol anidro, por volume. Da mesma maneira, E85 indica um combustível com 15% de gasolina e 85% de etanol, por volume.

resíduos agrícolas do milho, em E85 para ser consumido no Canadá. Mac Lean e Sparati (2009) quantificaram o consumo energético e as emissões dos gases de efeito estufa associados com os processos químicos e de enzimas requeridos para a conversão da biomassa lignocelulósica a etanol. Luo *et al.* (2009a) analisaram o desempenho ambiental do uso do etanol derivado de resíduos de milho para uma mistura E10 (10% volume etanol) e E85 (85% volume etanol), e etanol hidratado (E100) em um carro tamanho médio. Os resultados mostraram que o esgotamento de recursos abióticos e da camada de ozônio diminuiu quando a gasolina é substituída por qualquer das misturas de etanol. Enquanto os efeitos de eutroficação, ecotoxicidade, toxicidade humana aumentaram com o uso de etanol. Por outra parte, para uma alocação de massa, os efeitos de aquecimento global diminuíram com etanol, mas para uma alocação econômica o resultado é invertido. Gonzáles-García *et al.* (2009) avaliaram os impactos ambientais da produção e uso de um carro flex com etanol E10 e E85 derivado de linho, sendo os resultados comparados com os da gasolina convencional. O etanol apresentou melhor *performance* ambiental do que a gasolina em termos de aquecimento global e consumo energético quando é utilizada alocação de massa. Por outra parte, quando é usada alocação econômica, a melhor *performance* ambiental do etanol foi em termos de acidificação, consumo energético e toxicidade humana. Bright *et al.* (2009) observaram quatro sistemas de produção hipotéticos de E85 baseados nas duas rotas tecnológicas de conversão de etanol derivado de madeira, a rota bioquímica e a termoquímica, para analisar as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo energético, e dependendo do cenário analisado, os resultados mostraram uma mitigação potencial de 58-83 Mega toneladas de CO<sub>2</sub>-equivalente na Noruega. Gonzales-Garcia *et al.* (2012, 2011, 2010) analisaram o uso de etanol derivado de diferentes matérias-primas biomassa celulósica como a acácia-falsa, *Alfalfa stems*, e canhama. As análises compararam a misturas E10 e E85 com a gasolina na operação de um carro tamanho médio. Todos os resultados obtidos levam a uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo energético quando a gasolina é substituída pelo etanol.

Na perspectiva de fazer uma análise pormenorizada do etanol derivado de bagaço e ir além do enfoque agregado *cradle-to-gate* usual nos modelos macroeconômicos, propõe-se o uso da ferramenta ACV híbrida integrada para avaliar a *performance* econômica e ambiental do etanol derivado de bagaço numa perspectiva minuciosa *cradle-to-grave*.

Esta técnica integra as vantagens do enfoque insumo-produto e *structural path* com as vantagens do enfoque de análise de processo de ACV por meio de uma matriz composta de quatro submatrizes que descrevem os fluxos físicos do processo analisado, os fluxos monetários da economia, e fluxos que vão do modelo físico ao modelo econômico, bem como

os fluxos econômicos que entram no modelo físico como insumos. Logo, com o enfoque ACV híbrida poderão ser integradas as perspectivas macro, meso e micro das atividades econômicas, examinando com detalhe uma atividade sem ignorar o restante da economia, em uma perspectiva desagregada *cradle-to-grave*.

Este estudo tem como objetivo avaliar mediante uma ACV híbrida, as emissões de CO<sub>2</sub> provocadas pela queima de combustíveis e o uso da energia hidrelétrica, bem como o consumo energético e a geração de empregos atribuíveis ao ciclo de vida do etanol derivado de bagaço. O ciclo de vida *cradle-to-grave* começa com a fase agrícola da cana-de-açúcar necessária para a obtenção do bagaço, e a fase final será a queima do combustível ao operar um carro flex 1.0 médio no Brasil. Neste exercício será considerado a etapa de uso do carro flex, para ilustrar como este novo enfoque detalha o processo consumo das famílias. A capacidade de sequestro de carbono no processo agrícola não foi considerada nesta análise, pois ele não foi observado nos estudos de caso anteriores.

Os efeitos econômicos e ambientais serão obtidos primeiramente por uma ACV de processo, que posteriormente servirão como entrada para uma análise ACV híbrida integrada. Esta análise híbrida será completada com uma análise *structural path*, em que a contribuição de cada rota de fornecedores para cada fator analisado será computada, listada e hierarquizada por meio de um algoritmo programado no *software Matlab*.

A unidade funcional desta análise é a operação de um carro flex motor 1.0 médio no Brasil, percorrendo uma distância de 500 km. Considere-se que um carro flex médio no Brasil tem um tanque com capacidade média de 50,5 litros de etanol que lhe possibilita percorrer o total de 500 km (base de cálculo carro flex 1.0 Mille - Fiat, Celta 1.0 – Chevrolet, e Gol 1.0 – Volkswagen).

O sistema de fronteira da análise de processo se limita às etapas mais relevantes da produção e uso do etanol. Já o sistema de fronteira do enfoque híbrido inclui, além dos setores correspondentes aos processos da ACV de processo, setores como alimentação, têxtil, papel e celulose, cerâmica, metalurgia, comércio e serviço, e público; abrangendo assim todos os setores que interagem no ciclo de vida de uma atividade em uma economia de mercado.

### 3.3.1 Metodologia e preparação da base de dados

Neste trabalho foi construído um modelo de processo de inventário de ciclo de vida (ICV) *cradle-to-grave* para avaliar, de maneira hipotética, o etanol derivado de bagaço de

cana-de-açúcar. Com a modelagem de processo em conjunto com o enfoque de insumo-produto foi possível obter o inventário de ciclo de vida híbrido para quantificar o consumo energético fóssil, as emissões de CO<sub>2</sub> devido à queima de combustível e consumo hidrelétrico, e a geração de emprego durante o ciclo de vida completo do etanol.

A escolha da unidade funcional em um estudo de avaliação de ciclo de vida é a base de todos os cálculos subsequentes no estudo, e ela está diretamente relacionada com a definição do objetivo do estudo. A unidade funcional definida para comparar os fluxos de ciclo de vida *cradle-to-grave* é percorrer 500 quilômetros com um veículo flex, motor 1.0, usando etanol derivado de bagaço E100<sup>12</sup> como combustível. A modelagem do sistema permite que seja feito, também, um estudo ACV híbrida *cradle-to-gate*, a unidade funcional dessa subanálise é a produção de 50,5 litros de etanol, necessários para percorrer os 500 km no carro flex motor 1.0.

### 3.3.1.1 ACV de processo para o etanol derivado de bagaço

A produção de etanol consiste de duas principais etapas de processos (ver figura 11): as atividades envolvendo a produção agrícola para a obtenção da biomassa e aquelas associadas à produção de etanol (conversão da biomassa em etanol). O transporte conectando os dois processos está incluído no inventário de ciclo de vida *cradle-to-gate* da fase agrícola da cana-de-açúcar (MACEDO *et al.*; 2008; MACEDO *et al.*; 2004). No processo “uso do etanol”, existe um sistema de distribuição do etanol saindo de uma usina para ser levado ao posto de combustível. Neste estudo se assume que a usina está localizada no município de Postes de Gestal, em São Paulo, e o produto deverá chegar a um posto de combustível (da rede de distribuição Petrobras) localizado no centro da cidade de São Paulo.

A figura 11 mostra o sistema de fronteira da análise de processo. Os processos ICV *cradle-to-gate* dos insumos e da matéria-prima foram construídos a partir da literatura científica e da base de dados da International Life Cycle Database Platform (ILCD); os fluxogramas de processos são encontrados no apêndice C1 e no grupo do apêndice C2. A informação referente à base de dados de cada processo produtivo é descrito a seguir:

---

<sup>12</sup> E100 é um termo usado para expressar o etanol hidratado, sendo 100% de etanol hidratado.

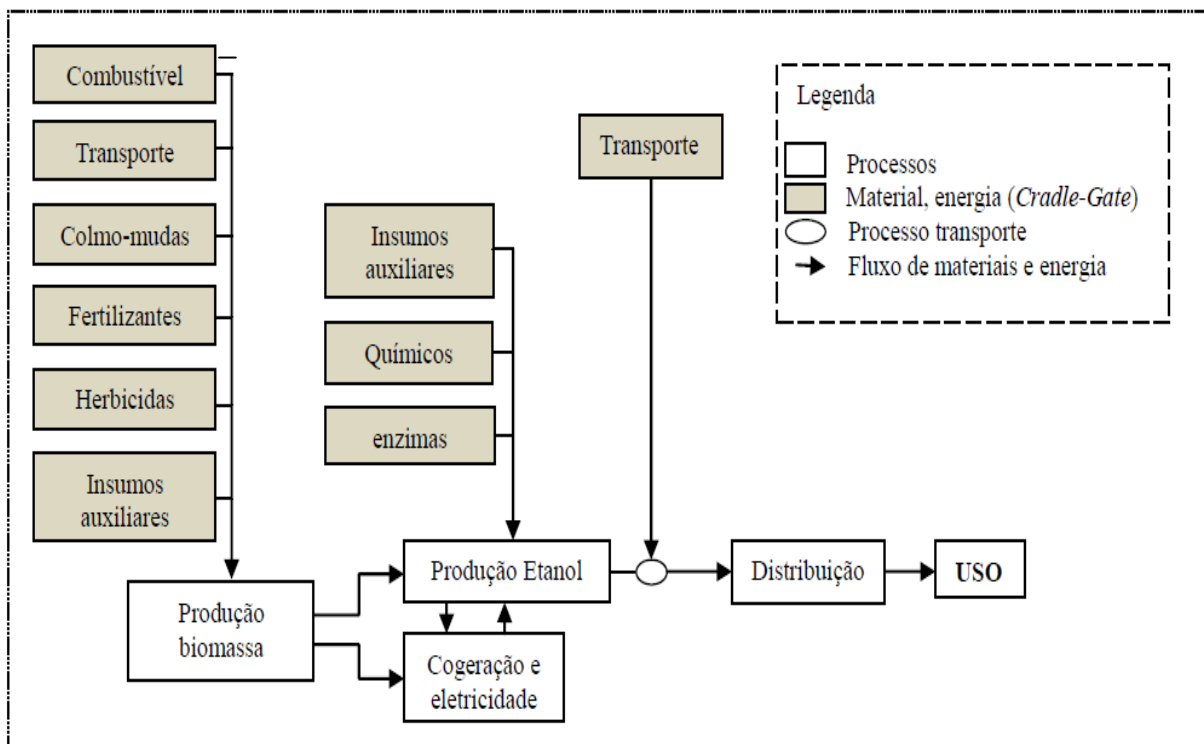


Figura 11 - Fluxograma de ciclo de vida da produção do etanol lignocelulósico e seu uso em um carro flex. Os processos de ciclo de vida incluem produção de combustível, distribuição e uso. Os módulos do *cradle-to-gate* para os principais insumos são incluídos no diagrama.  
Fonte: Resultado da pesquisa.

**Fase agrícola.** A base de dados ICV da fase agrícola foi obtida da literatura científica. MACEDO *et al.* (2008, 2004) apresentam os dados ICV de fluxos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> da fase agrícola e industrial do etanol de cana-de-açúcar brasileira mais completa e já publicada para dados do período 2005/2006. Com a moagem da cana-de-açúcar se obtêm principalmente o bagaço e o caldo. Para alocar os fluxos energéticos e de emissões referentes ao ciclo de vida da cana-de-açúcar modelada por Macedo *et al.* (2008, 2004) e obter, assim, as cargas ambientais relacionadas ao bagaço, foi considerada uma alocação mássica, na qual para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida se obtêm 0,25 toneladas de bagaço (SEABRA e MACEDO, 2011; WALTER e ENSINAS, 2010; PIPPO *et al.*; 2010).

A modelagem de Macedo *et al.* (2008, 2004) consideram três níveis de fluxos energéticos para a avaliação do balanço energético e de emissões gases de efeito estufa: 1) o consumo direto de combustíveis externos e de eletricidade (consumo direto de energia); 2) a energia adicional requerida para a produção de químicos e materiais auxiliares usados na fase agrícola (fertilizantes, herbicidas, colmos-mudas, materiais auxiliares, etc.) e industrial do etanol de primeira geração, não considerado neste estudo; 3) a energia adicional necessária para manufatura, construção e manutenção dos equipamentos e edifícios.

Como resultado, os coeficientes de emissões de CO<sub>2</sub> e de consumo energético fóssil foram obtidos do balanço ICV final de Macedo *et al.* (2008, 2004) em unidades de kg CO<sub>2</sub>/tonelada bagaço e MJ/tonelada bagaço, respectivamente. Entretanto, como não existe uma base de dados com o número de empregos do ciclo de vida das atividades econômicas, para a fase agrícola do bagaço, obteve-se coeficientes de emprego baseados nas informações apresentadas em relatórios da UNICA e em relatórios anuais de empresas produtoras dos principais insumos da etapa agrícola, como o relatório anual 2007/2008 da Petrobras para o insumo diesel. Já que os relatórios anuais das empresas fornecem dados agregados, assume-se que todos os itens produzidos pela mesma empresa possuem a mesma estrutura tecnológica de emprego; assim, o coeficiente de emprego da empresa representaria o coeficiente de emprego do insumo ou matéria-prima analisados. O coeficiente de empregos do ciclo de vida da etapa agrícola foi calculado como mostrado na equação 67,

$$C_{bagaço} = \frac{\text{empregos bagaço}}{\text{Produção total bagaço(Ton)}} + \sum_{j=1}^n \frac{\text{empregos setor insumo}_j}{\text{Produção total insumo}_j} * \frac{\text{consumo insumo}_j}{\text{tonelada bagaço}} \quad (67)$$

Onde *j* o insumo analisado. A unidade do coeficiente de emprego da fase agrícola é números de empregados/tonelada bagaço.

**Produção de etanol lignocelulósico e eletricidade.** A estrutura industrial da produção do etanol lignocelulósico foi baseada na literatura científica. O modelo tecnológico hipotético da usina de etanol lignocelulósico é a sugerida por Walter e Ensinas (2010), na qual foi elaborada uma avaliação energética da produção combinada de eletricidade e biocombustíveis derivados de bagaço e palha da cana-de-açúcar. No modelo de Walter e Ensinas (2010) utilizou-se uma hidrólise enzimática para quebrar a celulose da biomassa e obter açúcar. Esses açúcares são fermentados para produzir etanol que é, então, purificado através da destilação e depois desidratado para obter uma concentração superior a 97,2% em volume. Baseada em Walter e Ensinas (2010) e Mac Lean e Sparati (2009), a tecnologia industrial para a conversão da biomassa lignocelulósica em etanol usada neste estudo usa um processo de pretratamento de ácido diluído desenvolvido pelo NREL,<sup>13</sup> que usa ácido sulfúrico e cal hidratada, em combinação com a sacarificação simultânea, hidrólise enzimática e a fermentação. Para a produção de etanol, considerou-se 76% do bagaço obtido da moagem.

Quanto à estrutura tecnológica de insumos para a produção do etanol, foram usados vários artigos como base para estipular uma média tecnológica simbolizando a produção

<sup>13</sup> National Renewable Energy Laboratory – Estados Unidos da América

brasileira (GONZALES-GARCÍA *et al*; 2009; SPARATI *et al*; 2005; FU *et al*; 2003; KADAM, 2002). Os insumos principais para a produção de etanol lignocelulósico com hidrólise enzimática são enzimas, cal hidratada, ácido sulfúrico, fosfato diamônio (DAP), vapor e eletricidade. No processo de cogeração e eletricidade, considerou-se como combustível 24% do bagaço, a lignina obtida do processo de hidrólise e 50% da palha de cana-de-açúcar, atualmente queimada na etapa de colheita, ou quando a atividade é mecanizada é deixada no campo para proteção do solo. O método de alocação para atribuir o consumo energético e de emissões da palha é baseado em um critério mássico, na que uma tonelada de cana-de-açúcar produz 0,22 toneladas de palha. Seguindo o modelo de Walter e Ensinas (2010), a planta de produção de etanol não usa como insumo nenhuma classe de combustível fóssil ou eletricidade externa para a obtenção de vapor ou a eletricidade necessária na planta.

**Insumos da produção de etanol.** O conjunto de dados ICV dos processos insumos do etanol foram coletados da literatura científica, e regionalizados com a introdução de ICV de fontes energéticas brasileiras em cada inventário ICV dos insumos. A regionalização de cada inventário foi elaborada utilizando como base de dados os inventários no formato ILCD da energia hidrelétrica e do diesel brasileiro. Na construção de cada ICV insumo regionalizado foi incorporado o processo transporte da entrega do insumo para a usina, como mostrado nos apêndices do grupo C2. O caminhão protótipo tem capacidade de carga máxima de 15 toneladas, usando diesel brasileiro B5 500 ppm, com 85% de produtividade de carga. Neste estudo foi utilizado o modelo de caminhão global da base de dados ILCD e regionalizado mediante uma mudança de parâmetros de carga máxima e produtividade do caminhão, combustível e estradas brasileiras.

Pela representatividade econômica e produtiva do estado de São Paulo na produção de etanol, foi escolhida uma usina localizada no município Pontes Gestal, do estado de São Paulo, a distância aproximada de 500 km da capital (DIAS DE MORAIS *et al*; 2010; UNICA, 2010). O potencial brasileiro na geração de biocombustíveis avançados faz com que empresas líderes mundiais em pesquisa e produção de enzimas procurem a instalação de unidade de produção de enzimas no Brasil (NOVOZYMES, 2011). Portanto, assume-se que a produção de enzimas é doméstica, e localizada em Araucária, no estado de Paraná, aproximadamente a 800 km da usina hipotética estabelecida. Foi eleito o município de Araucária por ser a localização atual da principal empresa internacional de produção e pesquisas de enzimas de combustíveis avançados no Brasil. Também considerou-se que o produtor de químicos como DAP e ácido sulfúrico é a mesma empresa líder nesse tipo de

produtos químicos no Brasil, com planta de produção em Cubatão, São Paulo, distante 621 km da usina. A cal hidratada é fornecida por uma empresa brasileira líder nacional, com planta em Itapeva, São Paulo, e localizada a 600 km da usina. Cabe destacar que o trajeto e o tipo de rodovia que o caminhão percorre para levar à usina os insumos estão baseados nos mapas e nas distâncias fornecidos pelo *Google map*.

Primeiramente, para obter os coeficientes energéticos e emissões da parte de processo da análise híbrida foi necessário realizar o balanço energético e mássico de emissões de CO<sub>2</sub> do processo produção de etanol do ICV de processo, que considera no sistema de fronteira todos os processos anteriormente descritos. Os coeficientes de consumo energético têm unidade de MJ/litro etanol e das emissões de gases de efeito estufa kg CO<sub>2</sub>/litro etanol.

O procedimento descrito na fase agrícola para a obtenção do coeficiente de emprego é o mesmo utilizado para alcançar os coeficientes dos insumos da produção de etanol, baseado em relatórios anuais das empresas que serviram como base desta pesquisa ou das associações do setor. Para chegar ao coeficiente de emprego dos insumos foram, considerados os principais processos que participam no ICV do insumo e calculados segundo a estrutura de cálculo apresentada na eq. 67. Para o processo de produção de etanol, foi considerado somente o primeiro elemento à direita da eq. 67, desde que o etanol derivado de cana-de-açúcar e o etanol derivado de bagaço são substitutos perfeitos e pertenceriam ao mesmo setor sucroalcooleiro, assume-se que ambos os setores possuem a mesma estrutura tecnológica de geração de emprego. Assim, a informação do panorama de empregos do etanol foi obtida de Neves *et al.* (2010) e do portal da UNICA. Portanto, o coeficiente da geração de emprego do ciclo de vida da produção de etanol será obtido da soma de coeficientes de emprego da ACV da produção de um litro de etanol.

Neste primeiro modelo de ACV processo, o balanço ambiental e soma econômica do inventário ICV da produção de etanol lignocelulósico ( $\mathbf{X}^*$ ) é calculado mediante um sistema matricial conformado pela matriz de fluxos físicos dos ICV dos insumos, pela respectiva matriz de cargas ambientais e econômicas, cujos elementos são os coeficientes de emissão  $\tilde{\mathbf{B}}^{\text{CO}_2}$ , consumo energético  $\tilde{\mathbf{B}}^{\text{F}}$ , e emprego  $\tilde{\mathbf{B}}^{\text{E}}$ , e pelo vetor de unidade funcional  $\mathbf{y}$  (nesta ACV processo para o cálculo de coeficientes seria um litro de etanol). A equação 68 apresenta a estrutura geral de cálculo para o balanço ICV final da produção de um litro de etanol lignocelulósico.



$$\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \underline{\tilde{\mathbf{B}}}^{\text{CO}_2} \\ \underline{\tilde{\mathbf{B}}}^{\text{F}} \\ \underline{\tilde{\mathbf{B}}}^{\text{E}} \end{bmatrix}_{1,m} \cdot [\tilde{\mathbf{A}}]_{m,m} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ y \end{bmatrix}_{m,1} \quad (68)$$

Na matriz de fluxos físicos do sistema matricial da figura 12, os fluxos de entrada são representados por um sinal negativo, enquanto os fluxos de saída são representados por um sinal positivo. Os coeficientes de emissão, consumo energético e emprego estão em unidades de milhões kg CO<sub>2</sub>, TJ e mil ocupações, respectivamente.

	Cradle-to-gate Produção bagaço	Cradle-to-gate Produção enzimas	Cradle-to-gate Produção AS	Cradle-to-gate produção CalH	Cradle-to-gate produção DAP	gate-to-gate Geração interna	gate-to-gate Produção de vapor	gate-to-gate produção ethanol
Bagaço (Ton)	1	0	0	0	0	0	0	-0.007
Enzimas (kg)	0	1	0	0	0	0	0	-0.062
Ácido Sulfúrico(kg)	0	0	1	0	0	0	0	-0.174
Cal hidratada (kg)	0	0	0	1	0	0	0	-0.194
DAP (kg)	0	0	0	0	1	0	0	-0.013
Eletricidade renovável (KWh)	0	0	0	0	0	1	0	-0.619
Vapor interno (Kg)	0	0	0	0	0	0	1	-5.690
EtanolSG (lts)	0	0	0	0	0	0	0	1.000
Emprego (1000 ocupações)	1.64E-06	4.35E-09	4.47E-09	1.43E-09	4.38E-09	3.71E-10	2.67E-14	5.11E-10
CO <sub>2</sub> -equivalente (milhões Kg)	1.76E-05	2.46E-06	3.10E-07	9.70E-07	8.20E-07	3.97E-09	2.85E-13	0.00E+00
Consumo energético (TJ)	2.23E-04	1.13E-06	1.18E-05	4.70E-06	1.14E-05	5.20E-08	3.61E-12	0.00E+00

Figura 12 - ICV *cradle-to-gate* de processo do etanol derivado de bagaço

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: AS – processo ácido sulfúrico; CalH – processo cal hidratada; DAP – processo fósforo de diamônio.

**Transporte distribuição.** A base de dados do caminhão-tanque usado nesta análise vem do modelo global da base de dados do ILCD, no qual o transporte foi regionalizado por uma mudança de parâmetros como a utilização do diesel brasileiro B5, o tipo de rodovia transitada e a distância percorrida para chegar a um posto localizado na área central da capital de São Paulo, com produtividade de carga de 85%.

**Uso etanol.** Para o processo de final de vida do etanol, construiu-se um modelo de carro com dados médios obtidos dos relatórios de consumo de combustível e de emissões dos carros flex 1.0 das marcas Fiat, Chevrolet e Volkswagen. O coeficiente de emprego dessa etapa foi baseado no número de empregos por venda total em litros dos postos de combustível da Petrobras Distribuição para o ano 2007/2008, considerando que a geração de emprego direto dessa etapa está focalizada no serviço de venda de combustível no posto, assim, assume-se que todos os pontos de venda possuem a mesma estrutura tecnológica de geração de empregos.

Finalmente, nesta segunda etapa do modelo de ACV processo, o balanço ambiental e a soma econômica do ICV da operação do carro flex 1.0 médio no Brasil para percorrer um quilômetro com etanol derivado de bagaço ( $X^*$ ) é calculado pelo sistema matricial conformado pela matriz de fluxos físicos do ICV da produção do etanol (obtido da figura 11), o transporte de distribuição e o processo uso, pela respectiva matriz dos coeficientes ambientais e econômicos, e pelo vetor de unidade funcional (operando um carro flex 1.0 para percorrer um quilômetro com etanol derivado de bagaço); ver equação 68 e figura 13.

	cradle-to-gate produção ethanol	cradle-to-gate Transporte distribuição	gate-to-gate Uso carro flex 1.0
Etanol (lts)	1	0	-0.101
Transporte distribuicao (carga)	0	1	-0.101
USO carro flex (Km)	0	0	1
Emprego (1,000 ocupações)	1.313E-08	6.193E-11	1.054E-10
CO <sub>2</sub> -equiv (milhões Kg)	5.249E-07	3.446E-08	1.495E-07
Consumo energético (TJ)	4.700E-06	4.840E-07	0.000E+00

Figura 13 - ICV processo do uso do carro flex 1.0 operado com etanol de bagaço  
Fonte: Resultado da pesquisa.

A tabela 17 mostra as referências bibliográficas usadas na construção do inventário ICV de cada processo dentro da fronteira do sistema analisado.

Tabela 17 - Referências bibliográficas da construção dos respectivos ICVs dos insumos e dos processos principais para a obtenção dos balanços de emissão, consumo energético e emprego.

ICV processo (Berço-portão)	unidade de	Fluxo de referência	Ano de referência	Referências do ICV ambiental	Referências do ICV econômico
Bagaço		1 Ton	2005/2006	Macedo <i>et al.</i> (2008); Macedo <i>et al.</i> (2004)	Unica (2010); Dias de Morais <i>et al.</i> (2010)
Palha		1 Ton	2005/2006	Macedo <i>et al.</i> (2008); Macedo <i>et al.</i> (2004)	Unica (2010); Dias de Morais <i>et al.</i> (2010)
Enzimas		1 kg	2010	Hsu <i>et al.</i> (2010); Sheehan <i>et al.</i> (2004); Nielsen <i>et al.</i> (2006)	Novozymes (2010)
Fosfato diamônio		1 kg	2008	Ledgard <i>et al.</i> (2009)	Kulaif (2009)
Ácido sulfúrico		1 kg	n/a	ACC (2011)	Kulaif (2009); ANDA (2008)
Cal hidratada		1 kg	2007/2008	ILCD	APPC (2008)
Enxofre		1 kg	2007/2008	ACC (2011); ILCD	Kulaif (2009); REFAP (portal)
Eletricidade interna		1 KWh	2005	Walter e Ensinas (2010)	BEN (2010)
vapor interno		1 kg	2005	Walter e Ensinas (2010)	-
Etanol		1 litro	2005: ambiental; 2007: econômico	Gonzales-García <i>et al.</i> (2009); Sparati <i>et al.</i> (2005); Fu <i>et al.</i> (2003); Kadam (2002)	UNICA, MAPA; Dias de Morais <i>et al.</i> (2010)
Diesel		1 litro	2007/2008	ILCD	REFAP (portal)
Caminhão		Cargo	2007/2008	ILCD, Mercedes-Benz (portal)	ALL logística (portal)
Caminhao-tanque		Cargo	2007/2008	ILCD	ALL logística (portal)
Hidrelétrica		1 KWh		ILCD	ITAIPU (portal)
Distribuição		1 litro		-	Distribuição Petrobras (portal)

### 3.3.1.2 ACV Híbrido do etanol derivado de bagaço

Para a elaboração da análise híbrida integrada foi necessária a incorporação da base de dados do enfoque de insumo-produto na análise de processo anteriormente descrita. Essa integração tem como objetivo não delimitar as fronteiras de nosso estudo e considerar todos os setores que interagem no ciclo de vida do etanol SG, como acontece em uma real economia de mercado. A figura 14 mostra o novo sistema de fronteira.

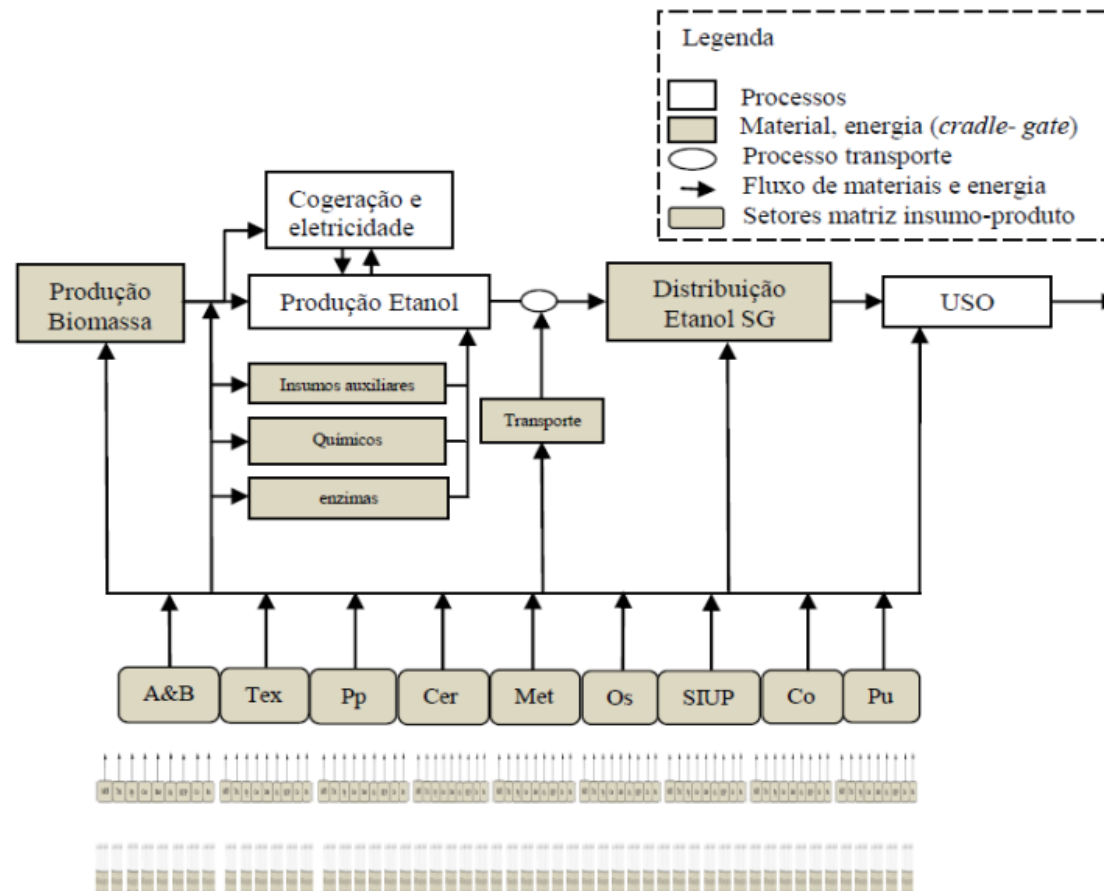


Figura 14 - Fluxograma de ciclo de vida do etanol de bagaço para uma análise híbrida integrada. Os processos de ciclo de vida incluem produção de combustível, distribuição e uso. Os módulos do berço-ao-portão para os principais insumos são incluídos no diagrama, bem como os módulos dos setores considerados do enfoque de insumo-produto.

Fonte: Elaboração própria

Abreviaturas: A&B – setor alimentos e bebidas; Tex – setor têxtil; Pp – setor papel e celulose; Cer – setor cerâmica; Met – setor metalúrgico; Os – setor “outros setores industriais”; SIUP – setor “serviço industrial de utilidade pública”; Co – setor “comércio e serviço”; Pu – setor público.

O novo sistema de fronteira esta estruturado por todos os setores da economia, em que se representa a interatividades setorial. A base de dados está formada por quadro matrizes integradas, onde a matriz de processo em unidades físicas (ver figs. 12 e 13) é conectada com a matriz de transações financeiras dos setores econômicos do enfoque de insumo-produto  $(\mathbf{I}-\mathbf{A})_{n \times n}$  mediante a matriz de unidades mistas que relaciona os setores da economia com os processos da análise de processo  $(\mathbf{C}^u)_{n \times m}$ , e a matriz de unidades mistas que relaciona a matriz de processos com os setores da economia  $(\mathbf{C}^d)_{m \times n}$ . A preparação respectiva à base de dados do enfoque de insumo-produto pode ser encontrada no capítulo 2 deste trabalho. Na equação 69 apresenta-se a nova matriz obtida da integração dos dois enfoques de inventário para o cálculo do balanço ICV energético, de emissões e a soma de emprego da operação de um carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço. A base de dados completa encontra-se no apêndice C3 e C4.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\tilde{\mathbf{A}} & -\mathbf{C}^d \\ -\mathbf{C}^u & \mathbf{I} - \mathbf{A} \end{bmatrix}^{-1} \quad (69)$$

Na matriz  $\mathbf{C}^u$  os fluxos de *commodities* dos setores do enfoque insumo-produto fluem para ser adicionados como insumos adicionais no processo físico, complementando assim o sistema de fronteira com dados inicialmente truncados. Como ilustrado na fig. 14, os setores do sistema insumo-produto considerados na matriz  $\mathbf{C}^u$  são: alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cerâmica, metalúrgica, outros setores industriais, SIUP, comércio e serviços, e público. Os setores de agricultura, mineração, energia, química, transporte, cimento não foram considerados porque eles estão já representados nos ICVs da análise de processo, e inseri-los na matriz poderia gerar uma contagem dupla. Para gerar a matriz  $\mathbf{C}^u$ , são colocados os coeficientes técnicos do enfoque de insumo-produto  $a_{ij}$  nos campos  $c^u_{ik}$  da matriz, onde  $i$  é um setor do enfoque insumo-produto e  $j$  é o setor com correspondência no processo  $k$  da matriz de processo. Mas os novos elementos em  $\mathbf{C}^u$  devem ser ponderados com os preços unitários de cada processo/produto  $k$ , como mostra a equação 70:

$$c^u_{ik} = \left( \frac{\text{preço produtor } k \text{ (R\$)}}{\text{volume } k \text{ (kg)}} \right) * a_{ij} \quad (70)$$

Assim, para evitar dupla contagem, todos os insumos já capturados na matriz de processo são assumidos como zero no vetor coluna resultante  $c_{ik}$ . A tabela 18 mostra os preços unitários assumidos dos processos/produtos da matriz de processos usados para a ponderação dos coeficientes  $a_{ij}$ .

Da mesma maneira, a matriz  $C^d$  pode ser usada para representar o fluxo em unidades físicas de bens produzidos por um processo específico para o sistema de insumo-produto. Nosso sistema considera a fornecimento de energia bioelétrica produzida na usina de etanol lignocelulósico à rede externa (SIUP) e ao setor Etanol FG.

Tabela 18 - Referência para base de cálculo do preço unitário dos processos/produtos

Produto	Preço unitário (R\$)	Referência para base de cálculo
Bagaço (Ton)	7,710	OECD/IEA (2010)
Palha (Ton)	7,710	OECD/IEA (2010)
Eletricidade (KWh)	0,012	Itaipu (portal);
Vapor (kg)	0,009	Eletronorte (portal);
Enzimas (kg)	3,254	Novozymes (2011); Fu <i>et al.</i> (2003); Macleon e sparati (2009)
Ácido sulfúrico (kg)	0,514	MAPA (portal); ANDA (portal); Kulaif (2009)
Cal hidratada (kg)	0,280	APPC (2008)
Fósforo de diamônio (kg)	1,028	ANDA (portal); Kulaif (2009)
Etanol (lts)	0,719	UNICA (portal)
Transporte (carga)	0,00015	All logística (portal)
Uso carro (km rodados)	0,380	Carros na web (portal); Fiat (portal); Chevrolet (portal); Woskwagen (portal)

### 3.3.2 Resultados da ACV Híbrida

Os efeitos ambientais e econômicos do ciclo de vida da operação de um carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço foram estimados por uma ACV híbrida integrada. Tal análise inclui a emissão de CO<sub>2</sub> devido à queima de biocombustível e ao consumo hidrelétrico, o combustível consumido em unidade energética e a geração de emprego no ciclo de vida *cradle-to-grave*, avaliados pelos quilômetros rodados. Os resultados da análise híbrida são apresentados na tabela 19, onde a contribuição dos produtos presentes na matriz de processos são detalhados e a contribuição dos setores da economia representados no sistema insumo-produto são agregados em restante da economia.

Tabela 19 - Resultados do ciclo de vida *cradle-to-grave* da operação do carro flex 1.0

Setor	kgCO <sub>2</sub>	Consumo Energético (MJ)	Geração emprego (ocupações)	
Produção Etanol SG	26,510	237,350	5,42E-04	/500 km rodados
Bagaço	5,966	75,429	2,05E-04	/500 km rodados
Enzimas	7,661	3,516	1,35E-05	/500 km rodados
Ácido sulfúrico	2,726	103,774	3,93E-05	/500 km rodados
Cal hidratada	9,515	46,103	1,40E-05	/500 km rodados
DAP	0,527	7,333	2,81E-06	/500 km rodados
Eletricidade interna	0,125	1,637	4,31E-06	/500 km rodados
Vapor interno	0,000	0,001	2,83E-09	/500 km rodados
Etanol	-	-	2,64E-04	/500 km rodados
Transporte distribuição	1,7402	24,442	3,13E-06	/500 km rodados
Uso carro flex 1.0	74,750	-	5,27E-05	/500 km rodados
Restante da economia	27,220	139,990	3,062E-03	/500 km rodados
<b>Total</b>	<b>130,220</b>	<b>401,780</b>	<b>3,66E-03</b>	<b>/500 km rodados</b>

Fonte: Resultados da pesquisa.

Abreviaturas: DAP – Fosfato de diamônio.

Na figura 15 se comparam os resultados do ciclo de vida da operação do carro flex por método de cálculo, ACV híbrida integrada e ACV de processos, e por principais insumos. A variação dos resultados com a ACV híbrida é de 26,4% para as emissões de kg CO<sub>2</sub>, de 53,5% para o consumo energético, e de 422% para o fator de geração de emprego.

Nos anexos A 2.5 e A2.6, ilustra-se a identificação a parcela de contribuição dos processos do ACV de processo *cradle-to-grave* correspondentes às emissões de CO<sub>2</sub> e ao consumo energético segundo o método CML 2001 e ao valor calorífico líquido, respectivamente.



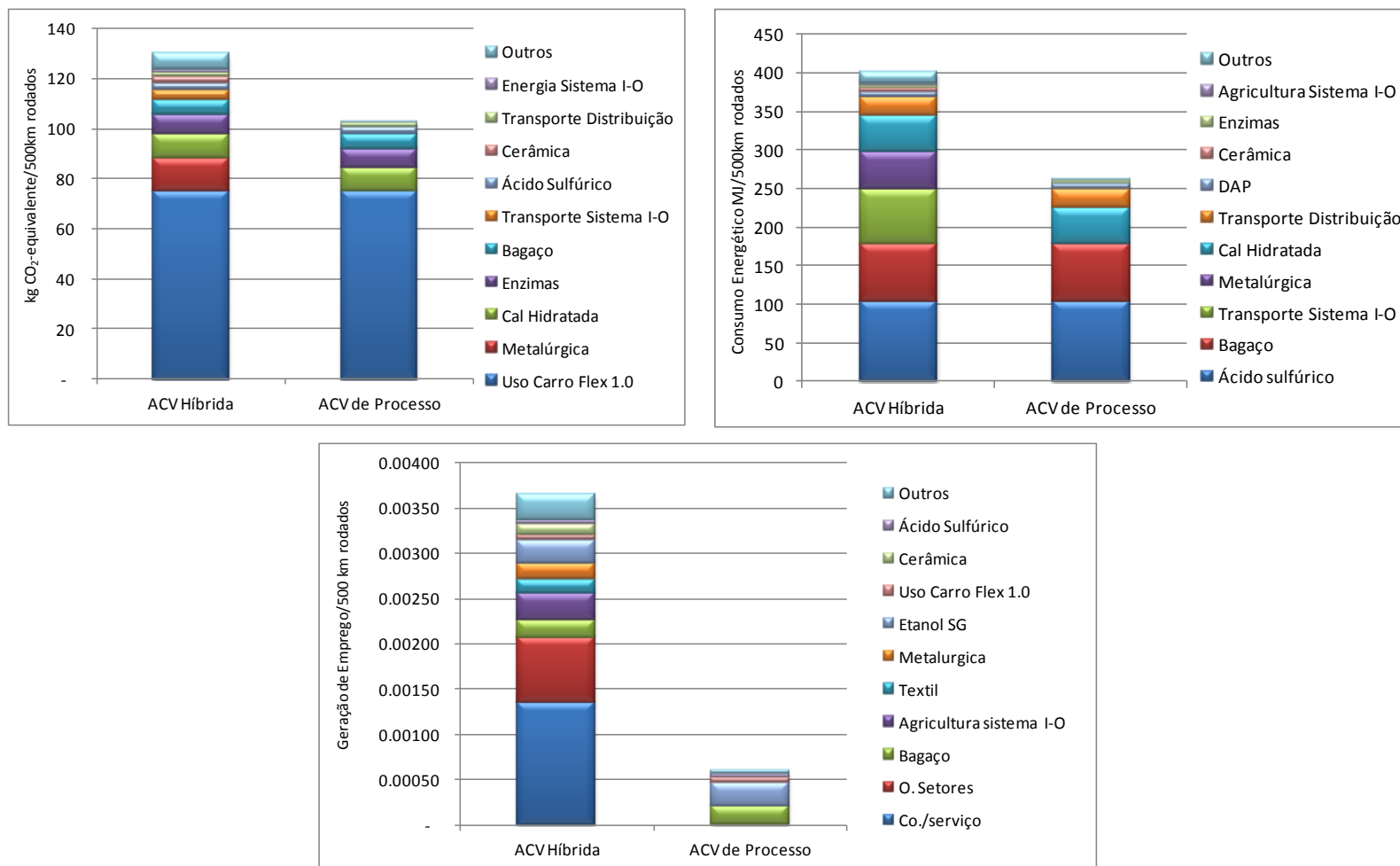


Figura 15 - Resultado para as emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético e geração de emprego dos principais insumos do ciclo de vida da operação de um carro flex 1.0 com etanol de bagaço

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviatura: O.setores – setor “outros setores industriais”; Co./serviço: setor “comércio e serviço”; DAP – processo fosfato de diamônio; I-O sistema insumo-produto.

**Emissões de CO<sub>2</sub>.** O ciclo de vida *cradle-to-grave* do Etanol SG resulta em 0,115 kgCO<sub>2</sub>/MJ etanol. O total de emissões de CO<sub>2</sub> referente à matriz de processo analisando a operação do carro flex por 500 km é de 103 kg CO<sub>2</sub> ou 79% do total de emissões da análise híbrida. Os setores do sistema de insumo-produto contabilizam 27,2 kg CO<sub>2</sub> do total de emissões do ciclo de vida. Estes números demonstram a relevância da descrição detalhada das atividades da matriz de processo, pois elas tendem a representar uma percentagem significativa das emissões. Isto porque a matriz de processo descreve os processos *foreground* ou de primeiro plano, ou seja, aqueles que influenciam diretamente no processo produtivo analisado. Já as atividades da matriz C<sup>u</sup> deveriam descrever, somente, os processos *background*, ou processos de segundo plano.

O processo uso do carro flex 1.0 identificou-se como o principal contribuidor de emissões com 74,8 kg CO<sub>2</sub>, representando 57% do ciclo de vida total. Por meio deste resultado ficou evidenciado a importância de incluir na análise o processo “uso”, que por suas variáveis físicas, a maioria das vezes é difícil de modelar com enfoques econômicos. Portanto, a descrição detalhada do processo ajudou a identificá-lo como principal emissor de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida do etanol derivado de bagaço. Assim, como indicado pelo objetivo do desenvolvimento sustentável, mudanças devem ser feitas não, somente, nos padrões de produção, mas também nos padrões de consumo.

Cabe destacar que, do sistema de insumo-produto, o setor metalúrgico é o maior contribuidor com 13,6 kg CO<sub>2</sub> devido a sua relevância no sistema produtivo intersetorial, ele pode ser relacionado com os intensivos serviços de instalação e manutenção que acontecem dentro de uma usina (NEVES *et al.*; 2010), ou com a forte presença de peças na produção e manutenção do carro flex 1.0. Segundo Ribeiro *et al.* (2007), as principais peças num carro leve são de aço e de plástico.

Insumos diretos na produção de etanol, como a cal hidratada, as enzimas e a parte agrícola do bagaço aparecem como contribuidores relevantes no desempenho ambiental do etanol, pelo intensivo uso de combustível fóssil e de energia elétrica no processo produtivo dos insumos. Cabe ressaltar que, dentro desses processos, o transporte incluído equivale em média 7% das emissões totais. Os resultados da análise desenvolvida por Mac Lean e Sparati (2009) confirmam que no processo de conversão de etanol, os químicos que mais contribuem com as emissões de CO<sub>2</sub> são cal hidratada, enzimas e ácido sulfúrico. Da mesma maneira, Fu *et al.* (2003) e Mac Lean e Sparati (2009) confirmam que a parte agrícola da matéria-prima é importante emissor no ciclo de vida do etanol de segunda geração. Como resultado, o ciclo de vida *cradle-to-grave* contribuiria no total com 130 kg CO<sub>2</sub>/500 km rodados

Por outro ângulo, quando avaliamos somente o ciclo de vida *cradle-to-gate* da produção de 50,5 litros de etanol derivado de bagaço, a contribuição total seria de 29 kg CO<sub>2</sub>, representando aproximadamente 20% do total de emissões do ciclo de vida *cradle-to-grave*. Esta análise identificou emissões de 0,0257 kg CO<sub>2</sub>/MJ etanol, sendo 77% menos dos kgCO<sub>2</sub>/MJ etanol encontrados na análise *cradle-to-grave*, o que ressalta a importância da definição do objetivo e das fronteiras do estudo para evitar interpretações erradas dos resultados.

O detalhamento das emissões para a análise de 500 km rodados com etanol e a subanálise *cradle-to-gate* da produção de 50,5 litros de etanol é ilustrado na tabela 20, onde são estimadas, listadas e hierarquizadas mediante uma análise *structural path*, as dez principais rotas de fornecedores que contribuem com as emissões de CO<sub>2</sub>. Para esse fator ambiental, as dez primeiras rotas equivalem a 89,5% e 94,3% das emissões totais para a ACV *cradle-to-grave* e *cradle-to-gate*, respectivamente.

Tabela 20 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com as emissões de CO<sub>2</sub> da produção e uso do etanol derivado de bagaço.

Rank	Descrição da rota	Kg CO <sub>2</sub>	Ordem da rota	%
500 km rodados em carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço				
1	uso carro flex com etanol SG	74,75	0	57,40
2	uso carro flex com etanol SG> Etanol SG	26,51	1	20,34
3	uso carro flex com etanol SG> Metalúrgico	8,30	1	6,38
4	uso carro flex com etanol SG> Cerâmica	1,79	1	1,38
5	uso carro flex com etanol SG> Transporte distribuição	1,74	1	1,34
6	uso carro flex com etanol SG> Outros setores>Metalúrgico	1,31	2	1,00
7	uso carro flex com etanol SG> Outros setores>Transporte	0,60	2	0,46
8	uso carro flex com etanol SG> Celulose e papel	0,55	1	0,43
9	uso carro flex com etanol SG> Metalúrgica>Transporte	0,54	2	0,42
10	uso carro flex com etanol SG> Outros setores industriais	0,42	1	0,32
	Restante da economia	13,71	1,2,3	10,5
	<b>TOTAL</b>	<b>130,22</b>		<b>100</b>
Produção de 50,5 litros de etanol derivado de bagaço				
1	Produção etanol SG>Cal hidratada	9,42	1	32,77
2	Produção etanol SG>Enzimas	7,59	1	26,38
3	Produção etanol SG>Bagaço	5,91	1	20,54
4	Produção etanol SG>Acido Sulfúrico	2,70	1	9,39
5	Produção etanol SG>Fosfato Diamônio	0,52	1	1,81
6	Produção etanol SG>Metalúrgico	0,27	1	0,95
7	Produção etanol SG>Alimentos e Bebidas>Alf	0,25	2	0,85
8	Produção etanol SG>Alimentos e Bebidas	0,22	1	0,75
9	Produção etanol SG>Eletricidade interna	0,12	1	0,43
10	Produção etanol SG> Enzimas>Papel e celulose	0,11	2	0,37
	Restante da economia	1,64	1,2,3	5,90
	<b>TOTAL</b>	<b>28,75</b>		<b>100</b>

Fonte: resultado da pesquisa.

Abreviaturas: Alf – setor agricultura, silvicultura e pesca.

A análise *structural path* da ACV híbrida *cradle-to-grave* para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol SG estimou, listou e hierarquizou 400 rotas de fornecedores que equivalem a

93% do resultado total. Do mesmo modo, na SPA da ACV híbrida *cradle-to-gate* para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> do Etanol SG foram estudadas 458 rotas de fornecedores que significam mais do 96% do resultado final. Em ambas as análises, as rotas consideradas foram de zero, um, dois até o terceiro grau, no nível de detalhamento. As 50 principais rotas de fornecedores para essa categoria de impacto são apresentadas nos apêndices C5 e C6 desta tese.

**Consumo energético.** O ciclo de vida *cradle-to-grave* do etanol derivado de bagaço tem um consumo energético total de 401,78 MJ/500 quilômetros rodados. A contribuição dos processos é de aproximadamente 65% do total do consumo energético, sendo o ciclo de vida da produção de etanol a principal consumidora energética, com 237MJ ou 59% do ciclo de vida completo. Essa significativa contribuição está relacionada com o alto consumo de combustível no processo de ciclo de vida do bagaço, do ácido sulfúrico, e da cal hidratada. Para Mac Lean e Sparati (2009), o principal consumo energético do ciclo de vida do etanol lignocelulósico vem da produção da biomassa e da produção dos químicos, o que confirma os resultados aqui encontrados. A agregação da contribuição dos setores do sistema de insumo-produto tem uma parcela de 35%, sendo relevante na contabilidade total do consumo energético do ciclo de vida.

Tabela 21 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com o consumo energético da produção e uso do etanol derivado de bagaço.

Rank	Descrição da rota	MJ	Ordem da rota	%
500 km rodados em carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço				
1	uso carro flex com etanol SG >SG produção	237,35	1	59,07
2	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia	30,56	1	7,61
3	uso carro flex com etanol SG >Transporte Distribuição	24,44	1	6,08
4	uso carro flex com etanol SG >Outros setores>Transporte	10,56	2	2,63
5	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Transporte	9,56	2	2,38
6	uso carro flex com etanol SG >Comércio e serviço>Transporte	6,43	2	1,60
7	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Metalurgia	4,81	2	1,20
8	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica	3,40	1	0,85
9	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Transporte	1,84	2	0,46
10	uso carro flex com etanol SG>O.setores>Metalurgia>Transporte	1,50	3	0,37
	Restante da economia	71,34	1,2,3	17,76
	<b>TOTAL</b>	<b>401,79</b>		<b>100</b>
Produção de 50,5 litros de etanol derivado de bagaço				
1	Produção etanol SG >Acido sulfúrico	102,75	1	41,342
2	Produção etanol SG >Bagaço	74,68	1	30,050
3	Produção etanol SG >Cal hidratada	45,65	1	18,367
4	Produção etanol SG >Fosfato Diamônio	7,26	1	2,921
5	Produção etanol SG >Enzimas	3,48	1	1,401
6	Produção etanol SG >Eletricidade interna	1,61	1	0,648
7	Produção etanol SG >Metalúrgico	1,00	1	0,403
8	Produção etanol SG >Alimentos e bebidas>Transporte	0,66	2	0,268
9	Produção etanol SG >Comércio e serviço>Transporte	0,45	2	0,181
10	Produção etanol SG >Outros setores industriais>Transporte	0,34	2	0,135
	Restante da economia	10,64	1,2,3	4,28
	<b>TOTAL</b>	<b>248,52</b>		<b>100</b>

Fonte: Elaboração própria.

A análise *structural path* da ACV híbrida *cradle-to-grave* estimou, listou e hierarquizou 562 rotas de fornecedores, que correspondem aproximadamente a 90% do resultado total. Da mesma maneira, na ACV híbrida *cradle-to-gate* foram estudadas 458 rotas de fornecedores que representa mais de 96% do valor total do resultado final. Em ambas as análises, as rotas consideradas foram de zero, um, dois até o terceiro grau, no nível de detalhamento. As 50 principais rotas de fornecedores para esta categoria de impacto são identificadas nos apêndices C7 e C8 desta tese.

Na tabela 21 se apresentam, em forma hierarquizada, as dez mais influentes rotas de fornecedores da análise de ciclo de vida completa, e da análise *cradle-to-gate* da produção de 50,5 litros de etanol para o consumo energético. As dez rotas representam para o ciclo de vida *cradle-to-grave* 82% do total do consumo energético, e as rotas da análise *cradle-to-gate* correspondem aproximadamente a 96% do total do consumo energético.

**Geração de empregos.** Diferentemente das categorias de impacto anteriormente analisadas, os resultados específicos da matriz de processo na categoria de geração de empregos representaram somente 16% da geração do emprego total do ciclo de vida *cradle-to-grave*. Já o agregado dos setores do sistema de insumo-produto corresponde a uma parcela de 84% do total da geração de empregos, devido especialmente, à grande contribuição do setor de comércio e serviços e do setor de outros setores industriais, representando 36% e 19% do total agregado, respectivamente.

Como esperado pela estrutura de emprego do setor alcooleiro, as etapas industrial e agrícola do etanol derivado de bagaço são as maiores geradoras de empregos representadas na matriz de processo, correspondendo a 7,2% e 5,6% do ciclo de vida completo da análise híbrida, respectivamente. Dias de Moraes *et al.* (2010) apontam que, para 2007, segundo dados do PNAD e UNICA, o total de empregados trabalhando na etapa agrícola da cana-de-açúcar direcionada para a produção de etanol de primeira geração representava 71% do total de empregados contratados nas etapas agrícola e industrial juntas. Portanto, a relevância da geração de emprego na etapa agrícola do bagaço de cana-de-açúcar é visualizada também nos resultados deste exercício, com a ressalva que a etapa industrial do Etanol SG cria mais emprego do que a parcela referente à produção agrícola do bagaço, posição contrária à atual, onde o setor agrícola cria mais empregos que a etapa industrial de Etanol FG. Cabe lembrar que somente 25% da mão de obra que trabalha para produzir uma tonelada de cana-de-açúcar contribui com a produção do bagaço, e supõe-se que a etapa industrial do etanol derivado de bagaço possui a mesma estrutura de geração de emprego que o setor Etanol FG.

De acordo com Dias de Moraes *et al.* (2010), a escolaridade média dos trabalhadores da etapa agrícola da cana-de-açúcar em 2007 foi de 4,2 anos. Já o processo industrial do etanol de cana-de-açúcar gera empregos com nível de escolaridade superior, tendo em 2007 a média de 7,7 anos de escolaridade. Logo, a produção de etanol derivado de bagaço será responsável pela criação direta de mais empregos qualificados do que ocupações de baixo nível de escolaridade. E provocará indiretamente a oferta de empregos em indústrias de alta qualificação, como a do setor de enzimas para biocombustíveis avançados, que se encontra em etapa de desenvolvimento no país.

A análise *structural path* da ACV híbrida *cradle-to-grave* estimou, listou e hierarquizou 1.354 rotas de fornecedores. Da mesma maneira, na ACV híbrida *cradle-to-gate*, para avaliar a geração de empregos na produção de 50,5 litros de etanol SG, foram estudadas 827 rotas de fornecedores. Em ambas as análises, as rotas consideradas foram de zero, um, dois até o terceiro grau, no nível de detalhamento. As 50 principais rotas são apresentadas nos apêndices C9 e C10. A tabela 22 estima, lista e hierarquiza as dez principais rotas de fornecedores que contribuem com a geração de emprego no ciclo de vida *cradle-to-grave* do etanol derivado de bagaço.

Tabela 22 - As principais rotas de fornecedores que contribuem com a geração de emprego no ciclo de vida do etanol SG.

Rank	Descrição da rota	ocupações	Ordem da rota	%
500 km rodados em carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço				
1	uso carro flex com etanol SG>Comércio e serviço	6,91E-04	1	18,89
2	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG	5,42E-04	1	14,82
3	uso carro flex com etanol SG>Outros Setores industriais	5,18E-04	1	14,16
4	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Comércio e serviço	1,09E-04	2	2,97
5	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico	1,01E-04	1	2,76
6	uso carro flex com etanol SG>Textil	9,72E-05	1	2,66
7	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica	9,33E-05	1	2,55
8	uso carro flex com etanol SG	5,27E-05	0	1,44
9	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>Comércio e serviço	4,89E-05	2	1,33
10	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Comércio e serviço	4,20E-05	2	1,15
	Restante da economia	1,4E-03	1,2,3	38,00
	<b>TOTAL</b>	<b>3,7E-03</b>		<b>100</b>
Produção de 50,5 litros de etanol derivado de bagaço				
1	Produção etanol SG	2,63E-04	0	28,40
2	Produção etanol SG >Bagaço	2,05E-04	1	22,10
3	Produção etanol SG >Comércio e serviço	4,89E-05	1	5,27
4	Produção etanol SG >Enzimas>Comércio e serviço	4,26E-05	2	4,59
5	Produção etanol SG >Ácido Sulfúrico	3,93E-05	1	4,24
6	Produção etanol SG >Alimentos e bebidas>AFP	3,39E-05	2	3,66
7	Produção etanol SG > Ácido Sulfúrico >Comércio e serviço	1,78E-05	2	1,92
8	Produção etanol SG > Outros Setores Industriais	1,67E-05	1	1,80
9	Produção etanol SG > Cal Hidratada	1,40E-05	1	1,51
10	Produção etanol SG > Enzimas	1,35E-05	1	1,46
	Resto da economia	2,4E-04	1,2,3	26
	<b>TOTAL</b>	<b>9,37E-04</b>		<b>100</b>

Fonte: Elaboração própria.

### 3.3.3 Análise de sensibilidade

As incertezas dentro da modelagem ACV híbrida são formadas por um número de fatores incluindo as imprecisões das fontes dos dados, balanço, alocação, suposição de proporcionalidade e homogeneidade, agregação setorial e regional, discrepâncias temporais, representatividade dos dados do modelo, taxa de câmbio, e conversão de preços (WEIDEMANN *et al*; 2011). Neste estudo de caso, considera-se que a ponderação dos elementos da matriz  $C^u$  e a agregação do setorial do enfoque insumo-produto pode constituir a principal fonte de incertezas. Como a ponderação de cada elemento  $c^u$  depende dos preços de produção de cada produto da matriz de processo e como os preços reais de alguns insumos relacionados à produção de etanol derivado de bagaço ainda não estão estabelecidos no mercado, esta análise de sensibilidade tenta demonstrar os efeitos de uma variação dos preços em  $\pm 20\%$  nos resultados finais das três categorias de impacto analisadas.

A avaliação do ciclo de vida *cradle-to-grave* do etanol derivado de bagaço mostra maior taxa de sensibilidade do que a avaliação *cradle-to-gate* do etanol, para todas as categorias analisadas, como exposto na tabela 23. Isto porque a participação dos setores do sistema de insumo-produto, afetados pela variação nos preços, é maior na ACV da operação do carro flex do que da ACV da produção do etanol.

Tabela 23 - Efeito da variação dos preços usados nas categorias de impactos estudadas

	Emissões kg CO <sub>2</sub>	Consumo energético MJ	Geração de emprego
<b>ACV híbrida (500 km)</b>	<b>130,22</b>	<b>401,785</b>	<b>0,00366</b>
Preços +20%	135,66	42,78	0,00427
Preços -20%	124,77	373,78	0,00305
Variação em %	±4,18	±6,97	±16,73
<b>ACV híbrida (50,5 litros)</b>	<b>28,75</b>	<b>248,52</b>	<b>0,00094</b>
Preços +20%	29,54	253,66	0,00102
Preços -20%	28,53	248,36	0,00086
Variação em %	±1,74%	±1,05%	±8,42%

Fonte: resultados da pesquisa

Pode ser observado que a variação dos resultados na categoria de emissões e de consumo energético é menor se comparada com a dos resultados da categoria de geração de emprego. Este comportamento é explicado pela menor contribuição dos insumos do sistema de insumo-produto nos resultados das categorias de impacto ambiental e pelo fato de que somente esses insumos são afetados pela variação nos preços. Entretanto, a contribuição na geração de empregos dos insumos do sistema insumo-produto, especialmente do setor de comércio e serviço e de outros setores industriais, é significativa para a categoria, como

mostrado na tab. 23<sup>14</sup>. Por isso, ao não incluirmos a relação tecnológica de insumos do setor comércio e serviços na matriz de processo para a análise de geração de empregos no ciclo de vida, ela deve ser computada pelos coeficientes da matriz  $C^u$ .

Uma segunda análise de sensibilidade foi realizada para eliminar as incertezas sobre a representatividade dos dados usados para o resultado final da categoria de geração de emprego. Isto quer dizer, identificar se todos os coeficientes da matriz  $C^u$  foram relevantes para análise de geração de emprego. Para esta análise de sensibilidade foram considerados mais elementos linhas diferentes do zero nas colunas da matriz  $C^u$ , para eliminar qualquer incerteza relacionada ao processo de decisão dos setores adicionados originalmente na matriz  $C^u$ . O processo de decisão foi baseado, principalmente, na eliminação das linhas dos setores já contabilizados no processo físico delimitados na fronteira do sistema, para evitar a dupla contagem especialmente dos fatores ambientais.

Para identificar quais setores seriam adicionados na nova matriz  $C^u$ , foram considerados os setores do sistema insumo-produto que representam os insumos da matriz de processo que por falta de informação não foram incluídos no cálculo original do coeficiente de emprego. A seguir apresenta-se a lista da base de cálculo do coeficiente de emprego:

1. Processo bagaço: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego da etapa agrícola, do transporte interno e do diesel usado. Na matriz  $C^u$  foram adicionados os elementos ponderados do setor de mineração e o setor de químicos;
2. Processo enzimas: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego da produção agrícola e industrial, transporte, diesel e hidrelétrica. Na matriz  $C^u$  foram incorporados os elementos ponderados do setor de mineração, química e cimento;
3. Processo ácido sulfúrico: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego da produção de enxofre, ácido sulfúrico, transporte, diesel e hidrelétrica. Na matriz  $C^u$  foram adicionados os elementos ponderados do setor de agricultura, cana-de-açúcar, mineração, outros químicos e cimento;
4. Processo cal hidratada: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego da mineração, produção de cal hidratada, transporte e diesel. Na matriz  $C^u$  foram incorporados os elementos ponderados do setor de agricultura, cana-de-açúcar, mineração, outros químicos e cimento;

---

<sup>14</sup> De acordo com o Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), em 2009, o setor de serviços correspondeu a 68,5% do PIB Brasileiro, quando medido pelo valor adicionado, e no ano 2008, o setor de comércio e serviços respondeu por 77,3% dos empregos formais do país, representando 54,6% da população economicamente ativa.



5. Processo DAP: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego da produção, transporte e diesel. Na matriz  $C^u$  foram somados os elementos ponderados do setor de agricultura, cana-de-açúcar, mineração, outros químicos e cimento;
6. Processo eletricidade interna: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego do processo bagaço e palha, diesel. Na matriz  $C^u$  foram incorporados os elementos ponderados do setor de mineração, químicos, outros químicos e cimento;
7. Processo vapor interno: o coeficiente de emprego original abrange a relação de emprego do processo bagaço e palha, diesel. Na matriz  $C^u$  foram incluídos os elementos ponderados do setor de mineração, químicos, outros químicos e cimento;
8. Processo produção etanol: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego do processo bagaço e palha, químicos, outros químicos, diesel, transporte, diesel. Não foram adicionados elementos da matriz  $C^u$ ;
9. Processo transporte distribuição: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego do processo transporte e diesel. Na matriz  $C^u$  foram somados os elementos ponderados do setor de agricultura, mineração, químicos, outros químicos e cimento;
10. Processo uso carro flex: o coeficiente de emprego original inclui a relação de emprego do posto distribuidor de combustível. Na matriz  $C^u$  foram adicionados os elementos ponderados do setor de agricultura, cana-de-açúcar, mineração, químicos, outros químicos e cimento;

Os resultados desta análise mostram que, ao completar o fornecimento de insumos dos produtos da matriz de processo com as relações intersetoriais do sistema de insumo-produto mediante a incorporação dos elementos da matriz  $C^u$  não considerados na avaliação de ciclo de vida original, a variação dos resultados da geração de emprego aumentaria em aproximadamente 5% para a avaliação do ciclo vida *cradle-to-grave*. Já para a avaliação de ciclo de vida *cradle-to-gate*, a variação seria quase 7%. Logo, não se observa um grau de sensibilidade significativa nos resultados ao completar os elementos na matriz  $C^u$  para a geração de emprego. Os respectivos resultados desta análise são mostrados na tabela 24.

Tabela 24 - Mudança na estrutura tecnológica de insumos para consolidação do balanço de geração de emprego no ciclo de vida

Caraterísticas	Geração de emprego
<b>ACV híbrida (500 km)</b>	<b>0,00366</b>
Máximo de insumos	0,00384
Varição em %	+4,94
<b>ACV híbrida (50,5 litros)</b>	<b>0,00094</b>
Máximo de insumos	0,00100
Varição em %	+6,73

Fonte: resultado da pesquisa.

Este resultado enfatiza a relevância do setor de comércio e serviço na geração de emprego no ciclo de vida da operação do carro flex 1.0 com etanol SG. Por último, para confirmar a importante contribuição dos insumos do setor de comércio e serviço em esta avaliação de ciclo de vida, realiza-se uma análise simples baseada no enfoque de “perda do setor” usado na análise de impacto do enfoque de insumo-produto. Uma das maneiras de mensurar o impacto na geração de emprego de um setor específico é assumir que o setor em questão desaparece da estrutura tecnológica de insumos, quer dizer, ele deixa de ser considerado na análise, e assim, calcula-se a mudança na geração de emprego no ciclo de vida antes e depois do fechamento produtivo do setor (VALADKHANI, 2003; WEST, 1999).

A eliminação da estrutura tecnológica de insumos do setor de comércio e serviço do sistema de insumo-produto da matriz  $C^u$  teve como resultado a redução do 27% do total da geração de emprego no ciclo de vida *cradle-to-grave*. Já para a análise *cradle-to-gate*, a redução na geração de emprego no ciclo de vida foi de aproximadamente 18%. Os resultados da análise “perda do setor” no ciclo de vida para todas as categorias analisadas neste exercício são mostradas na tabela 25.

Tabela 25 - Análise “perda do setor” no ciclo de vida para consolidar a contribuição do setor comércio e serviço

	Emissões kg CO <sub>2</sub>	Consumo energético MJ	Geração de emprego
<b>ACV híbrida (500 km)</b>	<b>130,22</b>	<b>401,785</b>	<b>0,00366</b>
Análise perda do setor	128,60	387,60	0,0026
Variação em %	-1,24	-3,53	-27,60
<b>ACV híbrida (50,5 litros)</b>	<b>28,75</b>	<b>248,52</b>	<b>0,00094</b>
Análise perda do setor	29,07	251,98	0,00077
Variação em %	+0,12	+0,39	-17,90

Fonte: resultado da pesquisa.

Observa-se, também, que a contribuição do setor “comércio e serviços” para os resultados das categorias ambientais é insignificante para as duas ACV híbridas deste estudo. Como resultado, as atividades econômicas referentes à prestação de serviço do setor “comércio e serviços” ao uso ou produção de etanol não consomem combustível suficiente para contribuir significativamente nas emissões de CO<sub>2</sub> e no consumo energético do ciclo de vida do etanol. Assim, sua eliminação não estrutura econômica não altera os resultados ambientais desta análise. Já para a categoria de geração de emprego, o setor tem uma contribuição relevante no ciclo de vida do etanol. A inclusão detalhada da participação do processo “comércio e serviços” na matriz de processo pode favorecer com a precisão dos resultados da geração de emprego no ciclo de vida da operação do carro flex e a produção do Etanol SG.

### 3.3.4 Considerações finais da ACV híbrida

A nova tendência mundial energética em tecnologias avançadas de biocombustíveis, como os de segunda geração ou derivados de biomassa lignocelulósica, trouxe consigo vários estudos de ACV para analisar o real desempenho ambiental das diferentes matérias-primas lignocelulósicas potenciais. Neste estudo analisou-se a *performance* econômica e ambiental da operação de um carro flex 1.0 com etanol derivado de bagaço mediante uma ACV híbrida integrada, que incorpora bases de dados de inventários de ciclo de vida consolidadas com a base de dados do enfoque de insumo-produto, reduzindo, assim, qualquer incompletude dos dados inerentes aos inventários de ciclo de vida de processos, e detalhando de maneira sólida, as características setoriais agregadas na base de dados do enfoque insumo-produto.

Com a regionalização de alguns ICVs de processo em conjunto com a incorporação da matriz de insumo-produto brasileira, tentou-se representar o panorama real brasileiro para os impactos das categorias de emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético e geração de emprego no potencial ciclo de vida do uso do etanol SG.

Os resultados apontam o processo de uso de carro flex 1.0 como o maior responsável pelas emissões de CO<sub>2</sub>. Os principais insumos da produção de etanol: cal hidratada, bagaço, enzimas, ácido sulfúrico, resultaram também como importantes emissores e consumidores energéticos no ciclo de vida. Já para a categoria de geração de emprego, os insumos provenientes do sistema de insumo-produto tiveram um papel significativo, especialmente, o setor de comércio e serviço, confirmando, assim, sua relevância no desempenho econômico do Brasil.

A geração de empregos no conjunto de processos diretamente relacionados à produção de etanol cria a segunda maior taxa de emprego. Essa geração é distribuída na produção de etanol, bagaço e enzimas. A identificação do setor de enzimas para biocombustíveis avançados como expressivo gerador de emprego no ciclo de vida do etanol traz consigo um resultado importante para suportar ações que estimulem o desenvolvimento científico e tecnológico desta nova atividade econômica, pois além de importante geradora de empregos, ela é um ponto focal para criar trabalhos qualificados, como apontado na literatura de biocombustíveis de segunda geração.

Cabe destacar que o processo bagaço foi relevante em todas as categorias de impacto analisadas neste ciclo de vida. Portanto, efetivas ações na etapa agrícola do bagaço – produção de cana-de-açúcar – refletem, significativamente, no desempenho econômico e ambiental do ciclo de vida do uso do Etanol SG.

Como resultado, quando se analisa a sustentabilidade do setor Etanol SG, não pode ser observado somente o desempenho econômico e ambiental do processo produtivo, mas também a *performance* da cadeia de fornecedores completa e desagregada, em uma perspectiva de ciclo de vida. A identificação da contribuição individual de cada insumo no desempenho completo do Etanol SG faz com que medidas específicas possam ser tomadas em cada processo do ciclo de vida, para chegar assim, à sustentabilidade, e conseqüentemente, à competitividade do Etanol SG brasileiro no mercado energético internacional e nacional. A competitividade esperada do setor está baseada nos princípios da sustentabilidade, que incluem ter atividades agrícolas mais sustentáveis, desenvolver tecnologias mais limpas nos setores produtivos, usar recursos energéticos adequados para as condições locais, reduzir as emissões e reusar materiais em toda a cadeia produtiva, além de gerar empregos.

### 3.4 Considerações finais dos estudos de caso

Neste capítulo foram aplicadas três técnicas analíticas diferentes para estudar o desempenho econômico e ambiental do setor hipotético Etanol SG. Como primeira análise foi estudado o desempenho econômico e ambiental da economia brasileira para dois diferentes cenários de exportação de etanol; o cenário *baseline* com exportação de etanol derivado de cana-de-açúcar, e o cenário I, em que o setor Etanol SG é incorporado na estrutura econômica, exclusivamente, para exportação. Assim, depois de conhecer o panorama macroeconômico do setor, foram identificadas, estimadas e hierarquizadas as diferentes rotas de fornecedores que influenciariam com o desempenho econômico e ambiental do setor mediante dois enfoques com diferentes níveis de detalhamento, agregação setorial e fronteira do sistema tecnológico. O primeiro enfoque o “*structural path* do enfoque insumo-produto” modela a estrutura econômica com dados agregados e com uma perspectiva *cradle-to-gate*. Já o segundo enfoque o “*structural path* do enfoque ciclo de vida” apresenta dados físicos e econômicos de maneira desagregada e com uma perspectiva *cradle-to-grave* e *cradle-to-gate*, dependendo com o objetivo e escopo do estudo.

Pode ser observado que as rotas de fornecedores identificadas como relevantes tanto no enfoque ACV híbrido *cradle-to-gate* como no enfoque insumo-produto com a análise *structural path*, são equivalentes no sentido que as principais rotas correspondem às duas análises. Por outro lado, a ACV híbrida *cradle-to-grave* incorpora na análise as etapas de transporte de distribuição e o uso final do biocombustível, em forma detalhada.

Para o fator de emissões de CO<sub>2</sub>, o enfoque insumo-produto identifica que as rotas Etanol SG>Quim, Etanol SG>Quim>Tra, Etanol SG>Oquim>Tra, Etanol SG>Oquim e Etanol SG>Etanol FG>Cs estão entre as principais rotas de fornecedores que contribuem com o desempenho do setor. Destaque-se, que no setor químico se agregam insumos diretos da produção de Etanol SG, como ácido sulfúrico, cal hidratada e fosfato de diamônio, além outros químicos não utilizados no seu processo produtivo. Da mesma maneira, o setor “outros químicos” incorpora além do setor de enzimas para biocombustíveis, outros produtos que não participam do ciclo de vida do Etanol SG.

Nos resultados da modelagem ACV híbrida *cradle-to-gate*, as principais rotas de fornecedores identificadas na SPA foram desagregadas, identificando as rotas de fornecedores Etanol SG>Cal hidratada, Etanol SG>enzimas e Etanol SG>bagaço, como as maiores contribuidoras de emissão de CO<sub>2</sub>. Destaque-se que na modelagem ACV foi

incorporada o transporte dentro de cada processo individual do insumo, por conseguinte, em cada rota da matriz de processo se considera, automaticamente, a rota de segundo grau Etanol SG>Cal hidratada>Tra, Etanol SG>Ácido sulfúrico>Tra e SG>enzimas>Tra. Por exemplo, no processo Cal hidratada, a rota Etanol SG>Cal hidratada>Tra correspondeu a 5,1% do total de emissões, representando aproximadamente 0,48 kg CO<sub>2</sub>/50,5 litros de etanol, conseqüentemente, ela estaria hierarquizada entre as dez principais rotas de fornecedores da categoria. No processo ácido sulfúrico, a rota Etanol SG>Ácido sulfúrico>Tra correspondeu a 16,9% do total das emissões, sendo estimado em 0,46 kg CO<sub>2</sub>/50,5 litros de etanol, hierarquizada entre as dez principais rotas de fornecedores da categoria. Já o transporte do setor de enzimas correspondeu a 0,205 kg CO<sub>2</sub>/50,5 litros de etanol, colocando-a entre as dez primeiras rotas do ciclo de vida *cradle-to-gate*, mas fora das dez principais do ciclo de vida *cradle-to-grave*.

Nos dois enfoques *cradle-to-gate*, o setor agrícola do bagaço e o setor de metalúrgica aparece, também entre os maiores contribuidores de emissão. Destaque-se que, na modelagem ACV de processo, o setor metalúrgico não foi considerado dentro da fronteira do sistema, mas como no enfoque ACV híbrido consideram-se todas as atividades econômicas na definição da fronteira, foi possível identificar o setor metalúrgico como relevante para a categoria de emissão. Adicionalmente, a significância da incorporação da etapa de uso do biocombustível na modelagem ACV híbrida foi confirmada, pois foi identificada como a principal fonte emissora de CO<sub>2</sub>, correspondendo a mais do 50% das emissões totais do ciclo de vida do etanol derivado de bagaço.

A análise comparativa da equivalência das rotas de fornecedores que mais influenciam nas emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao ciclo de vida *cradle-to-gate* do Etanol SG é ilustrada na tabela 26. Nela são identificadas e hierarquizadas as principais rotas de fornecedores das duas análises *structural path* realizadas neste capítulo. Desde que as duas análises quantificam as emissões em um contexto analítico diferente, ilustra-se, somente, a importância hierárquica das diferentes rotas. Nas duas análises, as 10 principais rotas de fornecedores representam mais do 60% das emissões do setor Etanol SG.

Tabela 26 – Comparação de resultados de emissões de CO<sub>2</sub> das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida

Rank	Rotas SPA enfoque insumo-produto	%	Rotas SPA enfoque ciclo de vida	%
1	Etanol SG>Tra	19,86	Etanol SG>Cal hidratada	31,70
2	Etanol SG>Quim>Tra	10,20	Etanol SG>Enzimas	26,38
3	Etanol SG>Quim	8,59	Etanol SG>Bagaço	20,54
4	Etanol SG>Oquim>Tra	6,88	Etanol SG>Ácido sulfúrico	7,80
5	Etanol SG>Met	3,86	Etanol SG>Fosfato de Diamônio	1,81
6	Etanol SG>Etanol FG>Sc	3,56	Etanol SG>Cal Hidratada>Tra	1,67
7	Etanol SG>Oquim	2,88	Etanol SG>Ácido sulfúrico >Tra	1,59
8	Etanol SG>Oquim>Quim>Tra	2,07	Etanol SG>Met	0,95
9	Etanol SG>Quim>En>Tra	1,89	Etanol SG>A&B >Alf	0,85
10	Etanol SG>A&B>Tra	1,81	Etanol SG>A&B	0,75
	Restante da economia	38,42	Restante da economia	6,33
	TOTAL	100	TOTAL	100

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: Tra – setor transporte; Quim – setor químico; Oquim – setor “outros químicos”; Met – setor metalúrgico; Sc – setor de cana-de-açúcar; En – setor energia; A&B – setor alimentos e bebidas; Alf – setor agricultura, silvicultura e pesca.

Para o fator de consumo energético, as duas análises *cradle-to-gate* apresentaram, também resultados equivalentes. A *structural path* apontou como as rotas de fornecedores mais relevantes as relacionadas com o transporte dos insumos químicos e das enzimas, a produção dos químicos, a etapa agrícola do bagaço, bem como o consumo energético do setor metalúrgico. Para a ACV híbrida, 94% do consumo energético *cradle-to-gate* está posicionado nas rotas Etanol SG>Bagaço, Etanol SG>Ácido sulfúrico, Etanol SG>Ácido sulfúrico>Tra, Etanol SG>Cal hidratada, Etanol SG>Cal hidratada>Tra, Etanol SG>Enzima>Tra e Etanol SG>Enzima. Estimou-se que a rota Etanol SG>Cal hidratada>Tra representou 6,7 MJ, a rota Etanol SG>Ácido sulfúrico>Tra correspondeu a 6,37 MJ, e a rota Etanol SG>Enzima>Tra influenciou em 2,916MJ. Estas três rotas foram hierarquizadas nas posições 5, 6 e 7, respectivamente.

A ACV híbrida *cradle-to-grave* identificou o transporte de distribuição de etanol como forte contribuidor na categoria de consumo energético, representando 6,1% do consumo total. De maneira equivalente, a análise *structural path* apontou a rota Etanol SG>Transporte como a consumidora energética mais significativa, com 22,36% do total de consumo.

A análise comparativa da equivalência das rotas de fornecedores que mais influenciam no consumo energético referente ao ciclo de vida *cradle-to-gate* do Etanol SG é ilustrada na tabela 27. Nela são identificadas e hierarquizadas as principais rotas de fornecedores das duas análises *structural path* realizadas neste capítulo. Desde que as duas

análises quantificam o consumo energético em um contexto analítico diferente, ilustra-se, somente, a importância hierárquica das diferentes rotas. Nas duas análises, as 10 principais rotas de fornecedores representam mais do 60% do consumo energético do setor Etanol SG.

Tabela 27 - Comparação de resultados do consumo energético das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida

Rank	Rotas SPA enfoque insumo-produto	%	Rotas SPA enfoque ciclo de vida	%
1	Etanol SG>Tra	22,36	Etanol SG >Acido sulfúrico	38,78
2	Etanol SG>Quim>Tra	11,49	Etanol SG >Bagaço	30,05
3	Etanol SG>Oquim>Tra	7,74	Etanol SG >Cal hidratada	15,67
4	Etanol SG>Quim	6,89	Etanol SG >Fosfato Diamônio	2,921
5	Etanol SG>Etanol FG>Sc	3,86	Etanol SG >Cal hidratada>Tra	2,70
6	Etanol SG>Met	2,84	Etanol SG >Acido sulfúrico> Tra	2,56
7	Etanol SG>Oquim>Quim>Tra	2,33	Etanol SG >Enzimas>Tra	1,17
8	Etanol SG>Quim>En>Tra	2,12	Etanol SG >Enzimas	0,23
9	Etanol SG>A&B>Tra	2,03	Etanol SG >Eletricidade interna	0,65
10	Etanol SG>Co>Tra	1,40	Etanol SG >Met	0,40
	Restante da economia	36,92	Restante da economia	4,22
	TOTAL	100	TOTAL	100

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: Tra – setor transporte; Quim – setor químico; Oquim – setor “outros químicos”; Met – setor metalúrgico; Sc – setor de cana-de-açúcar; En – setor energia; A&B – setor alimentos e bebidas.

Na geração de emprego, o setor de comércio e serviços confirma o significativo impacto desse fator na estrutura econômica brasileira, influenciando diretamente o setor Etanol SG, ou de forma indireta mediante sua presença como entrada no processo produtivo dos insumos do setor Etanol SG. Esse comportamento é encontrado tanto na SPA, como na ACV híbrida. Outro ponto importante para ressaltar é que em ambas as análises, o setor Etanol SG aparece como o principal criador de emprego. E, os setores representando os insumos químicos e as enzimas se encontram, também, entre as rotas de fornecedores mais influentes. Com este panorama, pode-se concluir que a produção doméstica dos principais insumos químicos e de enzimas traz benefícios econômicos para o país, especialmente pelo aumento na oferta potencial de empregos qualificados. Mas, na perspectiva ambiental, mudanças no padrão produtivo e consumo das famílias devem ser feitas, pois eles se posicionam entre os principais consumidores energéticos e emissores de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida do etanol.

A análise comparativa da equivalência das rotas de fornecedores que mais influenciam na geração de emprego referente ao ciclo de vida *cradle-to-gate* do Etanol SG é ilustrada na tabela 28. Nela são identificadas e hierarquizadas as principais rotas de fornecedores das duas análises *structural path* realizadas neste capítulo. Desde que as duas



análises quantificam a geração de emprego em um contexto analítico diferente, ilustra-se, somente, a importância hierárquica das diferentes rotas. Nas duas análises, as 10 principais rotas de fornecedores representam mais do 65% do consumo energético do setor Etanol SG.

Tabela 28 - Comparação de resultados da geração de emprego das análises SPA do enfoque insumo-produto e do enfoque ciclo de vida

Rank	Rotas SPA enfoque insumo-produto	%	Rotas SPA enfoque ciclo de vida	%
1	Etanol SG	24,58	<b>Etanol SG</b>	<b>28,40</b>
2	Etanol SG>Co	7,18	Etanol SG >Bagaço	22,10
3	Etanol SG>Cim	6,87	Etanol SG >Co	5,27
4	Etanol SG>Quim>Co	5,57	Etanol SG >Enzimas>Co	4,59
5	Etanol SG>A&B>Alf	5,35	Etanol SG >Ácido Sulfúrico	4,24
6	Etanol SG>Oquim>Co	5,09	Etanol SG >A&B>Alf	3,66
7	Etanol SG>Alf	4,55	Etanol SG > Ácido Sulfúrico >Co	1,92
8	Etanol SG>Os	2,46	Etanol SG > Os	1,80
9	Etanol SG>Oquim	2,08	Etanol SG > Cal Hidratada	1,51
10	Etanol SG>Tra	1,81	Etanol SG > Enzimas	1,46
	Restante da economia	34,35	Restante da economia	26,00
	<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: Tra – setor transporte; Quim – setor químico; Oquim – setor “outros químicos”; Met – setor metalúrgico; Sc – setor de cana-de-açúcar; Alf – setor agricultura, silvicultura e pesca; A&B – setor alimentos e bebidas; Os – “outros setores”

Portanto, os resultados deste capítulo evidenciam que o uso de bagaço como matéria-prima é uma alternativa para a produção de etanol, sempre e quando as tecnologias emergentes sejam economicamente competitivas para converter esse recurso em biocombustível baixo em carbono. A identificação de rotas de fornecedores chaves para o desempenho ambiental e econômico desse setor hipotético revela onde ações deveriam ser tomadas para estruturar boas práticas setoriais a caminho da sustentabilidade da produção, cadeia de fornecedores e uso do biocombustível. A identificação das rotas de fornecedores principais visa prever efeitos destrutivos para o meio ambiente ou economicamente prejudiciais mediante ações que façam o etanol brasileiro competitivo a nível internacional e nacional.

Finalmente, foi realizada uma análise comparativa dos resultados dos enfoques ACV de processo e ACV híbrido *cradle-to-gate* com os resultados do enfoque insumo-produto, para uma produção de 15.851,02 milhões de litros de etanol derivado de bagaço, que hipoteticamente poderiam ter sido produzidos no ano 2012. Esse valor está baseado no total de produção de biomassa derivada da cana-de-açúcar obtida nesse ano, considerando as mesmas especificações técnicas descritas no capítulo 2 desta tese. A unidade funcional deste

exercício equivaleu a uma demanda final do setor Etanol SG de R\$11.400 milhões. Na tabela 29 apresentam-se os resultados comparativos das taxas de variação analisados para os fatores de emissões de CO<sub>2</sub>, consumo energético e geração de emprego.

A avaliação de ciclo de vida híbrida combina as fortalezas dos dois enfoques mais utilizados para análise ambiental: o enfoque de insumo-produto da economia e o enfoque ACV da ecologia industrial. Ela une a descrição setorial de uma economia completa em termos monetários, com a descrição física dos fluxos de massa, energia e econômicos do ciclo vida de um produto no seu maior nível de detalhamento. Essa sinergia de informação faz com que o enfoque ACV híbrido apresente uma taxa de variação positiva quando seus resultados substituem os resultados da análise insumo-produto ambiental e ACV de processo.

Tabela 29 - Taxa de variação dos enfoques ACV e ACV híbrida *cradle-to-gate* com o enfoque insumo-produto

Técnica analítica	10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub>	TJ	Mil empregos
Insumo-produto	1.181,95	14.429,45	275,07
ACV híbrida	9.199,86	79.876,01	297,76
Varição %	678,36	453,56	8,25
ACV processo	8.323,88	74.635,01	170,30
Varição %	604,25	417,24	-38,09

Fonte: Resultado da pesquisa.

Cabe destacar que, como no Brasil não se publica as contas ambientais, e conseqüentemente, não existe sua integração com as contas econômicas, os fatores ambientais usados na análise insumo-produto foram calculados e organizados setorialmente mediante suposições baseadas em relatórios do governo. Vale ressaltar que, por suposições do modelo, o consumo energético é linear com a produção, onde as emissões são proporcionais ao consumo de combustíveis e de energia hidrelétrica, sem ser possível incorporar o progresso tecnológico ao longo dos anos.

Como resultado, algumas das hipóteses do enfoque insumo-produto limitam os resultados da análise. Este fato pode explicar a grande discrepância entre os resultados ambientais da ACV híbrida e do enfoque insumo-produto. Enquanto, a ACV híbrida modela, em forma detalhada, com dados micros de processos, o ciclo de vida da produção de etanol para a análise ambiental, o enfoque insumo-produto representa a estrutura média do setor, com dados macros provenientes de agência de estatísticas, subestimando, assim, os resultados ambientais. Levanta-se, portanto, a discussão sobre a real representação dos valores ambientais quantitativos do enfoque insumo-produto. Contudo, os resultados qualitativos ou comportamentais do enfoque insumo-produto foram confirmados com a ACV híbrida, como discutido nos primeiros parágrafos desta seção.

As contas econômicas fornecem a informação referente à geração de emprego para o mesmo nível de agregação setorial das tabelas TRUs. Logo, o acesso à uma fonte de informação mais completa é refletido em uma taxa de variação de somente 8,25% do resultado final com relação à ACV híbrida. Os resultados ilustram como uma metodologia com maior nível de detalhamento e especificidade, contabiliza valores que poderiam ficar negligenciados na agregação setorial do enfoque insumo-produto.

Observa-se, que a taxa de variação dos fatores ambientais é significativa, também, quando a ACV de processo substitui os resultados do enfoque insumo-produto. Isto porque a ACV de processo, como a ACV híbrida, descreve detalhadamente, em nível de dados micro, as atividades econômicas que conformam a fronteira do ciclo de vida do produto analisado. A modelagem ACV de processo não considerou na fronteira todas as atividades que contribuem de maneira relevante à geração de emprego, logo, a taxa de variação foi negativa. Destaque-se que, as fronteiras da ACV híbrida ambiental e da ACV híbrida econômica precisam ser equivalentes, mas não sempre são idênticas, pois cada uma pode ter processos relevantes para seu foco específico, mas irrelevante para o outro.

Os resultados deste exercício mostram como a ACV híbrida contribui para uma análise econômica e ambiental detalhada do setor Etanol SG, diminuindo, assim, os problemas relacionados com a agregação setorial, falta de especificidade de processos e de informação ambiental do enfoque insumo-produto, bem como os erros de truncamento devido à delimitação da fronteira de uma ACV de processo.

#### 4. Considerações finais da tese

Os estudos de caso elaborados nesta tese visavam analisar três objetivos da macroeconomia ambiental dentro do contexto analítico da abordagem de ciclo de vida, para identificar a real contribuição do enfoque dentro da economia do meio ambiente. A estrutura analítica foi: 1. O estudo de biocombustíveis avançados que expressam o progresso tecnológico visando a proteção do meio ambiente mediante o desenvolvimento de tecnologias mais limpas; 2. A análise das consequências de políticas de comércio que incentivam a exportação do etanol, com a intenção de estimular políticas de comércio sustentáveis, que não provoquem efeitos ambientais e sociais negativos, e que não tendam a concentrar o poder, representando um sistema de energias renováveis descentralizado; e 3. Estudo do desempenho ambiental e econômico real da introdução do setor de biocombustíveis avançados no Brasil, incentivados por organismos internacionais que disseminam tecnologias que promove o desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável propõe mudanças fundamentais na maneira de como a sociedade fundamenta suas decisões. O desafio é alcançar a prosperidade econômica alterando os padrões de produção e consumo para proteger os recursos naturais e o meio ambiente, procurando a distribuição equitativa entre gerações. De acordo com UNEP (2009), no começo da década dos anos 90, governos e organismos internacionais, em conjunto com o setor privado, foram chamados a desenvolver critérios e metodologias para avaliar os impactos ambientais e os requerimentos de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos/serviços e processos. Nesse período nasceu a filosofia do pensamento de ciclo de vida, que visa ir além do foco tradicional, considerando os impactos ambientais e econômicos de um produto/serviço ao longo do seu ciclo de vida. No pensamento do ciclo de vida todos que participam na cadeia completa do ciclo de vida de um produto têm responsabilidades e um papel a cumprir, considerando todos os efeitos externos relevantes.

O enfoque de ciclo de vida avalia os impactos ambientais e econômicos completos de um produto/serviço. Quando aplica-se o enfoque para uma análise ambiental, focaliza-se nos aspectos ambientais e nos impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida de um produto. Por outro lado, quando aplica-se o enfoque para uma análise econômica, concentra-se nos aspectos econômicos e os impactos econômicos, como geração de emprego, ao longo do ciclo de vida. Estas duas abordagens são complementares que juntas formam uma ferramenta consistente para a análise robusta de ações, iniciativas e políticas públicas direcionadas à sustentabilidade.

As análises econômicas convencionais vêem as atividades produtivas como um sistema linear de fluxo de materiais, onde políticas e instrumentos *end-of-pipe* tentam controlar os efeitos ambientais. Essa visão aberta do sistema é consequência da falta de definição de uma fronteira analítica nos modelos econômicos. Para Georgescu-Roegen (1971) quando não existe uma fronteira analítica, não existe um processo analítico, e frequentemente, na economia se fala de processos sem definir sua fronteira, abusando assim do uso do termo. Processo deve ser tal que altera sua própria fronteira. Como no contexto de ciclo de vida, quando se quer identificar um processo, deve-se descrever o que acontece dentro da fronteira do processo completo ou do processo parcial.

Como resultado, esta tese identificou algumas das contribuições que o enfoque de ciclo de vida para a visão analítica da economia do meio ambiente:

1. O enfoque de ciclo de vida mostra a relevância da definição de fronteira para definir o processo que vai ser analisado. O enfoque enfatiza que os resultados são diferentes quando a fronteira é alterada;
2. O enfoque de ciclo de vida apresenta uma abordagem analítica ampla, que inclui a perspectiva de um sistema cíclico e a relação de processos dentro de uma fronteira analítica. Quando se analisa os efeitos econômicos e ambientais de uma atividade mediante a perspectiva de ciclo de vida, identificam-se todos os atores que influenciam na *performance* final, bem como, conhece-se a parcela de responsabilidade de cada um deles. Este aspecto ajuda a estruturar medidas eficazes para melhorar o desempenho econômico e ambiental dos produtos/serviços de uma economia;
3. O enfoque de ciclo de vida traz à economia do meio ambiente uma perspectiva física dos processos, onde as limitações físicas e técnicas são representadas na elaboração de cada inventário de ciclo de vida. Portanto, ele cria uma base para entender conceitos como “sustentabilidade” e “desenvolvimento sustentável”, porque esses conceitos têm estreita relação com as restrições físicas.
4. Para análises ambientais as características físicas e técnicas de cada processo são representadas por balanços de massa, energia e exergia. As características econômicas são levantadas no inventário de ciclo de vida econômico representado pela soma de todas contribuições econômicas dos processos que compõem o ciclo de vida. Esta perspectiva física ajuda a descrever de maneira mais próxima à realidade das atividades econômicas, permitindo uma interpretação econômica dos resultados;

5. O enfoque de ciclo de vida permite ter uma visão comparativa da *performance* econômica e ambiental de diferentes produtos/serviços com a mesma função econômica. Sempre e quando todas as comparações devem sejam feitas dentro das exigências metodológicas das normas ISO 14040 e ISO 14044;
6. A etapa de uso e disposição final pode ser analisada com detalhe mediante o enfoque de ciclo de vida. Este fato introduz a parcela de responsabilidade respectiva ao consumidor ou usuário final pelos efeitos externos totais do produto/serviço. Nesta abordagem não somente a cadeia de fornecedores tem influência no desempenho de um produto/serviço, mas também quem usufrui do bem-estar que ele fornece;
7. Pela estrutura robusta do enfoque de ciclo de vida, ele traz à economia do meio ambiente uma ferramenta micro em um contexto macro das atividades econômicas. Identificou-se que um amplo nível de detalhamento é importante para interpretar resultados de forma correta, e identificar ações eficazes rumo ao desenvolvimento sustentável.

Como resultado deste panorama, nesta tese propõe-se a incorporação da ferramenta de avaliação de ciclo de vida híbrida dentro da economia do meio ambiente, isto porque ela integra a visão de processos do enfoque ciclo de vida e o contexto analítico do enfoque de insumo-produto usado e consolidado na economia. Entre os fatores positivos encontrados na aplicação da avaliação de ciclo de vida híbrida foram:

- a) Mitiga as limitações da matriz de coeficientes técnicos para representação o progresso tecnológico. Isto porque mediante a matriz de processos podem ser representada a real estrutura tecnológica das principais atividades;
- b) análise do ciclo de vida completa do sistema para fatores ambientais e econômicos;
- c) capacidade de incorporar a etapa de uso e disposição final dentro da fronteira de análise;
- d) confiabilidade dos dados referentes à informação de processo encontrada nas bases de dados de inventários de ciclo de vida já existente e publicadas;
- e) representatividade tecnológica do produto/serviço mediante a modelagem de inventário de ciclo de vida;
- f) completeza dos dados mediante a integração da base de dados do enfoque insumo-produto e a base de dados do enfoque ACV de processo;
- g) fronteira do sistema completa;
- h) confiabilidade dos dados referentes aos fatores ambientais dos principais processos;

- i) descrição detalhada da tecnologia dos fatores econômicos mediante o contexto do enfoque ACV;
- j) fácil introdução e cálculo dos fatores econômicos em uma perspectiva de ciclo de vida;
- k) modelagem física da estrutura econômica para a obtenção de indicadores econômicos.

Por último, entre as desvantagens identificadas na análise híbrida foram:

- a) complexidade na modelagem do sistema, se comparado com a modelagem do enfoque de insumo-produto;
- b) suposições de representação tecnológica de alguns dos inventários ICV do sistema de processo;
- c) incertezas devidas aos preços básicos estabelecidos para os insumos;
- d) não existe base de dados com fatores econômicos no enfoque ACV;
- e) necessidade de inventários ICV de processo muitas vezes sem livre acesso.

Acredita-se que o enfoque de ciclo de vida traz uma nova visão de como analisar e visualizar as atividades econômicas, e assim alcançar os objetivos da macroeconomia ambiental e cumprir com os princípios do desenvolvimento sustentável. Conclui-se que pelo contexto abrangente e multidisciplinar do enfoque de ciclo de vida, ele pode ser inserido nas análises de sustentabilidade, no âmbito da economia do ambiente, para avaliar, de maneira robusta e consistente, ações, iniciativas e políticas públicas que visem alcançar os objetivos da macroeconomia ambiental.

*“Intellectual solve problems, geniuses prevent them...”*

Albert Einstein (1879-1955)

## Referências

- ACC. **Cradle-to-Gate Life Cycle Inventory of Nine Plastic Resins and Four Pelyurethane Precursors**. Plastic Division of the American Chemistry Council. 2011.
- ACQUAYE, A; WIEDMANN, T; FENG, K; CRAWFORD, R; BARRET, J; KUYLENSTIERNA, J; DUFFY, A; KOH, S.C.L; McQUEEN-MASON, S. **Identification of Carbon Hot-Spots and Quantification of GHG Intensities in the Biodiesel Supply Chain using Hybrid LCA and Structural Path Analysis**. Environ. Sci. Technol; 45 (6) 2471-2478 pp. 2011.
- AJANOVIC, A. e HASS, R. **Economic Challenges for the Future Relevance of Biofuels in Trasport in EU Countires**. Energy 35, 3340-3348 pp. 2010.
- APPC. **Plano de Desenvolvimento APL da Cal e Calcário do Paraná**. Associação Paranaense dos Produtores de Cal, Associação dos Produtores de Calcário, Sindacal e Sindemcap. 2006.
- ARDENT, F; BECCALI, M; CELLURA, M. Application of the IO Methodology to the Energy and Environmental Analysis of a Regional Context em SUH, S (Eds), **Handbook of input-output Economics in Industrial Ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. 2009.
- ARNDT, C; GARCIA, A; TARP, F; THURLOW, J. **Poverty Reduction and Economic Structure: Comparative Path Analysis for Mozambique and Vietnam**. Review of Income and Wealth 2011. DOI: 10.1111/j.1475-4991.2011.00474.x. 2011.
- BABOULET, O. e LENZEN, M. **Evaluating the Environmental Performance of a University**. Journal of Cleaner Production 18, 1134-1141 pp. 2010.
- BAI, Y; LUO, L; DER VOET, E. **Life Cycle Assessment of Switchgradd-Derived Ethanol as Transport Fuel**. International journal of life cycle assessment, 15: 468-477. DOI: 10.1007/s11367-010-0177-2. 2010.
- BAUMANN, H. e TILLMAN, A-M. **The Hitch Hiker's: Guide to LCA**. Lund: Studentlitteratur, 543 pp, ISBN 91-44-02364-2. 2004.
- BEN/MME. **Balanco Energético Nacional 2010: Ano base 2009 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2010, PP. 276. 2010.
- BERGH, J. e JASSEN. Introduction and overview. M. Bergh, J e Janssen, M (Eds) em **Economics of Industrial Ecology: Materials, structural changes, and spatial scales**. MIT Press. ISBN 0-262-22071-7. 2004.
- BERGH, J; JANSSEN, M. The interface between economics and industrial ecology: a survey, Bergh e Janssen (Eds) em **Economics of Industrial Ecology: Materials, structural changes, and spatial scales**. MIT Press. ISBN 0-262-22071-7. 2004.



BRIGHT, R; STROMMAN, A; HAEKINS, T. Environmental assessment of wood-based biofuel production and consumption scenarios in Norway. *Jornal of Industrial Ecology*, 14 (3), 422-439 pp. 2010.

BULLARD, C.W e PILLATI, D.A. **Reducing uncertainty in energy analysis**. CAC-doc. no. 205. Center for Advanced Computation. University of Illinois, Urbana, USA. 1976.

BULLARD, C.W; PENNER, P.S; PILLATI, D.A. Net energy analysis – **Handbook for combining process and input-output analysis**. *Resources and Energy* 1, 267-313. 1978.

CALLAN, S.J e THOMAS, J.M. **Environmental economics & management: Theory, policy and applications**. South-Western Cengage Learning, Ohaio, USA. 2010.

CANTARELLA, H e ROSSETTO, R. Fertilizantes para a Cana-de-Açúcar, em Cortez, L.A (Eds), **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: PeD para Produtividade e Sustentabilidade**. FAPESP, ISBN 978-85-212-0531-9. São Paulo, Brazil. 2010.

CARRIQUIRY, M; DU, X; TIMILSINA, G. **Second Generation biofuels: Economics and Policies**. *Energy Policy* 39, pp. 4222-4234. 2011.

COELHO, C. **Life cycle assessment parameters adaptation for Brazilian electricity production**. Mater Degree Thesis, Departamento de energia e meio ambiente, Universidade de Tecnologia Chalmers, suecia. 2009.

COLTRO, L; GARCIA, E; QUEIROZ, G. **Life Cycle Inventory For Electric Energy System In Brazil**. *International journal of life cycle assessmet*. DOI: 10.1065/lca2003. 2003.

CRUZ, L. Application of IO Energy Analysis for CO<sub>2</sub> Emissions, em SUH (Eds), **Handbook of input-output Economics in Industrial Ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. 2009.

DALY, H. **Towards an Environmental Macroeconomics**. *Land Economics*, Vol. 67, No. 2, pp. 255-259. <http://www.jstor.org/stable/3146415> . 1991.

DEFOURNY, J e THORBECKE, E. **Structural Path Analysis and Multiplier Decomposition within a Social accounting Matrix Framework**. *The Economic Journal* 94 (1984), 111-136. 1984.

DEFOURNY, J. **Une Approche Structurale pour l'Analyse Input-Output: um Premier Bilan**. *Economie Appliquée*, tome XXXV – 1982, n. 1-2, 203-230. 1982.

DIAS DE MORAES, F.M; DA COSTA, C.C; GUILHOTO, M.J; DE SOUZA, L; DE OLIVEIRA, R.F. O Mapa sucroenergetico do Brasil, em De Souza and Macedo (Eds), **Etanol e Bioeletricidade: A Cana-de-Açúcar no futuro da matriz energética**. ISBN 978-85-63750-00-6. São Paulo, Brazil. 2010.

DIAS, M; CUNHA, M; JESUS, C; ROCHA, G; PRADELLA, J.G; ROSSELL, C; FILHO, R; BONOMI, A. **Second Generation Ethanol in Brazil: Can it Compete with Electricity Production?** Bioresource Technology, doi: 10.1016/j.biortech.2011.06.098. 2011.

DUCHIN, F e HERTWITCH, E. **Industrial ecology**. International Society for Ecological Economics, Online Encyclopaedia of Ecological Economics. 2003.

DUCHIN, F. **Industrial input-output analysis: implications for industrial ecology**. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, vol. 89, 851-855 pp. 1992.

DUCHIN, F. **Input-output analysis and industrial ecology**. The greening of industrial ecosystems, National Press 61-68 pp. 1994.

DUCHIN, F. Input-output economics and materials flows, Suh (Eds) em **Handbook of input-output economics in industrial ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3. 2009.

DUCHIN, F. **The conversion of biological materials and waste to useful products**. Structural Change and Economic Dynamics, vol. 1, no. 2, 243-261 pp. 1990.

E&E/MCT. **Balço de Carbono nas atividades energéticas do Brasil**. Economia e Energia - eee – OSCIP No 13.0020.00/2005. 2007.

EC/JRC. **International Reference Life Cycle Data System Handbook**. General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. European Union, 414pp. 2010.

ENGLAND, R. **Natural Capital and the Theory of Economic Growth**. Ecological Economics, Vol. 34 (3), 425-31pp. 2000.

EREC. **Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020**. Acesso: 15 agosto, 2011. [www.erec.org](http://www.erec.org). 2008.

ERKMAN, S. The recent history of industrial ecology, Ayres, R; Ayres, L (Eds) em **A Handbook of Industrial Ecology**. Edward Elgar Publishing Limited. ISBN 1-84064-506-7. 2002.

EUROPEAN COMMISSION. **Eurostat Manual of Supply, Use and Input-output Table**. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-RA-07-013/EN/KS-RA-07-013-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-RA-07-013/EN/KS-RA-07-013-EN.PDF). 2008.

FERRÃO, P e NHAMBIU, J. A comparison between conventional LCA and hybrid EIO-LCA: analyzing crystal giftware contribution to global warming potential, SUH (Eds) em **Handbook of input-output economics in industrial ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3. 2009.

FERREIRA-LEITAO, V; GOTTSCHALK, L.M.F; FERRERA, M.A; NEPOMUCENO,

- A.L.; MILINARI, H.B.C. **Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses.** Waste Biomass Valor 1:65-76 pp. 2010.
- FIEDLER, M; PTAK, V. **On matrices with non-positive off-diagonal elements and positive principal minors.** Czechoslovak Mathematical Journal 94, 382-400. 1962.
- FILHO, L; MACEDO, I. O Mapa sucroenergetico do Brasil, em De Souza and Macedo (Eds), **Etanol e Bioeletricidade: A Cana-de-Açúcar no futuro da matriz energética.** ISBN 978-85-63750-00-6. 2010.
- FINNVEDEN, G; HAUSCHILD, M; EKVALL, T; GUINEE, J; HEIJUNGS, R; HELLWEG, S; KOEHLER, A; PENNINGTON, D; SUH, S. **Recent development in life cycle assessment.** Journal of Environmental Management 91, 1-21 pp. 2009.
- FORAN, B. Balancing act: a national input-output analysis, Murray and Wood (Eds) em **The sustainability practitioner's guide to input-output analysis.** ISBN 798-1-86335-747-0. 2010.
- FROBENIUS, G. **Über matrizen aus positiven elemente.** Sitzungsberichte der Königlichen Preussischen Akademie der Wissenschaften 26, 471-476. 1908.
- FROSCH, R. e GALLOPOULOS, N. **Strategies for Manufacturing.** *Scientific American* 189 (3) 152. 1989.
- FU, G; CHANG, A; MINNS, D. **Life Cycle Assessment of Bio-ethanol Derived from Cellulose.** Int. J. Life Cycle Assessment 8 (3) 137-141, DOI <http://dx.doi.or~10.1065/Ica2003.03.109>. 2003.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process.** Harvard University Press, ISBN 0-674-25781-2, USA. 1971.
- GIRMA, M. **Macropolicy and the Environment: A Framework for Analysis.** World Development, vol. 20 (4), 531-540 pp. 1992.
- GOLDEMBERG, J; COELHO, T.S; GUARDABASSI, P. **The Sustainability of Ethanol Production of Sugarcane.** Energy Policy 36, 2086– 2097 pp. 2008.
- GONZALES-GARCÍA, S; GASOL, C; MOREIRA, M.T; GABARRELL, X; RIERADEVALL, J; FEIJOO, G. **Envrionmental Assessment of black locust-based ethanol as potential transport fuel.** International Journal of Life Cycle Assessment 16, 465-477 pp. 2011. DOI: 10.1007/s11367-011-0272-z. 2011.
- GONZALES-GARCÍA, S; LUO, L; MOREIRA, M.T; FEIJOO, G. **Life Cycle Assessment of hemp use in second generation ethanol production.** Biomass and Bioenergy 36, 268-279 pp. 2011.
- GONZALES-GARCÍA, S; LUO, L; MOREIRA, M.T; FEIJOO, G; HUPPES, G. **Life Cycle Assessment of flax derived second generation ethanol fueled automobiles in**

- Spain.** Renewable and Sustainable Energy Review 13, 1922-1933 pp. 2009.
- GONZALES-GARCÍA, S; MOREIRA, M.T; FEIJOO, G. **Environmental performance of Lignocellulosic bioethanol production from Alfalfa stems.** Biofuel, Bioproducts & Biorefining 4, 118-131 pp. 2010.
- HARRIS, J e CODUR, A-M. **Microeconomics and the environment.** Global Development and Environment Institute, Tufts University. [http://docsfiles.com/pdf\\_by\\_jonathan\\_m\\_harris\\_and\\_anne\\_marie\\_codur.html](http://docsfiles.com/pdf_by_jonathan_m_harris_and_anne_marie_codur.html). 2004.
- HARRIS, J. **Environmental and Natural Resource Economics.** <http://ase.tufts.edu/gdae/db/ENREregistration.asp>. 2003.
- HARRIS, J. **Macroeconomic policy and sustainability.** Global Development and Environment Institute, Working Paper No. 01-09. 2001.
- HARRIS, J. **Sustainable development and sustainability.** International Society for Ecological Economics, Online Encyclopaedia of Ecological Economics. 2003.
- HATTI-KAUL, R. **Biorefineries – A path to Sustainability.** Crop Science, vol. 50, S-152-S-256 pp. 2010.
- HEIJUNGS, R. **A generic method for the identification of options for cleaner products.** Ecological Economics, vol. 10, issue 1, pages 69-81. 1994.
- HEIJUNGS, R. e SUH, S. **The computational structure of life cycle assessment.** Kluwer Academia Publishers, 241 pp, ISBN 1-4020-0672-1. 2002.
- HOEKSTRA, R; JEROEN, C; BERGH, J. Structural decomposition analysis of iron and steel and of plastics, Bergh e Janssen (Eds) em **Economics of Industrial Ecology: Materials, structural changes, and spatial scales.** MIT Press. ISBN 0-262-22071-7. 2004.
- HUIJBREGTS, M; HELLWEG, S; FRISCHKNECHT; HENDRIKS, H; HUNGERBUHLER, K; HENDRIKS, J. **Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production.** Environ. Sci. Technol. 44, 2189-2196 pp. 2010.
- HSU, D; INMAN, D; HEATH, G; WOLFRUM, G; MANN, M; ANDEN, A. **Life Cycle Environmental Impacts of Selected US Ethanol Production and Use Pathways in 2022.** Environ. Sci. Technol; 44, 5289-5297. 2010.
- IEA/OECD. **From 1th to 2th Generation Biofuel Technologies: An Overview of Current Industry and RDeD Activities.** International Energy Agency. 2008.
- ISO 14040. **Environmental management – life cycle assessment – principles and framework.** ISO 14040:1997, International Organization for Standardization, 1997.
- ISO 14044. **Environmental management – life cycle assessment – Requirements and Guidelines.** ISO 14044:2006, International Organization for Standardization. 2006.

- JAGGER, A. **Brazil Invest in Second Generation Biofuels**. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 3:8,10. 2009.
- JOSHI, S. **Product environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques**. *Journal of Industrial ecology*, vol. 3, number 2e3, 95-120 pp. 2000.
- KADAM, K.L. **Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India**. *Energy Policy*, vol. 30, 5, 371-384 pp. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00104-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00104-5). 2002.
- KUCHLER, M. **Unravelling the Argument for Bioenergy Production in Development Countries: A World-economy Perspective**. *Ecological Economics* 69 (2010) 1336-21343 pp. 2010.
- KULAI, Y. **Cadeia de Fertilizantes: Perfil dos fertilizantes N-P-K**. Ministério de Minas e Energia, Brasil. 2009.
- LA ROVERE, E; PEREIRA, A; SIMÕES, A. **Biofuels and Sustainable Energy Development in Brazil**. *World Development* 39 (6) 1026-1036 pp. 2011.
- LAVE, L; COBAS-FLORES, E; HENDRICKSON, C; MCMICHAEL, F. **Using input-output analysis to estimate economy wide discharges**. *Environ. Sci. Technol.* 29(9), 420-426. 1995.
- LEDGARD, S.F; BOYES, M; BRENTROP, F. **Life Cycle Assessment of Local and Imported Fertilisers Used on New Zeland Farms**. MAF and FERTRESEARCH. 2010.
- LENZEN, M. **A Guide for Compiling Inventories in Hybrid Life-Cycle Assessment: Some Australian Results**. *Journal of Cleaner Production* 10, 545 – 572 pp. 2002.
- LENZEN, M. **Environmentally Important Path, Linkages and Key Sectors in the Australian Economy**. *Structural Change and Economy Dynamics* 14, 1-34 pp. 2003.
- LENZEN, M. **Structural Path Analysis of Ecosystem Network**. *Ecological Modelling* 200, 334 – 342 pp. 2007.
- LENZEN, M; MURRAY, J. **Conceptualising Environmental Responsibility**. *Ecological Economics*, 70, 261–270 pp. 2010.
- LEONTIEF, W. A *Análise de Insumo-Produto*, Leontief (Eds) em **A Economia do Insumo-Produto**. São Paulo: Nova Cultural, 1988. ISBN 85-13-00068-X. 1965.
- LEONTIEF, W. e FORD, D. *Air Pollution and the economic structure: empirical results of input-output computation*, Brody e Carter (Eds) em **Input–Output Techniques**, North-Holland Publishing Company. 1972.
- LEONTIEF, W. **Environmental Repercussions and the Economic Structure: an Input-Output Approach**. *Review of Economics and Statistics*, vol. LII, No. 3, pp. 262-271. 1970.

LIFSET, R e GRAEDEL, T. Industrial ecology: goals and definitions, Ayres, R; Ayres, L (Eds) em **A Handbook of Industrial Ecology**. Edward Elgar Publishing Limited. ISBN 1-84064-506-7. 2002.

LIFSET, R. Industrial ecology in the age of input-output analysis, Suh (Eds) em **Handbook of input-output economics in industrial ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3. 2009.

LUO, L; VAN DER VOET, E; HUPPES, G. **Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 1613-1619 pp. 2009b.

LUO, L; VAN DER VOET, E; HUPPES, G; UDO DE HAES, H. Allocation issues in **LCA methodology: A case study of corn stover-based fuel ethanol**. International Journal of Life Cycle Assessment 14, 529-539 pp. 2009a.

MAC LEAN, H e SPARATI, S. **The Contribution of Enzymes and Process Chemicals to the Life Cycle of ethanol**. Environ. Res. Lett. 4. 014001. Doi:10.1088/1748-9326/4/1/014001. 2009.

MACEDO, I; LEAL VERDE, M; SILVA, J. **Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil**. Governo do Estado de São Paulo. 2004.

MACEDO, I; SEABRA, J; SILVA, J. **Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020**. Biomass and bioenergy, 32, 582 – 595pp. 2008.

MAJEAU-BETTEZ, G; STRØMMAN, A; HERTWICH, E. **Evaluation of Process- and Input-Output-based Life Cycle Inventory Data with Regard to Truncation and Aggregation Issues**. Environ. Sci. Technol. 45, 10170–10177pp. dx.doi.org/10.1021/es201308x. 2011.

MARHEINEKE, T; FRIEDRICH, R; KREWITT, W. **Application of a hybrid-approach to the life cycle inventory analysis of a freight transport task**. SAE Technical paper series 982201, Total Life Cycle Conference and Exposition, Austria. 1998.

MARTINEZ, H.S. **Socio-economic Assessment of Sustainable Sugarcane-Ethanol Production in Northeast Brazil**. Master thesis, Universiteit Utrecht, The Netherlands. 2011.

MILLER, R E BLAIR, P. **Input-output Analysis: Foundations and Extensions**. Cambridge University Press, second edition. ISBN 978-0-521-51713-3. 2009.

MORIGUCHI, Y; KONDO, Y; SHIMIZU, H. **Analyzing the life cycle impact of cars: the case of CO<sub>2</sub>**. Industrial and environment 16 (1-2), 42-45. 1993.

- MUNASINGHE, M. **Environmental economics**: Basic principles. International Society for Ecological Economics, Online Encyclopaedia of Ecological Economics. 2004.
- NEVES, F.M; TROMBIN, V.G; CONSOLI, M. O Mapa sucroenergetico do Brasil, em De Souza and Macedo (Eds), **Etanol e Bioeletricidade**: A Cana-de-Açúcar no futuro da matriz energetica, ISBN 978-85-63750-00-6. 2010.
- NIELSEN, P; OXENBOLL, K; WENZEL, H. **Cradle-to-Gate Environmental Assessment of Enzyme Products Produced Industrially in Denmark by Novozymes A/S**. International Journal of Life Cycle Assessment, 7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.08.265.1>. 2006.
- NOVAZYMES. **Financial, environmental, and social annual report**. <http://www.novozymes.com/en/investor/financial-reports/Pages/Annual-reports.aspx>. 2011.
- NOVAZYMES. **Financial, environmental, and social annual report**. <http://www.novozymes.com/en/investor/financial-reports/Pages/Annual-reports.aspx>. 2010.
- OECD/IEA. **Sustainable Production of Second Generation Biofuels**: Potentials and Perspectives in Major Economies and Developing Countries. International Energy Agency. 2010.
- OMETTO, R.A; HAUSCHILD, M.Z; ROMA, L.N.W. **Life cycle Assessment from Fuel Ethanol in Brazil**. Int. J Life Cycle Assess, 14: 236- 247 pp. 2009.
- PAIXÃO, P. **Electric cars in Brazil**: a method for assessing innovation impacts on the economy. World Energy Council – Congress paper. <http://www.worldenergy.org/documents/congresspapers/396.pdf> . 2010.
- PALMA-ROJAS, S; CALDEIRA-PIRES, A; NOGUEIRA, J. **Life cycle inventory modeling**: the appropriate LCI approach for decision support. IV International Conference of LCA in Latin America (Cilca), Coatzacoalcos, México. 2011a.
- PALMA-ROJAS, S; CALDEIRA-PIRES, A; NOGUEIRA, J; FERREIRA, L. **Biomass Residues for Second Generation Biofuel in the Brazilian Context**. COBEM 2011, 21 st International Congress of Mechanical Engineering, Natal, RN, Brasil. 2011b.
- PALMA-ROJAS, S; NOGUEIRA, M; CALDEIRA-PIRES, A. **Integration of the Input-Output Model into Life Cycle Assessment Tool**: Perspective of the State of the Art. III International Conference of LCA in Latin America (Cilca), Pucon – Chile. 2009.
- PETERS, G. e HERTWICH, E. **A comment on “Functions, commodities and environmental impacts in an ecological–economic model.”** Ecological Economics, volume 59, Issue 1, 5, 1-6pp. 2006.

PIPPO, W. A; LUENGO, C.A; ALONSOAMADOR, L; GARZONE, P; CORNACCHIA, G. **Energy Recovery from sugar cane-Trash in the Light of 2 Generation Biofuels.** Part 1: Current Situation and Environmental Aspects. *Waste Biomass Valor* 2:1-16 pp. 2011.

PIRES, A e SCHECHTMAN, R. O Mapa sucroenergetico do Brasil, em De Souza and Macedo (Eds), **Etanol e Bioeletricidade: A Cana-de-Açúcar no futuro da matriz energética.** ISBN 978-85-63750-00-6. 2010.

REBITZER, G; EKVALL, T; FRISCHKNECHT, R; HUNKELER, D; NORRIS, G; RYDBERG, T; SCHMIDT, W; SUH, S; WEIDEMA, B; PENNINGTON, D. **Review Life Cycle Assessment part 1:** framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International* 30, 701-720 pp. 2004.

REN21. **Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century**, Renewable Global Status Report 2009 update. Último acesso: 15 agosto, 2011. [www.ren21.net/RE\\_GSR\\_2009\\_Update.pdf](http://www.ren21.net/RE_GSR_2009_Update.pdf). 2009.

ROBERTS, D. **The Role of Households in Sustaining Rural Economies:** A Structural Path Analysis. *European Review of Agricultural Economics*, vol 32 (3), 393-420 pp. 2005.

RØPKE, I. **Consumption in ecological economics.** International Society for Ecological Economics, Online Encyclopaedia of Ecological Economics. 2005.

ROSILLO-CALLE, F. Alimentos Versus Combustíveis: Podemos Evitar o Conflito?, em Cortez, L.A (Eds), **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade.** FAPESP, ISBN 978-85-212-0531-9. São Paulo, Brazil. 2010.

SEABRA, J; MACEDO, I; VERDE LEAL, M. R. Emissões de Gases de Efeito Estufa Relacionadas ao Ethanol de Cana-de Açúcar, em Cortez, L.A (Eds), **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade.** FAPESP, ISBN 978-85-212-0531-9. São Paulo, Brazil. 2010.

SHAHBAZI, A e LI, Y. **Availability of Crop Residues as Sustainability Feedstock for Bioethanol Production in North Carolina.** *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Volume 129, Numbers 1-3, 41-54 pp. DOI: 10.1385/ABAB:129:1:41. 2006.

SHEEHAN, J; ADEN, A; PAUSTIAN, K; KILLIAN, K; BRENNER, J; WALSH, M; NELSON, R. **Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol.** *Industrial Ecology*, 7, 3-4, 117-146 pp. 2004.

SINGH, A; PANT, D; KORRES, N; NIZAME, A-S; PRASAD, S; MURPHY, J. **Key Issues in Life Cycle Assessment of Ethanol Production from Lignocellulosic Biomass:** Challenges & Perspective. *Bioresour.Technol.*, 101, 5003-5012pp. 2010.

SNA. **System of National Account.** ISBN 978-92-1-161522-7. 2008.



SOLOW, R. **An almost practical step toward sustainability**. *Resource Policy*, vol. 19, issue 3, 162-172 pp. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.03.031. 1993.

SOLOW, R. **Sustainability**: An economist's perspective. Eighteenth J. Seward Johnson lecture to the Marine Policy Center, Woods Hole Oceanographic Institution at Woods Hole, Massachusetts. 1991.

SPATARI, S; ZHANG, Y; MAC LEAN, H. 2005. **Life Cycle Assessment of Switchgrass- and Corn Stover-Derived Ethanol-Fueled Automobiles**. *Environ. Sci. Technol.* 35, 9750-9758 pp. 2005.

STIGLITZ, J. **Growth with Exhaustible Natural Resources**: Efficient and Optimal Growth Paths. *Review of Economic Studies*, Vol.41, Special Symposium Issue, 123-37 pp. 1974.

STRØMMAN, A e HERTWICH, E. **Hybrid life cycle assessment of large scale hydrogen production facilities**. Working paper no. 3/2004. ISSN 1504-3681. 2004.

STRØMMAN, A; PETERS, G; HERTWICH, E. **Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories**. *Journal of Cleaner Production*, 17 (2), 248-254 pp. 2009.

SUH, S e HEIJUNGS, R. **Power Series Expansion and Structural Analysis for Life Cycle Assessment**. *Int. J Life Cycle Assess* 12 (6) 381-390 pp. 2007.

SUH, S e HUPPES, G. **Methods for Life Cycle Inventory of a product**. *Journal of Cleaner Production* Volume 13, Issue 7, 687-697 pp. 2005.

SUH, S e HUPPES, G. **Methods in the Life Cycle Inventory of a Product**, em Suh (Eds), **Handbook of input-output Economics in Industrial Ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3. 2009.

SUH, S e KAGAWA, S. **Industrial ecology and input-output economics: a brief history**, em Suh (Eds) em **Handbook of input-output economics in industrial ecology**. Springer, Science+Business media. ISBN 978-1-4020-4083-2. DOI: 10.1007/978-1-4020-5737-3. 2009.

SUH, S. **Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model**. *Ecological Economics*, Volume 48, Issue 4, Pages 451-467. 2004.

SUH, S; LENZEN, M; TRELOAR, G; HONDO, H; HORVATH, A; HUPPES, G; JOLLIET, O; KLANN, U; KREWITT, W; MORIGUCHI, Y; MUNKSGAARD, J; NORRIS, G. **System boundary selection in life cycle inventories using hybrid approaches**. *Environmental Science and Technology*, 38(3), 657-664 pp. 2004.

TRELOAR, G. J. **Extracting Embodied Energy Paths From Input-Output Tables: Towards An Input-Output-Based Hybrid Energy Analysis Method**. Article Provided By

Taylor And Francis Journals in its Journal Economic Systems Research, Vol. 9, Issue 4, 375-91 pp. 1997.

UDO DE HAES, H; HEINJUNGS, R; SUH, S; HUPPES, G. **Three strategies to overcome the limitations of life-cycle assessment.** Journal of Industrial Ecology, 8, 3, 19 – 32 pp. 2004.

UNEP. **Global guidance principles for life cycle assessment database:** A basis for greener processes and products. Life Cycle Initiative, ISBN:978-92-807-3174-3. 2011.

UNEP. **Guidelines for social life cycle assessment of products.** Life Cycle Initiative, ISBN: 978-92-807-3021-0. 2009.

UNICA. **Etanol e Bioeletricidade:** A Cana-de-Açúcar no futuro da matriz energética, De Souza e Macedo (Eds), ISBN 978-85-63750-00-6. 2010.

VALADKHANI, A. **Using Input-Output Analysis to identify Australian's High Employment Generating Industries.** Australian Bulletin of Labour 29 (3), 199-217 pp. 2003.

VALDES, C. **Brazil's Ethanol Industry:** Looking Forward. United States Department of Agriculture - A report of the Economic Research Services. 2011.

WALTER, A e ENSINAS, A. **Combined Production of Second Generation Biofuels and Electricity from Sugarcane Residues.** Energy 35, 874-879 pp. 2010.

WAUGH, F.V. **Inversion of the Leontief Matrix by Power Series.** Econometrica 18 142-154pp. 1950.

WEIDEMA, B; EKVALL, T; HEIJUNGS, R. **Guidelines for Applications of deepened and Broadened LCA.** Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability (CALCAS), Project no.037075. 2009.

WIEDMANN, T; SUH, S; FENG, S; KUI SHUANG, F; LENZEN, M; ACQUAYE, A; SCOTT, K; BARRETT, J. **Application of hybrid cycle approaches to emerging energy technologies:** the case of wind power in the UK. Environ. Sci. Technol. 45, 5900-5907 pp. DOI:10.1021/es2007287. 2011.

WILTING, H. C. **An energy perspective on economic activities.** Doctoral thesis, Rijksuniversiteit Groningen. 1996.

WOOD, R; LENZEN, M. **Structural path decomposition.** Energy Economics 21(2009) 335-341 pp. 2009.

## Apêndice

### A1 - Matriz de oferta e consumo intermediário da economia Brasileira agregada em 55 setores e 110 produtos – Sistema de Contas Nacionais

Fonte: Elaboração própria baseada no IBGE, Miller e Blair (2009) e Paixão (2010).

## A2 - Agregação dos setores da matriz de insumo-produto

setor	Setores originais TUR	Agregação Energético	Balço	Agregação em 19 setores econômicos
1	Agricultura, silvicultura, exploração florestal	Setor agropecuário		Setor agropecuária
2	Pecuária e pesca	Setor agropecuário		Setor agropecuária
3	Cana de açúcar	Setor agropecuário		Cana de açúcar
4	Minério de ferro	Mineração		Mineração
5	Outros da indústria extrativa	Mineração		Mineração
6	Alimentos e bebidas	Alimentos e bebidas		Alimentos e bebidas
7	Têxteis	Têxtil		Têxtil
8	Celulose e produtos de papel	Celulose e papel		Celulose e papel
9	Jornais, revistas, discos	Celulose e papel		Celulose e papel
10	Petróleo e gás natural	Energia		Energia
11	Refino de petróleo e coque	Energia		Energia
12	Álcool	Energia		Etanol FG
13	Etanol segunda geração	n/a		Etanol SG
14	Produtos químicos	Química		Química
15	Fabricação de resina e elastômeros	Química		Química
16	Defensivos agrícolas	Química		Química
17	Tintas, vernizes, esmaltes e lacas	Química		Química
18	Produtos e preparados químicos diversos	Químicos		Outros Químicos
19	Cimento	Cimento		Cimento
20	Cerâmica e outros	Cerâmica		Cerâmica
21	Fabricação de aço e derivados	Metalúrgico		Metalúrgico
22	Metalurgia de metais não-ferrosos	Metalúrgico		Metalúrgico
23	Produtos de metal - exclusive máquinas e equipamentos	Metalúrgico		Metalúrgico
24	Transporte, armazenagem e correio	Transporte		Transporte
25	Máquinas e equipamentos, inclusive manutenção e reparos	Outros setores industriais		Outros setores industriais
26	Eletrodomésticos	Outros setores industriais		Outros setores industriais
27	Máquinas para escritório e equipamentos de informática	Outros setores industriais		Outros setores industriais
28	Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	Outros setores industriais		Outros setores industriais
29	Material eletrônico e equipamentos de comunicações	Outros setores industriais		Outros setores industriais
30	Aparelhos/instrumentos médico-hospitalar, medida e óptico	Outros setores industriais		Outros setores industriais
31	Automóveis, camionetas e utilitários	Outros setores industriais		Outros setores industriais
32	Caminhões e ônibus	Outros setores industriais		Outros setores industriais
33	Peças e acessórios para veículos automotores	Outros setores industriais		Outros setores industriais
34	Outros equipamentos de transporte	Outros setores industriais		Outros setores industriais
35	Móveis e produtos das indústrias diversas	Outros setores industriais		Outros setores industriais
36	Produtos do fumo	Outros setores industriais		Outros setores industriais
37	Artigos do vestuário e acessórios	Outros setores industriais		Outros setores industriais
38	Artefatos de couro e calçados	Outros setores industriais		Outros setores industriais
39	Produtos de madeira - exclusive móveis	Outros setores industriais		Outros setores industriais
40	Produtos farmacêuticos	Outros setores industriais		Outros setores industriais
41	Perfumaria, higiene e limpeza	Outros setores industriais		Outros setores industriais
42	Artigos de borracha e plástico	Outros setores industriais		Outros setores industriais
43	Eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana	SIUP e Energia		SIUP e Energia
44	Construção	Outros setores industriais		Outros setores industriais
45	Comércio	Comércio e serviços		Comércio e serviços
46	Serviços de informação	Comércio e serviços		Comércio e serviços
47	Intermediação financeira e seguros	Comércio e serviços		Comércio e serviços
48	Serviços imobiliários e aluguel	Comércio e serviços		Comércio e serviços
49	Serviços de manutenção e reparação	Comércio e serviços		Comércio e serviços
50	Serviços de alojamento e alimentação	Comércio e serviços		Comércio e serviços
51	Serviços prestados às empresas	Comércio e serviços		Comércio e serviços
52	Educação mercantil	Comércio e serviços		Comércio e serviços
53	Saúde mercantil	Comércio e serviços		Comércio e serviços
54	Outros serviços	Comércio e serviços		Comércio e serviços
55	Educação pública	Setor público		Setor público
22	Saúde pública	Setor público		Setor público
55	Administração pública e seguridade social	Setor público		Setor público



#### A 4 - Matriz de coeficientes técnicos para a economia brasileira no nível de agregação 18x18

A (18x18)	A Matriz de coeficientes técnicos																	
	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0309 Energia	0310 Álcool	0311 Produtos químicos	0317 Produtos e preparados químicos diversos	0319 Cimento	0320 Cerâmica e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte, armazenagem e correio	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Público
Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0.092	0.040	0.000	0.314	0.074	0.049	0.000	0.009	0.002	0.007	0.000	0.004	0.000	0.000	0.011	0.000	0.002	0.001
cana-de-açúcar	0.001	0.001	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.359	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mineração	0.006	0.001	0.089	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.023	0.008	0.008	0.059	0.051	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
Alimentos e bebidas	0.073	0.006	0.001	0.166	0.000	0.003	0.005	0.028	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006	0.003	0.019	0.009
Têxteis	0.002	0.001	0.009	0.000	0.186	0.005	0.000	0.002	0.001	0.009	0.004	0.008	0.000	0.002	0.018	0.000	0.002	0.000
Celulose e produtos de papel	0.000	0.000	0.011	0.008	0.004	0.160	0.000	0.002	0.006	0.032	0.033	0.011	0.004	0.003	0.009	0.002	0.016	0.005
Energia	0.029	0.065	0.066	0.012	0.024	0.021	0.334	0.011	0.092	0.016	0.100	0.044	0.028	0.137	0.016	0.077	0.007	0.013
Álcool	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
Produtos químicos	0.112	0.096	0.009	0.006	0.056	0.044	0.006	0.002	0.193	0.191	0.011	0.042	0.040	0.001	0.041	0.006	0.002	0.003
Outros Químicos	0.001	0.001	0.005	0.002	0.002	0.019	0.002	0.001	0.023	0.013	0.010	0.004	0.002	0.000	0.005	0.004	0.000	0.001
Cimento	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.035	0.049	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Cerâmica	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	0.006	0.021	0.042	0.005	0.000	0.023	0.000	0.001	0.001
Metalurgia	0.004	0.003	0.027	0.013	0.000	0.015	0.020	0.014	0.017	0.017	0.038	0.022	0.209	0.000	0.083	0.001	0.001	0.003
Transporte	0.021	0.013	0.092	0.047	0.024	0.032	0.045	0.018	0.034	0.027	0.094	0.031	0.045	0.084	0.026	0.020	0.022	0.008
Outros setores industriais	0.022	0.008	0.046	0.027	0.017	0.041	0.025	0.027	0.028	0.045	0.047	0.047	0.041	0.072	0.157	0.026	0.031	0.042
SIUP	0.001	0.002	0.021	0.016	0.035	0.027	0.036	0.013	0.039	0.042	0.049	0.073	0.034	0.014	0.013	0.206	0.013	0.011
Comércio e serviço	0.055	0.031	0.139	0.097	0.093	0.112	0.064	0.042	0.120	0.129	0.134	0.117	0.081	0.128	0.112	0.097	0.164	0.209
Público	0.001	0.000	0.003	0.002	0.002	0.005	0.002	0.001	0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.006	0.002	0.002

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública

### A 5 - Matriz de Leontief para a economia brasileira no nível de agregação 18x18

L	A Matriz de Leontief																	
	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0308 Energia	0310 Álcool	0311 Produtos químicos	0317 Outros Químicos	0319 Cimento	0320 Cerâmica e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Pública
Agricultura, silvicultura, exploração florestal	1.1407	0.0515	0.0087	0.4362	0.1090	0.0748	0.0086	0.0428	0.0134	0.0200	0.0099	0.0136	0.0067	0.0069	0.0262	0.0061	0.0167	0.0105
cana-de-açúcar	0.0062	1.0029	0.0018	0.0400	0.0019	0.0017	0.0095	0.3619	0.0065	0.0022	0.0019	0.0016	0.0013	0.0024	0.0020	0.0015	0.0019	0.0015
Mineração	0.0132	0.0059	1.1025	0.0083	0.0047	0.0084	0.0044	0.0044	0.0362	0.0194	0.0167	0.0739	0.0755	0.0023	0.0166	0.0018	0.0015	0.0018
Alimentos e bebidas	0.1059	0.0160	0.0104	1.2449	0.0170	0.0192	0.0168	0.0445	0.0198	0.0159	0.0110	0.0104	0.0082	0.0103	0.0188	0.0109	0.0312	0.0189
Têxteis	0.0055	0.0030	0.0150	0.0050	1.2317	0.0112	0.0025	0.0054	0.0053	0.0149	0.0097	0.0152	0.0041	0.0055	0.0281	0.0021	0.0049	0.0026
Celulose e produtos de papel	0.0066	0.0038	0.0225	0.0185	0.0125	1.1983	0.0059	0.0070	0.0173	0.0480	0.0501	0.0241	0.0134	0.0100	0.0205	0.0083	0.0253	0.0128
Energia	0.0937	0.1301	0.1566	0.0900	0.0880	0.0822	1.5408	0.0799	0.2128	0.0952	0.2149	0.1330	0.1058	0.2435	0.0749	0.1638	0.0291	0.0355
Álcool	0.0043	0.0039	0.0040	0.0036	0.0035	0.0029	0.0248	1.0023	0.0165	0.0047	0.0044	0.0034	0.0030	0.0057	0.0039	0.0032	0.0025	0.0024
Produtos químicos	0.1678	0.1319	0.0282	0.0854	0.1085	0.0914	0.0234	0.0589	1.2604	0.2586	0.0356	0.0730	0.0755	0.0138	0.0822	0.0185	0.0117	0.0128
Outros Químicos	0.0057	0.0043	0.0083	0.0060	0.0064	0.0264	0.0041	0.0033	0.0312	1.0217	0.0141	0.0089	0.0063	0.0019	0.0099	0.0064	0.0018	0.0022
Cimento	0.0007	0.0006	0.0013	0.0010	0.0006	0.0010	0.0034	0.0007	0.0015	0.0014	1.0385	0.0536	0.0015	0.0013	0.0095	0.0008	0.0006	0.0006
Cerâmica	0.0037	0.0024	0.0046	0.0065	0.0024	0.0044	0.0047	0.0043	0.0088	0.0104	0.0260	1.0490	0.0104	0.0036	0.0313	0.0024	0.0028	0.0030
Metalurgia	0.0204	0.0139	0.0543	0.0370	0.0123	0.0382	0.0483	0.0302	0.0448	0.0425	0.0706	0.0512	1.2826	0.0201	0.1360	0.0137	0.0103	0.0131
Transporte	0.0516	0.0332	0.1345	0.0953	0.0534	0.0653	0.0901	0.0420	0.0770	0.0636	0.1386	0.0743	0.0894	1.1169	0.0620	0.0450	0.0376	0.0232
Outros setores industriais	0.0550	0.0283	0.0940	0.0793	0.0514	0.0868	0.0676	0.0533	0.0763	0.0916	0.1000	0.0962	0.0915	0.1147	1.2202	0.0580	0.0545	0.0669
SIUP	0.0226	0.0187	0.0500	0.0441	0.0706	0.0601	0.0799	0.0310	0.0855	0.0846	0.0927	0.1229	0.0737	0.0384	0.0444	1.2752	0.0256	0.0241
Comércio e serviço	0.1449	0.0873	0.2539	0.2350	0.1987	0.2285	0.1678	0.1102	0.2547	0.2559	0.2612	0.2424	0.1986	0.2201	0.2306	0.1867	1.2280	0.2786
Pública	0.0026	0.0016	0.0052	0.0048	0.0041	0.0076	0.0043	0.0023	0.0052	0.0056	0.0067	0.0060	0.0046	0.0043	0.0041	0.0082	0.0034	1.0034

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública

## A 6 - Coeficientes dos fatores ambientais e econômicos da economia brasileira em 18 setores

Coeficientes	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0309 Energia	0310 Álcool	0311 Produtos químicos	0317 Outros Químicos	0319 Cimento	0320 Cerâmica e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Pública
CO2 (milhões kg CO2)	0.080903854	0.182463133	0.08528868	0.011768547	0.02139243	0.045361411	0.021984894	0.01706207	0.031479668	0.0124424	0.229962547	0.0604921	0.214536364	0.98609161	0.005352822	0.022145845	0.001465842	0.008152544
Consumo energético TJ	1.043268914	2.416660024	0.97006776	0.110083328	0.15090097	0.471725768	0.251357346	0.2200195	0.308436095	0.05084485	1.974382022	0.7745651	1.925062333	13.55624164	0.042374447	0.126649332	0.010887972	0.073867272
Emprego (mil ocupações)	0.102890091	0.020884815	0.00649605	0.008562123	0.0288783	0.008509938	0.000359642	0.0059311	0.001777921	0.00691244	0.001797753	0.0212349	0.006358587	0.020956561	0.017330107	0.003175127	0.032340031	0.021486771
Valor Adicionado (milhões R\$)	0.558725238	0.280031885	0.42283138	0.198934301	0.39234252	0.370533778	0.24417851	0.44077023	0.201218874	0.25691244	0.336479401	0.37643	0.333977547	0.505583257	0.334323681	0.538206297	0.659802995	0.640366299

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública



### A 7 - Estrutura TRU 6 setores para a estimativa dos coeficientes técnicos do setor Etanol SG

produção	Etanol SG	Etanol FG	Químicos	Oche	SIUP	Resto da economia	total x
Etanol SG	7902.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7902.44
Etanol FG	0.00	12308.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12308.00
Che	0.00	0.00	105179.00	0.00	0.00	0.00	105179.00
Oche	0.00	0.00	0.00	13020.00	0.00	0.00	13020.00
SIUP	0.00	0.00	0.00	0.00	112436.44	0.00	112436.44
Resto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3543739.56	3543739.56

USO	Etanol SG	Etanol FG	Químicos	Oche	SIUP	Resto da economia	total	Damanda Final	q total
Etanol SG	340.38	542.28	0.00	0.00	808.72	0.00	1691.38	7902.44	9533.82
Etanol FG	567.42	0.00	1402.00	0.00	0.00	9170.00	11139.42	5184.00	16323.42
Che	1724.87	21.00	20590.00	2541.00	646.00	69500.00	95022.87	11478.00	106500.87
Oche	2203.37	11.00	2588.00	178.00	493.00	7828.00	13301.37	2727.00	16028.37
SIUP	0.00	170.60	4254.10	570.77	23966.90	56464.05	85426.42	30334.36	115760.78
Resto	0.00	6342.40	35796.90	3866.23	25459.22	1558893.26	71464.75	2106601.64	3536565.23

Fonte: Resultado da pesquisa baseada nas tabelas 6 e 7.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública; Che – setor químico; Oche – setor “outros químicos”; Resto – restante da economia; x – produção total; q – fornecimento total

## A 8 - Matriz de Coeficientes técnicos da economia brasileira com o setor etanol SG

A (19x19)	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0309 Energia	Etanol FG	Etanol SG	0311 Produtos químicos	0317 Outros Químicos	0319 Cimento	0320 Cerâmica e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Pública
Agricultura, silvicultura, e cana-de-açúcar	0,092	0,040	0,000	0,314	0,074	0,049	0,000	0,009	0,009	0,002	0,007	0,000	0,004	0,000	0,000	0,011	0,000	0,002	0,001
Mineração	0,006	0,001	0,089	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,023	0,008	0,008	0,059	0,051	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Alimentos e bebidas	0,073	0,006	0,001	0,166	0,000	0,003	0,005	0,028	0,028	0,006	0,003	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006	0,003	0,019	0,009
Têxteis	0,002	0,001	0,009	0,000	0,186	0,005	0,000	0,002	0,002	0,001	0,009	0,004	0,008	0,000	0,002	0,018	0,000	0,002	0,000
Celulose e produtos de papel	0,000	0,000	0,011	0,008	0,004	0,160	0,000	0,002	0,002	0,006	0,032	0,033	0,011	0,004	0,003	0,009	0,002	0,016	0,005
Energia	0,029	0,065	0,066	0,012	0,024	0,021	0,334	0,011	0,000	0,092	0,016	0,100	0,044	0,028	0,137	0,016	0,077	0,007	0,013
Etanol FG	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,054	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
Etanol SG	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
Produtos químicos	0,112	0,096	0,009	0,006	0,056	0,044	0,006	0,002	0,216	0,193	0,191	0,011	0,042	0,040	0,001	0,041	0,006	0,002	0,003
Outros Químicos	0,001	0,001	0,005	0,002	0,002	0,019	0,002	0,001	0,226	0,023	0,013	0,010	0,004	0,002	0,000	0,005	0,004	0,000	0,001
Cimento	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,049	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
Cerâmica	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	0,021	0,042	0,005	0,000	0,023	0,000	0,001	0,001
Metalurgia	0,004	0,003	0,027	0,013	0,000	0,015	0,020	0,014	0,014	0,017	0,017	0,038	0,022	0,209	0,000	0,083	0,001	0,001	0,003
Transporte	0,021	0,013	0,092	0,047	0,024	0,032	0,045	0,018	0,018	0,034	0,027	0,094	0,031	0,045	0,084	0,026	0,020	0,022	0,008
Outros setores industriais	0,022	0,008	0,046	0,027	0,017	0,041	0,025	0,027	0,027	0,028	0,045	0,047	0,047	0,041	0,072	0,157	0,026	0,031	0,042
SIUP	0,001	0,002	0,021	0,016	0,035	0,027	0,036	0,013	0,013	0,039	0,042	0,049	0,073	0,034	0,014	0,013	0,206	0,013	0,011
Comércio e serviço	0,055	0,031	0,139	0,097	0,093	0,112	0,064	0,042	0,042	0,120	0,129	0,134	0,117	0,081	0,128	0,112	0,097	0,164	0,209
Pública	0,001	0,000	0,003	0,002	0,002	0,005	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,006	0,002	0,002

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública.

## A 9 - Matriz de Leontief para a economia brasileira com o setor Etanol SG

L (19x19)	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0309 Energia	Etanol FG	Etanol SG	0311 Produtos químicos	0317 Outros Químicos	0319 Cimento	0320 Cerâmicas e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Pública
Agricultura, silvicultura, e cana-de-açúcar	1.1403 0.0057	0.0509 1.0022	0.0079 0.0012	0.4354 0.0398	0.1080 0.0014	0.0740 0.0013	0.0069 0.0009	0.0465 0.3895	0.0543 0.3978	0.0129 0.0059	0.0193 0.0019	0.0090 0.0009	0.0124 0.0011	0.0055 0.0009	0.0064 0.0010	0.0254 0.0016	0.0061 0.0036	0.0157 0.0016	0.0101 0.0012
Mineração	0.0134	0.0059	1.1022	0.0079	0.0045	0.0084	0.0038	0.0052	0.0171	0.0355	0.0191	0.0163	0.0736	0.0747	0.0021	0.0160	0.0018	0.0014	0.0016
Alimentos e bebidas	0.1057	0.0158	0.0102	1.2450	0.0161	0.0183	0.0147	0.0477	0.0558	0.0190	0.0150	0.0099	0.0095	0.0074	0.0096	0.0178	0.0115	0.0303	0.0191
Têxteis	0.0050	0.0026	0.0155	0.0041	1.2309	0.0107	0.0023	0.0054	0.0099	0.0050	0.0151	0.0093	0.0147	0.0039	0.0060	0.0286	0.0021	0.0046	0.0024
Celulose e produtos de papel	0.0064	0.0036	0.0219	0.0189	0.0119	1.1985	0.0053	0.0077	0.0222	0.0174	0.0479	0.0494	0.0243	0.0134	0.0100	0.0207	0.0082	0.0247	0.0126
Energia	0.0945	0.1309	0.1565	0.0900	0.0887	0.0831	1.5396	0.0879	0.1397	0.2137	0.0958	0.2146	0.1335	0.1049	0.2438	0.0751	0.1656	0.0297	0.0358
Etanol FG	0.0021	0.0015	0.0009	0.0014	0.0015	0.0014	0.0006	1.0406	0.0628	0.0136	0.0031	0.0009	0.0012	0.0012	0.0017	0.0024	0.0010	0.0015	0.0016
Etanol SG	0.0014	0.0002	0.0015	0.0008	0.0006	0.0005	0.0005	0.0391	1.0391	0.0011	0.0007	0.0006	0.0009	0.0006	0.0003	0.0004	0.0080	0.0002	0.0002
Produtos químicos	0.1678	0.1317	0.0282	0.0855	0.1081	0.0914	0.0215	0.0763	0.4050	1.2607	0.2582	0.0357	0.0728	0.0750	0.0137	0.0815	0.0211	0.0116	0.0123
Outros Químicos	0.0064	0.0049	0.0082	0.0065	0.0063	0.0265	0.0047	0.0132	0.2498	0.0315	1.0216	0.0142	0.0090	0.0062	0.0019	0.0096	0.0084	0.0014	0.0022
Cimento	0.0007	0.0006	0.0011	0.0010	0.0006	0.0009	0.0038	0.0008	0.0014	0.0013	1.0387	0.0541	0.0013	0.0014	0.0093	0.0008	0.0005	0.0007	0.0007
Cerâmicas	0.0039	0.0027	0.0044	0.0060	0.0023	0.0046	0.0039	0.0051	0.0092	0.0082	0.0104	0.0264	1.0485	0.0097	0.0035	0.0310	0.0021	0.0028	0.0032
Metalurgia	0.0204	0.0140	0.0534	0.0367	0.0117	0.0380	0.0477	0.0327	0.0516	0.0441	0.0423	0.0698	0.0507	1.2819	0.0196	0.1349	0.0136	0.0095	0.0133
Transporte	0.0512	0.0326	0.1344	0.0948	0.0535	0.0654	0.0886	0.0460	0.0764	0.0769	0.0629	0.1387	0.0738	0.0892	1.1163	0.0614	0.0456	0.0373	0.0229
Outros setores industriais	0.0550	0.0280	0.0937	0.0795	0.0506	0.0869	0.0669	0.0592	0.0961	0.0757	0.0911	0.0998	0.0962	0.0915	0.1151	1.2196	0.0588	0.0541	0.0671
SIUP	0.0228	0.0193	0.0506	0.0445	0.0707	0.0601	0.0799	0.0345	0.0713	0.0852	0.0840	0.0929	0.1226	0.0738	0.0392	0.0448	1.2750	0.0261	0.0242
Comércio e serviço	0.1448	0.0870	0.2534	0.2352	0.1974	0.2289	0.1642	0.1231	0.2350	0.2536	0.2553	0.2600	0.2414	0.1971	0.2194	0.2295	0.1877	1.2272	0.2780
Pública	0.0027	0.0011	0.0053	0.0046	0.0042	0.0078	0.0045	0.0024	0.0047	0.0048	0.0056	0.0068	0.0059	0.0045	0.0038	0.0043	0.0088	0.0031	1.0032

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: SIUP – Serviços industriais de utilidade pública

## A 10 - Matriz de coeficiente dos fatores econômicos e ambientais para uma economia brasileira com o setor etanol SG

Coefficientes	0101 Agricultura, silvicultura, exploração florestal	0101 Cana-de-açúcar	0202 Mineração	0301 Alimentos e Bebidas	0303 Têxteis	0307 Celulose e produtos de papel	0309 Energia	0310 Etanol FG	Etanol SG	0311 Produtos químicos	0317 Outros Químicos	0319 Cimento	0320 Cerâmica e outros	0321 Metalurgia	0701 Transporte	0324 Outros setores industriais	0401 SIUP	0601 Comércio e Serviço	1201 Pública
CO2 (milhões kg CO2)	0.080903854	0.182463133	0.08528868	0.011768547	0.02139243	0.045361411	0.021984894	0.01706207	0	0.03147967	0.012442396	0.2299625	0.060492086	0.214536364	0.98609161	0.005352822	0.022145845	0.001465842	0.008152544
Consumo energético TJ	1.043268914	2.416660024	0.97006776	0.110083328	0.15090097	0.471725768	0.251357346	0.2200195	0	0.30843609	0.050844854	1.974382	0.774565115	1.925062333	13.55624164	0.042374447	0.126649332	0.010887972	0.073867272
Emprego (mil ocupações)	0.102890091	0.020884815	0.00649605	0.008562123	0.0288783	0.008509938	0.000359642	0.0059311	0.005931102	0.00177792	0.006912442	0.0017978	0.021234916	0.006358587	0.020956561	0.017390107	0.003175127	0.032340031	0.021486771
Valor Adicionado (milhões R\$)	0.558725238	0.280031885	0.42283138	0.198934301	0.39234252	0.370533778	0.24417851	0.44077023	0.440770231	0.20121887	0.256912442	0.3364794	0.376430027	0.339377547	0.505583257	0.334323681	0.538206297	0.659802995	0.640366299

Fonte: Resultado da pesquisa.

**B - Algoritmo para a análise *structural path* para rotas de fornecedores de primeira, segunda e terceira ordem da economia brasileira com 19 setores.**

```

DA=(eye(19,19)-A);
DT=det(DA)
% first order
for i=9;
    j=1:19;
    ind1=[i];
    for j=(setdiff(1:length(j),ind1)); %http://www.mathworks.com/matlabcentral/newsreader/view_thread/148688
        D1(j,1)=A(j,i);
        DA1=DA;
        DA1([i,j],:)=[];
        DA1(:,[i,j])=[];
        Mp1(j,1)=det(DA1)/DT;
        TI1(j,1)=TCO2(j)*D1(j)*Mp1(j)*F2010(i);
        TF1(j,1)=F(j)*D1(j)*Mp1(j)*F2010(i);
        TE1(j,1)=E(j)*D1(j)*Mp1(j)*F2010(i);
        TGDP1(j,1)=GDP(j)*D1(j)*Mp1(j)*F2010(i);
        T1=[TI1,TF1,TE1,TGDP1];
    end
end
% second order
for i=9;
    for j=1;
        k=1:19;
        ind2=[i j]; %% indice to be removed A=A(setdiff(1:length(A),ind))or A=1:10;% 1-D array/ ind=[1 4 7];%indices to be
removed/A(ind)=[];%remove;
        for k=k(setdiff(1:length(k),ind2));
            D2(k,1)=A(k,i)*A(j,k);
            DA2=DA;
            DA2([i,k,j],:)=[];
            DA2(:,[i,k,j])=[];
            Mp2(k,1)=det(DA2)/DT;
            TI2(k,1)=TCO2(k)*D2(k)*Mp2(k)*F(i);
            TF2(k,1)=F(j)*D2(k)*Mp2(k)*F(i);
            TE2(k,1)=E(j)*D2(k)*Mp2(k)*F(i);
            TGDP2(k,1)=GDP(j)*D2(k)*Mp2(k)*F(i);
            T2=[TI2,TF2,TE2,TGDP2];
        end
    end
end
% third order
for i=9;
    for j=1;
        k=2;
        l=1:19;
        ind2=[i j]; %% indice to be removed A=A(setdiff(1:length(A),ind))or A=1:10;% 1-D array/ ind=[1 4 7];%indices to be
removed/A(ind)=[];%remove;
        for k=k(setdiff(1:length(k),ind2));
            D3(k,1)=A(l,i)*A(l,k)*A(k,j);
            DA3=DA;
            DA3([i,l,k,j],:)=[];
            DA3(:,[i,l,k,j])=[];
            Mp3(l,1)=det(DA3)/DT;
            TI3(l,1)=TCO2(j)*D3(k)*Mp3(k)*F(i);
            TF3(l,1)=F(j)*D3(k)*Mp3(k)*F(i);
            TE3(l,1)=E(j)*D3(k)*Mp3(k)*F(i);
            TGDP3(l,1)=GDP(j)*D3(k)*Mp3(k)*F(i);
            T3=[TI3,TF3,TE3,TGDP3];
        end
    end
end
end

```

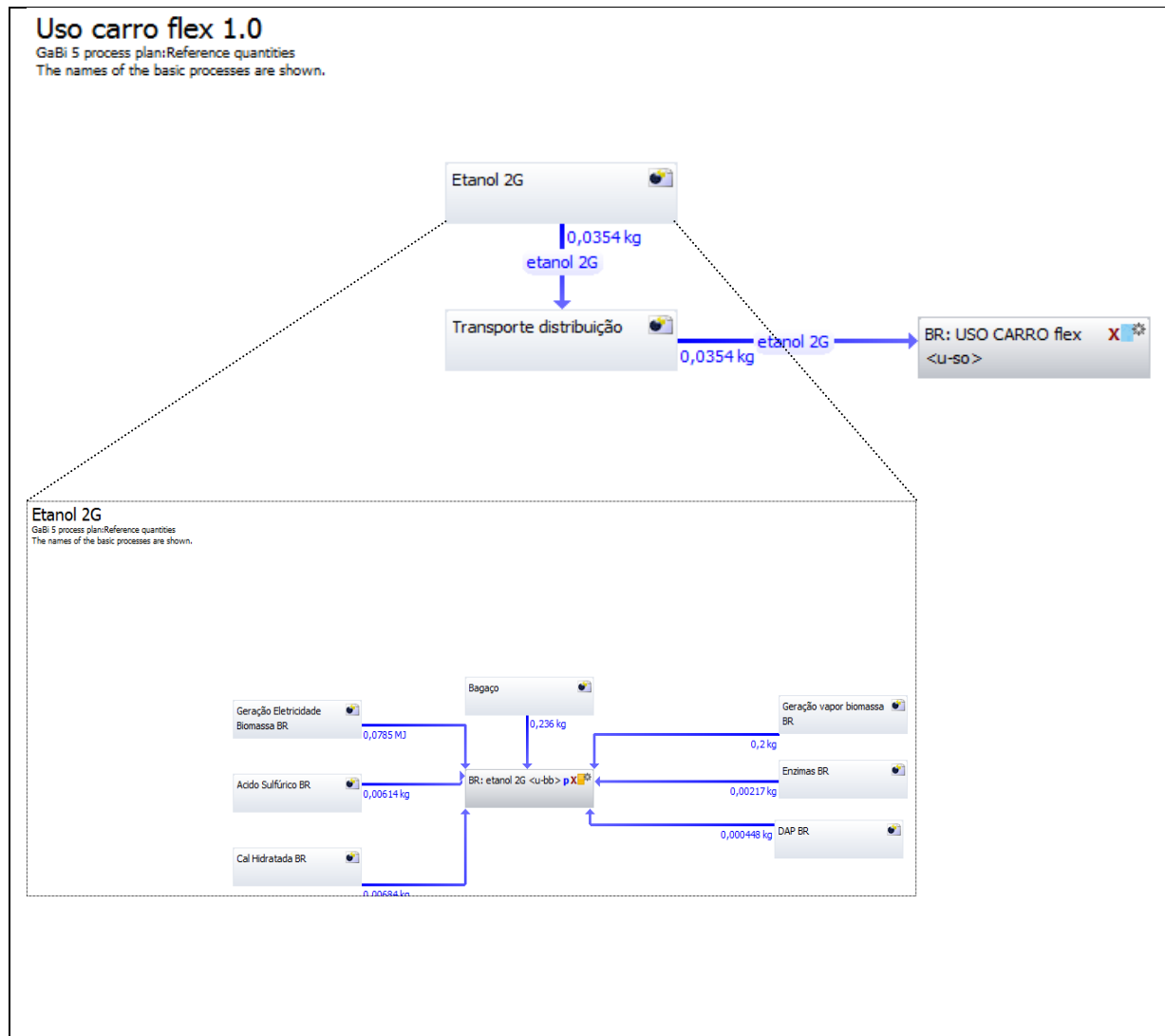
## B1 - Algoritmo para a análise *structural path* para rotas de fornecedores de primeira, segunda e terceira ordem da análise ACV híbrida do etanol derivado de bagaço.

```

A=eye(26,26)-A29; % for SPA in LCA B=(I-A)----- A^-1=I+B+B^2+B^3+....+B^m
;
% first order
for i=8;
    j=1:26;
    ind1=[i];
    for j=j(setdiff(1:length(j),ind1)); %http://www.mathworks.com/matlabcentral/newsreader/view_thread/148688
        D1(j,1)=A(j,i);
        TH1(j,1)=TCO2(j)*D1(j)* F2010(i);
        TF1(j,1)=F(j)*D1(j)* F2010(i);
        TE1(j,1)=E(j)*D1(j)* F2010(i);
        TGDP1(j,1)=GDP(j)*D1(j)* F2010(i);
        T1=[TH1,TF1,TE1,TGDP1];
    end
end
% second order
for i=8;
    for j=1;
        k=1:26;
        ind2=[i j]; % indice to be removed A=A(setdiff(1:length(A),ind))or A=1:10;% 1-D array/ ind=[1 4 7];%indices to be
removed/A(ind)=[];%remove;
        for k=k(setdiff(1:length(k),ind2));
            D2(k,1)=A(k,i)*A(j,k);
            TI2(k,1)=TCO2(k)*D2(k)* F (i);
            TF2(k,1)=F(j)*D2(k)* F (i);
            TE2(k,1)=E(j)*D2(k)* F (i);
            TGDP2(k,1)=GDP(j)*D2(k)* F (i);
            T2=[TI2,TF2,TE2,TGDP2];
        end
    end
end
% third order
for i=8;
    for j=1;
        k=2;
        l=1:26;
        ind2=[i j]; % indice to be removed A=A(setdiff(1:length(A),ind))or A=1:10;% 1-D array/ ind=[1 4 7];%indices to be
removed/A(ind)=[];%remove;
        for k=k(setdiff(1:length(k),ind2));
            D3(k,1)=A(l,i)*A(l,k)*A(k,j);
            TI3(l,1)=TCO2(j)*D3(k)* F (i);
            TF3(l,1)=F(j)*D3(k)* F (i);
            TE3(l,1)=E(j)*D3(k)* F (i);
            TGDP3(l,1)=GDP(j)*D3(k)* F (i);
            T3=[TI3,TF3,TE3,TGDP3];
        end
    end
end
end

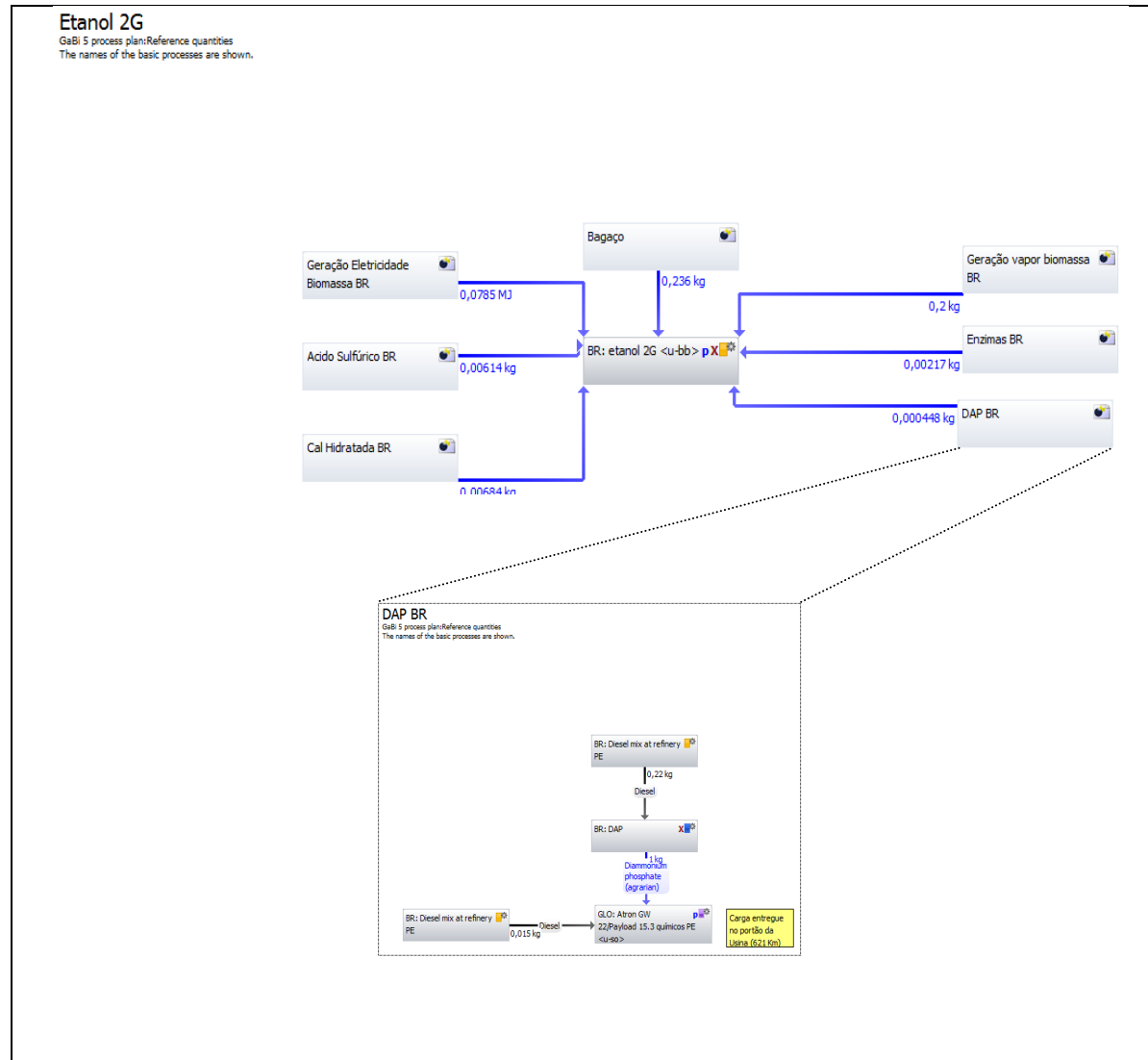
```

## C1 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-grave* de processos contruído por literatura científica e a base de dados ILCD



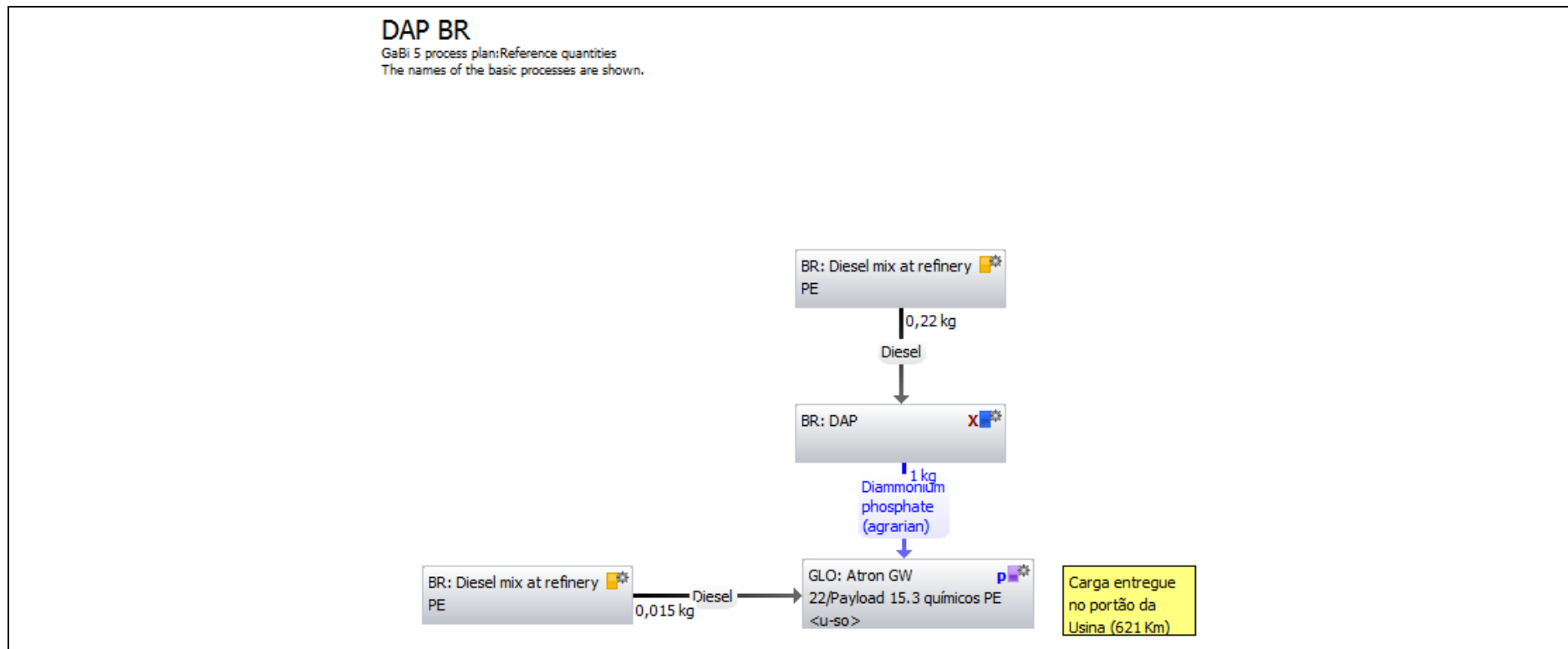
Fonte: Resultado da pesquisa.

## C2 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-gate* Etanol 2G, construído por literatura científica e a base de dados ILCD



Fonte: Resultado da pesquisa.

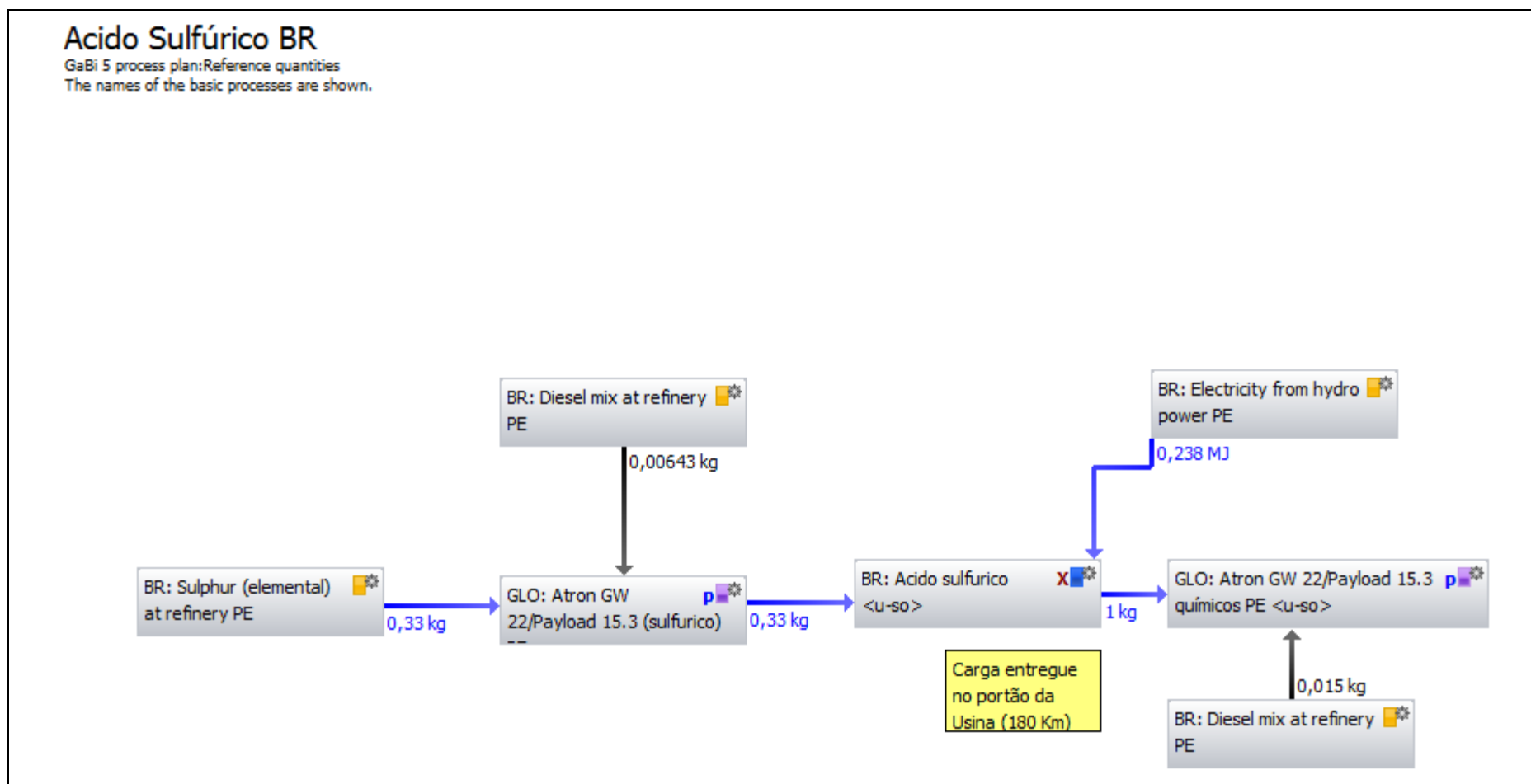
## C2.1 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-gate* de processos Fosfato de Diamonio (DAP) contruído por literatura científica e a base de dados ILCD



Fonte: Resultado da pesquisa

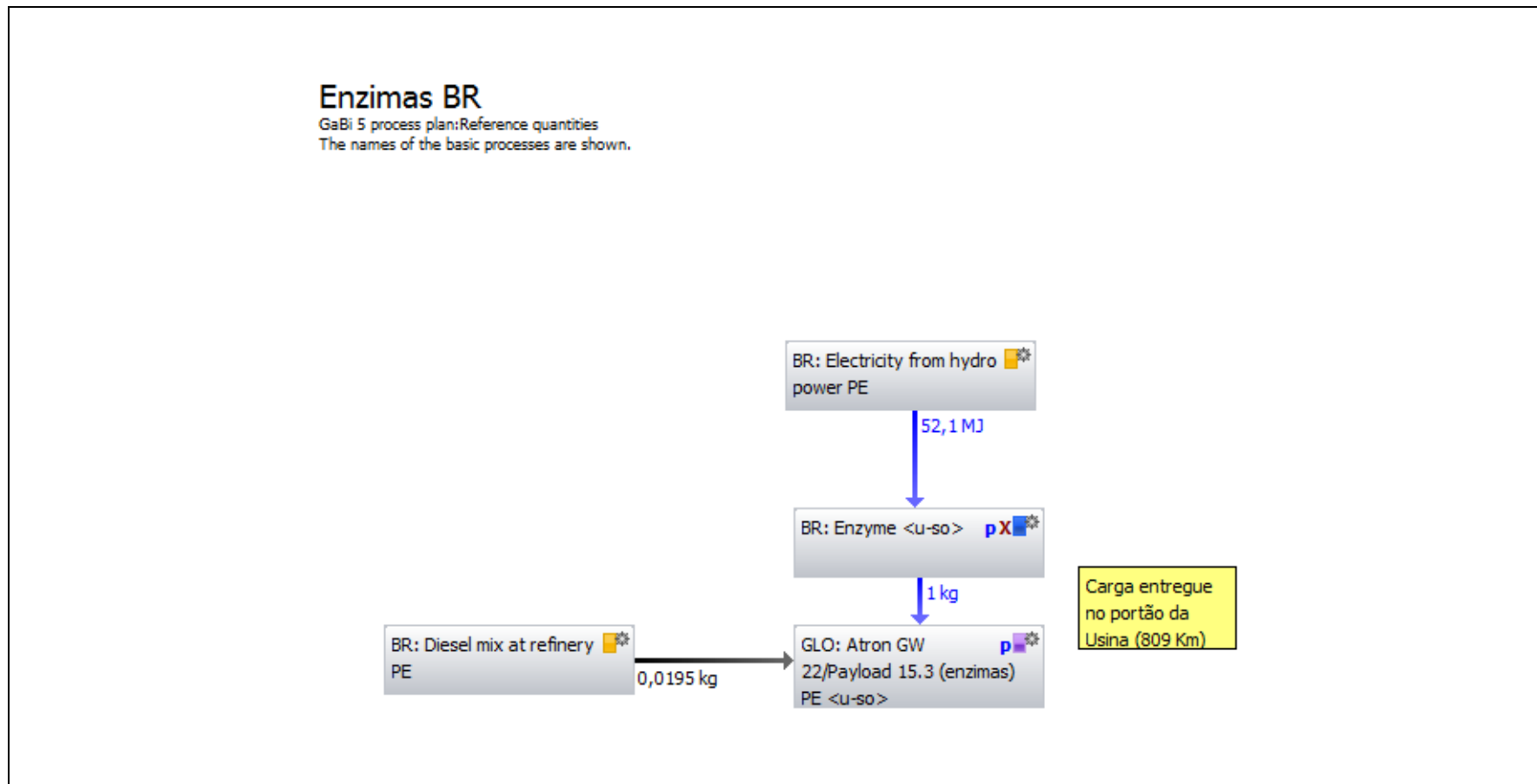


## C2.2 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-gate* de processos Acido Sulfúrico contruído por literatura científica e a base de dados ILCD



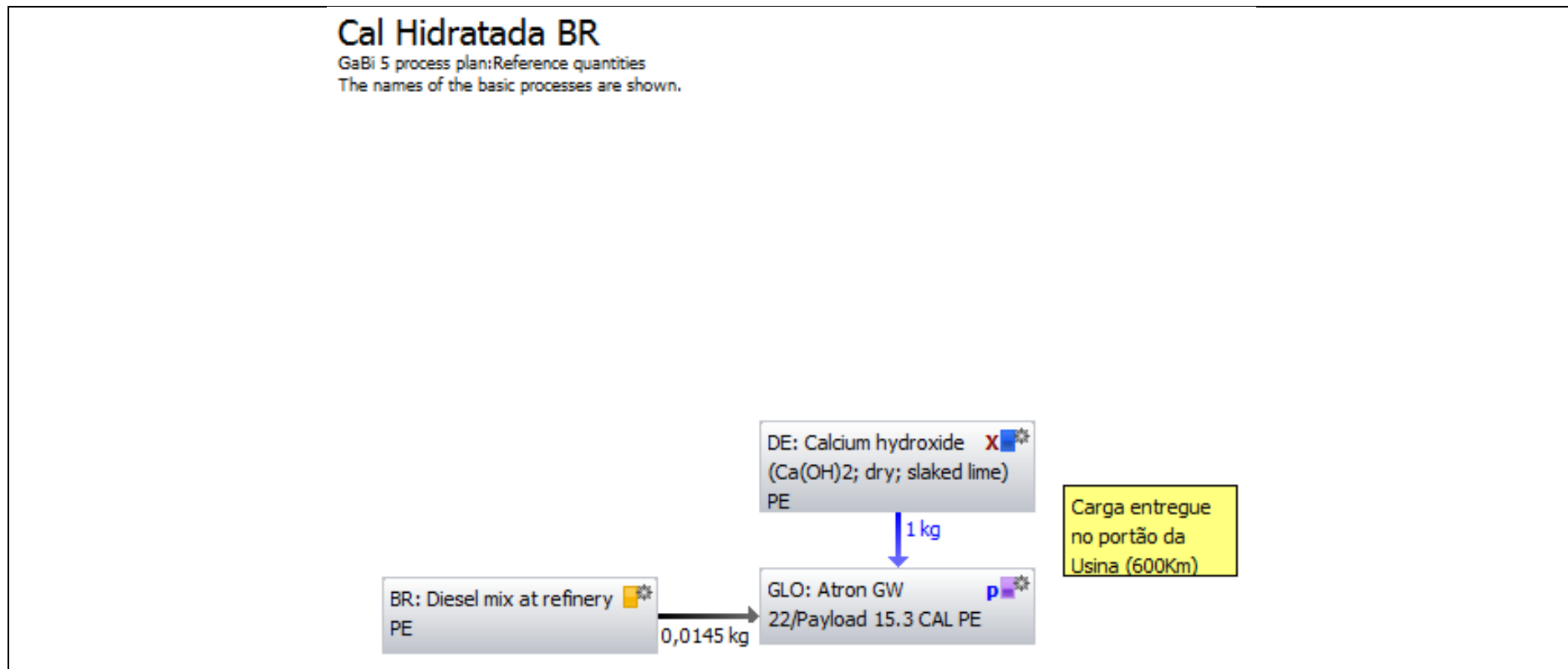
Fonte: Resultado da pesquisa

### C2.3 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-gate* de processos Enzimas contruído por literatura científica e a base de dados ILCD



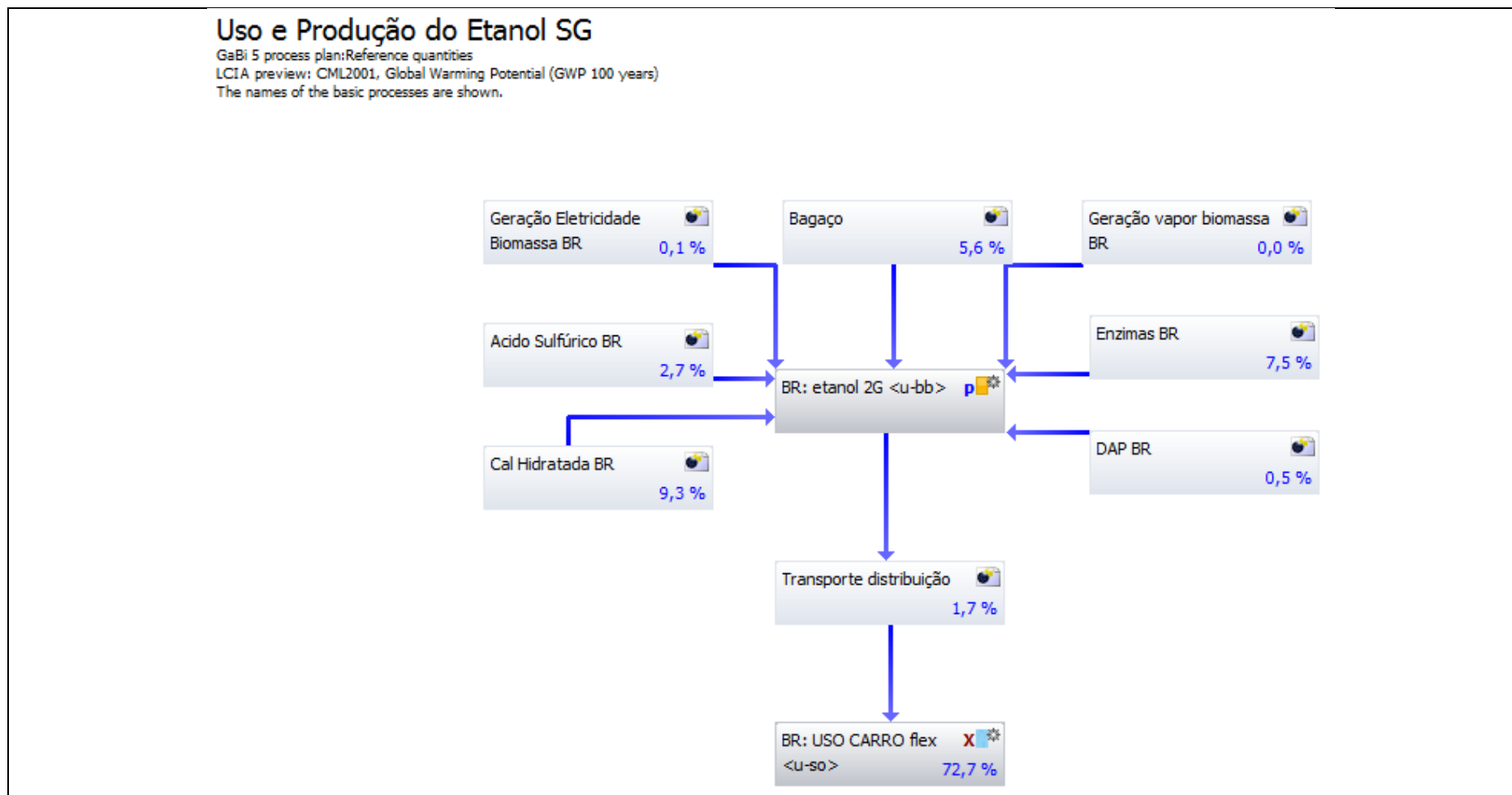
Fonte: Resultado da pesquisa

## C2.4 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-gate* de processos Cal hidratada contruído por literatura científica e a base de dados ILCD



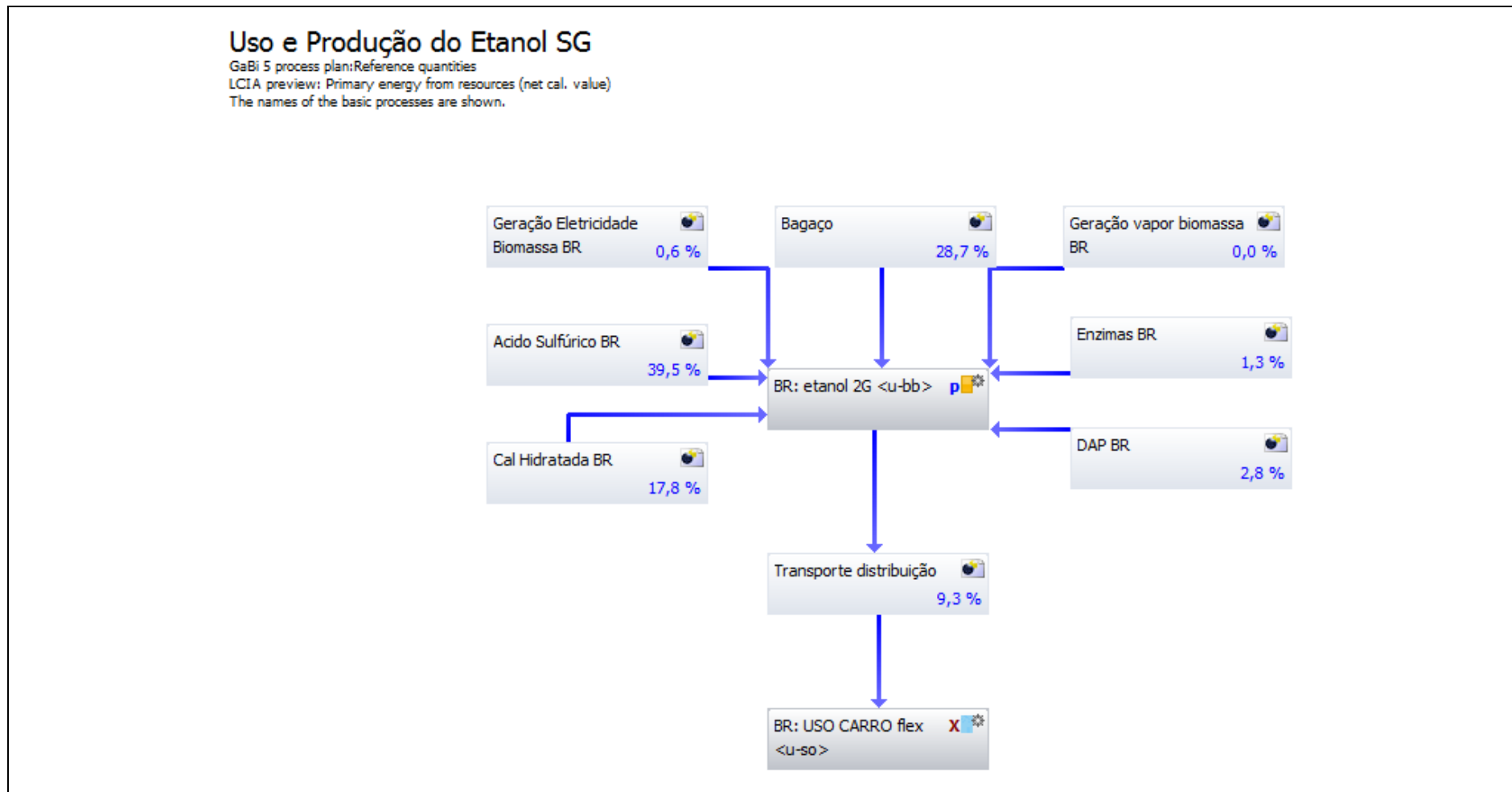
Fonte: Resultado da pesquisa

## C2.5 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-grave* de processos para a identificação dos principais processos que contribuem com as emissões de CO<sub>2</sub> segundo o método CML 2001 para Global Warming Potential



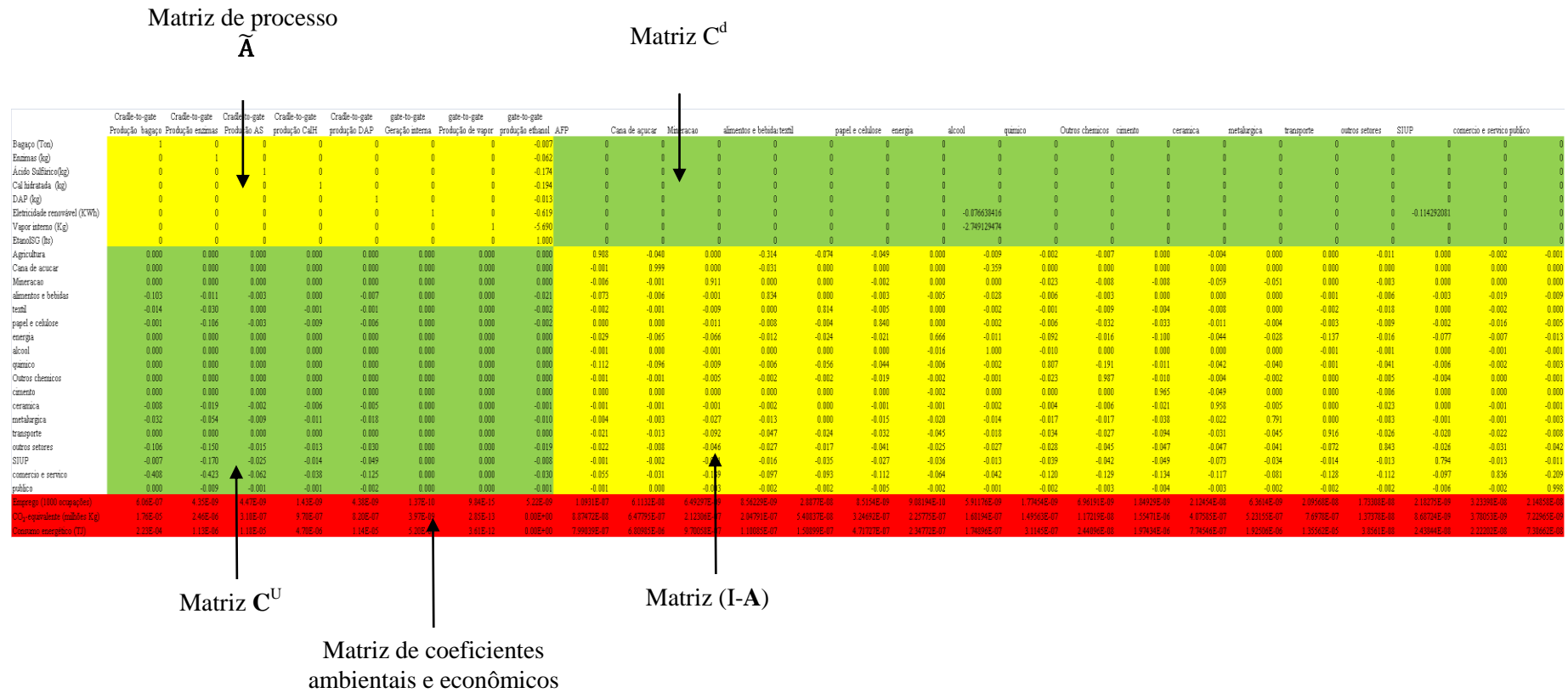
Fonte: Resultado da pesquisa

**C2.6 - Fluxograma de processos para a ACV *cradle-to-grave* de processos para a identificação dos principais processos que contribuem com o consumo energético considerando o poder calorífico líquido**



Fonte: Resultado da pesquisa

### C3 - Matriz ICV Híbrida Cradle-to-Gate para a avaliação de impactos ambientais e econômico do Etanol SG



Fonte: Resultado da pesquisa

### C4 - Matriz ACV Híbrida *Cradle-to-Grave* para a avaliação de impactos ambientais e econômico do etanol SG

	cradle-to-gate produção ethanol	cradle-to-gate Transporte distribuição	gate-to-gate Uso carro flex 1.0	AFP	Cana	Min	A&B	Text	P&C	En	FG	Che	Oche	Cim	Cer	Met	Trans	O. Setores	SIUP	Co./serviço	Publico	
Etanol (t/s)	1.000	0.000	-0.101	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Transporte distribuação (carga)	0.000	1.000	-0.101	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
USO carro flex (Km)	0.000	0.000	1.000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AFP	0.000	0.000	0.000	0.9150	-0.0679	-0.0007	-0.2922	-0.0727	-0.0475	0.0000	-0.0776	-0.0016	-0.0154	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000	-0.0107	0.0000	-0.0015	-0.0006	
Cana	0.000	0.000	0.000	-0.0012	0.9984	0.0000	-0.0303	0.0000	0.0000	0.0000	-0.2807	-0.0001	-0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Min	0.000	0.000	0.000	-0.0061	-0.0019	0.9084	-0.0002	0.0000	-0.0019	-0.0001	0.0000	-0.0208	-0.0074	-0.0087	-0.0536	-0.0511	0.0000	-0.0029	0.0000	0.0000	-0.0001	
A&B	-0.021	0.000	-0.002	-0.0760	-0.0134	-0.0009	0.8323	-0.0003	-0.0035	-0.0058	-0.0293	-0.0064	-0.0034	-0.0005	-0.0005	-0.0002	-0.0011	-0.0064	-0.0018	-0.0199	-0.0086	
Text	-0.002	0.000	-0.007	-0.0020	-0.0019	-0.0086	-0.0004	0.8167	-0.0054	0.0000	-0.0024	-0.0008	-0.0093	-0.0043	-0.0085	-0.0001	-0.0016	-0.0177	0.0000	-0.0022	-0.0001	
P&C	-0.002	0.000	-0.003	-0.0001	-0.0001	-0.0113	-0.0077	-0.0044	0.8379	-0.0006	-0.0024	-0.0058	-0.0326	-0.0338	-0.0110	-0.0039	-0.0028	-0.0090	-0.0014	-0.0161	-0.0050	
En	0.000	0.000	0.000	-0.0308	-0.0322	-0.0659	-0.0122	-0.0233	-0.0207	0.6599	-0.0134	-0.0912	-0.0072	-0.0993	-0.0436	-0.0280	-0.1362	-0.0157	-0.0645	-0.0114	-0.0106	
FG	0.000	0.000	0.000	-0.0007	-0.0007	-0.0006	-0.0008	-0.0004	-0.0001	-0.0153	0.9995	-0.0099	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0011	-0.0012	0.0000	-0.0014	-0.0012	
Che	0.000	0.000	0.000	-0.1105	-0.1648	-0.0088	-0.0059	-0.0557	-0.0440	-0.0094	-0.0018	0.8087	-0.1917	-0.0104	-0.0433	-0.0395	-0.0004	-0.0413	-0.0039	-0.0018	-0.0034	
Oche	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0053	-0.0018	-0.0021	-0.0190	-0.0018	-0.0008	-0.0231	0.9865	-0.0100	-0.0041	-0.0021	0.0000	-0.0052	-0.0026	-0.0004	-0.0009	
Cim	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0016	0.0000	-0.0002	-0.0001	0.9651	-0.0487	-0.0001	0.0000	-0.0061	0.0000	0.0000	0.0000	
Cer	-0.001	0.000	-0.009	-0.0006	-0.0010	-0.0011	-0.0025	0.0000	-0.0008	-0.0014	-0.0019	-0.0045	-0.0059	-0.0205	0.9573	-0.0053	0.0000	-0.0231	-0.0002	-0.0009	-0.0008	
Met	-0.010	0.000	-0.032	-0.0032	-0.0041	-0.0254	-0.0131	-0.0001	-0.0148	-0.0196	-0.0145	-0.0173	-0.0165	-0.0383	-0.0224	0.7890	-0.0003	-0.0835	-0.0008	-0.0014	-0.0027	
Trans	0.000	0.000	0.000	-0.0209	-0.0232	-0.0911	-0.0466	-0.0235	-0.0315	-0.0473	-0.0179	-0.0335	-0.0275	-0.0927	-0.0310	-0.0444	0.9165	-0.0261	-0.0130	-0.0222	-0.0083	
O. Setores	-0.019	0.000	-0.060	-0.0210	-0.0137	-0.0458	-0.0268	-0.0170	-0.0413	-0.0290	-0.0265	-0.0293	-0.0462	-0.0468	-0.0494	-0.0399	-0.0716	0.8426	-0.0170	-0.0312	-0.0420	
SIUP	-0.008	0.000	-0.005	-0.0010	-0.0009	-0.0210	-0.0160	-0.0355	-0.0272	-0.0591	-0.0115	-0.0481	-0.0521	-0.0492	-0.0741	-0.0343	-0.0137	-0.0128	0.8523	-0.0080	-0.0135	
Co./serviço	-0.030	0.000	-0.043	-0.0540	-0.0529	-0.1394	-0.0967	-0.0976	-0.1110	-0.0801	-0.0416	-0.1216	-0.1300	-0.1353	-0.1175	-0.0819	-0.1287	-0.1125	-0.0636	0.8362	-0.2088	
Publico	-0.001	0.000	-0.001	0.0000	0.0000	-0.0031	-0.0021	-0.0020	-0.0032	-0.0033	-0.0009	-0.0022	-0.0028	-0.0042	-0.0029	-0.0023	-0.0029	-0.0015	-0.0045	-0.0026	0.9975	
Emprego (1,000 ocupações)	1.074E-08	6.193E-11	1.054E-10	1.093E-07	6.113E-08	6.493E-09	8.562E-09	2.888E-08	8.515E-09	9.082E-10	5.912E-09	1.775E-09	6.962E-09	1.849E-09	2.125E-08	6.361E-09	2.096E-08	1.733E-08	2.183E-09	3.234E-08	2.149E-08	
CO <sub>2</sub> -equiv (milhões Kg)	5.249E-07	3.446E-08	1.495E-07	8.875E-08	6.478E-07	2.123E-07	2.048E-07	5.408E-08	3.247E-07	2.258E-07	1.632E-07	1.496E-07	1.172E-07	1.555E-06	4.076E-07	5.232E-07	7.698E-07	1.374E-08	8.687E-08	3.781E-09	7.230E-09	
Consumo energético (TJ)	4.700E-06	4.340E-07	0.000E+00	7.990E-07	6.810E-06	9.701E-07	1.101E-07	1.503E-07	4.717E-07	2.348E-07	1.749E-07	3.114E-07	2.441E-08	1.974E-06	7.745E-07	1.925E-06	1.356E-05	3.856E-08	2.438E-08	2.222E-08	7.387E-08	

Fonte: Resultado da pesquisa.

Abreviaturas: AFP – setor agricultura, silvicultura e pesca; Cana – setor cana-de-açúcar; Min – setor Mineração; A&B – setor Alimentos e bebidas; Text – setor têxtil; P&C – setor Papel e celulose; En = setor energia; FG – setor Etanol FG; Che – setor químico; Oche – setor “outros químicos”; Cim – setor cimento; Cer – setor cerâmica; Met – setor metalúrgico; Trans – setor transporte; O. Setores – setor “outros setores industriais”; SIUP – serviços industriais de utilidade pública; Co./serviço – setor comércio e serviço.

### C5 - Principais rotas de fornecedores das emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida do uso de um carro flex rodando 500 km com Etanol SG

Rank	Descrição da rota	Kg CO <sub>2</sub>	Ordem da rota	%
1	uso carro flex com etanol SG	74,75	0	57,40
2	uso carro flex com etanol SG> Etanol SG	26,51	1	20,34
3	uso carro flex com etanol SG> Metalúrgica	8,30	1	6,38
4	uso carro flex com etanol SG> Cerâmica	1,79	1	1,38
5	uso carro flex com etanol SG> Transporte distribuição	1,74	1	1,34
6	uso carro flex com etanol SG> Outros setores>Metalurgica	1,31	2	1,00
7	uso carro flex com etanol SG> Outros setores>Transporte	0,60	2	0,46
8	uso carro flex com etanol SG> Celulose e papel	0,55	1	0,43
9	uso carro flex com etanol SG> Metalurgica>Transporte	0,54	2	0,42
10	uso carro flex com etanol SG> Outros setores	0,42	1	0,32
11	uso carro flex com etanol SG> Com./serviços>Transporte	0,36	2	0,28
12	uso carro flex com etanol SG> Cerâmica>Cimento	0,33	2	0,26
13	uso carro flex com etanol SG>Outros setores>Cimento	0,28	2	0,22
14	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Cerâmica	0,28	2	0,22
15	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>Metalurgica	0,27	2	0,21
16	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e bebidas	0,25	1	0,19
17	uso carro flex com etanol SG>etanol SG>Alimentos e bebidas	0,22	2	0,17
18	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Químico	0,19	2	0,14
19	uso carro flex com etanol SG>Textil	0,18	1	0,14
20	uso carro flex com etanol SG>Metalurgica>Mineração	0,17	2	0,13
21	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Papel e celulose	0,11	2	0,09
22	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Energia	0,11	2	0,08
23	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Transporte	0,10	2	0,08
24	uso carro flex com etanol SG>Metalurgica>Energia	0,10	2	0,08
25	uso carro flex com etanol SG>Metalurgica>Química	0,09	2	0,07
26	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Papel e celulose	0,09	2	0,07
27	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Alimentos e bebidas	0,09	2	0,07
28	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço	0,09	1	0,07
29	uso carro flex com etanol SG>Textil>Transporte	0,06	2	0,05
30	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Energia	0,05	2	0,04
31	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Metalurgica	0,05	2	0,04
32	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Mineração	0,05	2	0,04
33	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e bebidas>Transporte	0,04	2	0,03
34	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Energia	0,04	2	0,03
35	uso carro flex com etanol SG>Papel e celulose>Transporte	0,04	2	0,03
36	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Alimentos e bebidas	0,04	2	0,03
37	uso carro flex com etanol SG>SIUP>Energia	0,04	2	0,03
38	uso carro flex com etanol SG>Metalurgica>Cerâmica	0,03	2	0,03
39	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e bebidas>AFP	0,03	2	0,02
40	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Textil	0,03	2	0,02
41	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Química	0,03	2	0,02
42	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>AFP	0,03	2	0,02
43	uso carro flex com etanol SG>etanolSG>Papel e celulose	0,03	2	0,02
44	uso carro flex com etanol SG>Textil>Química	0,03	2	0,02
45	uso carro flex com etanol SG>etanol SG>Cerâmica	0,03	2	0,02
46	uso carro flex com etanol SG>SIUP>Transporte	0,02	2	0,02
47	uso carro flex com etanol SG>A&B>Cana-de-açúcar	0,02	2	0,02
48	uso carro flex com etanol SG>SIUP	0,02	1	0,02
49	uso carro flex com etanol SG>Textil>AFP	0,02	2	0,02
50	uso carro flex com etanol SG>Metalurgica>Papel e celulose	0,02	2	0,02
Contribuição das rotas restante		9,34		16,83
<b>Inventário de ciclo de vida total (UF:500 Km)</b>		130,22		100

Fonte: Resultado da pesquisa

Abreviatura: O. Setores – setor outros setores industriais; SIUP – Serviço industrial de utilidade pública;



### C6 - Principais rotas de fornecedores das emissões de CO<sub>2</sub> do ciclo de vida da produção de 50,5 lts de Etanol SG

Rank	Descrição da rota	Kg CO <sub>2</sub>	Ordem da rota	%
1	Produção etanol SG>Cal hidratada	9,42	1	32,77
2	Produção etanol SG>Enzimas	7,59	1	26,38
3	Produção etanol SG>Bagasse	5,91	1	20,54
4	Produção etanol SG>Acido Sulfurico	2,70	1	9,39
5	Produção etanol SG>Fosfato Diamônio	0,52	1	1,81
6	Produção etanol SG>Metalurgia	0,27	1	0,95
7	Produção etanol SG>Alimentos e Bebidas>AFP	0,25	2	0,85
8	Produção etanol SG>Alimentos e Bebidas	0,22	1	0,75
9	Produção etanol SG>Eletricidade interna	0,12	1	0,43
10	Produção etanol SG> Enzimas>Papel e celulose	0,11	2	0,37
11	Produção etanol SG>Enzimas>Metalurgia	0,09	2	0,30
12	Produção etanol SG>Cal hidratada>Metalurgia	0,05	2	0,19
13	Produção etanol SG >O.setores>Metalurgia	0,04	2	0,14
14	Produção etanol SG >Acido sulfúrico>Metalurgia	0,04	2	0,14
15	Produção etanol SG >Alimentos e Bebidas>Transporte	0,04	2	0,13
16	Produção etanol SG >Cal hidratada>Papel e celulose	0,03	2	0,10
17	Produção etanol SG >Papel e celulose	0,03	1	0,10
18	Produção etanol SG >Cerâmica	0,03	1	0,09
19	Produção etanol SG >Co./serviço>Transporte	0,03	2	0,09
20	Produção etanol SG >Enzimas>Cerâmica	0,02	2	0,08
21	Produção etanol SG >Cal hidratada>Cerâmica	0,02	2	0,08
22	Produção etanol SG >Alimentos e Bebidas>Cana-de-açúcar	0,02	2	0,07
23	Produção etanol SG >O.setores>Transporte	0,02	2	0,07
24	Produção etanol SG >Metalurgia>Transporte	0,02	2	0,06
25	Produção etanol SG >O.setores	0,01	1	0,05
26	Produção etanol SG >O.setores>Cimento	0,01	2	0,03
27	Produção etanol SG >O.setores>Cerâmica	0,01	2	0,03
28	Produção etanol SG >Acido Sulfúrico>Papel e celulose	0,01	2	0,03
29	Produção etanol SG > Acido Sulfúrico >Cerâmica	0,01	2	0,03
30	Produção etanol SG >O.setores>AFP	0,01	2	0,03
31	Produção etanol SG >Co./serviço>Papel e celulose	0,01	2	0,03
32	Produção etanol SG >Alimentos e Bebidas>Metalurgia	0,01	2	0,03
33	Produção etanol SG >Vapor interno>Metalurgia	0,01	2	0,02
34	Produção etanol SG >Bagaço>Alimento e bebidas	0,01	2	0,02
35	Produção etanol SG >Enzimas>Alimento e bebidas	0,01	2	0,02
36	Produção etanol SG >Enzimas>O.setores	0,01	2	0,02
37	Produção etanol SG >Co./serviço>Alimentos e bebidas	0,01	2	0,02
38	Produção etanol SG >SIUP>Energia	0,01	2	0,02
39	Produção etanol SG >Fosfato Diamônio >Metalurgia	0,01	2	0,02
40	Produção etanol SG >O.setores>Químico	0,01	2	0,02
41	Produção etanol SG > Acido Sulfúrico >Alimentos e bebidos	0,01	2	0,02
42	Produção etanol SG >Vapor interno>Alimentos e bebidas	0,01	2	0,02
43	Produção etanol SG >Co./serviço	0,01	1	0,02
44	Produção etanol SG >Metalurgia>Mineração	0,01	2	0,02
45	Produção etanol SG >Bagaço>Metalurgia	0,01	2	0,02
46	Produção etanol SG >Enzimas>Textil	0,01	2	0,02
47	Produção etanol SG >Cerâmica>Cimento	0,01	2	0,02
48	Produção etanol SG >Enzimas>Co./serviço	0,00	2	0,02
49	Produção etanol SG >Textil>AFP	0,00	2	0,02
50	Produção etanol SG >Textil	0,00	1	0,02
	Contribuição das rotas restante	1,66		5,77
	<b>Inventário de ciclo de vida total (FU: 50,5 Lts)</b>	<b>28,75</b>		<b>100,00</b>

Fonte: Resultados da pesquisa

### C7 - Principais rotas de fornecedores do consumo energético do ciclo de vida do uso de um carro flex rodando com tanque cheio de Etanol SG

Rank	Descrição da rota	MJ	Ordem da rota	%
1	uso carro flex com etanol SG >SG produção	237,35	1	59,07
2	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia	30,56	1	7,61
3	uso carro flex com etanol SG >Transporte Distribuição	24,44	1	6,08
4	uso carro flex com etanol SG >Outros setores>Transporte	10,56	2	2,63
5	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Transporte	9,56	2	2,38
6	uso carro flex com etanol SG >Co./serviço>Transporte	6,43	2	1,60
7	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Metalurgia	4,81	2	1,20
8	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica	3,40	1	0,85
9	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Transporte	1,84	2	0,46
10	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Metalurgia>Transporte	1,50	3	0,37
11	uso carro flex com etanol SG >O.setores	1,17	1	0,29
12	uso carro flex com etanol SG >Textil>Transporte	1,07	2	0,27
13	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Co./serviço>Transporte	1,01	3	0,25
14	uso carro flex com etanol SG >SG produção>Metalurgia	1,01	2	0,25
15	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Mineração>Transporte	1,00	3	0,25
16	uso carro flex com etanol SG >Papel e celulose	0,81	1	0,20
17	uso carro flex com etanol SG >metalurgia>Mineração	0,79	2	0,20
18	uso carro flex com etanol SG >Alimentos&Bebidas>Transporte	0,77	2	0,19
19	uso carro flex com etanol SG >Papel e Celulose>Transporte	0,73	2	0,18
20	uso carro flex com etanol SG >produçãoSG>A&B>Transporte	0,67	3	0,17
21	uso carro flex com etanol SG >O. Setores>Químicos>Transporte	0,56	3	0,14
22	uso carro flex com etanol SG >O. Setores>Cerâmica	0,54	2	0,13
23	uso carro flex com etanol SG >textil	0,51	1	0,13
24	uso carro flex com etanol SG >Co./serviço	0,47	1	0,12
25	uso carro flex com etanol SG >produçãoSG>Co./serviço>Transporte	0,45	3	0,11
26	uso carro flex com etanol SG >SIUP>Transporte	0,43	2	0,11
27	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Cimento	0,42	2	0,11
28	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Co.serviço>Transporte	0,39	3	0,10
29	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Químicos	0,38	2	0,10
30	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Cimento	0,36	2	0,09
31	uso carro flex com etanol SG >produçãoSG>O.setores>Transporte	0,34	3	0,08
32	uso carro flex com etanol SG >produçãoSG>Metalurgia>Transporte	0,32	3	0,08
33	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Energia>Transporte	0,30	3	0,07
34	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Mineração>Transporte	0,29	3	0,07
35	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Cerâmica>Transporte	0,29	3	0,07
36	uso carro flex com etanol SG >Alimentos e Bebidas>AFP	0,29	2	0,07
37	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Química>Transporte	0,28	3	0,07
38	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>Energia>Transporte	0,28	3	0,07
39	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Papel e celulose>Transp.	0,27	3	0,07
40	uso carro flex com etanol SG >Co./serviço>A&B>Transporte	0,27	3	0,07
41	uso carro flex com etanol SG >O. Setores>AFP	0,26	2	0,06
42	uso carro flex com etanol SG >A&B>Cana-de-açúcar	0,25	2	0,06
43	uso carro flex com etanol SG >Co./serviço>O.setores>Transporte	0,24	3	0,06
44	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Cimento>Transporte	0,23	3	0,06
45	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Mineração	0,23	2	0,06
46	uso carro flex com etanol SG >Metalurgia>O.setores>Transporte	0,22	3	0,06
47	uso carro flex com etanol SG >textil>AFP	0,20	2	0,05
48	uso carro flex com etanol SG >metalurgia>Químico	0,20	2	0,05
49	uso carro flex com etanol SG >Cerâmica>Metalurgia	0,19	2	0,05
50	uso carro flex com etanol SG >O.setores>Textil>Transporte	0,17	3	0,04
Contribuição das rotas restante		52,68		13,11
<b>Inventário de ciclo de vida total (UF: 500 Km)</b>		<b>401,79</b>		<b>100</b>

Fonte: Resultado da pesquisa

### C8 - Principais rotas de fornecedores que contribuem com o consumo energético na produção de 50,5 lts de Etanol SG

Rank	Descrição da rota	MJ	Ordem da rota	%
1	Produção etanol SG >Acido sulfúrico	102,75	1	41,342
2	Produção etanol SG >Bagasse	74,68	1	30,050
3	Produção etanol SG >Cal hidratada	45,65	1	18,367
4	Produção etanol SG >Fosfato Diamônio	7,26	1	2,921
5	Produção etanol SG >Enzimas	3,48	1	1,401
6	Produção etanol SG >Eletricidade interna	1,61	1	0,648
7	Produção etanol SG >Metalurgia	1,00	1	0,403
8	Produção etanol SG >Alimentos e bebidas>Transporte	0,66	2	0,268
9	Produção etanol SG >Co./serviço>Transporte	0,45	2	0,181
10	Produção etanol SG >O.setores>Transporte	0,34	2	0,135
11	Produção etanol SG >Enzimas>Metalurgia	0,32	2	0,128
12	Produção etanol SG >Metalurgia>Transporte	0,31	2	0,126
13	Produção etanol SG >Alimentos e Bebidas>AFP	0,25	2	0,099
14	Produção etanol SG >Alimentos e Bebidas>Cana-de-açúcar	0,22	2	0,087
15	Produção etanol SG >Cal hidratada>Metalurgia	0,20	2	0,081
16	Produção etanol SG >Enzimas>Papel e celulose	0,15	2	0,062
17	Produção etanol SG >O.setores>Metalurgia	0,15	2	0,062
18	Produção etanol SG >Acido sulfúrico>Metalurgia	0,15	2	0,060
19	Produção etanol SG >Alimentos e bebidas	0,12	1	0,047
20	Produção etanol SG >SIUP>Transporte	0,07	2	0,029
21	Produção etanol SG >Cerâmica	0,05	1	0,021
22	Produção etanol SG >Enzimas>Cerâmica	0,05	2	0,018
23	Produção etanol SG >Cal hidratada>Papel e celulose	0,04	2	0,017
24	Produção etanol SG >Cal hidratada>Cerâmica	0,04	2	0,017
25	Produção etanol SG >Papel e celulose	0,04	1	0,016
26	Produção etanol SG >Papel e celulose>Transporte	0,04	2	0,015
27	Produção etanol SG >O.setores	0,04	1	0,015
28	Produção etanol SG >Co./serviço	0,03	1	0,013
29	Produção etanol SG >Enzimas>Co./serviço	0,03	2	0,012
30	Produção etanol SG >Cerâmica>Transporte	0,03	2	0,011
31	Produção etanol SG >Textil>Transporte	0,03	2	0,011
32	Produção etanol SG >Alimentos e bebidas>Metalurgia	0,03	2	0,011
33	Produção etanol SG >Vapor interno>Metalurgia	0,03	2	0,011
34	Produção etanol SG >Metalurgia>Mineração	0,03	2	0,010
35	Produção etanol SG >DAP>Metalurgia	0,02	2	0,009
36	Produção etanol SG >Bagaço>Metalurgia	0,02	2	0,008
37	Produção etanol SG >Enzimas>O.setores	0,02	2	0,007
38	Produção etanol SG >O.setores>Cerâmica	0,02	2	0,007
39	Produção etanol SG >Acido sulfúrico>Cerâmica	0,02	2	0,006
40	Produção etanol SG >Enzimas>Textil	0,01	2	0,006
41	Produção etanol SG >Textil	0,01	1	0,005
42	Produção etanol SG >Enzimas>SIUP	0,01	2	0,005
43	Produção etanol SG >O.setores>Químico	0,01	2	0,005
44	Produção etanol SG >Acido sulfúrico>Papel e celulose	0,01	2	0,005
45	Produção etanol SG >Acido sulfúrico>Co./serviço	0,01	2	0,005
46	Produção etanol SG >O.setores>Cimento	0,01	2	0,005
47	Produção etanol SG >Co./serviço>Papel e celulose	0,01	2	0,005
48	Produção etanol SG >Energia interna>Metalurgia	0,01	2	0,004
49	Produção etanol SG >SIUP	0,01	1	0,004
50	Produção etanol SG >Cal hidratada>Co./serviço	0,01	2	0,003
Contribuição das rotas restante		115,27		4,64
<b>Inventário de ciclo de vida total (UF: 50,5 Lts)</b>		<b>248,53</b>		<b>100,00</b>

Fonte: Resultado da pesquisa

### C9 - Principais rotas de fornecedores que contribuem com a geração de emprego no ciclo de vida *cradle-to-grave* do Etanol SG

Rank	Descrição da rota	Ocupações (pessoas)	Ordem da rota	%
1	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço	6,91E-04	1	18,89
2	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG	5,42E-04	1	14,82
3	uso carro flex com etanol SG>O. Setores	5,18E-04	1	14,16
4	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Co./serviço	1,09E-04	2	2,97
5	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico	1,01E-04	1	2,76
6	uso carro flex com etanol SG>Textil	9,72E-05	1	2,66
7	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica	9,33E-05	1	2,55
8	uso carro flex com etanol SG	5,27E-05	0	1,44
9	uso carro flex com etanol SG>etanol SG>Co./serviço	4,89E-05	2	1,33
10	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Co./serviço	4,20E-05	2	1,15
11	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e bebidas>AFP	3,91E-05	2	1,07
12	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>AFP	3,49E-05	2	0,95
13	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>Alimentos e bebidas>AFP	3,39E-05	3	0,93
14	uso carro flex com etanol SG>Textil>AFP	2,68E-05	2	0,73
15	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>Co./serviço	1,67E-05	2	0,46
16	uso carro flex com etanol SG> etanol SG>O. Setores	1,67E-05	2	0,46
17	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Transporte	1,63E-05	2	0,45
18	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Metalúrgico	1,59E-05	2	0,43
19	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Textil	1,53E-05	2	0,42
20	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Transporte	1,48E-05	2	0,40
21	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Cerâmica	1,47E-05	2	0,40
22	uso carro flex com etanol SG>Papel e Celulose	1,45E-05	1	0,40
23	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Alimentos e bebida>AFP	1,36E-05	3	0,37
24	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>O. Setores	1,16E-05	2	0,32
25	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>O. Setores	1,10E-05	2	0,30
26	uso carro flex com etanol SG>Textil>Co./serviço	1,06E-05	2	0,29
27	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e bebidas	1,05E-05	1	0,29
28	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Transporte	9,95E-06	2	0,27
29	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>Alimentos e bebidas	9,10E-06	2	0,25
30	uso carro flex com etanol SG>Papel e Celulose >AFP	8,85E-06	2	0,24
31	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Metalúrgico>Co./serviço	6,61E-06	2	0,18
32	uso carro flex com etanol SG>Publico	6,20E-06	1	0,17
33	uso carro flex com etanol SG>Papel e Celulose>Co./serviço	6,13E-06	2	0,17
34	uso carro flex com etanol SG>SIUP	5,31E-06	1	0,15
35	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Mineração	5,26E-06	2	0,14
36	uso carro flex com etanol SG>SIUP>Co./serviço	5,00E-06	2	0,14
37	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Química>Co./serviço	4,86E-06	3	0,13
38	uso carro flex com etanol SG>Alimentos e Bebidas>Co./serviço	3,83E-06	2	0,10
39	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica>O. Setores	3,76E-06	2	0,10
40	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Mineração>Co./serviço	3,66E-06	3	0,10
41	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Alimentos e bebidas	3,64E-06	2	0,10
42	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>O. Setores>Co./serviço	3,50E-06	3	0,10
43	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>AFP	3,45E-06	2	0,09
44	uso carro flex com etanol SG> Etanol SG>Metalúrgico	3,34E-06	2	0,09
45	uso carro flex com etanol SG>Etanol SG>A&B>Co./serviço	3,32E-06	3	0,09
46	uso carro flex com etanol SG>O. Setores>Transporte>Co./serviço	3,24E-06	3	0,09
47	uso carro flex com etanol SG>Distribuição	3,13E-06	1	0,09
48	uso carro flex com etanol SG>Metalúrgico>Transporte>Co./serviço	2,93E-06	3	0,08
49	uso carro flex com etanol SG>Co./serviço>Papel e Celulose	2,93E-06	2	0,08
50	uso carro flex com etanol SG>Cerâmica >Transporte	2,85E-06	2	0,08
	Cotribuição das rotas restante	0,00098		26,5
	<b>Inventário de ciclo de vida total (UF: 500 km)</b>	0,0037		100,00

Fonte: resultado da pesquisa

### C10 - Principais rotas de fornecedores da geração de emprego do ciclo de vida da produção de 50,5 lts de etanol SG

Rank	Descrição da rota	Ocupações (pessoas)	Ordem da rota	%
1	Produção etanol SG	2.63E-04	0	28.40
2	Produção etanol SG > Bagaço	2.05E-04	1	22.10
3	Produção etanol SG > Co./serviço	4.89E-05	1	5.27
4	Produção etanol SG > Enzimas > Co./serviço	4.26E-05	2	4.59
5	Produção etanol SG > Ácido Sulfúrico	3.93E-05	1	4.24
6	Produção etanol SG > Alimentos e bebidas > AFP	3.39E-05	2	3.66
7	Produção etanol SG > Ácido Sulfúrico > Co./serviço	1.78E-05	2	1.92
8	Produção etanol SG > O. Setores	1.67E-05	1	1.80
9	Produção etanol SG > Cal Hidratada	1.40E-05	1	1.51
10	Produção etanol SG > Enzimas	1.35E-05	1	1.46
11	Produção etanol SG > Cal hidratada > Co./serviço	1.20E-05	2	1.30
12	Produção etanol SG > Alimentos de bebidas	9.10E-06	1	0.98
13	Produção etanol SG > Enzimas > O. Setores	8.12E-06	1	0.87
14	Produção etanol SG > Bagaço > Co./serviço	4.46E-06	2	0.48
15	Produção etanol SG > Eletricidade interna	4.28E-06	1	0.46
16	Produção etanol SG > O. Setores > Co./serviço	3.50E-06	2	0.38
17	Produção etanol SG > Metalúrgico	3.34E-06	1	0.36
18	Produção etanol SG > Alimentos e bebidas > Co./serviço	3.32E-06	2	0.36
19	Produção etanol SG > Fosfato Diamônio (DAP)	2.81E-06	1	0.30
20	Produção etanol SG > Enzimas > Papel e celulose	2.81E-06	2	0.30
21	Produção etanol SG > Enzimas > Textil	2.73E-06	2	0.29
22	Produção etanol SG > Fosfato Diamônio (DAP) > Co./serviço	2.60E-06	2	0.28
23	Produção etanol SG > Textile	2.47E-06	1	0.27
24	Produção etanol SG > Acido Sulfúrico > O. Setores	2.29E-06	2	0.25
25	Produção etanol SG > Cal hidratada > O. Setores	2.23E-06	2	0.24
26	Produção etanol SG > Alimentos e bebidas > Cana-de-açúcar	1.97E-06	2	0.21
27	Produção etanol SG > Enzimas > Papel e Celulose > AFP	1.71E-06	3	0.18
28	Produção etanol SG > Enzimas > O. Setores > Co./serviço	1.70E-06	3	0.18
29	Produção etanol SG > Cerâmica	1.43E-06	1	0.15
30	Produção etanol SG > Metalúrgico > Co./serviço	1.39E-06	2	0.15
31	Produção etanol SG > Vapor Interno > Co./serviço	1.28E-06	2	0.14
32	Produção etanol SG > Enzimas > Cerâmica	1.27E-06	2	0.14
33	Produção etanol SG > Cal hidratada > Cerâmica	1.20E-06	2	0.13
34	Produção etanol SG > Enzimas > Papel e celulose > Co./serviço	1.19E-06	3	0.13
35	Produção etanol SG > Enzimas > SIUP	1.15E-06	2	0.12
36	Produção etanol SG > O. Setores > AFP	1.12E-06	2	0.12
37	Produção etanol SG > Bagaço > Alimentos e bebidas > AFP	1.12E-06	3	0.12
38	Produção etanol SG > Enzimas > Alimentos e bebidas > AFP	1.10E-06	3	0.12
39	Produção etanol SG > Enzimas > ISPU > Co./serviço	1.09E-06	3	0.12
40	Produção etanol SG > Enzimas > Metalúrgico	1.06E-06	2	0.11
41	Produção etanol SG > Alimentos e bebidas > Transporte	1.04E-06	2	0.11
42	Produção etanol SG > Co./serviço > Alimentos e bebidas > AFP	9.59E-07	3	0.10
43	Produção etanol SG > Acido sulfúrico > Alimentos e bebidas > AFP	9.27E-07	3	0.10
44	Produção etanol SG > SIUP	9.10E-07	1	0.10
45	Produção etanol SG > SIUP > Co./serviço	8.57E-07	2	0.09
46	Produção etanol SG > Co./serviço > O. Setores	8.17E-07	2	0.09
47	Produção etanol SG > Cal hidratada > Papel e celulose	7.92E-07	2	0.09
48	Produção etanol SG > Enzimas > Textil > AFP	7.52E-07	3	0.08
49	Produção etanol SG > Papel e celulose	7.42E-07	1	0.08
50	Produção etanol SG > Público	7.39E-07	1	0.08
	Cotribuição das rotas restante	0.000139		15
	<b>Inventário de ciclo de vida total (UF: 50,5 Lts)</b>			<b>100.00</b>

Fonte: resultado da pesquisa

## ANEXO

## A – Consumo de eletricidade por setor apresentados pelo balanço energético nacional (BEN/MME 2010)

Tabela 2.25 | Eletricidade

Table 2.25 | Electricity

	GWh										
FLUXO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	FLOW
PRODUÇÃO	348.909	328.509	345.671	364.339	387.452	402.938	419.337	445.044	463.120	466.158	PRODUCTION
CENTRAIS EL. SERV. PÚBLICO	323.899	301.318	311.601	329.282	349.539	363.156	377.644	397.907	412.012	409.150	PUBL UTIL POWER PLANTS
AUTOPRODUTORES	25.010	27.191	34.070	35.057	37.913	39.782	41.692	47.137	51.107	57.008	SELF-PRODUCERS
IMPORTAÇÃO	44.345	37.854	36.580	37.151	37.392	39.202	41.447	40.866	42.901	41.064	IMPORT
EXPORTAÇÃO	-7	-6	-7	-6	-7	-160	-283	-2.034	-689	-1.080	EXPORT
VAR. EST. PERDAS E AJUSTES	-61.609	-56.628	-57.879	-59.271	-64.892	-66.787	-70.550	-71.745	-77.081	-80.112	VAR. INV. LOSSES AND ADJUSTMENTS
CONSUMO TOTAL	331.638	309.729	324.365	342.213	359.945	375.193	389.950	412.130	428.250	426.029	TOTAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL	331.638	309.729	324.365	342.213	359.945	375.193	389.950	412.130	428.250	426.029	FINAL CONSUMPTION
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO	331.638	309.729	324.365	342.213	359.945	375.193	389.950	412.130	428.250	426.029	FINAL ENERGY CONSUMPTION
SETOR ENERGÉTICO	10.479	11.154	11.635	12.009	13.199	13.534	14.572	17.269	18.395	18.756	ENERGY SECTOR
RESIDENCIAL	83.613	73.770	72.752	76.143	78.577	83.193	85.810	90.881	95.585	101.779	RESIDENTIAL
COMERCIAL	47.510	44.668	45.407	48.375	50.082	53.492	55.222	58.535	62.495	64.329	COMMERCIAL
PÚBLICO	29.200	27.136	28.058	29.707	30.092	32.731	33.049	33.718	34.553	36.693	PUBLIC
AGROPECUÁRIO	12.856	12.395	12.922	14.283	14.895	15.685	16.417	17.536	18.397	16.600	AGRICULTURE AND LIVESTOCK
TRANSPORTES	1.250	1.200	940	980	1.039	1.188	1.462	1.575	1.607	1.591	TRANSPORTATION
FERROVIÁRIO	1.250	1.200	940	980	1.039	1.188	1.462	1.575	1.607	1.591	RAILROADS
INDUSTRIAL	146.730	139.406	152.651	160.716	172.061	175.370	183.418	192.616	197.218	186.280	INDUSTRIAL
CIMENTO	4.456	4.360	3.988	3.813	3.754	4.008	4.120	4.313	4.777	4.730	CEMENT
FERRO-GUSA E AÇO	14.717	13.963	14.994	16.066	16.889	16.248	16.879	18.363	18.622	14.868	PIG-IRON AND STEEL
FERRO-LIGAS	6.398	5.371	6.821	7.136	7.659	7.735	7.703	8.675	8.737	6.730	IRON ALLOYS
MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO	7.429	6.913	7.676	9.130	9.292	9.634	10.030	10.792	11.274	8.208	MINING/ PELLETIZATION
NÃO-FERROSOS E OUTROS DA METALURGIA	28.970	26.236	30.578	32.126	33.907	34.874	36.904	38.056	39.144	36.113	NON-FERROUS/OTHER METALLURGICAL
QUÍMICA	17.251	16.524	17.727	18.946	21.612	21.094	21.855	23.084	22.109	23.155	CHEMICAL
ALIMENTOS E BEBIDAS	16.173	15.908	18.015	18.755	19.851	20.658	21.487	22.396	23.080	23.488	FOODS AND BEVERAGES
TÊXTIL	6.983	6.701	6.856	6.979	7.776	7.670	7.775	7.963	7.813	7.713	TEXTILES
PAPEL E CELULOSE	12.144	11.785	13.112	13.483	14.098	14.773	15.464	16.578	17.764	18.271	PAPER AND PULP
CERÂMICA	2.720	2.666	2.771	2.850	3.050	3.136	3.209	3.307	3.469	3.494	CERAMICS
OUTROS	29.489	28.979	30.113	31.432	34.173	35.540	37.993	39.090	40.429	39.509	OTHERS

**B** – Produção Acadêmica derivada desta tese de doutorado

#### ARTIGOS SUBMETIDOS A REFEREED JOURNALS

Palma-Rojas, S; Caldeira-Pires, A; Nogueira, J. **Toward Sustainability in Brazilian Ethanol Production: A Structural Path Analysis**. Aceito com revisão em Ecological Economics (em andamento).

Palma-Rojas, S; Nogueira, J. **Second Generation Ethanol and the Brazilian Economy: Environmental and Economic Effects**. Submetido para revisão na revista Economia Aplicada (em andamento)

Palma-Rojas, S; Caldeira-Pires, A; Nogueira, J. **Environmental and Economic Hybrid Life Assessment of Bagasse-derived Ethanol Produced in Brazil**. Em preparação para ser submetido na revista International Journal of Life Cycle Assessment.

#### ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS NO TEMA DA TESE

Palma-Rojas, S; Caldeira-Pires (2012). **Economic and Environmental Contribution of the ethanol Supply chain: a Structural Path Analysis**. III Brazilian Congress of Life Cycle Management of Products (CBGCV), Paraná, Brazil.

Palma-Rojas, S and Nogueira, J (2012). **Second Generation Ethanol and the Brazilian Economy: Assessment based on Input-output Analysis**. 73 International Atlantic Economic Conference, Istanbul, Turkey.

Palma-Rojas, S; Caldeira-Pires, A; Nogueira, J (2011). **Biomass Residues for Second Generation Biofuel in the Brazilian Context**. International Congress of Mechanical Engineering – ISSN 2176-5480 COBEM 2011, Brazil.

Palma-Rojas, S & Nogueira, M.J (2011). **Social Cost-Benefit Analysis of Biodiesel Production in Brazil**. 49° SOBER – Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - <http://www.sober.org.br/congresso2011/>

Palma-Rojas, S; Nogueira, M.J; Caldeira-Pires, A. (2011). **Life Cycle Inventory Modeling: The appropriate LCI approach for decision support**. International Conference on Life Cycle Assessment in Latin America - Cilca 2011 - Coatzacoalcos, Mexico - [http://cilca2011.mx/?page\\_id=75](http://cilca2011.mx/?page_id=75).

Palma, S; Nogueira, J; Caldeira-Pires, A (2009). **Integration of the Input-output approach into life cycle framework: State of the Art**. International Congress on Life Cycle Assessment of Latin America, ISBN 978-956-7226-08-5, Pucón -Chile