

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PROCESSOS**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA  
PRODUÇÃO DE BIOETANOL HIDRATADO EM  
PEQUENA ESCALA: ABRANGÊNCIA AGRÍCOLA E  
INDUSTRIAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Michel Brondani**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

# **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL HIDRATADO EM PEQUENA ESCALA: ABRANGÊNCIA AGRÍCOLA E INDUSTRIAL**

**Michel Brondani**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Agroindustriais e Ambientais, linha de pesquisa Controle Ambiental e Otimização Energética, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Processos**.

**Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Hoffmann**

**Santa Maria, RS, Brasil.  
2014**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

BRONDANI, MICHEL  
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE  
BIOETANOL HIDRATADO EM PEQUENA ESCALA: ABRANGÊNCIA  
AGRÍCOLA E INDUSTRIAL / MICHEL BRONDANI.-2014.  
132 p.; 30cm

Orientador: RONALDO HOFFMANN  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Processos, RS, 2014

1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
3. BIOETANOL HIDRATADO 4. PEQUENA ESCALA I. HOFFMANN,  
RONALDO II. Título.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Michel Brondani. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Pedro Paulo Pradella, São João do Polêsine, RS, 97230-000

E-mail: mbbondani@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de  
Mestrado**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE  
BIOETANOL HIDRATADO EM PEQUENA ESCALA: ABRANGÊNCIA  
AGRÍCOLA E INDUSTRIAL**

Elaborada por  
**Michel Brondani**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia de Processos**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Ronaldo Hoffmann, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Daniel Assumpção Bertuol, Dr.**  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

  
\_\_\_\_\_  
**Orlando Cristiano da Silva, Dr.**  
Instituto de Energia e Ambiente/ Universidade de São Paulo - IEE/USP

Santa Maria, 07 de Março de 2014.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e por não ter me faltado em nenhum momento.

Aos meus pais, Lourdes Maria Brondani e Moacir Brondani (*in memoriam*) pelo constante incentivo e apoio na caminhada da vida pessoal e acadêmica.

Ao professor Ronaldo Hoffmann, pela oportunidade e confiança a mim depositada e pelo auxílio nas atividades teórico/práticas desenvolvidas.

Aos funcionários da microdestilaria da UFSM, pelas entrevistas para coleta de dados e aos funcionários do Departamento de Fitotecnia pelas informações cedidas.

À Limana Poliserviços, pela permissão de visitas técnicas e pelas informações disponibilizadas.

Aos amigos em geral, pelas conversas e dicas que serviram de estímulo para conclusão do presente estudo e pelos momentos de descontração compartilhados.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Ministério da Educação) pela bolsa de incentivo financeiro à pesquisa.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos  
Universidade Federal de Santa Maria

### **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL HIDRATADO EM PEQUENA ESCALA: ABRANGÊNCIA AGRÍCOLA E INDUSTRIAL**

Autor: Michel Brondani

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Hoffmann

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 07 de Março de 2014

O estado do Rio Grande do Sul (RS) produz pouco do etanol consumido por causa de condições edafoclimáticas que impedem a produção agrícola extensiva e a consequente construção e operação de grandes usinas. No entanto, pequenas destilarias podem fornecer, em parte, este etanol para consumo através da produção a partir de cana-de-açúcar. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Análise de Eficiência Energética foram realizadas para avaliar a produção de etanol em pequena escala, considerando cada etapa individual e a análise global. Os principais resultados da ACV foram dados em termos de impactos e danos ambientais de acordo com o método de avaliação de impacto Eco-Indicador 99, e demonstrou que o uso de fertilizantes ricos em nitrogênio e fósforo juntamente com o uso de herbicida e calcário foram responsáveis por maior parte dos impactos ambientais na etapa agrícola enquanto o uso de equipamentos e eletricidade tiveram grandes impactos na etapa industrial. A etapa agrícola apresentou alta eficiência energética (9,98-19,03 - razão energia saída/energia entrada), enquanto a fase industrial mostrou eficiência energética de 0,86-0,87 e 0,20-0,21 com e sem créditos de energia do bagaço, respectivamente. Na análise global, a etapa industrial mostrou maiores impactos e danos. A cadeia produtiva de etanol em pequena escala apresentou eficiência energética (2,59-2,92) com créditos de energia do bagaço. Caso contrário, o processo pode ser energeticamente ineficiente (0,61-0,69). A construção da microdestilaria e aquisição/dimensionamento dos equipamentos com base na disponibilidade de matéria-prima de alimentação são ações para evitar perdas de energia e danos ambientais. A ACV também foi usada para avaliar, ambientalmente, a produção de dois tipos de colunas de destilação (tipo pratos ou bandejas e tipo mista) para produção contínua de etanol hidratado visando indicar o modelo de menor impacto sobre o meio ambiente. Os resultados mostraram que a produção de coluna destilação mista gera menores contribuições de impacto ao meio ambiente, por isso, a sua escolha para instalação em uma microdestilaria é indicado em termos de mitigação de impactos ambientais.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Eficiência Energética, Bioetanol Hidratado, Pequena Escala.

## **ABSTRACT**

Dissertation for the degree of Master of Science  
Post-Graduation Program in Process Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF PRODUCTION BIOETHANOL HYDROUS AT SMALL-SCALE: SCOPE AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL**

Author: Michel Brondani

Advisor: Ronaldo Hoffmann

Local and Date of Defense: Santa Maria, March, 07 of 2014

The state of Rio Grande do Sul (RS) produces little of the ethanol consumed because of edaphoclimatic conditions that preclude the extensive agricultural production and the consequent construction and operation of large distilleries. However, small-scale distilleries may supply, in part, this ethanol for consumption through production with sugarcane. The Life Cycle Assessment (LCA) and Energy Efficiency Analysis were performed to evaluate small-scale ethanol production considering the individual step and the overall analysis. The main results of the LCA were given in terms of environmental impacts and damage according to Eco-Indicator 99 assessment method, and demonstrated that nitrogen- and phosphorus- rich fertilizers along with herbicide and limestone were responsible for major environmental damage during the agricultural step, while the use of equipments and electricity had major impacts in industrial step. The agricultural step showed high energy efficiency (9.98-19.03 - energy in/energy out ratio) while the industrial stage showed energy efficiency of 0.86-0.87 and 0.20-0.21 with and without bagasse energy credits, respectively. In the overall analysis, the industrial step showed higher impacts and damages. Small-scale ethanol production chain presented energy efficiency (2.59-2.92) with bagasse energy credits. Otherwise the process could be energetically inefficient (0.61-0.69). Construction of the small-scale distillery and acquisition/sizing of equipment based on the availability of raw material supply are actions to avoid energy losses and environmental damage. The LCA was also used to evaluate, environmentally, the production of two types of distillation columns (tray type and mixed type) for continuous production of hydrous ethanol to indicate the model less impact on the environment. The results showed that the production of mixed distillation column generates lower contributions of impact to the environment, therefore their choice for installation in small-scale is indicated in terms of mitigating environmental impacts.

Keywords: Life Cycle Assessment, Energy Efficiency, Production Bioethanol, Small-scale.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parcelas de contribuição por fontes de energia em 2010.....	14
Figura 2 - Esquema representativo de uma abordagem do ciclo de vida. ....	21
Figura 3 - Estrutura das normas ISO 14000. ....	23
Figura 4 - Estrutura da Análise de Ciclo de Vida.....	24
Figura 5 - Dimensões da ACV. ....	25
Figura 6 - Fluxograma de um processo unitário.....	26
Figura 7 - Fluxograma de um sistema de processo. ....	27
Figura 8 - Diagrama de blocos. ....	29
Figura 9 - Modelo geral na avaliação de impactos na ACV.....	35
Figura 10 - Diferenças entre os métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida.....	37
Figura 11 - Etapas de uma ACV.....	38
Figura 12 - Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis.....	53
Figura 13 - Níveis de regressão em um sistema de produção de biocombustíveis. ....	55
Figura 14 - Etapas da produção de etanol na usina do Colégio Politécnico da UFSM. ....	60
Figura 15 - Fronteira do sistema referente à etapa agrícola. ....	65
Figura 16 - Fronteira do sistema referente à etapa de transporte.....	66
Figura 17 - Fronteira do sistema referente à etapa industrial. ....	67
Figura 18 - Fronteira global do sistema.....	70
Figura 19 - Principais tipos de torres de contato. ....	71
Figura 20 - Tipos de anel de Raschig. ....	72
Figura 21 - Prato perfurado sem downcomer (a) e prato do tipo válvula (b).....	72
Figura 22 - Fluxograma do processo construtivo de uma coluna de destilação contínua de pequeno porte. ....	73
Figura 23 - Avaliação de impactos: Etapa agrícola.....	77
Figura 24 - Avaliação de impactos: Etapa de transporte da cana-de-açúcar. ....	81
Figura 25 - Avaliação de impactos: Etapa Industrial. ....	84
Figura 26 - Comparação, em termos de categorias de impacto, entre as etapas do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala.....	88
Figura 27 - Comparação, em termos de categorias de danos, entre as etapas do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala.....	89
Figura 28 - Avaliação de impactos da produção dos modelos de colunas. ....	94
Figura 29 - Avaliação de danos: produção da coluna de destilação tipo prato e tipo mista.....	95



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escalas e modelos sociopolíticos. ....	17
Tabela 2 - Escalas e modelos tecnológicos. ....	17
Tabela 3 - Dados de produção agrícola e industrial. ....	65
Tabela 4 - Fluxos de maior contribuição nas categorias de impacto: Etapa Agrícola.....	78
Tabela 5 - Eficiência energética da etapa agrícola. ....	79
Tabela 6 - Fluxos de maior contribuição nas categorias de impacto: Etapa Industrial. ....	85
Tabela 7 - Eficiência energética da etapa industrial. ....	86
Tabela 8 - Eficiência energética global do sistema. ....	90
Tabela 9 - Parâmetros de projeto das colunas. ....	92

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes de informações utilizadas. ....	30
Quadro 2 - Aspectos considerados na Avaliação do Ciclo de Vida. ....	30
Quadro 3 - Descrição de algumas categorias de impacto ambiental. ....	33
Quadro 4 - Tipos e fontes de incertezas. ....	40
Quadro 5 - Relação entre as fases de uma ACV e os possíveis tipos de incertezas. ....	41
Quadro 6 - Alguns <i>softwares</i> disponíveis no mercado para uso em ACV. ....	46
Quadro 7 - Comparação entre processos unitários e sistemas de processo no SimaPro 7. ....	48
Quadro 8 - Caracterização das categorias de impacto do método Eco-Indicador 99. ....	50
Quadro 9 - Contribuição energética dos níveis de regressão. ....	56
Quadro 10 - Equipamentos da etapa industrial. ....	68
Quadro 11 - Quantificação mássica e energética da etapa agrícola. ....	76
Quadro 12 - Quantificação mássica e energética da etapa de transporte da cana-de-açúcar. ....	80
Quadro 13 - Quantificação mássica e energética da etapa industrial. ....	83
Quadro 14 - Inventário da produção: coluna de destilação por pratos. ....	93
Quadro 15 - Inventário da produção: coluna de destilação mista. ....	93

## SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

LCA - Life Cycle Assessment

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ISO - International Organization for Standardization

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria

RS - Rio Grande do Sul

$\Sigma$  - Somatório

m - Massa (g ou kg)

$\Delta U$  - Variação de energia interna (J)

Q - Calor (J)

W - Trabalho (J)

$\Delta S$  - Variação de entropia (J/K)

$\Delta E$  - Variação de energia da reação (J)

WTT - Well-To-Tank (Berço ao Portão incluindo a etapa de distribuição)

WTG - Well-To-Gate (Berço ao Portão)

TTW - Tank-To-Wheel (Portão-Portão)

WTW - Well-To-Wheel (Berço ao Túmulo)

DBO<sub>5</sub> - Demanda Biológica de Oxigênio (mg/L)

Brix - Escala numérica de índice de refração utilizada para determinar, de forma indireta, a quantidade de compostos solúveis numa solução de sacarose (° Bx)

pH - Potencial de hidrogênio

ha - Hectare

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - Pentóxido de fósforo ou Óxido de fósforo (V)

N - Nitrogênio

K<sub>2</sub>O - Óxido de potássio

CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub> - Dolomita

EM - Valor energético do material (J)

EF - Valor do consumo energético gasto para fabricação (J)

ER - Energia consumida para reparos e manutenção (J)

$\rho$  - Densidade (kg/m<sup>3</sup>, kg/L, ou g/cm<sup>3</sup>)

PP - Polipropileno

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>19</b>
2.1 Objetivos específicos .....	19
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
3.1 Conceito e aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida.....	20
3.1.1 Fases da ACV .....	24
3.1.1.1 Objetivo e Escopo .....	24
3.1.1.2 Análise do Inventário .....	28
3.1.1.3 Avaliação de Impacto .....	31
3.1.1.4 Interpretação .....	37
3.2 Barreiras e incertezas de um estudo de Análise de Ciclo de Vida .....	38
3.3 Relação qualitativa entre ACV, a Lei da Conservação da Massa e a 1º e 2º Lei da Termodinâmica.....	42
3.4 <i>Softwares</i> e bases de dados para a realização de uma ACV .....	46
3.4.1 SimaPro .....	47
3.4.1.1 Eco-Indicador 99 .....	49
3.5 ACV na produção de biocombustíveis .....	51
3.6 Produção de álcool em pequena escala.....	57
3.6.1 Aspectos operacionais da produção de etanol em pequena escala .....	61
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>63</b>
4.1 Análise da produção de etanol hidratado em pequena escala.....	64
4.2 Análise ambiental comparativa da produção da coluna de destilação por pratos e da coluna de destilação mista.....	71
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>74</b>
5.1 Resultados da produção de etanol hidratado em pequena escala .....	74
5.1.1 Resultados da etapa agrícola .....	74
5.1.2 Resultados da etapa de transporte.....	80
5.1.3 Resultados da etapa industrial .....	81
5.1.4 Resultados da comparação entre as etapas .....	87
5.2 Resultados da análise ambiental comparativa entre modelos de colunas de destilação .....	92
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>97</b>

<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>110</b>
Apêndice A - Produção de etanol, em grande escala, a partir da cana-de-açúcar .....	110
Apêndice B - Eficiência Energética .....	120
Apêndice C - Índices mássicos para a etapa agrícola.....	122
Apêndice D - Índices energéticos para a etapa agrícola.....	123
Apêndice E - Índices mássicos e energéticos para a etapa de transporte .....	124
Apêndice F - Índices energéticos para a etapa industrial .....	125
Apêndice G - Equipamentos da microdestilaria .....	126
<b>ANEXOS .....</b>	<b>129</b>
ANEXO 1 - Caldeira vertical para queima de lenha (série GVL), Óleo diesel (série GVO) ou gás (série GVG).....	129
ANEXO 2 - Esquema teórico de uma coluna de destilação por pratos e coluna de recheio..	131
ANEXO 2 - Continuação.....	132

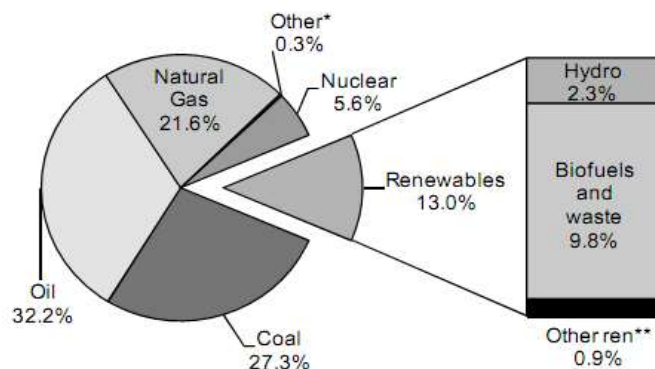
# 1 INTRODUÇÃO

As principais preocupações dos países industrializados e dos países em desenvolvimento nortearam-se, durante muito tempo, no âmbito social, econômico e político. No entanto, a partir das últimas décadas do século XX, os países perceberam o demasiado avanço da degradação ambiental e a partir dessa preocupação o meio ambiente começou a receber maior atenção.

Como consequência surgiu o conceito de sustentabilidade e a gradual inserção de fontes renováveis de energia na matriz energética dos países foi estimulada.

É indiscutível que os combustíveis fósseis foram e são as fontes energéticas propulsoras do desenvolvimento industrial (principalmente na 1ª e 2ª Revolução Industrial), sendo os países hegemônicos fortemente e diretamente dependentes desses.

O carvão mineral e petróleo (combustíveis não renováveis) ainda predominam como fundamentais fontes de geração de energia, com parcela de 59,5 % do total da energia primária produzida no mundo, conforme apresenta a Figura 1 e, sem dúvida, permanecerão por um período ainda incerto, como principais recursos energéticos. Mas, para o alcance da sustentabilidade, mudanças em setores políticos, econômicos, sociais e ambientais fazem-se necessárias, onde dessa forma as fontes renováveis de energia ganhem fomento.



\* Inclui eletricidade a partir de fontes de energia não definidas acima, tais como resíduos não renováveis, turfa e calor química.

\*\* Outras energias renováveis incluídas como geotérmica, eólica, solar, das marés.

Figura 1 - Parcelas de contribuição por fontes de energia em 2010.

Fonte: IEA, 2012.

Através da Figura 1, vê-se que apenas 13 % do total de energia produzida no mundo vêm de fontes renováveis. No entanto, a situação brasileira é diferente da mundial, onde a parcela de contribuição energética oriunda de fontes renováveis é substancialmente mais elevada, com média de 47,2 % entre os anos de 2002 e 2011, de acordo com dados do BEN (2012).

Desses 47,2 %, em média, 16,9 % é atribuído a produtos da cana-de-açúcar (produção de etanol e cogeração de energia elétrica), sendo que a produção energética a partir da biomassa<sup>1</sup>, para uso como combustível, principalmente na produção de álcool (etanol) e biodiesel, fazem do Brasil um importante espelho para países em busca da sustentabilidade.

O incentivo à produção e uso de etanol, no Brasil, é um exemplo estimulante desse tipo ação, sendo politicamente explicado pela diversificação da matriz energética brasileira, economicamente ratificada pela redução da importação de etanol para adição à gasolina e, segundo Cobra (2001), reconhecido por suas vantagens ambientais, contribuindo para redução da poluição atmosférica, além de promover benefícios sociais através da geração de empregos e valorização do homem do campo. No entanto, o modelo de produção de etanol em grande escala, muitas vezes, promove o deslocamento de mão-de-obra do campo para outras regiões, o que pode implicar em nocividade a fixação do homem no campo.

Em 1975, o governo brasileiro criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que diversificou a atuação da indústria açucareira com grandes investimentos financeiros, possibilitando a ampliação da área plantada com cana-de-açúcar e a implantação de destilarias de etanol (UNICA, 2012). A experiência serviu como alternativa para diminuir a vulnerabilidade energética do País, devido à crise mundial do petróleo de 1973 e com o objetivo de substituição em larga escala dos combustíveis veiculares derivados de petróleo por álcool a partir da adição de 20% e, após, 22% da mistura de álcool anidro a gasolina. No entanto, nos anos subsequentes (principalmente na década de 90) o programa começou a perder força devido à estabilidade do preço do petróleo, aliado a maior lucratividade de produção de açúcar em comparação com o etanol, culminando no fechamento de várias indústrias.

Com o advento da tecnologia “flex” e a busca pela produção ambientalmente correta e menos poluente ao meio ambiente, a produção de etanol voltou a ganhar importância no setor industrial, tendo em vista que seu uso tem vantagens como menor dependência de

---

<sup>1</sup> Biomassa, do ponto de vista energético, é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia (CENBIO, 2013).

combustíveis fósseis importados, os subprodutos da cana-de-açúcar, por exemplo, são utilizados no próprio ciclo produtor de álcool, como fonte de energia elétrica obtida pela queima do bagaço e uso do vinhoto como fertilizante da terra utilizada no plantio, tornando uma usina de álcool auto dependente.

Apesar de o Brasil ser um grande produtor de etanol, alguns estados como o Rio Grande do Sul (RS) produzem pouco etanol. O RS produz menos de 2% do álcool que consome atualmente e paga um preço alto pela importação de álcool de outros estados (CASTRO *et al.*, 2008). Portanto, é notável que se estimule uma maior produção no estado do RS, mesmo que o etanol seja produzido a partir do cultivo e beneficiamento da cana-de-açúcar cultivada em pequenas propriedades rurais, contrariando o panorama atual da agroindústria canavieira extensiva existente no Brasil.

Segundo Mayer (2010) a estrutura fundiária do RS permite que a produção de álcool combustível ocorra em pequena escala, nas chamadas micro ou mini destilarias, com produção de até 5.000 litros de etanol por dia, tendo como principal característica o fato de a lavoura de cana-de-açúcar não ser a única atividade de sustento da propriedade. Logo, o foco deste estudo incide nas microdestilarias produtoras de álcool oriundo da cana-de-açúcar, respeitando os fatores edafoclimáticos que delimitam e norteiam a produção no Estado do RS.

Para Ortega *et al.* (2008) quando se planeja ou se constrói uma destilaria de etanol, determina-se o futuro da região, devido a relação entre a escala de produção e o sistema social, demonstrado na Tabela 1 e Tabela 2.

O mesmo autor relata que as escalas de produção de 4.000 até 40.000 hectares permitem produzir etanol concentrado (99 %) e eletricidade de forma eficiente com vapor a alta pressão, enquanto que escalas de produção de 4 até menos de 4.000 hectares produzem etanol hidratado (94%), adubo e outros co-produtos, sem cogeração de eletricidade.

As microdestilarias atualmente não permitem produzir etanol anidro, mas permite a autossuficiência de combustível líquido, adubo e de produtos agropecuários.



Tabela 1 - Escalas e modelos sociopolíticos.

<b>Modalidade da organização social</b>	<b>Área da lavoura (ha) e toneladas de cana por dia (TCD)</b>	<b>Litros/dia de etanol e MegaWatt/ano de eletricidade</b>
Modelo altamente concentrador	40.000 ha	5.000.000 l/dia
	5.000 TCD	~ 730.000 MW/ano
Modelo com ajustes ambientais	4.000 ha	500.000 l/dia
	500 TCD	~ 73.000 MW/ano
Assentamentos rurais grandes	400 ha	50.000 l/dia
	50 TCD	-
Assentamentos rurais médios	40 ha	5.000 l/dia
	5 TCD	-
Assentamentos rurais pequenos	4 ha	500 l/dia
	0,5 TCD	-

Fonte: ORTEGA *et al.*, 2008.

Tabela 2 - Escalas e modelos tecnológicos.

<b>Modalidade de organização</b>	<b>Lavoura</b>	<b>Outras características</b>
Modelo altamente concentrador	Monocultura extensiva e agroquímica	Terreno plano, mecanização
Modelo com ajustes socioambientais	Monocultura orgânica e produção pecuária	Terreno plano, mecanização
Assentamentos rurais pequenos, médios e grandes (Organizações Comunitárias)	Policultura ecológica	Possibilidade de ter terreno ondulado, sem mecanização

Fonte: ORTEGA *et al.*, 2008.

A partir de uma reflexão acerca das informações acima, é possível imaginar um futuro promissor às microdestilarias no Estado do Rio Grande do Sul, promovendo o aumento da produção de etanol visando à busca contínua pela maior autossuficiência da produção do mesmo.

No entanto, o fato de o etanol ser uma fonte renovável de energia não a exime da possibilidade de causar impactos ambientais. Frequentemente apresentadas como “fontes limpas”, as fontes renováveis podem causar danos ao meio ambiente oriundos da sua produção agrária, industrial e/ou de sua utilização. Devido a isso, torna-se necessária a análise

de seu processo como um todo, pois consome energia e matérias-primas que podem estar ligados a degradação e poluição ambiental.

Uma ferramenta/metodologia propícia para avaliação ambiental de um determinado produto é a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite, por meio dos fluxos de entrada e saída do sistema (nesse caso, a produção de etanol hidratado a partir da cana-de-açúcar) verificar o impacto ambiental causado por cada etapa do processo. Além disso, a análise da eficiência energética (que também pode ser considerada uma ACV) possibilita, através da razão energia de saída e energia de entrada, verificar se o processo produz mais energia do que consome.

A técnica de ACV em conjunto com a análise da eficiência energética responde, assim, à crescente necessidade de estender a responsabilidade ambiental e energética dos processos produtivos e sua aplicação na produção de etanol em microdestilarias se torna atrativo no intuito de valorar o produto etanol, identificar as etapas e/ou fluxos do processo com maior potencial de impactos ao meio ambiente, avaliar energeticamente a sua produção e, conseqüentemente, fazer sugestões de melhorias no processo com base nos resultados obtidos.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal é identificar e avaliar os impactos potenciais e aspectos ambientais da produção de etanol hidratado oriundo da cana-de-açúcar, em pequena escala, a partir do estudo do processo de produção do mesmo em microdestilaria utilizando a técnica/metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida aliado à análise da eficiência energética.

### **2.1 Objetivos específicos**

Como especificidades desse estudo, destaca-se:

- i) Aplicar a ACV na produção de etanol hidratado, a partir da cana-de-açúcar, produzido em pequena escala (microdestilaria), a partir da realização de seu inventário do ciclo de vida;
- ii) Identificar, avaliar e comparar ambientalmente a etapa agrícola, de transporte e industrial e, dentro de cada etapa de produção de etanol hidratado, identificar e avaliar os fluxos com maior potencial de impacto ambiental;
- iii) Analisar comparativamente a produção de dois tipos de colunas de destilação (pratos ou bandejas e mista) objetivando verificar e indicar qual propicia menores danos e/ou impactos ao meio ambiente, e dessa forma, servir de alternativa para escolha/indicação do tipo de coluna ideal em termos de mitigação de impactos ambientais;
- iv) Avaliar a eficiência energética da produção de etanol hidratado em termos individuais da etapa agrícola e industrial e a eficiência energética do processo global.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de qualquer estudo do ciclo de vida de um produto, é necessário o conhecimento da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida a fim de aplicá-la da forma mais consistente e confiável possível. O mesmo intuito se aplica a análise da eficiência energética, sendo esta apresentada no Apêndice B.

Adicionalmente, é preciso conhecer e dominar o processo de produção do etanol hidratado em microdestilaria.

#### 3.1 Conceito e aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida

Qualquer produto manufaturado possui um ciclo de vida, ou seja, o produto é originado de matérias-primas, é usado pelos consumidores e finalmente é disposto ou eliminado.

Nesse estudo, o ciclo de vida do etanol hidratado produzido em microdestilaria será abordado, pois a Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês *Life Cycle Assessment - LCA*) é uma ferramenta que vem ganhando força para análise de sistemas produtivos no setor da agroindústria e seus processos.

Os primeiros estudos envolvendo, ainda uma forma embrionária do que hoje se chama de Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos, tiveram início durante a primeira crise do petróleo (CHEHEBE, 1998). A crise provocada gerou uma busca por formas alternativas de energia e para a melhor utilização de seus recursos naturais.

O movimento ecologista da década de 80 abordou a questão da reciclagem, aplicado primordialmente às embalagens, e os impactos ambientais foram naturalmente incluídos na análise energética associada ao ciclo de vida dos produtos analisados, dando origem ao conceito de Avaliação do Ciclo de Vida, o qual passou a ganhar mais força na década de 90.

Apesar do principal enfoque desses estudos terem sido a questão energética, alguns deles chegaram a considerar, ainda que de forma tímida, vários aspectos ligados à questão ambiental, incluindo estimativas de emissões sólidas, líquidas e gasosas (CHEHEBE, 1998).

Com o aumento dos estudos referentes ao ciclo de vida dos produtos, a necessidade de padronização da metodologia de ACV fez-se necessária e sua aplicação, conceito e características passaram a ser especificadas.

Segundo Weidema e Meeusen (2000) e Mendonça (2007) a ACV é definida como uma técnica para determinar os potenciais impactos associados a um produto pela compilação de um inventário das intervenções relevantes em todo seu ciclo de vida, desde a retirada das matérias-primas necessárias à sua produção até sua disposição final no meio ambiente. A Figura 2 representa o esquema amplo de uma abordagem do ciclo de vida, onde determinado produto é resultado da interação de etapas como, extração de matéria-prima, processo, produção, distribuição, disposição, recuperação, etc.



Figura 2 - Esquema representativo de uma abordagem do ciclo de vida.

Fonte: adaptado de UNEP, 2013.

Portanto, essa técnica possibilita considerar todos os processos que contribuem para o produto final, sendo também conhecida como avaliação do “berço ao túmulo”.

Narayanaswamy *et al.* (2004) definiu a ACV como uma técnica que quantifica entradas como energia, água, nutrientes e insumos químicos e quantifica saídas como produto, co-produtos, resíduos e emissões. A partir desses dados, é analisado o desempenho ambiental através dos fluxos de entrada e desprendimentos de saída do sistema, a contribuição relativa

dos vários estágios da cadeia para a produção total e auxilia onde e quais medidas devem ser tomadas para um perfil ambiental desejado.

Para Ferrão (1998), o termo ciclo de vida refere-se a todas as etapas e processos de um sistema de produção ou de serviços, englobando a cadeia de produção e consumo, considerando consumos de energia, matérias-primas e produtos auxiliares, aspectos relativos aos sistemas de transportes e logística, características da utilização, manuseamento, embalagem, marketing e consumo, resíduos gerados e respectiva reciclagem ou outro destino final.

A Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos é, na realidade, uma ferramenta técnica que pode ser utilizada em uma grande variedade de propósitos. As informações coletadas na ACV e os resultados de suas análises e interpretações podem ser úteis para tomadas de decisão, na seleção de indicadores ambientais relevantes para avaliação da performance de projetos e reprojeto de produtos ou processos e/ou planejamento estratégico (CHEHEBE, 1998).

Dentre mais alguns benefícios da aplicação dessa ferramenta pode-se citar:

- Atenta às indústrias a considerar as questões ambientais ligadas aos sistemas de produção (insumos, matéria-prima, manufatura, distribuição, uso, descarte, reuso, reciclagem);
- Contribui para o melhor entendimento dos aspectos ambientais ligados aos processos produtivos;
- Permite mudança na visão do conceito de redução de impactos ambientais, ou seja, mudança do enfoque tradicional de tecnologias “fim de tudo”;
- Na avaliação do desempenho ambiental e rotulagem ambiental.

A ACV está diretamente ligada à gestão ambiental onde as normas da série ISO 14000 (Figura 3) certificam o estudo ambiental, podendo ser implementadas de modo isolado, dependendo do objetivo e necessidade do estudo.

Quanto à sua padronização, a *International Organization for Standardization (ISO)* trabalha em torno da Avaliação de Ciclo de Vida desde 1993, referenciando-a à família 14040.

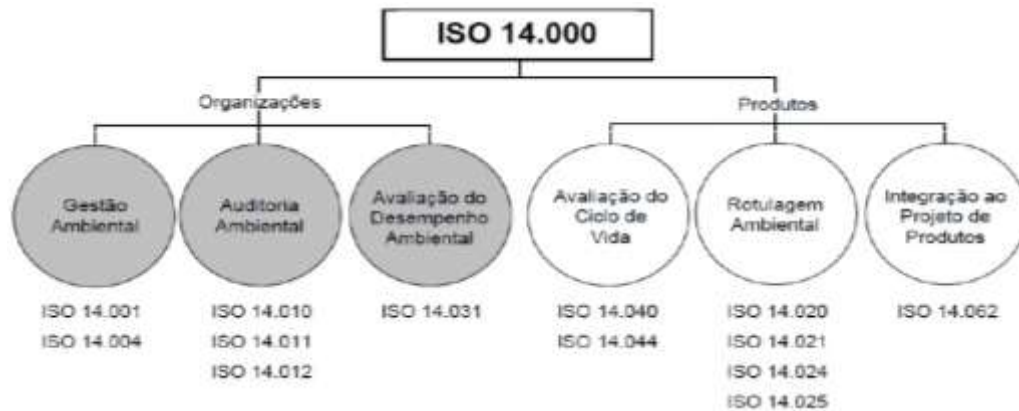


Figura 3 - Estrutura das normas ISO 14000.

Fonte: ALMEIDA, 2012.

As seguintes normas foram publicadas, contextualizando a ACV:

- ISO 14040 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura Básica.

Descreve os princípios e a estrutura para ACV, incluindo a definição do objetivo e escopo, a fase de análise do inventário de ciclo de vida, a fase de avaliação do impacto de ciclo de vida, a fase de interpretação do ciclo de vida, elaboração do relatório e análise crítica da ACV, as limitações da ACV e a relação entre as fases da ACV.

- ISO 14041 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Objetivo, Escopo e Análise do Inventário.
- ISO 14042 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Avaliação de Impactos Ambientais.
- ISO 14043 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Interpretação do Ciclo de Vida.
- ISO 14044 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Diretrizes.

Além dessas normas, foram publicados dois Relatórios Técnicos (*Technical Report*) e uma Especificação Técnica (*Technical Specification*).

- ISO TR 14047 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Exemplos de Aplicação da ISO 14042.
- ISO TR 14049 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Exemplos de Aplicação da ISO 14042 para a definição de objetivos e escopo e análise de inventário.

- ISO TS 14048 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Formato da Apresentação de Dados.

A aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida é descrita pela ISO 14040 e sua correspondente brasileira ABNT NBR ISO 14040, sendo estruturada em quatro fases:

- Objetivo e Escopo;
- Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV);
- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e
- Interpretação dos Resultados.

O esquema das fases é demonstrado na Figura 4.

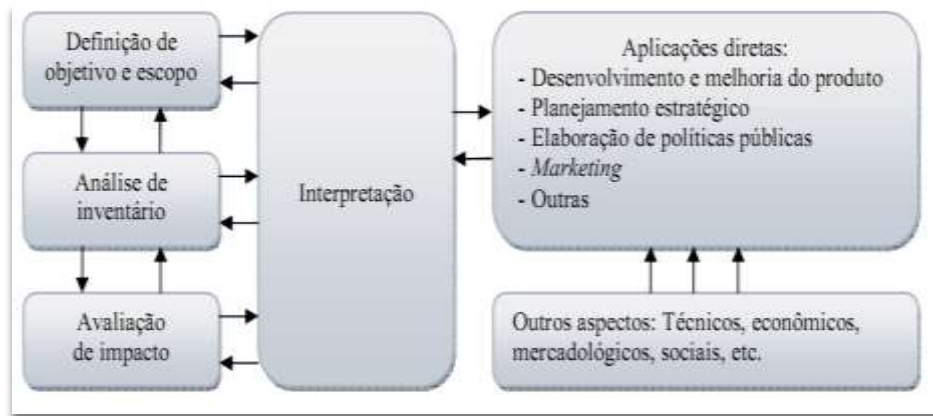


Figura 4 - Estrutura da Análise de Ciclo de Vida.

Fonte: adaptado da ISO 14040, 2006.

### 3.1.1 Fases da ACV

De maneira sucinta serão descritos os principais pontos a serem abordados e introduzidos em cada uma das etapas da ACV.

#### 3.1.1.1 Objetivo e Escopo



À medida que se adiciona detalhes aos modelos, adiciona-se ao mesmo tempo complexidade.

Deve-se, portanto, percorrer caminhos que tornem o estudo gerenciável, prático e econômico sem descuidar, no entanto, da confiabilidade do modelo. O princípio básico a ser aplicado é “menos é melhor” (CHEHEBE, 1998).

A definição do objetivo deve incluir, de forma clara, os propósitos pretendidos e conter todos os aspectos considerados relevantes para direcionar as ações que deverão ser realizadas. É preciso definir se o almejado no estudo é a comparação de produtos ou somente uma relação com um padrão, se existe a intenção de promover alguma melhoria ambiental em um determinado produto existente ou projetar um produto completamente novo, ou pretende-se obter mais informações sobre seu produto.

O escopo refere-se à aplicabilidade (função) do estudo, ou seja, de onde os dados virão, como atualizar o estudo, como a informação será manipulada e onde os resultados serão aplicados. Também é importante informar quem está realizando o estudo e a quem se destina e se os resultados serão de uso privado ou público.

O escopo pode ser alterado ou complementado de acordo com as informações adicionais obtidas no desenvolver do estudo, devido à natureza interativa da ACV.

Conforme Chehebe (1998), as dimensões presentes na Figura 5 devem ser definidas de forma compatível e suficiente para atender ao objetivo do estudo desenvolvido, sendo que a profundidade apropriada do estudo pode ser verificada por meio da comparação com resultados de outros estudos compatíveis ao processo analisado.

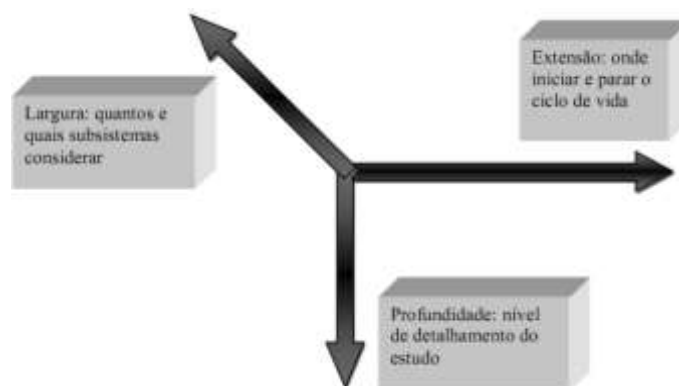


Figura 5 - Dimensões da ACV.

Fonte: CHEHEBE, 1998.

Nesta etapa algumas considerações devem ser tomadas e especificadas, como:

1. O sistema a ser estudado;

2. A definição das unidades do processo e dos limites do sistema ou fronteiras do sistema, pois definem os processos e os fluxos ambientais de entrada e de saída a serem considerados. Na determinação das fronteiras do sistema devem-se levar em consideração vários tipos de parâmetros e fatores, tais como: os fluxos de matéria e de energia na sequência de produção, a produção e a utilização de combustíveis, eletricidades e calor, a distribuição e o transporte, a utilização dos produtos, a eliminação do processo e dos produtos, a recuperação dos produtos já utilizados (reutilização e reciclagem), utilização de recursos naturais e o fabrico e manutenção de equipamentos. O sistema de produto representa o ciclo de vida completo de um produto ou processo.

Para melhor compreendê-lo, o sistema pode ser dividido em uma série de subsistemas (processos unitários) ligados entre si por fluxos de materiais ou de energia, que realizam uma ou mais funções definidas (ISO 14040:2006). Um processo unitário é definido como um processo individual pertencente ao sistema de produto definido, conforme demonstrado na Figura 6.

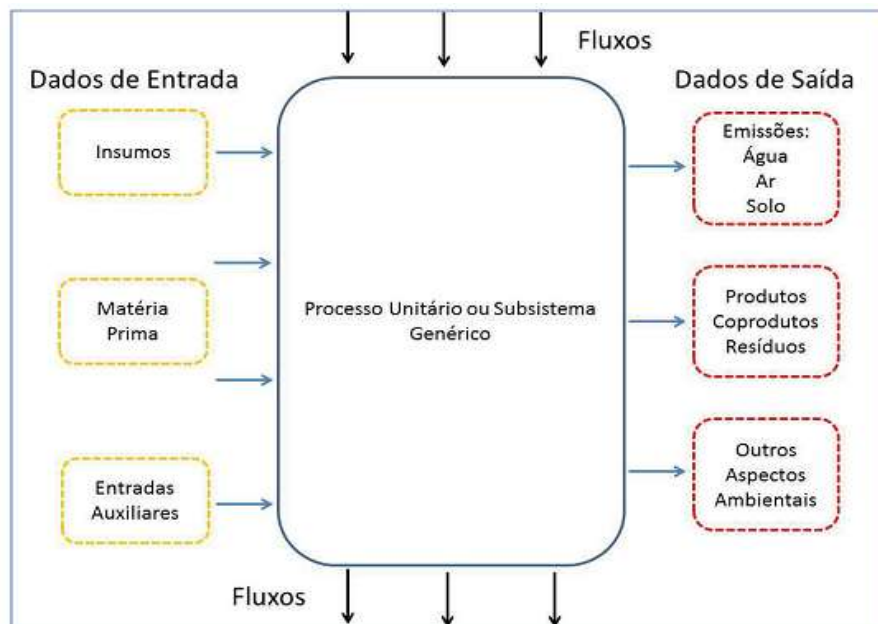


Figura 6 - Fluxograma de um processo unitário.

Fonte: US EPA, 2006; CAMPOS, 2012.

Os conjuntos de processos unitários formam o sistema de produto (Figura 7) abrangendo todo o ciclo de vida de um produto ou processo, desde a sua extração de matéria prima até o seu descarte final.

O sistema de produto está contido na fronteira do sistema (delimitada a partir do objetivo e escopo do estudo). Algumas fronteiras do sistema são classificadas como:

- Fronteiras em relação ao sistema natural: os limites indicam onde se inicia e termina o ciclo de vida em relação ao meio natural;
- Fronteiras em relação a outros sistemas: onde os limites abrangem os sistemas de produto associado aos insumos;
- Fronteiras geográficas: definem localidade onde será realizado o estudo;
- Fronteira temporal: considera o momento para o qual os dados levantados terão validade, ou seja, se será estudada uma situação atual, passada ou ainda cenários de futuro;
- Fronteiras de bens de capital: determina se serão incluídas ou não no estudo as infraestruturas necessárias para a realização dos processos (edifícios das fábricas, estradas, etc).

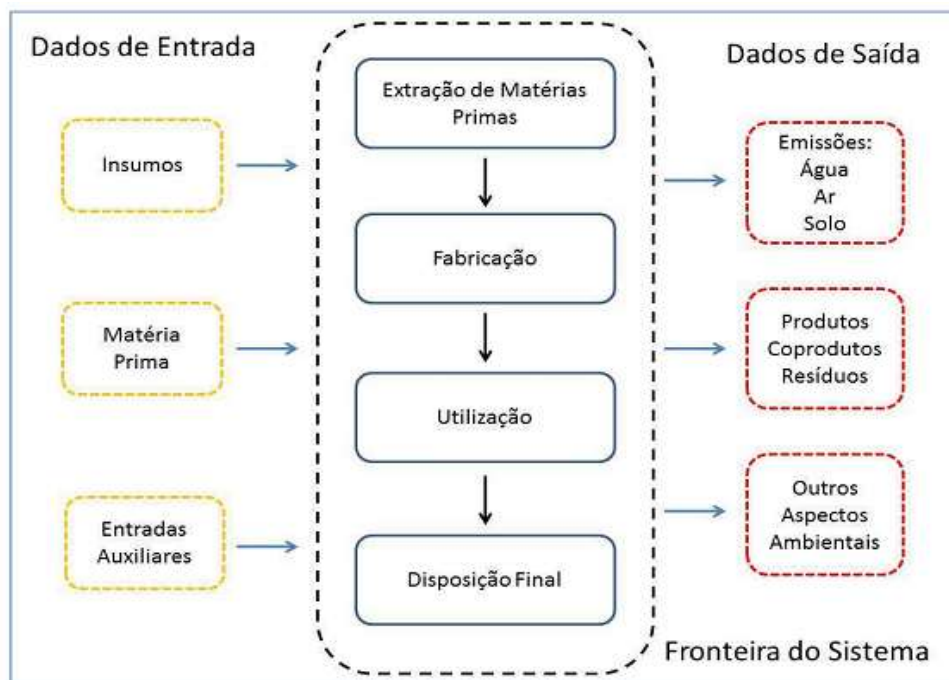


Figura 7 - Fluxograma de um sistema de processo.

3. Estabelecimento da unidade funcional do sistema (unidade básica), ou seja, todos os dados coletados na fase de inventário devem ser relacionados de acordo com a unidade funcional e dessa forma criar uma referência para guiar na normalização dos dados de entrada e saída;

4. Qualidade dos dados, sendo oportuno descrever o método de coleta de dados, período de coleta e cobertura geográfica, pois oferecem credibilidade ao estudo;

5. Hipóteses e limitações feitas.

### 3.1.1.2 Análise do Inventário

Refere-se à coleta de dados e aos procedimentos de cálculo.

Geralmente o inventário inicia-se com a análise seletiva, ou seja, uma coleta grosseira de dados e pontos mais importantes do processo. Depois, ajustam-se as próximas coletas de forma a aperfeiçoar a investigação.

Etapas da análise do inventário:

- Preparação para a coleta de dados;
- Coleta de dados;
- Refinamento dos limites do sistema;
- Esquematização do diagrama de blocos representativo do sistema;
- Determinação dos procedimentos de cálculo;
- Procedimentos de alocação.

A definição dos processos elementares a considerar no estudo depende da identificação do conjunto inicial de fluxos de massa disponíveis ou que se preveem obter, pois é inútil decompor o sistema global em blocos elementares que não possam caracterizar-se.

A descrição do sistema por meio de um diagrama de blocos (Figura 8) permite representar os processos mais relevantes incluídos no estudo do ciclo de vida de forma clara e simples, bem como a relação entre eles e os processos. Dessa forma, possibilita uma visão global do processo.



	Fontes de Informação	Utilização	Observações
<b>FERRÃO ou Norma ISO</b>	Artigos científicos	✓	Utilização pontual
	Estatísticas de foro ambiental	X	Não aplicável
	Enciclopédias técnicas	✓	Sobretudo em revisões bibliográficas
	Informação interna às empresas	✓	Diversos contactos com empresas
	Associações de produtores	X	Não aplicável
	Fornecedores de equipamento	✓	Diversos contactos com empresas
	Outros estudos de ACV	✓	Durante a pesquisa bibliográfica
	Bases de dados	✓	Fonte de informação crucial no estudo
	Dados da DGEG	✓	Aplicável pontualmente
<b>Utilização específica</b>	Estudo de Impacte Ambiental	✓	Primeiro contacto com o projecto
	Cadernos de Encargo dos fornecimentos	✓	Fontes de informação importantes para o inventário dos materiais e produtos utilizados e afectos à unidade funcional.
	Documentos das propostas de fornecimento	✓	
	Manuais de manutenção dos equipamentos	✓	
	Catálogos dos produtores	✓	
<b>Chave</b>	✓ - consideração plena pelos aspectos.		
	X — não se consideraram os aspectos.		
	X/✓ - consideraram-se os aspectos, até certo ponto.		

Quadro 1 - Fontes de informações utilizadas.

Fonte: FERREIRA, 2007; FERRÃO, 1998.

Aspectos a considerar genericamente numa ACV	Consideração	Observações
Fluxos de matéria e de energia na sequência de produção	X/✓	Não se considera o fabrico dos componentes, e o inventário centra-se na produção dos materiais e transporte dos fornecimentos (SETTERWALL, EPA). Para os materiais para os quais se utilizou a base de dados do <i>software</i> , está inerente a sua consideração.
Produção e utilização de combustíveis, electricidade e calor	✓	Teve-se em consideração estes aspectos, durante a produção e transporte dos materiais, fase de obra e exploração.
Distribuição e transporte	✓	Foram considerados os transportes da fábrica e armazéns. Os transportes das matérias-primas também são considerados, uma vez que se utiliza a base de dados, que fornece os seus ciclos de vida e inclui os transportes.
Utilização de produtos	✓	São avaliados os impactes da fase de exploração.
Eliminação dos resíduos do processo e dos produtos	X	Adoptando o que afirma SETTERWALL, a fase de demolição deve ser considerada, à excepção das centrais hídras, porque, na maior parte das vezes, não ocorre demolição, pelo que não deverá ser de considerar essa fase.
Recuperação de produtos já utilizados	X	Não aplicável.
Utilização de recursos naturais	✓	Considerado, uma vez que se inventaria os materiais utilizados.
Fabrico e manutenção dos equipamentos	✓	A operação de manutenção dos equipamentos é considerada na medida em que se inventaria as perdas e substituição de diversos óleos utilizados.
Manufatura de materiais auxiliares ao processo principal	X	Não são considerados estes aspectos, uma vez que o tempo de vida dos equipamentos usados na obra é muito superior ao tempo durante o qual este foi utilizado. As fronteiras definidas devem ser tais que sejam considerados os equipamentos, instalações ou obras construídas especificamente para o empreendimento, sendo, por exemplo, que o guindaste usado na obra não deve ser comutado (EPA). No entanto, para <i>inputs</i> da base de dados, estes aspectos são considerados.
Operações de manutenção, tais com iluminação e aquecimento	✓	Consideradas.
<b>Chave</b>	✓ - consideração plena pelos aspectos.	
	X — não se consideraram os aspectos.	
	X/✓ - consideraram-se os aspectos, até certo ponto.	

Quadro 2 - Aspectos considerados na Avaliação do Ciclo de Vida.

Fonte: FERREIRA, 2007; FERRÃO, 1998.

Uma vez coletado os dados, podem-se obter centenas de informações de entrada e saída, o que torna necessário a existência de um critério para refinamento. Os critérios usados para selecionar as informações significativas incluem a relevância mássica, energética e ambiental. São selecionadas as entradas de materiais que cumulativamente contribuem mais que uma porcentagem definida para a massa ou fluxo de energia do sistema produtivo (Prado, 2007 apud CAMPOS, 2012).

Adicionalmente, encontra-se disponível na literatura uma quantidade substancial de dados em artigos científicos, estatísticas de foro ambiental, enciclopédias técnicas, fornecedores de equipamentos, outros estudos de ACV e base de dados que podem ser utilizados em conjunto com a coleta de dados prática. A coleta de dados deve ser de tal forma que propicie credibilidade do resultado final do estudo.

Normalmente, um sistema de produto inclui diversos processos que podem gerar mais de um produto. Como consequência, existe a necessidade de que a carga ambiental seja distribuída (alocada) sobre os diferentes produtos de saída do processo. A ISO 14040:2006 recomenda o seguinte procedimento, a fim de lidar com questões de alocação (PRE CONSULTANTS, 2013):

- Evitar a alocação, ao dividir o processo de tal forma que possa ser descrito como dois processos separados, cada um com um único *output*. Muitas vezes, isto não é possível, uma vez que o processo não pode ser separado em dois.
- Extensão do limite do sistema, incluindo processos que seriam necessários para fazer um *output* semelhante.
- Se não for possível evitar a alocação, a norma ISO 14044: 2006 sugere a atribuição com base em uma causalidade física, tal como a massa ou o conteúdo de energia dos *outputs*.
- Se este último procedimento não puder ser aplicado, a ISO14044: 2006 sugere o uso de uma base de alocação socioeconômica, como o valor econômico dos produtos.

### 3.1.1.3 Avaliação de Impacto

A avaliação de impacto tem por objetivo compreender e avaliar a magnitude e importância dos impactos ambientais potenciais de um sistema, baseada no inventário realizado. Nessa etapa, convertem-se os valores obtidos nos resultados do inventário em impactos e/ou danos ao meio ambiente. Para tal, uma série de conceitos e metodologias, que se encontra em constante evolução, deve ser colocada em prática.

O processo de avaliação de impacto deve ser composto, no mínimo, nos seguintes elementos:

- Seleção e definição dos impactos: onde são identificados os grandes focos de preocupação ambiental, seleção dos métodos de avaliação de impactos (como por exemplo, Eco-Indicador 99, EDIP e Impact 2002 +) e seleção das categorias de impactos ambientais (como por exemplo, ecotoxicidade, aquecimento global, acidificação e eutrofização) que o estudo utilizará;
- Classificação: onde os dados do inventário são classificados e agrupados nas diversas categorias selecionadas (aquecimento global, acidificação, saúde humana, etc);
- Caracterização: onde os dados do inventário atribuídos a uma determinada categoria são modelados de forma que os resultados possam ser expressos na forma de um indicador numérico para aquela categoria. Uma vez que as categorias de impacto são definidas e os resultados do inventário são atribuídos a estas categorias de impacto, é necessária a determinação dos fatores de caracterização, também denominados de equivalentes ou potenciais. Esses fatores devem refletir a contribuição relativa de um resultado do inventário para a categoria de impacto (PRE CONSULTANTS, 2013). Cada categoria apresenta um método de cálculo para o fator de caracterização.

Esses fatores são derivados de modelos científicos de causa e efeito dos sistemas naturais e eles indicam o quanto uma substância contribui para uma categoria de impacto em comparação com uma substância de referência. Assim, os fatores de caracterização colocam todos os dados classificados em uma categoria de impacto ambiental, em uma mesma unidade de medida.

A avaliação de impacto ambiental utiliza indicadores numéricos para categorias selecionadas com o objetivo de condensar e simplificar os dados do inventário. Logo, é uma etapa que procura identificar, caracterizar e avaliar, quantitativa e qualitativamente, impactos potenciais das intervenções ambientais identificadas na etapa de análise do inventário.

Na seleção e definição dos métodos de avaliação de impacto (como por exemplo, o CML, Eco-Indicador 95 e Eco-Indicador 99) são identificados os grandes focos de preocupação ambiental, as categorias e os indicadores que o estudo utilizará.



O Quadro 3 expõe algumas categorias de impacto ambiental que podem estar presentes em diferentes métodos de avaliação de impactos para estudos de ACV.

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Escala</b>	<b>Classificação (Dados de um ICV)</b>	<b>Fator de Caracterização</b>	<b>Descrição do Fator de Caracterização</b>
Aquecimento Global	Global	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) Metano (CH <sub>4</sub> ) Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Brometo de Metil (CH <sub>3</sub> Br)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Converte para dados de ICV em equivalente dióxido de carbono (kg CO <sub>2</sub> eq)
Depleção do Ozônio Estratosférico	Global	Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Brometo de Metil (CH <sub>3</sub> Br) Halons	Potencial de Depleção do Ozônio	Converte dados de ICV em equivalentes triclorofluormetano (kg CFC-11 eq)
Acidificação	Regional Local	Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> ) Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) Ácido Hidroclorídrico (HCl) Ácido Hidrofluorídrico (HF) Amônia (NH <sub>4</sub> )	Potencial de Acidificação	Converte dados de ICV em equivalentes íons de hidrogênio (H <sup>+</sup> )
Eutrofização	Local	Fosfato (PO <sub>4</sub> ) Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> ) Nitratos de Amônia	Potencial de Eutrofização	Converte dados de ICV em equivalentes fosfatos (PO <sub>4</sub> )
Oxidação Fotoquímica	Local	Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	Potencial de Criação de Oxidante Químico	Converte dados de ICV em equivalentes etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
Toxicidade Terrestre	Local	Químicos tóxicos com um registro de concentração letal para roedores	LC <sub>50</sub>	Converte dados LC <sub>50</sub> em equivalentes
Toxicidade Aquática	Local	Químicos tóxicos com um registro de concentração letal para peixes	LC <sub>50</sub>	Converte dados LC <sub>50</sub> em equivalentes
Depleção de Recursos	Local Regional Global	Quantidade de minerais usados Quantidade de combustíveis fósseis usados	Potencial de Depleção de Recursos	Converte dados de ICV em razão da quantidade de recurso versus quantidade de recursos deixados em reserva
Uso do Solo	Local Regional Global	Quantidade depositada num aterro	Resíduo Sólido	Converte massa de resíduo sólido em volume usando uma densidade estimada
Saúde Humana	Local Regional Global	Total liberado para o ar, água e solo	LC <sub>50</sub>	Converte dados LC <sub>50</sub> em equivalentes

Quadro 3 - Descrição de algumas categorias de impacto ambiental.

Fonte: Adaptado de US EPA, 2006.

De acordo com a norma ISO 14040, a avaliação de impacto pode servir para 3 fins principais:

1. Expressar a preferência relativa de uma organização ou um grupo, baseada em políticas, objetivos ou opiniões comuns a essa organização ou grupo;
2. Assegurar que o processo é visível, documentável e quantificável;
3. Estabelecer a importância relativa dos resultados com base no estado do conhecimento sobre os diversos temas ambientais.

Elementos opcionais na etapa de avaliação de impacto:

- Normalização

Procedimento necessário para mostrar em que medida uma categoria de impacto tem uma contribuição significativa para o problema ambiental global. Isto é feito dividindo-se os indicadores de categoria de impacto por um valor "normal".

Dividem-se os valores encontrados após a caracterização dos resultados por um valor de referência de fora do inventário do estudo, com o intuito de fazer com que os resultados se aproximem mais da realidade encontrada. Quando os resultados da caracterização para cada categoria de impacto ambiental são relacionados para um valor de referência, esses resultados normalizados podem aumentar a comparabilidade dos dados com as diferentes categorias de impacto.

Assim, a normalização faz com que categorias de impacto ambiental que contribuem apenas com uma pequena parcela do total do impacto, comparado com outras categorias, possam ser deixadas de lado, por não serem relevantes para o processo.

Reduz-se, assim, a quantidade de dados para serem avaliados. Além disso, os resultados normalizados mostram em ordem de magnitude os problemas ambientais gerados pelo ciclo de vida dos produtos ou processos, o que permite a comparação dos impactos ambientais (PRE CONSULTANTS, 2013).

- Ponderação

Método subjetivo, por isso é o mais controverso e mais difícil em uma ACV, especialmente para alguns métodos de avaliação de impactos.

Segundo a ISO 14040 (2006), esse método não pode ser utilizado em comparações públicas entre produtos, sendo apenas utilizado para estudos não comparativos.

A Figura 9 representa o esquema de como a avaliação de impacto é modelada de acordo com a forma de representação dos resultados. Ou seja, a partir da coleta de dados do inventário os resultados são obtidos através das categorias de impactos (presentes no método de avaliação de impacto escolhido) e tais resultados podem, ainda, ser normalizados a fim de

apresentar os resultados em termos de danos ambientais ao invés de impactos ambientais, sendo os danos mais abrangentes ao ambiente e ao homem.

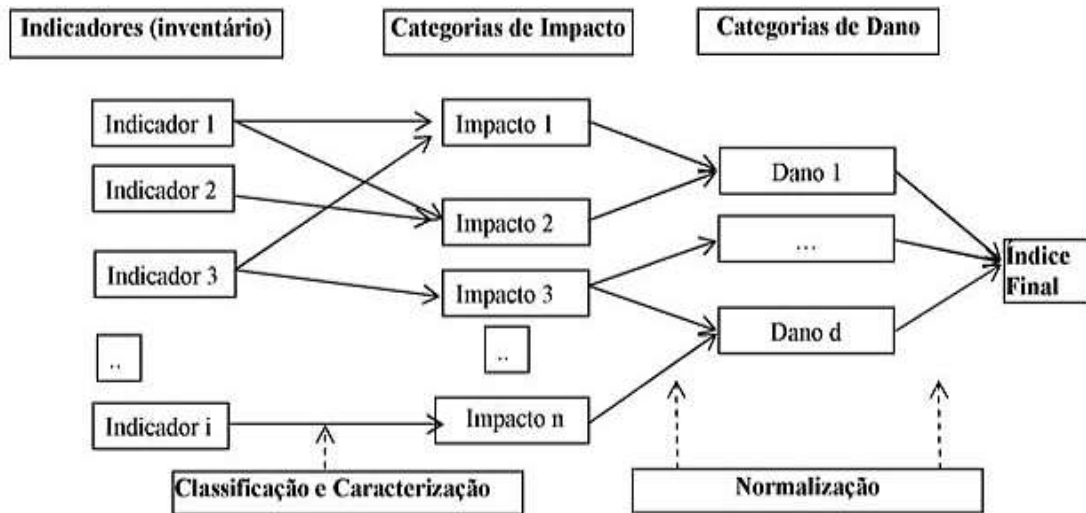


Figura 9 - Modelo geral na avaliação de impactos na ACV.

Fonte: FIGUEIRÊDO *et al.*, 2010.

É possível que algumas categorias de impactos sejam mais importantes do que outras para uma ACV. Logo, cada categoria de impacto é multiplicada pelo respectivo fator de ponderação, fazendo com que as categorias de impacto que realmente são importantes para a ACV se sobressaiam das outras não tão importantes, contribuindo para que os resultados se diferenciem e se aproximem da realidade (Argonne, 2007 apud CAMPOS, 2009).

Portanto, nessa etapa se pode escolher quais são as categorias de impacto mais importantes para o estudo de ACV, sendo que ainda não existe nenhum acordo internacional sobre a metodologia mais aplicada para essa finalidade e são decisões que contam com a experiência dos realizadores da ACV.

#### Modelos de análise do inventário do ciclo de vida (impacto x dano)

De um modo geral, os modelos de análise do inventário do ciclo de vida podem ser agrupados em duas categorias:

- Modelos Clássicos ou *Midpoint*
- Modelos de Danos ou *Endpoint*

Os modelos clássicos ligam diretamente os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) para categorias de impacto intermediárias, por exemplo, acidificação e mudança climática (Goedkoop e Spriensma, 2001 apud CAMPOS, 2012).

Os modelos de danos vão além das categorias de impacto intermediárias, sendo modelados causas e efeitos para estimar danos (Goedkoop e Spriensma, 2001 apud CAMPOS, 2012).

Para Sallaberry (2009), a diferença entre impacto (*midpoint*) e dano (*endpoint*) é a distância entre o processo unitário e seu efeito. Em uma escala contínua, o processo (com suas entradas e saídas) é o início e, o ponto intermediário, é o impacto. O ponto final, ou seja, o efeito no ambiente e no homem é chamado de dano.

Enquanto que os modelos clássicos produzem categorias de impacto intermediárias, os modelos de dano estimam quais são os danos que decorrem dessas categorias intermediárias para o homem, fauna e flora (PRE CONSULTANTS, 2013). Em geral, indicadores que são escolhidos próximos ao inventário, tem um grau de confiabilidade maior que os indicadores que vão além dos intermediários, já que as hipóteses assumidas são menos específicas.

Entretanto, indicadores específicos são mais fáceis de serem interpretados que os indicadores intermediários. A Figura 10 apresenta a diferença de abordagem das metodologias de impacto *midpoint* e *endpoint*, sendo que a metodologia de abordagem *endpoint* engloba a *midpoint*.

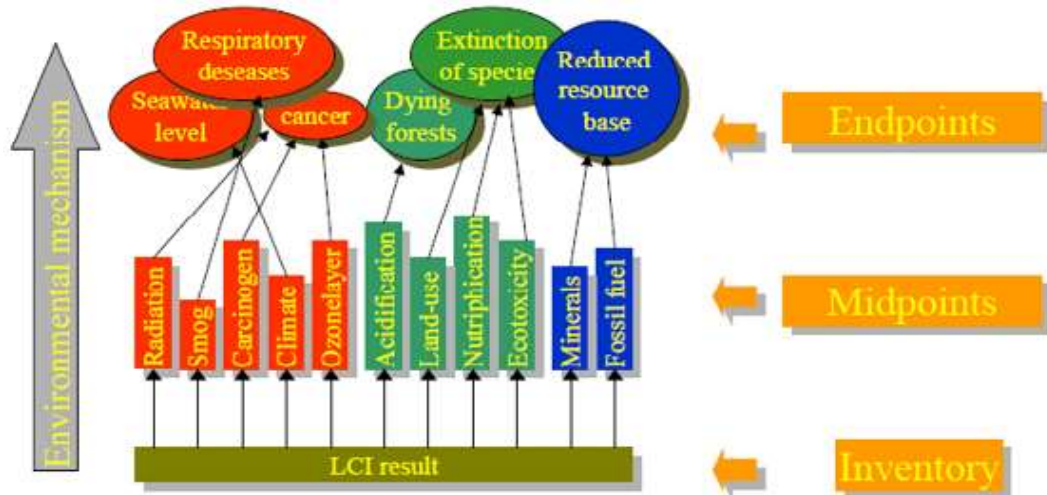


Figura 10 - Diferenças entre os métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida.

Fonte: PRÉ CONSULTANTS - INTRODUCTION INTO LCA SIMAPRO 7, 2010.

#### 3.1.1.4 Interpretação

O objetivo da fase de interpretação é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações para um estudo do inventário do ciclo de vida ou uma análise completa do ciclo de vida. Deve-se, nesse estágio, consultar os objetivos e o escopo definidos inicialmente para o estudo.

A interpretação dos resultados deve também evidenciar as limitações que podem tornar os objetivos iniciais inalcançáveis ou impraticáveis. As etapas dessa fase são:

- Identificação das questões ambientais mais significativas baseadas nos resultados da análise do inventário e/ou ACV;
- Avaliação, onde pode incluir checagem da integridade, sensibilidade e consistência dos resultados;
- Conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais significativas relacionados ao processo em um todo.

Nota-se, pela Figura 11, que todas as fases estão interligadas de modo que podem ser alteradas ao longo do estudo para estarem em conformidade entre si. Dessa forma, caso um dos objetivos e/ou escopo não possam ser alcançados, pode-se alterá-los e conseqüentemente permitir e implicar em mudanças na coleta, análise e interpretação dos resultados.

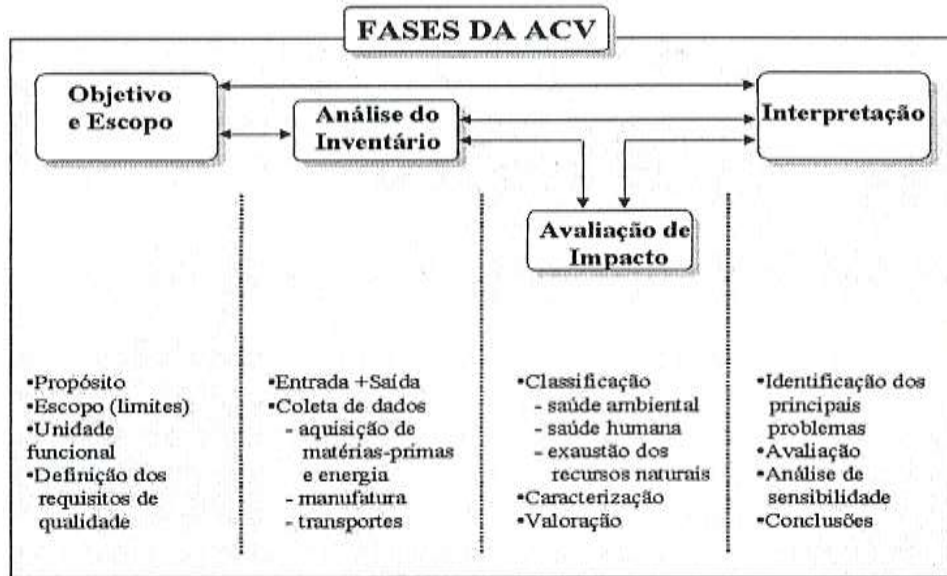


Figura 11 - Etapas de uma ACV.

Fonte: CHEHEBE, 1998.

A importância dessa ferramenta na análise de processos é tanta que muitos artigos, como o de Klöpffer (2012), focam em salientar e descrever sua aplicação de acordo com as normas certificadoras e com temática de estado da arte.

### 3.2 Barreiras e incertezas de um estudo de Análise de Ciclo de Vida

Mesmo com os diversos benefícios da ACV existem barreiras para a prática desses estudos, que segundo Campos (2012), são:

- Carência de guias práticos;
- Necessidade de grande volume de dados;
- Necessidade de participação de vários setores dentro de uma organização;
- Incertezas sobre a aplicação dos resultados;
- Deficiências na validação dos resultados;
- Base científica em constante aprimoramento;
- Transparência.

Black *et al.* (2011) citam fatores como definição das fronteiras do sistema, alocação de impactos, escolha e confiabilidade de dados e modelos de ACV demasiadamente

simplificados como barreiras negativas em estudos de avaliação de ciclo de vida na produção de biocombustíveis.

Além disso, a elaboração de estudos que utilizam a metodologia de Análise do Ciclo de Vida muitas vezes demandam um grande consumo de tempo, recursos financeiros e humanos. A não disponibilidade de dados importantes pode afetar o resultado final do estudo e conseqüentemente a sua validade.

Como as metodologias para avaliação de impacto ambiental estão em constante transformação e adequação, não há um critério de medida absoluta para determinar os impactos. Para algumas categorias, pela sua objetividade, este cálculo é preciso e bem fundamentado, enquanto para outras, que envolvem mais fenômenos e são dependentes de situações mais subjetivas, apresentam-se maiores dificuldades na utilização desta simplificação.

Outra limitação da ACV é a subjetividade da natureza das escolhas e suposições feitas (como por exemplo, a seleção da fronteira do sistema, dos dados de entrada e saída e das categorias de impacto). Por se tratar de uma técnica que envolve alto grau de subjetividade, a confiabilidade dos dados para aplicações práticas reais pode ser fraca (CAMPOS, 2012).

Uma barreira importante para a disseminação mundial da ACV é a sua característica europeia e americana, onde as bibliotecas de consulta se referem a dados estrangeiros, que muitas das vezes não se aplicam e se diferenciam muito da realidade de outros países.

Ainda, cada etapa analisada do ciclo de vida está sujeita a incertezas como a natureza das suposições adotadas, modelos escolhidos para análise do inventário e impactos, qualidade de dados coletados que, acumuladas ou não, podem levar a conclusões que não interpretam adequadamente o sistema em estudo quanto aos impactos potenciais do produto ou serviço sob avaliação (BENEDET JUNIOR, 2007). Portanto, todo tipo de suposição e/ou informação referente ao produto analisado deve ser mencionada na ACV para evitar equívocos de interpretação e entendimento.

Existem diferentes tipos e fontes de incertezas que podem surgir durante um estudo de ACV, sendo os mais tradicionais citados no Quadro 4.

<u>Incertezas de parâmetro</u>	<b>Imprecisão de dados</b>	Os instrumentos utilizados para análise dos processos estudados podem gerar imprecisão nos resultados coletados.
	<b>Falta de dados</b>	A maioria dos estudos de ACV engloba muitas etapas e processos que vão além do alcance do pesquisador, gerando assim, a falta de diversos dados necessários ao estudo.
	<b>Lacuna de dados</b>	Vinculado à falta de dados, a lacuna nos dados ocorre devido à variação do período de amostragem, no qual, são coletados os dados relevantes ao estudo de ACV. Pode também aparecer na perda ou descarte de dados por algum motivo.
	<b>Dados não representativos</b>	Dados que não representam completamente a realidade do estudo. Quando são utilizados dados de processos semelhantes para preencher a falta de dados, estes podem ser não representativos por serem muito antigos, de origem geográfica diferente, ou desempenho técnico inadequado.
<u>Variabilidades</u>	<b>Variabilidade Temporal</b>	Dados de alguns anos atrás podem não representar o atual sistema avaliado tão bem, quanto à utilização de dados mais recentes.
	<b>Variabilidade Espacial</b>	Dados de regiões diferentes das do estudo em questão podem possuir características diferentes, mesmo que para parâmetros iguais.
	<b>Variabilidade Tecnológica</b>	Relativo às tecnologias utilizadas no estudo e diferenças no desempenho entre processos equivalentes ao do sistema estudado.
<u>Outros</u>	<b>Incerteza de modelo</b>	Utilização de modelos impróprios podem não representar a realidade do estudo.
	<b>Incerteza devido às escolhas</b>	Quando se lida com escolhas, estas geram incerteza nos resultados finais, por exemplo, escolha dos limites do sistema, métodos de distribuição, metas de qualidade, etc.
	<b>Incerteza subjetiva</b>	Também conhecida como Epistemológica, surge por não saber realmente o que irá acontecer. É uma falta de conhecimento no sistema comportamental ou de aspectos relevantes ao sistema estudado, por exemplo, a previsão do comportamento ao longo do tempo ou a caracterização de impactos potenciais.
	<b>Enganos</b>	Em qualquer fase de uma ACV, ou qualquer outro estudo, enganos podem ocorrer e isto gera incerteza.

Quadro 4 - Tipos e fontes de incertezas.

Fonte: adaptado de BENEDET JÚNIOR, 2007.

O Quadro 5 apresenta a relação entre as etapas da ACV e tipos e fontes de incertezas encontradas em cada uma delas.



<u>Tipo de incerteza</u>		<b>Fases da ACV</b>			
		<u>Objetivo e Escopo</u>	<u>Inventário</u>	<u>Impacto</u>	<u>Interpretação</u>
<u>Incertezas de parâmetro</u>	<b>Imprecisão de dados</b>	-	Imprecisão na medida da emissão	Incerteza nos tempos de vida de substâncias e relativas contribuições para os impactos	-
	<b>Falta de dados</b>	-	Alguns parâmetros não avaliados	Alguns impactos não avaliados	-
	<b>Lacuna de dados</b>	-	Variação no período de amostragem dos dados do inventário	-	-
	<b>Dados não representativos</b>	-	Utilização de banco de dados para suprir a falta de dados do inventário; pouca quantidade de dados amostrada	-	-
<u>Variabilidades</u>	<b>Variabilidade Espacial</b>	-	Diferenças regionais nos inventários de emissão	Diferenças regionais na sensibilidade ambiental	-
	<b>Variabilidade Temporal</b>	-	Diferenças nos inventários anuais de emissão	Mudanças nas características ambientais ao longo do tempo	-
	<b>Variabilidade Tecnológica</b>	-	Diferenças no desempenho entre processos equivalentes	Diferenças nas características ambientais e humanas	-
<u>Outros</u>	<b>Incerteza de modelo</b>	-	Modelagem estática ao invés de dinâmica; modelagem linear ao invés de não-linear	Utilização de modelos de impacto inadequados	-
	<b>Incerteza devido às escolhas</b>	Escolha da unidade funcional, fronteiras do sistema, metas de qualidade, etc.	Escolhas de métodos de alocação, modelos de agregação, etc.	Deixando de fora categorias de impacto conhecidas; escolha do método de caracterização	-
	<b>Incerteza subjetiva</b>	Ignorância sobre aspectos relevantes do sistema estudado	Desconhecimento sobre processos modelados	Categorias de impacto, contribuição e fatores de caracterização não são conhecidos	-
	<b>Enganos</b>	Quaisquer	Quaisquer	Quaisquer	Quaisquer

Quadro 5 - Relação entre as fases de uma ACV e os possíveis tipos de incertezas.

Fonte: adaptado de BENEDET JÚNIOR, 2007.

Uma medida importante para romper essas barreiras é a maior disseminação de bancos de dados de indústrias e maiores informações sobre casos de sucesso de abordagens em ciclo de vida. Também é importante padronizar, para cada tipo de ACV, uma unidade funcional e fronteira do sistema padrão a fim de permitir uma possível comparação entre trabalhos.

Cabe salientar que, embora existam barreiras, elas não superam os benefícios potenciais do uso do ACV, visto que essa metodologia está em crescimento de utilização em todo o mundo.

### **3.3 Relação qualitativa entre ACV, a Lei da Conservação da Massa e a 1º e 2º Lei da Termodinâmica**

A Lei da Conservação da Massa foi publicada pela primeira vez 1760, em um ensaio do químico russo Mikhail Lomonosov. No entanto, sua obra não teve repercussão na Europa Ocidental, cabendo ao francês Antoine Laurent Lavoisier o papel de tornar mundialmente conhecido o que hoje se chama Lei de Lavoisier.

Por volta de 1774, o químico francês realizava experiências sobre a combustão e a calcinação de substâncias. Através dos resultados dos experimentos realizados em sistemas fechados, onde as massas de reagentes e produtos gasosos poderiam ser medidas com precisão, concluiu que as variações de massa observadas quando as reações eram realizadas em sistemas abertos, correspondia à massa da substância inicialmente empregada, mais a massa do gás a ela incorporada ou perdida através da reação (UNESP, s/ ano).

Os estudos de Lavoisier o levaram a concluir que, em uma reação química que se processe em um sistema fechado, a massa permanece constante, ou seja, a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos, segundo a equação (1):

$$\Sigma(m_{\text{reagentes}}) = \Sigma(m_{\text{produtos}}) \quad (1)$$

Através de seus trabalhos, pôde enunciar uma lei que ficou conhecida como Lei da Conservação das Massas ou Lei de Lavoisier (LAVOISIER, 1789):

*“Numa reação química que ocorre em sistema fechado, a massa total antes da reação é igual à massa total após a reação”.*

Ou ainda, em uma reação química a massa se conserva porque não ocorrem criação nem destruição de átomos. Os átomos são conservados e apenas se rearranjam, ou seja, os agregados atômicos dos reagentes são desfeitos e novos agregados atômicos são formados.

Filosoficamente pode-se dizer que:

*“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”.*

Atualmente sabemos que a Lei de Lavoisier como inicialmente foi proposta só não se aplica em seu enunciado original às reações nucleares, onde a energia envolvida é proveniente da transformação significativa de matéria em energia.

O fato de não ser possível consumir a matéria até sua aniquilação implica a geração de resíduos em todas as atividades dos seres vivos e nos processos em geral. A Lei da Conservação da Massa mostra que nunca estaremos livres de algum tipo de poluição (resíduos) (BRAGA *et al.*, 2002).

Portanto, na ACV, o balanço de massa (também chamado um balanço material) é uma aplicação do princípio da conservação da massa para a análise de sistemas físicos. Pela contabilidade (medição) de material entrando e deixando um sistema, fluxos de massa podem ser identificados, os quais podem ser desconhecidos, ou difíceis de serem conhecidos sem esta técnica. Ainda, balanços de massa são amplamente utilizados em engenharia e análises ambientais, nesse caso, na Avaliação do Ciclo de Vida da produção de etanol hidratado.

Como mencionado anteriormente, para a realização da ACV de um produto qualquer, é necessário a coleta de dados, ou seja, o fluxo de entradas e saídas. A partir desse preceito, pode-se realizar um balanço de massa do sistema com intuito de identificar os fluxos de maior contribuição mássica e por meio da Lei da Conservação da Massa corroborar para comprovar que a massa de entrada é igual a massa de saída.

A ACV também está relacionada às Leis da Termodinâmica. De forma simples, a 1ª Lei da Termodinâmica, também conhecida como Princípio da Conservação da Energia, explica a conservação da energia, ou seja, a energia não pode ser criada e tampouco destruída.

Já, a 2ª Lei da Termodinâmica limita a disponibilidade da energia e os modos de conversão e uso da mesma, ou seja, a quantidade de trabalho que pode ser obtido nos processos de transformação da energia.

As duas leis estão diretamente ligadas, já que quase tudo que acontece envolve, de certa forma, perceptivelmente ou não, transformações de algum tipo de energia em energias de outros tipos ou, em determinados casos, puramente transferência de energia.

Conforme Sato (2004), a 1ª Lei da Termodinâmica estabelece o conceito de energia, que é definido com base no conhecimento empírico como uma quantidade física de estado de

sistemas termodinâmicos. Na realidade, a energia se apresenta de várias formas, tais como térmica, mecânica, química, elétrica, magnética, etc. Estas várias formas de energia podem ser convertidas umas nas outras com alguma restrição em energia térmica. A Primeira Lei também expressa o princípio empírico que a quantidade total de energia é conservada em um sistema.

No caso mais geral, em que ocorre transferência de calor e realização de trabalho, a variação da energia interna do sistema depende destas duas componentes e é dada pela equação (2):

$$\Delta U = Q - W \quad (2)$$

A equação (2) representa a forma analítica da Primeira Lei da Termodinâmica, onde atribui-se que a variação da energia interna ( $\Delta U$ ) provém do trabalho realizado sobre o sistema ou pelo sistema e ao calor transferido ao sistema ou retirado do sistema. A primeira lei pode ser enunciada da seguinte forma:

*“A energia interna de um sistema termodinâmico se conserva se for considerada a transferência de calor”.*

Analisando tal definição em relação ao estudo da ACV, pode-se deduzir que toda energia que entra na fronteira do sistema analisado será convertida em outra forma de energia e em trabalho (para geração dos produtos e/ou co-produtos) sendo, portanto, conservada. Nesse sentido a energia contida na cana-de-açúcar, ao passar pelas transformações do processo produtivo, se conservaria resultando na energia contida no etanol hidratado e no bagaço (se considerado como um co-produto).

No que compete a 2ª Lei da Termodinâmica, esta evidencia uma propriedade chamada de entropia (S) como uma ampla variável relativa à capacidade de distribuição de energia sobre as partículas constituintes de um sistema físico, segundo Sato (2004). Essa lei procura explicar a lacuna deixada pela 1ª Lei (Conservação da Energia), já que a energia perdida, geralmente na forma de calor, não se conserva. A parcela da energia convertida em trabalho é chamada de energia útil (quanto mais trabalho se conseguir realizar com uma mesma quantidade de energia mais nobre será este tipo de energia), enquanto que a energia perdida é chamada de entropia (medida de desordem do sistema) e que não é aproveitada, o que pode ser chamado de degradação da energia (a energia degradada implicará em danos ao meio ambiente na forma de resíduos, emissões, efluentes, etc).

Nesse sentido, a energia total presente na cana-de-açúcar não se conserva (como é previsto pela 2ª Lei da Termodinâmica), pois parte desta se perde através dos processos de transformação da cana-de-açúcar em etanol hidratado na forma de calor e resíduos (sólidos, líquidos e gasosos).

Um dos enunciados da 2ª Lei diz que:

*“Em qualquer transformação de energia, uma parte é degradada”.*

Segundo Braga *et al.* (2002), de acordo com a 2ª Lei da Termodinâmica, todo processo de transformação de energia dá-se a partir de uma maneira mais nobre para uma menos nobre ou de menor qualidade, ou seja, é impossível obter energia de melhor qualidade do que aquela disponível inicialmente em processos espontâneos.

Todo sistema que possui uma forma ordenada necessita de energia de alta qualidade para manter sua entropia baixa. Como a tendência é o aumento da dispersão de energia na forma de calor, destruindo a ordem inicial e levando a um estado final mais estável, para manter qualquer sistema organizado é necessário o fornecimento contínuo de energia, sendo parte desta degradada. No entanto, a tendência natural de qualquer sistema, como um todo, é o aumento de sua entropia (grau de desordem).

A entropia de um sistema isolado não se altera se ele realiza um processo reversível e aumenta se ele realiza um processo irreversível.

Logo, a 2ª Lei leva a entender por que a maioria dos processos da natureza é irreversível e, de modo mais conciso, implica que a entropia do universo aumenta sempre. Ou seja, a variação de entropia ( $\Delta S$ ) pode ser reversível ou irreversível, sendo:

Processo reversível:  $\Delta S = 0$

Processo irreversível:  $\Delta S > 0$

Portanto, pode-se avaliar que a parcela da energia perdida implica em danos ao meio ambiente, que na ACV podemos elencar como resíduos, efluentes e emissões. Em uma análise simplificada em relação à ACV, pode-se afirmar que a 1ª Lei, estipulando a conservação da energia, fundamenta os cálculos e permite a verificação da consistência dos dados recolhidos, enquanto que a 2ª Lei, quantificando a degradação da energia e conseqüente inexistência de processos verdadeiramente reversíveis, justifica a necessidade da técnica (FERRÃO, 1998).

### 3.4 Softwares e bases de dados para a realização de uma ACV

Devido à exigência de grande quantidade de informações para a realização da ACV de um determinado processo, relativo ao fabrico e utilização do produto em análise, e sobre outros processos como seu uso e destino final, a necessidade de busca da base de dados torna-se oportuna, apoiando a identificação e coleta de dados de qualidade cuja manipulação abrange um grande número de operações e cálculos.

Os *softwares* para uma completa ACV contêm extensas bases de dados com elevada quantidade de matérias-primas, fontes de energia e modos de transporte, que podem ser usados na análise do processo em questão.

Segundo Sallaberry (2009), diversos *softwares* já foram desenvolvidos para ACV, motivados por: grande volume de dados, necessidade de incorporação de dados de outros ciclos de vida, facilidade de utilização e modificação de dados, capacidade de analisar os dados segundo diversas metodologias e disponibilidade dos resultados a outros usuários, permitindo, ainda, sua utilização.

O Quadro 6 mostra alguns tipos de programas usados em ACV.

<i>Software</i>	<b>Desenvolvedor</b>	<b>País</b>
Boustead 5.0	Boustead Colsulting	Reino Unido
GREET*	Argonne National Laboratory	EUA
GaBi4	Universidade de Stuttgart e PE	Alemanha
KLC ECO	FPPR-Institute	Finlândia
LCAit	Chalmers Industrieteknik	Suécia
SimaPro	Pré-Consultants	Holanda
TEAM	Ecobilan	França
Umberto	Ifeu-Institut	Alemanha
WISARD	PricewaterhouseCoopers	França

\* Específico para estudos no setor de transporte.

Quadro 6 - Alguns *softwares* disponíveis no mercado para uso em ACV.

Fonte: adaptado de SALLABERRY, 2009.

Nesse estudo, para obtenção dos resultados de caráter ambiental referente às etapas de produção de etanol hidratado em pequena escala e em relação à comparação entre os modelos de colunas de destilação, foi utilizado o *software* SimaPro<sup>®</sup>. Portanto, se torna conveniente à apresentação de algumas características deste *software*, sendo descritas a seguir.

### 3.4.1 SimaPro

De acordo com Pré-Consultants (2013), o SimaPro<sup>®</sup> permite modelar produtos e sistemas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. Usuários podem construir modelos complexos de uma forma sistemática e transparente, utilizando recursos exclusivos do SimaPro<sup>®</sup> que vem totalmente integrado com a base de dados Ecoinvent.

O programa pode ser utilizado para uma variedade de aplicações, como cálculo da pegada de carbono, design do produto e eco-design, Declarações Ambientais de Produtos (EPD), impacto ambiental de produtos ou serviços, relatórios ambientais e determinação de indicadores de desempenho.

A base de dados Ecoinvent tem as seguintes características principais:

- Inclui uma grande gama de dados;
- Está disponível para processos unitários e sistemas de processos;
- É uma aplicação consistente com as fronteiras dos sistemas e atribuição de contribuições;
- Está bem documentada;
- Tem especificações sobre as informações com incerteza, com a distribuição normal e desvio padrão;
- As emissões são diferenciadas em subcompartimentos, por exemplo, as emissões para o ar podem ser feitas em áreas com elevada densidade populacional ou para a estratosfera (apesar de os métodos de avaliação de impactos não considerarem ainda estas diferenças);
- Considera os bens de produção *standards* (pode desligar-se no *software* esta opção), o que é muito importante nas centrais hidroelétricas e nos sistemas de transporte;
- Sofre atualizações frequentes.

O uso do *software* pode ser feito através do estudo dos manuais da Pré-Consultants (SimaPro 7 - Introduction into LCA e SimaPro 7 - Tutorial) e da própria interação com o *software*.

Quando se inicia o programa, surge a possibilidade de abrir um Projeto ou uma Livraria, sendo o primeiro uma área onde se armazena informação coletada e processada e o segundo um tipo especial de projeto que contém as informações fornecidas pelo SimaPro®.

Um processo contém informações sobre fluxos ambientais e sociais (emissões para o ar, água e solo, além de resíduos sólidos, emissões não materiais e uso de matérias-primas e impactos sociais), fluxos econômicos (entradas e saídas de outros processos, saídas de resíduos para tratamento posterior, processos evitados e impactos econômicos).

Os processos identificam-se na base de dados de acordo com sua saída, e podem ser ligados uns aos outros, criando redes. Podem descrever-se os processos através de processos unitários ou sistemas de processos, apesar de os resultados não serem significativamente diferentes (FERREIRA, 2007). A versão de processos unitários contém apenas as emissões e *inputs* de um passo do processo, além das referências aos *inputs* vindos de outro processo unitário. Assim, o impacto ambiental é descrito através de uma série de processos unitários.

A outra possibilidade é a caracterização do sistema de processo, ao invés de considerar isoladamente cada processo unitário que o compõe. Ainda assim, todas as emissões são contempladas, resultando em uma ACV referente ao processo global.

A comparação entre processo unitário e sistema de processo é descrita no Quadro 7.

<b>Processos Unitários</b>	<b>Sistemas de Processos</b>
Árvores de processos muito transparentes, mas muito grandes, que permitem avaliar as contribuições dos processos unitários.	Árvore de processo muito mais simples.
Contém informação com incertezas.	Não tem informações incertas.
Cálculo relativamente lento.	Cálculo muito rápido.

Quadro 7 - Comparação entre processos unitários e sistemas de processo no SimaPro 7.

Fonte: adaptado de SimaPro 7 - Introduction into LCA, 2010.



Os resultados se dão através da chamada árvore de processos e também na forma de tabelas e gráficos. O SimaPro<sup>®</sup> possibilita, também, através do uso do critério *cut-off*, que se faça uma análise interessante na árvore de processos ou no diagrama de rede, pois alguns diagramas assumem proporções que tornam a sua análise impraticável ou muito dificultada, tendo em vista que alguns processos têm contribuições pouco significativas para o impacto global do ciclo de vida do produto.

O SimaPro<sup>®</sup> possui diversos métodos para avaliação de impacto, sendo cada método composto de várias categorias de impacto. Delimitar-se-á, para esta análise, apenas o método Eco-Indicador 99, pois foi o método escolhido para avaliação da potencialidade de impacto e dano ambiental do processo de produção de etanol hidratado em pequenas escala.

#### 3.4.1.1 Eco-Indicador 99

De acordo com o disposto na norma ISO 14042:2000, os métodos de avaliação de impactos têm elementos obrigatórios, como a possibilidade de classificação e caracterização dos impactos e elementos opcionais, como a normalização e a ponderação.

Um dos passos mais importantes na avaliação de impactos é a seleção das categorias de impacto a considerar, que deve ser apoiada pelo que foi definido no âmbito do estudo. Para isso, pode-se começar por definir os *endpoints*, ou seja, os aspectos ambientais de preocupação, como a saúde humana, a extinção de espécies e a disponibilidade de recursos, por exemplo.

A norma não estabelece quais deverão ser os *endpoints* considerados, mas prevê uma seleção e uma definição cuidadosa e rigorosa dos mesmos. De seguida, pode então se escolher as categorias de impacto, desde que o modelo ambiental que liga a categoria de impacto ao *endpoint* esteja bem descrito.

Segundo SimpaPro 7 - Database Manual - Methods library (2010), o Eco-Indicador 99 é o sucessor do Eco-Indicador 95 e utiliza uma abordagem orientada para o dano.

O desenvolvimento da metodologia Eco-Indicador 99 começou com o projeto da ponderação-procedimento. Tradicionalmente, na ACV, as emissões e extrações de recursos são expressos como 10 ou mais diferentes categorias de impacto, como a acidificação, esgotamento da camada de ozônio, ecotoxicidade e de recursos de extração, etc.

O método Eco-Indicador 99 possui os seguintes *endpoints*: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos. Os danos à saúde humana são expressos em DALY (danos à saúde contabilizada como o número de anos de vida perdidos), danos à qualidade do ecossistema (expresso como a perda de espécies ao longo de uma determinada área, durante um certo tempo) e recursos (expresso como a energia excedente necessária para futuras extrações de minerais e combustíveis fósseis).

O método utilizado, o Eco-Indicador 99, pondera as categorias ambientais e obtém um indicador, o Eco-Indicador. As categorias ambientais do Eco-Indicador 99 estão sintetizadas no Quadro 8.

<b>Categoria ambiental</b>	<b>Descrição</b>
Carcinogenia	O aparecimento e desenvolvimento de doenças cancerosas é favorecido por diversas intervenções ambientais, como a radioatividade, o amianto, o fumo de tabaco, a radiação ultravioleta, certos compostos químicos, etc.. Esta categoria indica a probabilidade que um indivíduo, exposto a 1 µg/m <sup>3</sup> de uma determinada substância (por exemplo, arsênio) tem de desenvolver cancro.
Camada de ozono	Avalia a diminuição do ozono na estratosfera, o que provoca uma menor absorção da radiação ultravioleta, aumentando a sua incidência na superfície e provocando o aumento de doenças humanas (melanomas, por exemplo) e desequilíbrios no ecossistema.
Combustíveis fósseis	O excedente de energia é baseado no uso futuro de betumes e areias asfálticas. A categoria tem em consideração a descoberta de petróleo e a sua extração. O conhecimento de geologia está suficientemente avançado para se saber que não serão descobertos grandes novos poços (Campbell, 1998).
Respiração Orgânicos	Categoria de Saúde Humana relacionada com a respiração de compostos orgânicos.
Eco-toxicidade	A Eco-toxicidade é expressa como sendo a percentagem de espécies presentes no ambiente que habitam em stress ecológico, Potentially Affected Fraction (PAF). O método foi desenvolvido pela RIVM for the Dutch Environment Outlook (MEENT AND KLEPPER, 1997)
Respiração Inorgânicos	Categoria de Saúde Humana relacionada com a respiração de compostos inorgânicos.
Acidificação / Eutrofização	Avalia os efeitos da acidificação das chuvas devido à presença na atmosfera de compostos que baixam o pH da chuva. A Acidificação provoca o aumento da acidez no meio, com efeitos na flora e fauna. A Eutrofização, por sua vez, resulta de uma excessiva concentração de nutrientes, e origina o aparecimento de algas em grande quantidade. A sua morte e decomposição consome grande parte do oxigénio na água, tornando-a um meio abiótico para a maior parte dos seres vivos.
Alterações Climáticas	Avalia o aumento da temperatura global do planeta devido à emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera.
Uso de solo	O Uso de solo e a sua transformação são baseados em informação empírica de ocorrência de plantas vasculares como função dos tipos de uso de solo e áreas.
Radiação	Mede as diferentes formas de radiação.
Minerais	São utilizados modelos geoestatísticos que relacionam a disponibilidade de um minério com a sua concentração. A qualidade dos recursos minerais diminui com a extração.

Quadro 8 - Caracterização das categorias de impacto do método Eco-Indicador 99.

Fonte: Eco-Indicator 99 - Manual for designers: A damage oriented method for Life Cycle Assessment, 2000; FERREIRA, 2007.

Também é importante prestar atenção às incertezas presentes na metodologia que será usada para o cálculo dos indicadores. Distinguem-se dois tipos, segundo o manual Eco-Indicador 99 - Manual for Designers (2000), da PRÉ CONSULTANTS:

1. Incertezas sobre a exatidão dos modelos utilizados
2. Incertezas dos dados

Incetezas dos dados são especificadas para a maioria dos fatores de danos como o quadrado do desvio padrão geométrico nos relatórios iniciais, mas não no método no SimaPro<sup>®</sup>.

As incertezas sobre o modelo estão relacionadas às escolhas subjetivas no modelo. A fim de lidar com eles, foram desenvolvidas três diferentes versões da metodologia, utilizando os tipos especificados. As três versões do Eco-Indicador 99 são:

- Perspectiva Igualitária
- Perspectiva Hierárquica
- Perspectiva Individualista

Na perspectiva hierárquica a perspectiva de tempo escolhido é de longo prazo e os danos são considerados evitáveis por uma boa gestão. No caso dos combustíveis fósseis é feita a suposição de que combustíveis fósseis não podem ser facilmente substituídos. Petróleo e gás podem ser substituídos por xisto, enquanto o carvão é substituído pelo carvão marrom.

Na perspectiva igualitária a perspectiva de tempo escolhido é extremamente longa e os danos não podem ser evitados e podem levar a acontecimentos catastróficos. No caso dos combustíveis fósseis é feita a suposição que os combustíveis fósseis não podem ser substituídos. Óleo, carvão e gás são substituídos por um futuro mix de carvão marrom e xisto.

Na perspectiva individualista a perspectiva de tempo escolhido é de curto prazo (100 anos ou menos) e os danos são considerados recuperáveis pela tecnologia e desenvolvimento econômico. No caso dos combustíveis fósseis é feita a suposição de que os combustíveis fósseis não podem realmente ser esgotados.

A perspectiva a ser adota será a igualitária por estar mais próxima do objetivo e escopo do presente estudo.

### **3.5 ACV na produção de biocombustíveis**

Em um estudo referente ao ciclo de vida de um biocombustível, a delimitação da fronteira do sistema é de fundamental importância, sendo realizada a partir de duas perspectivas: as fronteiras físicas do sistema produtivo e os níveis de regressão dos fluxos considerados.

Quanto aos biocombustíveis produzidos a partir de produtos agrícolas, para fazer um balanço ambiental é preciso ter em conta o impacto dos adubos e dos pesticidas utilizados, do consumo de água e do impacto na biodiversidade no momento da delimitação das fronteiras do sistema. A análise ambiental deve levar em consideração a energia necessária à sua produção (a energia contida e necessária para a produção de adubos, para a locomoção dos tratores agrícolas, para a irrigação, para o armazenamento, transporte dos produtos entre outros).

As fronteiras físicas fazem referência às etapas do ciclo de vida do produto, com seus processos característicos, sendo várias as denominações atribuídas às variações das fronteiras consideradas.

De acordo com Capaz (2009), a análise “do berço ao túmulo” (*Cradle to Grave*) abrange todo o ciclo de vida do produto, ou seja, desde a etapa de obtenção das matérias-primas usadas no processamento, até a disposição dos resíduos gerados pelo uso final do produto (biocombustível).

A análise “do berço ao portão” (*Cradle to Gate*) considera a etapa de obtenção da matéria-prima até o processamento do produto desejado, neste caso, a análise de biocombustíveis ficaria restrita apenas à etapa agrícola e à etapa industrial. Já, a “análise portão-portão” (*Gate to Gate*), é usada quando se pretende estudar processos mais específicos, considerando apenas uma etapa ou processo do ciclo de vida.

A Figura 12 apresenta os limites das fronteiras consideradas em uma ACV e suas denominações.

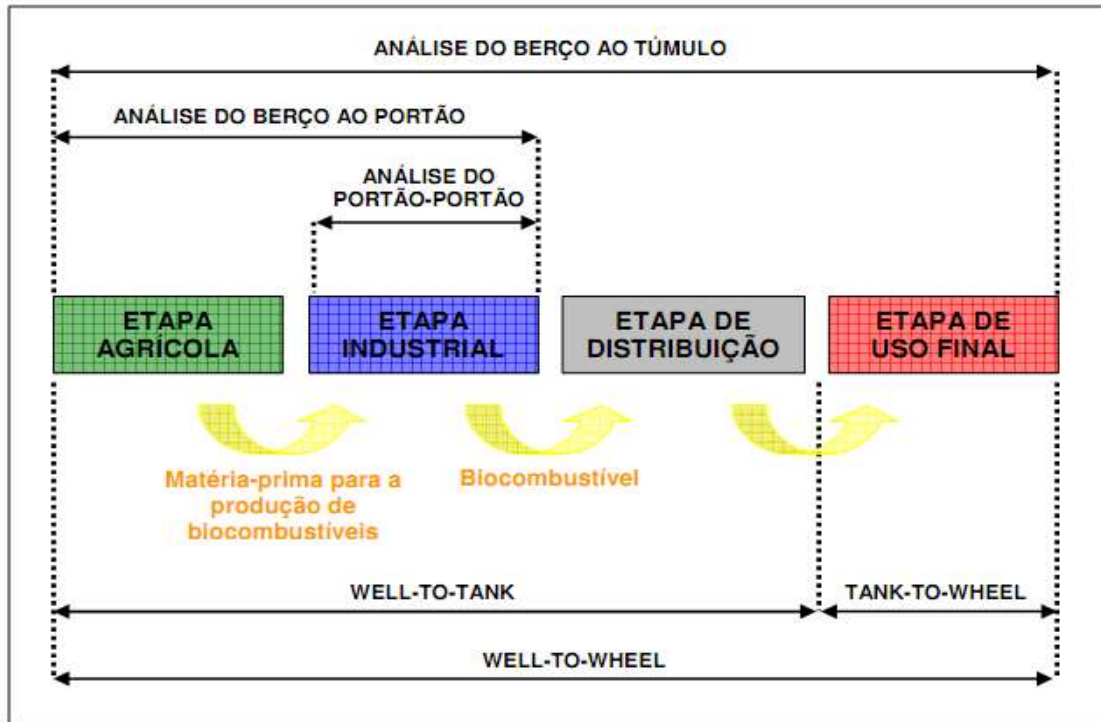


Figura 12 - Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis.

Fonte: CAPAZ, 2009.

Conforme Cepa (2009), particularmente no estudo do ciclo de vida de combustíveis também podem ser usadas outras denominações, como a análise WTT (*Well-To-Tank*) que abrange o ciclo de vida do combustível entre a produção da matéria-prima e a disponibilização do produto final para o consumidor. Alguns autores usam esta análise até a obtenção do produto final, sem considerar a etapa de distribuição, ou seja, WTG (*Well-To-Gate*).

A análise TTW (*Tank-To-Wheel*) estuda apenas uso do combustível no automóvel.

As análises WTT e TTW, juntas, configuram a então análise WTW (*Well-To-Wheel*) que abrange todas as etapas do ciclo de vida de um combustível, desde sua produção até seu uso final, isto é, “do berço ao túmulo”.

A maioria das análises da produção de biocombustíveis é do tipo “berço ao portão” ou do tipo WTT, contabilizando apenas a energia consumida no cultivo da biomassa, no seu processamento e, talvez, na distribuição do combustível (CAPAZ, 2009). Tal informação é também relatada por Pieragostini *et al.* (2012) que além de identificar a fronteira do sistema “berço ao portão” (*Cradle to Gate*) como mais usada em estudos aplicando a ACV em

processos, cita que o *software* mais usado é o SimaPro<sup>®</sup> e o método de avaliação de impacto mais escolhido para geração de resultados é o Eco-Indicador 99.

Em relação à outra perspectiva (níveis de regressão dos fluxos), Capaz (2009) diz que referem-se à extensão dos fluxos energéticos contabilizados dentro das fronteiras físicas do sistema. Nos primeiros estudos de fluxos energéticos contabilizavam-se apenas os insumos diretos requeridos, isto é, eletricidade e calor. No entanto, a crescente preocupação com os impactos causados pelo uso da energia, a tentativa de localizar e minimizar as perdas ao longo do processo e a busca insistente de alternativas aos combustíveis fósseis, estendeu-se a análise energética para a contabilização de requerimentos energéticos indiretos, isto é, na energia embutida nos insumos químicos e equipamentos.

Os níveis de regressão podem ser classificados em:

Nível 1: são considerados apenas os insumos de energia direta, aplicados ao processo, geralmente em termos de eletricidade e vapor.

Nível 2: em adição ao nível 1, é considerado o aporte energético referente aos insumos indiretos. No sistema de produção de biocombustíveis, contabiliza-se neste nível, a energia embutida nos fertilizantes e defensivos, consumo de diesel e combustíveis usados nas caldeiras que produzem o vapor usado no processo, por exemplo.

Nível 3: inclui-se a energia usada na produção de equipamentos de processo.

Nível 4: inclui-se a energia usada na obtenção de matérias-primas para produção de equipamentos, insumos, etc.

A Figura 13 sumariza os níveis de regressão em um sistema de produção de biocombustíveis.

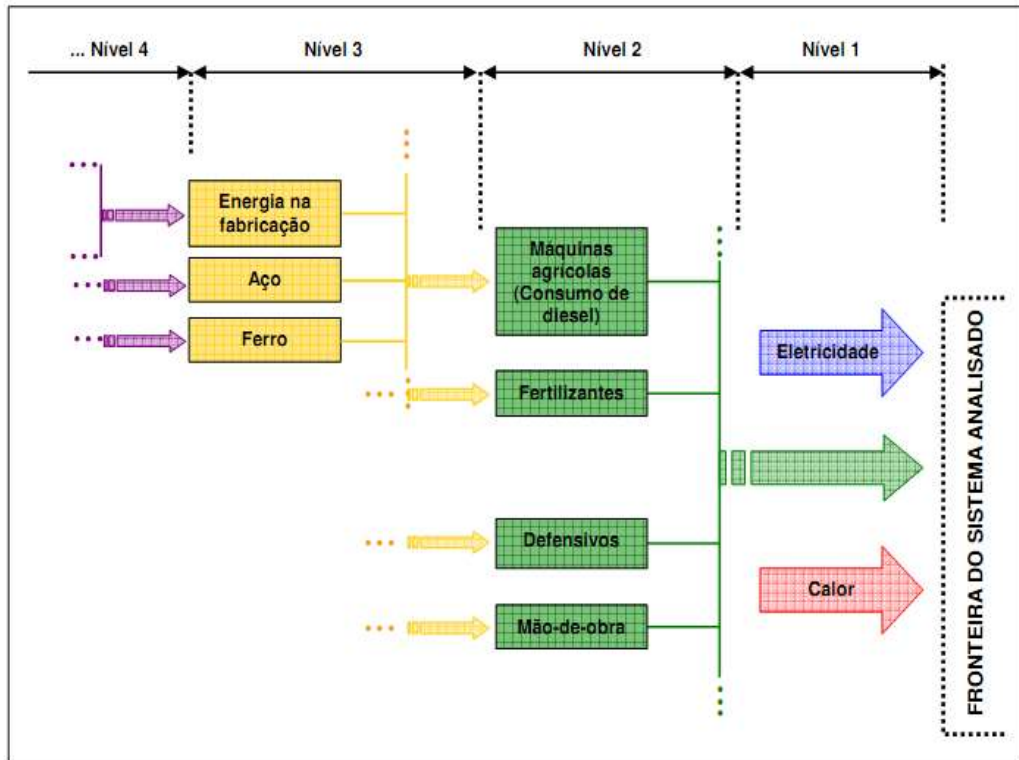


Figura 13 - Níveis de regressão em um sistema de produção de biocombustíveis.

Fonte: CAPAZ, 2009.

Segundo Wilting (1996), a consideração apenas dos requerimentos diretos no processo pode resultar em valores distantes da realidade, pois não aloca requerimentos energéticos importantes como transporte e os insumos gastos na produção da matéria-prima utilizada. Geralmente em uma análise energética não se passa do terceiro nível de regressão, uma vez que a contribuição dos níveis mais elevados vai se tornando insignificante.

O Quadro 9 mostra a contribuição de cada nível de regressão em termos de contribuição energética do processo global.

<b>Nível</b>	<b>Contribuição energética nas análises</b>	<b>Definição</b>
Nível 1	Tipicamente menor que 50%	Somente a energia direta envolvida no processo.
Nível 2	Geralmente em torno de 40%	Energia envolvida na obtenção dos insumos energéticos diretos.
Nível 3	Raramente excede 10%	Energia requerida para produzir os equipamentos.
Nível 4	Geralmente muito baixa	Energia requerida para produzir as máquinas que produzem os equipamentos.

Quadro 9 - Contribuição energética dos níveis de regressão.

Fonte: CAPAZ, 2009; BAIRD, 1997.

Estudos tem feito uso da ACV na análise de processos que utilizam biomassa para geração de produtos, como por exemplo, Emmenegger *et al.* (2012) que citam resultados de ACVs na produção de biogás, tratamento de biomassa e biocombustíveis, realizados na Suíça. O foco gira em torno da comparação do impacto ambiental do uso da biomassa em relação a fontes não-renováveis, resultando em conclusões positivas e negativas para o uso da biomassa.

Ramjeawon (2004) fez uso da metodologia da ACV para análise ambiental da produção de açúcar nas ilhas Murícius, abrangendo a etapa agrícola e industrial de produção. Os resultados apontaram a etapa agrícola como sendo responsável por 2/3 do impacto ambiental, indicando a eutrofização como categoria de impacto de maior potencial.

Contreras *et al.* (2009) utilizaram o SimaPro<sup>®</sup>, escolhendo o método de avaliação de impacto Eco-Indicador 99, para avaliar a fabricação de produtos a partir da cana-de-açúcar em uma usina de Cuba. Foram então analisadas 4 alternativas de processos de produção de açúcar, sendo que em uma delas incluiu a produção de etanol em conjunto com a produção de açúcar, a qual foi responsável pelos melhores resultados ambientais.

No Brasil, os estudos de Luo *et al.* (2009) e Cavallet *et al.* (2012) avaliaram econômica e ambientalmente a produção de etanol, em termos da etapa agrícola e industrial, em usinas de grande porte. Este último, analisa plantas autônomas em comparação com plantas anexas, ambas com tecnologia de base e tecnologia otimizada, fazendo uso do SimaPro<sup>®</sup> para obtenção de resultados ambientais, gerando melhores resultados para plantas anexas otimizadas.



A etapa agrícola é responsável pela maior parte dos impactos ambientais da produção de etanol em grande escala, principalmente devido a aplicação de nutrientes, queima da cana-de-açúcar antes da colheita e o uso de diesel em maquinários, relata Ometto *et al.* (2009).

Cherubini e Strømman (2011) avaliaram 94 estudos sobre ACV de sistemas de bioenergia, em termos de artigos de revisão e trabalhos de pesquisa, elencando fatores que implicam em incertezas e maior importância nesse tipo de estudo. Os resultados indicaram um foco no estudo de biocombustíveis como o biodiesel e etanol a partir da lignocelulose, sendo que o estudo da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é mais desenvolvido em países com condições geográficas e climáticas favoráveis, prevendo em países como o Brasil, uma tendência no aumento de estudos dessa magnitude, em especial em biorrefinarias.

Outro resultado interessante de Cherubini e Strømman (2011) abrange a interpretação qualitativa dos resultados, que se dá, geralmente, por 3 tipos: balanço de energia (razão da energia de saída pela energia de entrada que pode ser descrita como a eficiência energética do processo); balanço da emissão de gases de efeito estufa; e outras formas de resultado (por categorias de impacto como eutrofização, acidificação, etc, sendo este tipo de análise muito pouco presente, entre 20-40 % dos estudos), adotando como unidade funcional do sistema a quantidade de produto de saída.

Portanto, tem-se notado uma grande aplicabilidade da metodologia de ACV em estudos com biocombustíveis, sendo notadamente utilizada em produção de grande escala e com limitado uso de *softwares*. Nesse sentido, a ACV da produção de etanol hidratado em pequena escala a partir de resultados oriundo do SimaPro<sup>®</sup> torna-se necessária, tendo em vista a escala de produção, a particularidade para o estado do RS e a escassez de estudos desse tipo.

Ainda, a análise da eficiência energética, aplicada em conjunto com a ACV, justifica-se pela grande empregabilidade, conforme citado anteriormente.

### **3.6 Produção de álcool em pequena escala**

A viabilidade da produção de etanol em microdestilarias, segundo Hoffmann (1985), fundamenta-se nos seguintes pontos: simplicidade de operação, possibilidades de obtenção de matéria-prima a custos menores, aproveitamento da infraestrutura existente em propriedades agrícolas, aproveitamento de resíduos e integração de fontes energéticas alternativas, desenvolvimento de regiões fora do círculo açúcar e álcool com produção de combustível

estratégico e reativação de pequenas propriedades agrícolas, absorção da mão-de-obra e terras ociosas e a fixação do homem no campo.

Além de gerar renda extra, subprodutos como o bagaço e pontas de cana-de-açúcar servem de alimento para o gado bovino. A *sacharina*, substância produzida pela fermentação anaeróbica do bagaço triturado, acrescida de uréia, gera 10% de proteína bruta, enquanto as pontas de cana-de-açúcar e o vinhoto podem ser usados como complemento de ração para o gado ou como fertilizante (RIBEIRO, 2001).

No presente estudo, foi adotado como processo avaliado a produção de etanol na microdestilaria da UFSM, sendo as operações unitárias básicas para a produção de álcool combustível bastante semelhantes às de uma destilaria comercial, excetuando-se o preparo da matéria-prima. A diferença está nos equipamentos utilizados, que são de dimensões menores e mais simplificados em comparação com os de uma unidade industrial de grande porte.

As operações unitárias e processos da unidade piloto podem ser agrupados da forma apresentada a seguir:

- Preparo e processamento da matéria-prima;
- Fermentação;
- Destilação;
- Utilidades;

As principais etapas do processo produtivo padronizado do etanol de cana-de-açúcar, na usina, adaptado de Dagnese *et al.* (2012), são:

- 1 - Recebimento da cana-de-açúcar: os colmos chegam a microdestilaria;
- 2 - Pesagem dos colmos: pesam-se manualmente, em feixes de colmos, utilizando-se uma balança de plataforma, levando-se aproximadamente 1h para pesar 2.000 kg;
- 3 - Moagem (prensagem) dos colmos: o operador insere os colmos na moenda de três rolos (acionada à energia elétrica) com a ajuda de outra pessoa. O caldo extraído no processo é direcionado ao decantador e o bagaço é agrupado para posterior distribuição no pomar ou na lavoura, servindo como cobertura de solo. Para moer 2.000 kg da matéria-prima leva-se em torno de 1h e 30 min.;
- 4 - Decantação do caldo: são cinco estágios para separar o caldo das impurezas como pedaços de colmos;
- 5 - Elaboração do pé-de-cuba (leveduras): é realizada manualmente e paralelamente a etapa anterior em recipiente separado da dorna quando da primeira rodada do processo. O tempo de preparação é de aproximadamente 1h em água a 35°C. Temperaturas muito altas

matam a levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e muito baixas retardam o processo. A levedura é adquirida no formato de *tablets* com nutrientes inclusos e após preparadas (mistura com água) é adicionada diretamente na dorna com o caldo extraído da cana-de-açúcar em quantidade conforme a qualidade do caldo;

6 - Transporte do caldo para a dorna de fermentação: acoplado ao decantador se encontra uma bomba elétrica que faz o transporte do caldo para a dorna de fermentação;

7 - Verificação do ° Brix: realizado através de um aparelho chamado refratômetro que mede o teor de açúcar. O valor ideal é de 14° Brix;

8 - Diluição do caldo: feita manualmente por meio da adição de água ao caldo da cana-de-açúcar quando o teor de açúcar é maior do que 14° Brix;

9 - Verificação do pH: realizado manualmente com o uso de tiras de medição. O pH ideal para o processo fermentativo é 5,5. Caso o pH seja diferente deste valor será necessário realizar a correção com ácido quando o  $\text{pH} > 5,5$  e com base quando o  $\text{pH} < 5,5$ ;

10 - Adição de leveduras: nesta etapa o pé-de-cuba (mistura das leveduras e água), elaborado em paralelo na etapa da decantação, é adicionado à dorna para o início da fermentação;

11 - Fermentação: neste momento ocorre a fermentação realizada pelos microorganismos, ocorrendo quebra da glicose em etanol e gás carbônico. Com os valores corrigidos das medições anteriores as leveduras encontrarão o ambiente ideal para a fermentação. Normalmente esta etapa dura de 18 à 24h, variando conforme a temperatura ambiente;

12 - Destilação do caldo da cana-de-açúcar: o caldo ou vinho, como também é chamado, resultante da fermentação é transferido para o destilador que, por meio da geração de vapor, permitirá a separação do álcool presente na mistura. Leva-se em torno de 3h para destilar 600 litros de caldo. O vinhoto, subproduto deste processo, é normalmente utilizado para a fertilização de pomares e lavouras;

15 - Armazenamento: o etanol é acondicionado em galões, tonéis e/ou tanques.

Destaca-se que no processo em pequena escala não é necessária a lavagem da cana-de-açúcar, culminando em menor uso de água e conseqüente redução de efluentes. Ainda, a colheita da cana-de-açúcar pode ser feita manualmente (pelo fato da área de plantio ser pequena) sem necessidade de contratação de mão-de-obra e sem necessidade da queima da cana-de-açúcar, reduzindo os níveis de emissões de dióxido de carbono e materiais particulados, além permitir que a palha (palhada) possa ser usada como adubo e/ou alimento para o gado.

Ribeiro (2001) diz que são gerados 240 kg de bagaço (contendo em média 50% de umidade) por tonelada de cana-de-açúcar processada. Cada quilo de bagaço, quando queimado na caldeira, gera 2 kg de vapor, o que significa que 1 tonelada de cana-de-açúcar produz 480 kg de vapor. A produção de álcool hidratado por tonelada de cana-de-açúcar fica entre 50 a 60 litros e cada litro produzido consome entre 5 e 6 kg de vapor, resultando em uma máximo de 360 kg de vapor por tonelada de cana-de-açúcar processada. Portanto, sobriariam 60 kg de bagaço que podem ser usados na alimentação animal.

Na microdestilaria da UFSM todo bagaço gerado é usado como fertilizante para o solo e para alimentação animal. Fatores como déficit de matéria-prima e produção abaixo da capacidade ótima culminam para a não utilização do bagaço na geração de energia (vapor).

O fluxograma do processo de produção de etanol hidratado com 96°GL (Gay-Lussac) produzido na microdestilaria da UFSM é demonstrado na Figura 14.

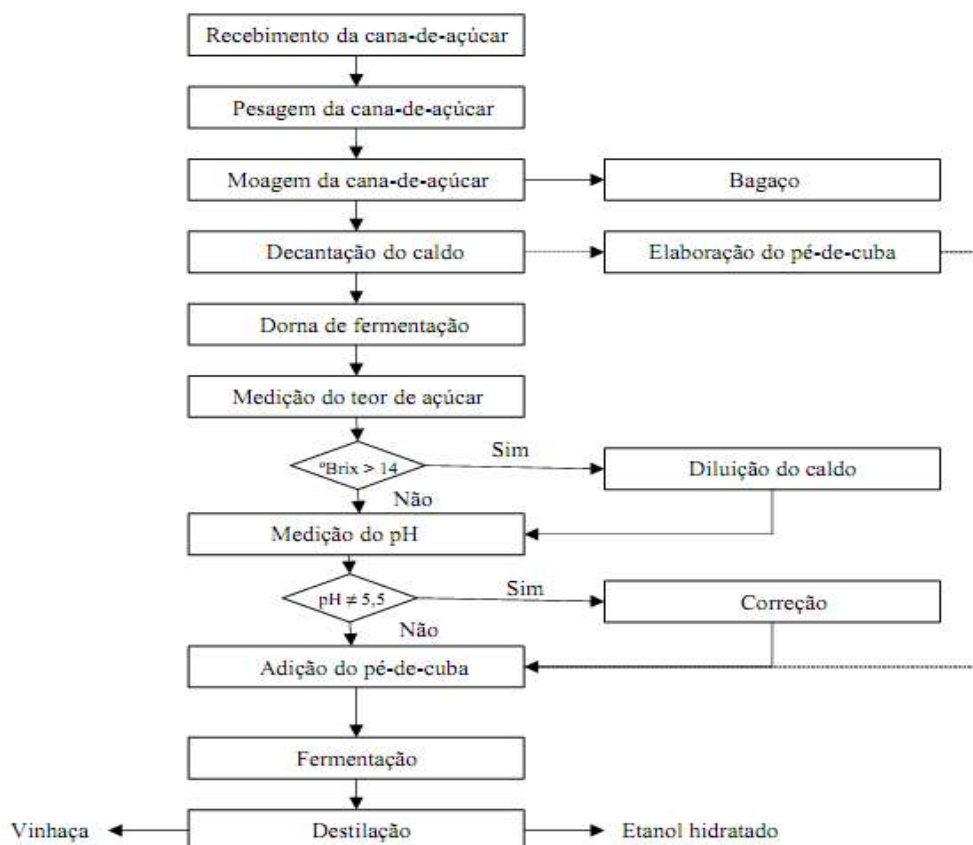


Figura 14 - Etapas da produção de etanol na usina do Colégio Politécnico da UFSM.

Os equipamentos necessários para a produção de etanol hidratado em pequena escala bem como a construção da infraestrutura para instalação de uma microdestilaria desse porte com as etapas referidas na Figura 14 permitem manter o pequeno produtor rural com seu sistema rural sem grandes modificações. A necessidade de área necessária não impede o agricultor de continuar seu sistema agropecuário.

Egeskog *et al.* (2011) avaliaram a produção de etanol em pequena escala em conjunto com a produção leiteira no Pontal do Paranapanema (localizado no estado de São Paulo) concluindo que a substituição da produção de leite pela produção de etanol pode causar estagnação econômica, no entanto, a adoção de um sistema integrado de produção de leite e etanol chegou a elevar em dez vezes a renda dos agricultores tendo em vista que a utilização do bagaço da cana-de-açúcar como fonte de eletricidade (por meio de sua queima) e sua alta qualidade alimentar (usado como alimento para o gado) viabiliza a adoção desse sistema integrado.

Estudo similar foi desenvolvido por Novo *et al.* (2012) nas regiões de Franca e São José do Rio Preto (ambas no estado de São Paulo), explorando como os agricultores interpretam os *trade-offs* (relação de perda e ganho ou conflito de escolha) entre a mudança para a cana-de-açúcar ou não, que na maioria dos casos significa alugar a terra para a indústria da cana de açúcar, investir ou simplesmente continuar com criação de gado leiteiro.

Tais escolhas são norteadas pelas preferências sobre a resiliência, redução do trabalho penoso e diversificação do trabalho. Aqueles agricultores que mudam e investem somente na cana-de-açúcar não são simplesmente estimulados por melhores preços, mas por resultado de percepções de limitações de trabalho, riscos e as oportunidades oferecidas pela diversificação.

Esses agricultores que abandonaram totalmente a produção de laticínios podem passar a não ter um retorno satisfatório.

### 3.6.1 Aspectos operacionais da produção de etanol em pequena escala

Antes de entrar, especificamente, no processo industrial, é importante mencionar que o rendimento na produção de etanol envolve também a qualidade da cana-de-açúcar utilizada e isso está diretamente ligado a seu processo agrícola. É também sabido que o rendimento nos processos em pequena escala podem ser ligeiramente inferiores aos de grande escala, no

entanto, não inviabiliza o processo. Segundo o Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE, 2005) o rendimento nas etapas de extração do caldo e destilação do caldo, em grandes usinas de produção de etanol hidratado e anidro, chega a 96,2 % e 99,6 %, respectivamente.

De acordo com estudos realizados na microdestilaria da UFSM, há um déficit econômico e energético na produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar, em pequena escala, devido ao diminuto rendimento e eficiência de algumas etapas da produção do etanol hidratado, principalmente na etapa de destilação que obteve valor abaixo do esperado.

Enquanto que a extração do caldo obteve rendimento inicial de 76,9 % (com redução para 60-65 %, a partir da utilização contínua), a etapa de fermentação obteve rendimento de 85 %, ambos dentro de valores aceitáveis para esta escala de processo. A baixa eficiência de extração do caldo implica em significativo teor de açúcar no bagaço gerado.

No entanto, a destilação resultou em rendimento de apenas 65 %, segundo UFSM (2010). Esse problema pode ser esperado em outras microdestilarias instaladas ou a serem instaladas no RS.

Visando minimizar tais percalços, está sendo realizado o estudo de utilização de uma coluna de destilação diferente da usual (coluna de destilação de pratos ou bandejas), ou seja, uma coluna tipo mista (coluna de pratos e recheio), além de outras alterações construtivas e operacionais, o que abriu espaço para aplicação da metodologia de ACV na comparação ambiental da produção desses dois tipos de colunas de destilação.

Além disso, a abordagem ambiental e energética proposta nesse estudo podem auxiliar na identificação dos principais impactos e potenciais danos que a produção de etanol em pequena escala impacta sobre o meio ambiente e avaliar o consumo de energia em relação à produção de energia, respectivamente. Assim, permite focar as ações em determinado fluxo material, energético, etapa e/ou operação, colaborando na análise como um todo e na tomada de decisão.

## 4 METODOLOGIA

A análise da produção de etanol em pequena escala foi desenvolvida sob duas avaliações. A primeira avaliando a produção de etanol hidratado a partir da etapa agrícola e industrial (análise do berço ao portão), abrangendo os níveis de regressão 1, 2 e 3 e a segunda avaliando a produção da coluna de destilação usual e de uma coluna mista (análise portão-portão), abrangendo os níveis de regressão 1, 2 e 3, quando possíveis de se obterem.

A primeira forma de avaliação se norteou a partir da produção em batelada, tendo em vista o caráter operacional desse tipo de processo e a intensa dependência de matéria-prima (nesse caso, exclusivamente a cana-de-açúcar), que impossibilitou a produção por operação contínua.

A segunda forma de abordagem avaliou a produção de colunas que operam em regime contínuo, tendo uma visão otimista para o RS no âmbito de transposição do regime batelada para o contínuo.

A coleta de dados referente à primeira abordagem foi realizada na própria UFSM, onde os dados agrícolas foram oriundos de trabalhos realizados na instituição (relatórios, dissertações e teses), entrevistas com pessoal com amplo conhecimento (teórico e prático) para aquisição de informações (professores, mestrandos, doutorandos e funcionários específicos) e análise em manuais de equipamentos disponibilizados no momento da coleta de dados ou disponíveis em pesquisa virtual. O nível de sensibilidade foi confiável tendo em vista que a instituição dispõe de área para plantio e cultivo da cana-de-açúcar e conta com amplo tempo de estudo dos processos envolvidos.

Foi construído um inventário do ciclo de vida da etapa agrícola a partir da coleta dos fluxos de entrada (insumos, diesel, maquinários, mão-de-obra, etc.) e de saída (cana-de-açúcar).

Os fluxos de entrada (vapor, eletricidade, insumos químicos, equipamentos, etc.) e de saída (etanol, bagaço e vinhoto ou vinhaça), da etapa industrial, foram mapeados e quantificados a partir do acompanhamento do processo em regime de batelada (período de 22/07/2013 a 01/10/2013), da informação do operador da microdestilaria e coleta em referências adequadas (manuais de equipamentos e estudos similares). A duração de cada batelada dependeu da quantidade de cana-de-açúcar disponível em cada dia de operação e da mão-de-obra disponível para o corte da cana-de-açúcar.

O fato da usina não operar no regime de capacidade de produção dimensionada (320-360 L<sub>etanol</sub>/dia) e da produção baseada na quantidade de cana-de-açúcar disponível (não sendo operada diariamente) culminou para a não contabilização da duração de cada batelada realizada.

Já, a coleta pertinente a segunda abordagem mesclou 3 visitas ao fabricante das colunas estudadas (Limana Polisserviços, localizada em Jaguari-RS), informações do próprio fabricante e buscas em referências pertinentes.

Depois de mapeados e quantificados os fluxos foram alocados no *software* SimaPro<sup>®</sup> para obtenção dos resultados em termos de potencialidade de impacto ambiental.

De forma a completar a avaliação do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala, foi calculada a eficiência energética de cada etapa do processo e do processo global, mediante coleta dos coeficientes energéticos (em literaturas específicas) para os fluxos abrangentes na fronteira de cada sistema e na fronteira global do sistema.

Após, foram multiplicados pelos respectivos fluxos mássicos de entrada e saída para conhecimento de valor energético total.

#### **4.1 Análise da produção de etanol hidratado em pequena escala**

A microdestilaria da UFSM tem capacidade para produzir, como capacidade máxima estimada, em torno de 320-360 L/dia de etanol hidratado e operando em regime batelada. Portanto, os dados foram calculados baseados nessa capacidade de produção, de acordo com a eficiência de extração do caldo da cana-de-açúcar e destilação do mosto, também assumindo operação diária de 320 L<sub>etanol</sub>/dia, de acordo com a Tabela 3.

Foi assumido a operação em 6 dias na semana (25 dias/mês), por 6 meses ao ano, tendo em vista o ciclo produtivo da cana-de-açúcar.

Cabe salientar que a microdestilaria tem a possibilidade de operar com outro tipo de matéria-prima no período que em que não se tenha disponível a cana-de-açúcar.

A produtividade de cana-de-açúcar foi estimada de acordo com Nogueira (2011), Hanauer (2011) e Aude et. al (1992) apud Hanauer (2011).

A Figura 15 mostra a fronteira do sistema adotada para a etapa agrícola, onde os valores mássicos e energéticos das entradas e saídas foram utilizados para o cálculo referente a área de 10,62 ha necessária para produção anual de 48.000 L/ano de etanol hidratado.



Tabela 3 - Dados de produção agrícola e industrial.

Produtividade (cana-de-açúcar)	80 TC/ha
Produção de etanol	48.000 L/ano (320 L/dia)
Rendimento da extração do caldo <sup>1</sup>	56,5 %
Rendimento da destilação <sup>2</sup>	10 %
Quantidade de cana-de-açúcar	849.557,52 kg/ano (5,66 TC/dia)
Área requerida <sup>3</sup>	10,62 ha/ano
Produtividade (etanol hidratado)	56,5 L/TC

<sup>1</sup> Baseado em UFSM (2010) - 4º Relatório Parcial.

<sup>2</sup> Média de duas bateladas acompanhadas.

<sup>3</sup> Estimada a partir da produtividade da cana-de-açúcar e do rendimento da extração e destilação.

Fonte: Autor.

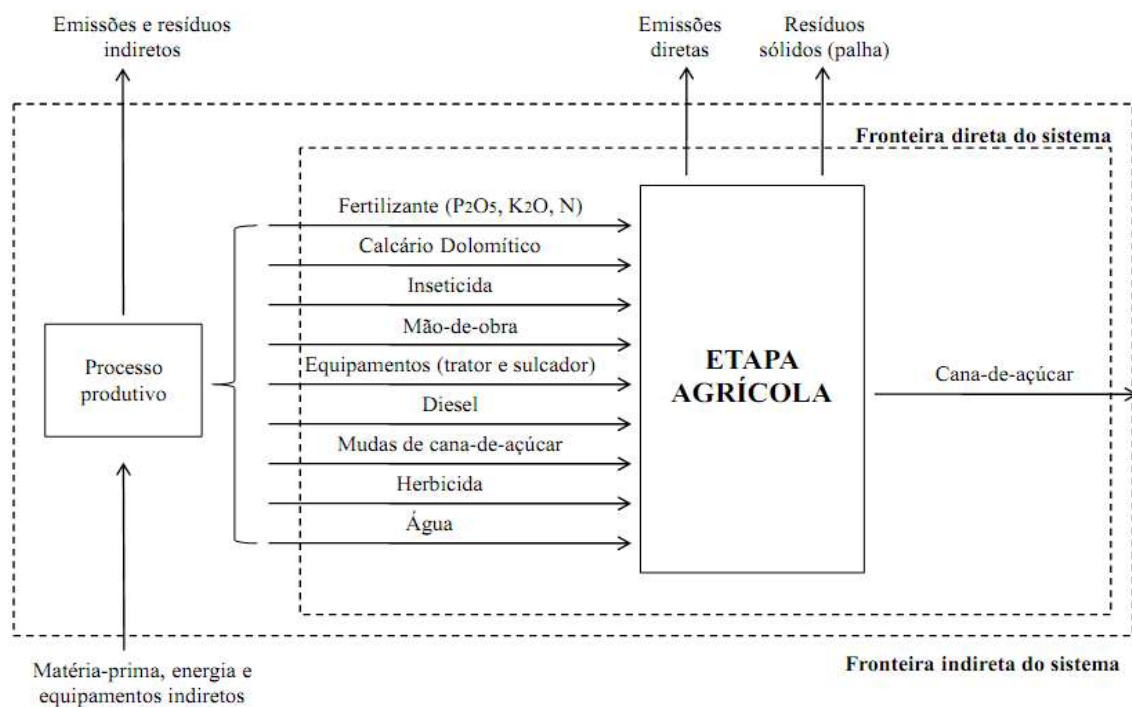


Figura 15 - Fronteira do sistema referente à etapa agrícola.

Fonte: Autor.

Os índices mássicos de cada fluxo de entrada estão apresentados no Apêndice C, onde serviram de base para o cálculo da produção estimada de etanol hidratado para o porte da

microdestilaria da UFSM. Os coeficientes energéticos utilizados para a conversão dos fluxos mássicos em termos energéticos estão no Apêndice D.

A vida útil de tratores foi assumida como sendo de 9 anos, enquanto que a vida útil do sulcador foi assumida como sendo de 10 anos, conforme consta na referência citada no Apêndice D.

Em alguns casos houve a necessidade de conversão de unidades, a exemplo de caloria (cal) para joule (J) e seus múltiplos, sendo 1 caloria é igual a 4,186 joule ( $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$ ).

Após a colheita, a cana-de-açúcar é transportada até a unidade fabril. Para isso é usado um trator acoplado com reboque. A Figura 16 mostra a fronteira do sistema tomada para a etapa de transporte.

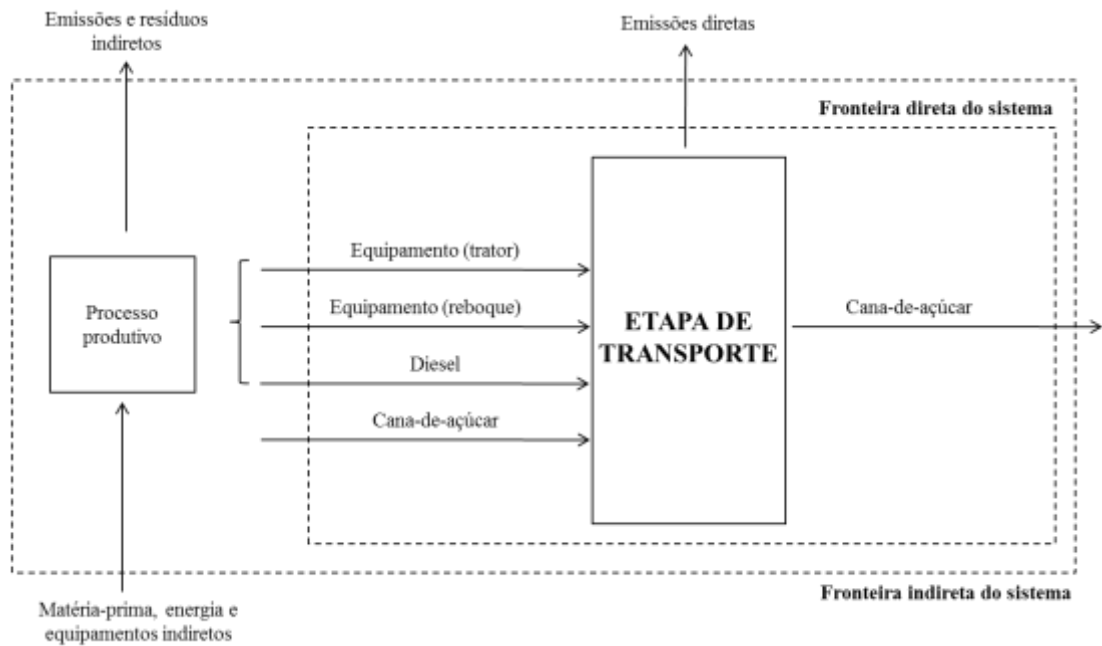


Figura 16 - Fronteira do sistema referente à etapa de transporte.

Fonte: Autor.

Os índices mássicos e energéticos para a fronteira de transporte encontram-se no Apêndice E.

A vida útil de tratores foi assumida como a mesma da etapa agrícola, enquanto que a vida útil do reboque foi assumida como sendo de 10 anos (mesma do sulcador).

A fronteira na qual abrange o processamento industrial da cana-de-açúcar (moagem, fermentação e destilação) é apresentada na Figura 17.

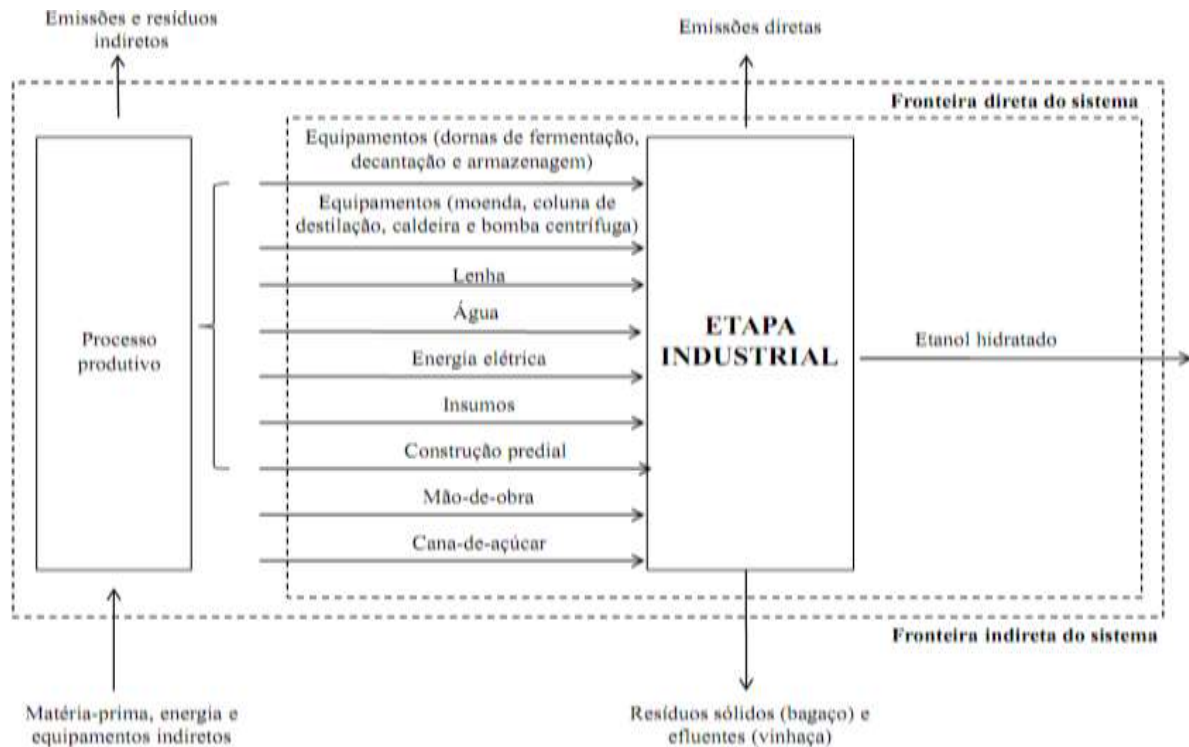


Figura 17 - Fronteira do sistema referente à etapa industrial.

Fonte: Autor.

Para obtenção dos tipos e quantificação dos equipamentos e matérias-primas pertinentes ao processo industrial, foram realizadas visitas à microdestilaria da UFSM.

Além disso, Segundo Macedo *et al.* (2004), é necessário destacar nas etapas dos processos industriais as matérias-primas e utilidades como energia elétrica, insumos do setor industrial, avaliação do uso de energia na construção e montagem de uma usina de etanol, energia utilizada na edificação de prédios, áreas de serviço, finalizando na produção e montagem dos equipamentos industriais.

Os equipamentos necessários para a produção de 320 L/dia de etanol hidratado e suas características estão apresentados no Quadro 10.

Entrada	Tipo	Peso	Unidade	Composição	Especificação	Fonte
Equipamentos	1 Moenda de um termo	2.500,00	kg	Aço inox/ferro fundido <sup>1</sup>	1.000-1.500 kg/h	Limana Polisserviços
	2 Bombas centrífugas	30,00	kg	Ferro fundido/aço carbono	2.000 L/h (cada)	
	3 Dornas de fermentação	135,00	kg	Polipropileno	2.000 L (cada)	
	2 Tanques de armazenagem	6,00	kg	Polipropileno	100 L (cada)	
	2 Tanques de armazenagem	60,00	kg	Polipropileno	1000 L (cada)	
	1 Tanque decantador	30,00	kg	Polipropileno	500 L	
	2 Tanques de armazenagem	240,00	kg	Fibra de vidro	6.000 L (cada)	
	1 Coluna de destilação	280,00	kg	Aço inox 304	600 L (carga)	
	1 Caldeira	2.000,00	kg	Aço carbono ASTM 285-C e ASTM 178-A	360 kg/h (vapor)	In loco: Microdestilaria/UFSM

<sup>1</sup> A composição da moenda foi obtida de Terra (s/ano).

### Quadro 10 - Equipamentos da etapa industrial.

Fonte: Autor.

Alguns dados de entrada como quantidade de água e vapor foram impossibilitados de serem quantificados devido a falta de equipamentos para medição eficaz e inconstante produção da usina. Para tal usou-se de recursos (fórmulas) para quantificação, que são apresentadas na sequência.

A quantificação do consumo de água se deu a partir de 3 análises: para diluição do caldo a partir da equação sugerida por Terra (s/ano), para geração de vapor a partir da interpolação de valores analisados por meio do manual da caldeira e acréscimo de 5% sobre o total de vapor produzido para uso em lavagem e limpeza de equipamentos.

A quantidade de água requerida é calculada pela equação (3):

$$\text{Água} = \left( \frac{C \times gb_{\text{caldo}}}{gb_{\text{desejado}}} \right) - C \quad (3)$$

Onde, Água = quantidade de água, em litros, a ser adicionada no caldo para redução do teor de açúcar.

C= volume, em litros, de caldo a ser diluído.

gb<sub>caldo</sub>= Grau Brix do caldo a ser diluído.

gb<sub>desejado</sub> = Grau Brix desejado (está aproximadamente em 14° brix).

O teor médio do caldo na produção, no período de acompanhamento citado, na microdestilaria da UFSM foi de 16° Brix.

Para o cálculo da quantidade de vapor necessária, adotou-se o valor médio de 3,25 kg/L<sub>etanol</sub>, de acordo com o sugerido por BNDES e CGEE (2008) com valor entre 3-3,50 kg/L<sub>etanol</sub> (ainda que para grande escala de produção).

A partir da quantidade necessária de vapor, da capacidade de geração de vapor e consumo de lenha da caldeira, obteve-se a quantidade de lenha necessária para a produção de 48.000,00 L<sub>etanol</sub>/ano.

O modelo da caldeira da microdestilaria é HBV 20 com as seguintes especificações: PMTA (8 kgf/cm<sup>2</sup>), categoria (B), capacidade (360 kg/h) e fonte de energia (lenha). Tal modelo, por ser razoavelmente antigo, não foi possível encontrar seu manual tanto no local quanto em busca virtual.

No entanto, encontrou-se um modelo análogo onde foi possível utilizar como base para estimação dos resultados. O modelo encontra-se no Anexo 1.

No que abrange a quantificação de energia elétrica requerida, a mesma foi obtida através do medidor de energia, registrando o consumo inicial e o final durante a análise do processo. Portanto, o cálculo do consumo total foi baseado nesse registro realizado *in loco*.

Os insumos necessários constam basicamente de reagente básico e ácido, ambos para controle de pH (se necessário) e fermento biológico (leveduras). O pH, geralmente, não acarretou em grande controle.

A levedura utilizada é da marca BIOFERM, adquirida da Limana Poliserviços (empresa que também produz e comercializa os equipamentos), sendo a quantidade usada de 1,20 g/L<sub>caldo</sub>.

A mão-de-obra necessária para operar com segurança a microdestilaria e atender a demanda do processo foi estimada em 2 pessoas trabalhando 8 h/dia (cada), em média.

Por fim, a área total da microdestilaria é de 102,84 m<sup>2</sup>, adquirida mediante análise da planta industrial.

É importante salientar algumas informações referentes à análise energética, de acordo com Macedo *et al.* (2004) e também citado por Santos (2011), sendo elas:

- ✓ Atribuir às edificações uma vida útil de 50 anos;
- ✓ Atribuir às máquinas e equipamentos pesados (moenda e caldeira) uma vida útil de 25 anos;
- ✓ Outros equipamentos (Leves) uma vida útil de 10 anos.

Para o custo energético de manutenção deve-se considerar para:

- ✓ Máquinas e equipamentos: 4% energia total de fabricação das máquinas e equipamentos;

- ✓ Edificações: 4% energia total na construção das edificações.

A vida útil da coluna de destilação foi considerada como de 15 anos, segundo Macedo *et al.* (2004).

Para o levantamento dos coeficientes energéticos de cada fluxo de entrada, seguiu-se o mesmo procedimento realizado na etapa agrícola e de transporte. No Apêndice F, apresenta-se os índices energéticos usados para a etapa industrial.

Por fim, para o cálculo final da eficiência energética de cada etapa e do processo como um todo, fez-se uso do poder calorífico inferior (PCI) dos produtos e resíduos pertinentes.

Segundo o Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética (2012) o PCI do caldo de cana é 620 kcal/kg (2,595 MJ/kg), do bagaço de cana com 50% de umidade é 2.130 kcal/kg (8,916 MJ/kg), do etanol etílico hidratado é 6.300 kcal/kg (26,371 MJ/kg) ou 5.097 kcal/L (21,336 MJ/L) e da cana-de-açúcar considerando os seus componentes (sacarose, fibras, água e outros) é 1.060 kcal/kg (4,437 MJ/kg). Segundo Paoliello (2006), o PCI da vinhaça fica em torno de 5,7 kcal/L (0,0238 MJ/L).

A Figura 18 mostra a etapa global do sistema, abrangendo a etapa agrícola, de transporte e industrial como um todo.

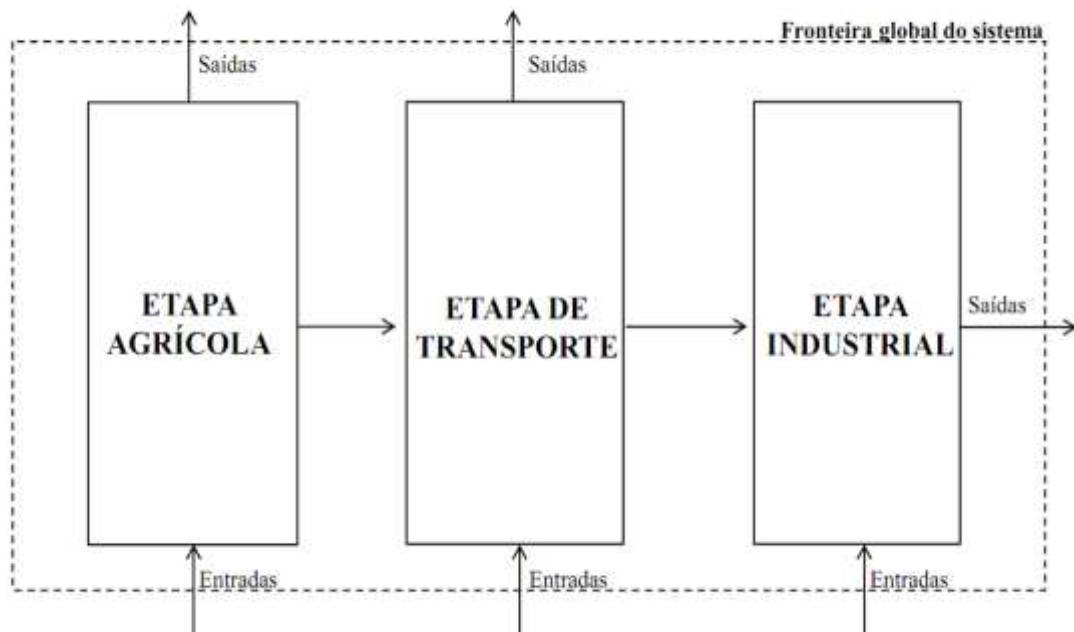


Figura 18 - Fronteira global do sistema.

## 4.2 Análise ambiental comparativa da produção da coluna de destilação por pratos e da coluna de destilação mista

Para a análise comparativa quanto ao impacto ambiental da produção de uma coluna de destilação por pratos e uma coluna de destilação mista (pratos e recheio), foi considerado o processo construtivo de ambas e a coleta de dados se deu na mesma forma que para análise do processo produtivo de etanol hidratado, ou seja, através de visitas, entrevistas e busca teórica em referências pertinentes.

O esquema teórico do modelo de coluna (torre) de recheio e pratos é apresentado na Figura 19. A coluna de destilação com recheio pode ser de 2 tipos: com recheio randômicos ou com recheios estruturados.

No Anexo 2 é apresentado um esquema teórico de uma coluna de destilação por pratos e uma coluna de recheio com seus acessórios básicos (refervedor, condensador e válvulas de controle de nível, pressão, temperatura e fluxo).

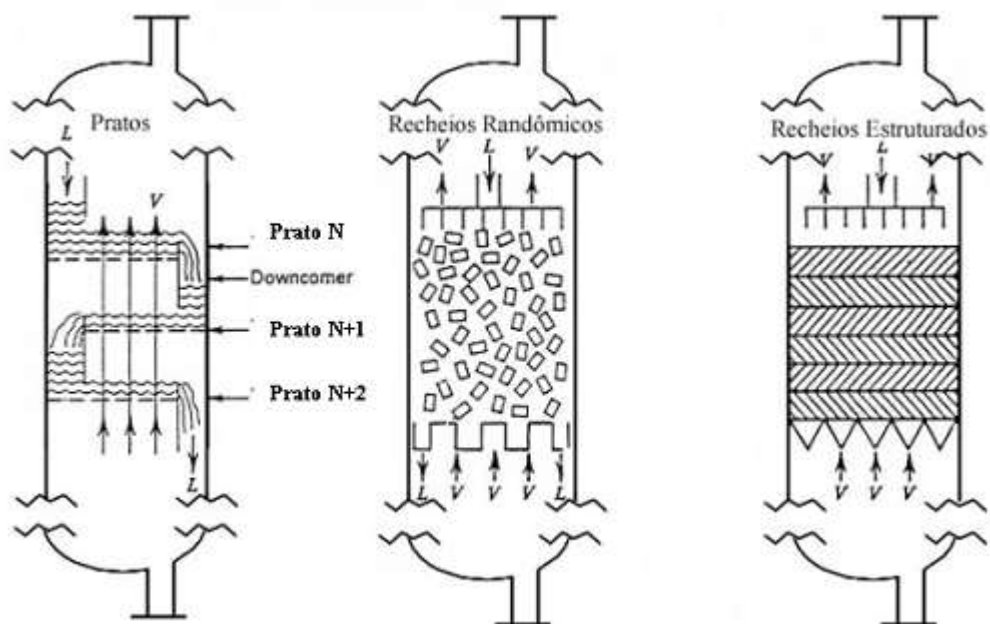


Figura 19 - Principais tipos de torres de contato.

Fonte: Caldas *et al.*, 2007.

O modelo da coluna mista é a configuração do modelo de coluna de pratos e recheio sendo composta em sua parte superior com preenchimento de recheio randômico do tipo mais simples (Anel de Raschig, mostrado na Figura 20) e na sua parte inferior com pratos do tipo perfurados sem *downcomer* também chamado de prato *dualflow* (Figura 21 - a). A coluna de pratos possui pratos do tipo válvulas (Figura 21 - b).

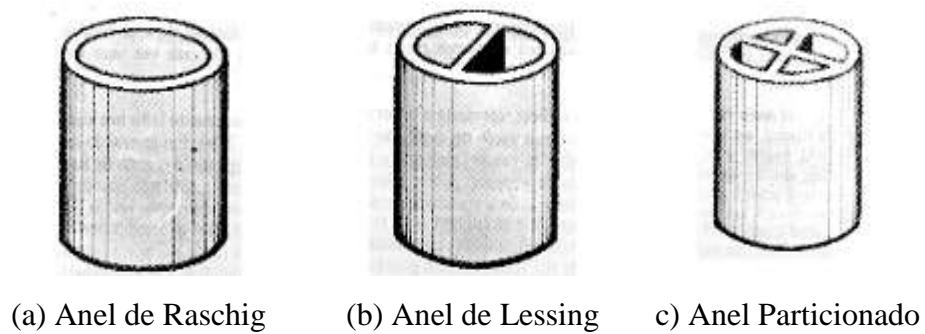


Figura 20 - Tipos de anel de Raschig.

Fonte: Caldas *et al.*, 2007.

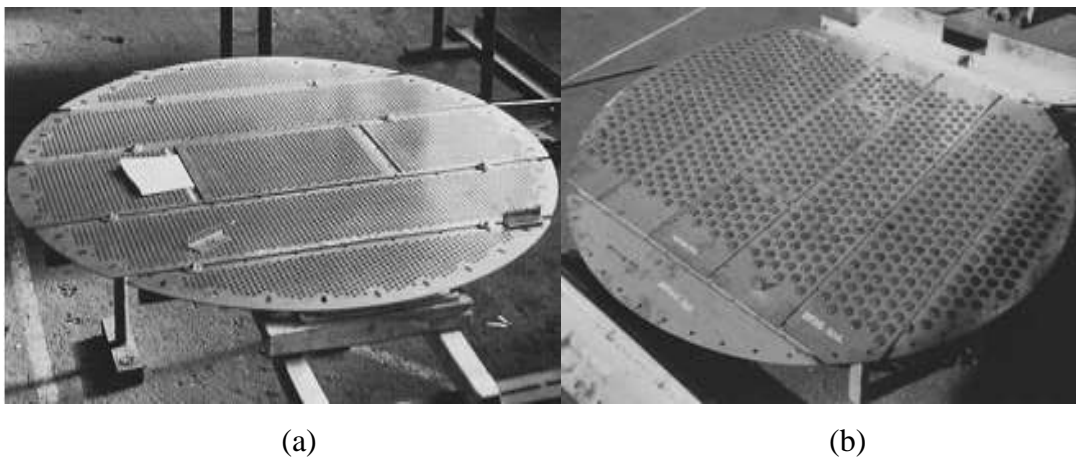


Figura 21 - Prato perfurado sem downcomer (a) e prato do tipo válvula (b).

Fonte: Coulson e Richardson, 2002.



As etapas básicas para construção das colunas são mostradas no fluxograma apresentado na Figura 22, desenvolvido com base nas informações obtidas na Limana Poliserviços.

Em cada etapa do fluxograma ocorrem entradas e saídas de fluxos mássicos e energéticos referentes à construção das colunas sendo analisados e comparados apenas ambientalmente para indicar qual tipo de coluna de destilação implica em menores danos ambientais.

Os fluxos de massa e energia são apresentados nos resultados e discussões bem como o resultado da análise comparativas dos dois tipos de colunas, gerados no SimaPro<sup>®</sup>.

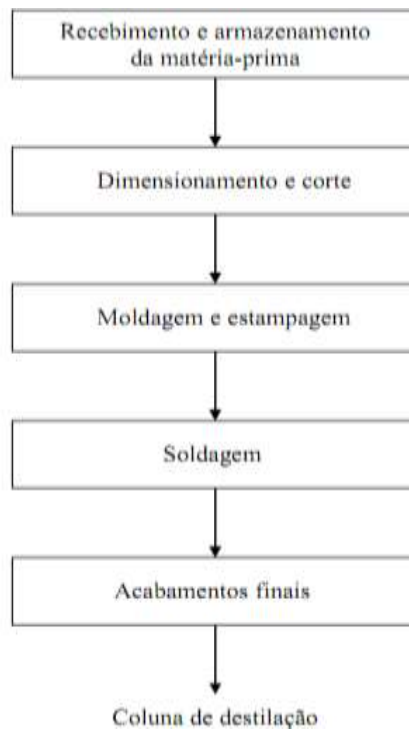


Figura 22 - Fluxograma do processo construtivo de uma coluna de destilação contínua de pequeno porte.

Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para produção de etanol hidratado (320 L/dia), em pequena escala, foram obtidos através da análise individual de cada etapa visando identificar os fluxos com maior potencial de impacto/dano ao meio ambiente e através da comparação de todas as etapas de produção como um todo de forma a verificar qual etapa implica em maiores impactos/danos. Ao mesmo tempo, a aplicação da análise da eficiência energética serviu para avaliar se o processo é energeticamente viável, em cada etapa e na etapa global.

Para a análise comparativa da construção das colunas de destilação, a análise ambiental foi desenvolvida a fim de servir de auxílio na indicação do tipo de coluna menos impactante ao meio ambiente na produção de etanol em pequena escala. É importante mencionar que tal avaliação ambiental foi baseada somente no processo de fabricação de cada coluna de destilação, não sendo avaliada a operação e eficiência de cada tipo de coluna.

O pressuposto utilizado foi que os dois modelos de colunas de destilação produzem a mesma quantidade de etanol por hora com a mesma eficiência operacional.

### 5.1 Resultados da produção de etanol hidratado em pequena escala

#### 5.1.1 Resultados da etapa agrícola

Com base nos índices mássicos e energéticos, respectivamente nos Apêndices C e D, foram calculados os fluxos de entrada e saída da etapa agrícola. Os resultados em termos mássicos foram alimentados no SimaPro<sup>®</sup> para obtenção dos resultados em termos ambientais e os termos mássicos convertidos em termos energéticos foram utilizados na equação baseada em Macedo *et al.* (2008), para a análise da eficiência energética.

Os fluxos quantificados para a produção considerada na Tabela 3 estão elencados no Quadro 11, em termos de produção anual. A partir do Quadro 11, nota-se um requerimento energético, em termos de porcentagem, distribuído entre diversos fluxos de entrada,

destacando-se os fertilizantes nitrogenados (37,27%) e o calcário dolomítico (17,49%), representado mais da metade do requerimento energético dessa etapa (54,76%).

Entradas	Quantidade	Unidade	Quantidade energética	Unidade	Unidade (J)	%	% (s/ energia solar)
Fertilizante P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.672,65	kg	15.997,06	MJ	1,60E+10	4,24	7,93
Fertilizante K <sub>2</sub> O	2.416,05	kg	17.151,06	MJ	1,72E+10	4,55	8,50
Fertilizante N	1.274,40	kg	75.211,39	MJ	7,52E+10	19,95	37,27
Calcário Dolomítico	30.444,04	kg	35.293,62	MJ	3,53E+10	9,36	17,49
Herbicida	34,52	kg	9.964,79	MJ	9,96E+09	2,64	4,94
Inseticida	3,19	kg	973,32	MJ	9,73E+08	0,26	0,48
Água	5.841,00	L ou kg	0,0244	MJ	2,44E+04	0,000006	0,000012
Equipamento (1 trator)	3.000,00	kg	20.611,02	MJ	2,06E+10	5,47	10,21
Equipamento (1 sulcador)	200,00	kg	1.434,18	MJ	1,43E+09	0,38	0,71
Diesel	212,40	L	10.152,72	MJ	1,02E+10	2,69	5,03
Mão-de-obra (4 pessoas)	2.218,16	h	4.018,98	MJ	4,02E+09	1,07	1,99
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>190.808,16</b>	<b>MJ</b>	<b>1,91E+11</b>	-	-
Mudas de cana	127.440,00	kg	10.981,14	MJ	1,10E+10	2,91	5,44
Energia Solar	-	-	175.230,00	MJ	1,75E+11	46,48	-
<b>TOTAL GERAL</b>	-	-	<b>377.019,30</b>	<b>MJ</b>	<b>3,77E+11</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
<b>Saídas</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade energética</b>	<b>Unidade</b>	<b>Unidade (J)</b>	-	-
Cana-de-açúcar	849.557,52	kg/ano	3.763.539,82	MJ	3,76E+12	-	-
Emissões (CO <sub>2</sub> )	180,54	kg diesel	622,86	kg CO <sub>2</sub>	-	-	-

$\rho_{diesel} = 0,85 \text{ kg/L}$

Fator de emissão para o diesel = 3,45 kg CO<sub>2</sub>/kg diesel

Cana-de-açúcar cortada e limpa.

Quadro 11 - Quantificação mássica e energética da etapa agrícola.

A Figura 23 foi gerada a partir dos resultados obtidos da alocação dos fluxos mássicos no SimaPro®.

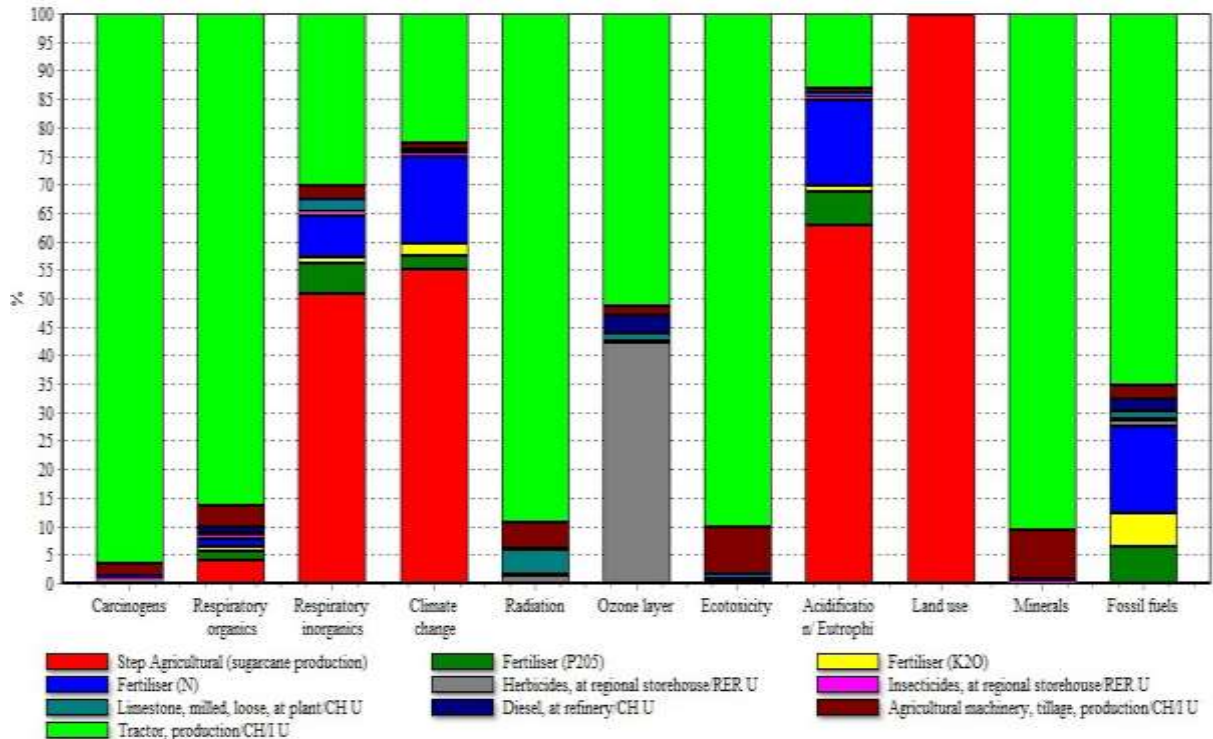


Figura 23 - Avaliação de impactos: Etapa agrícola.

A utilização de fertilizante rico em nitrogênio implica em impactos ambientais consideráveis na etapa respiração inorgânicos (*respiratory inorganics*), mudança climática (*climate change*), acidificação/eutrofização (*acidification/eutrophization*) e combustíveis fósseis (*fossil fuels*), mas o uso de trator para preparo do solo é o maior responsável pelos impactos ambientais da etapa agrícola.

É importante salientar que é considerada nessa análise a produção do trator (matérias-primas e utilidades), fato que se refletiu em sua elevada contribuição em todas as categorias de impacto do método Eco-Indicador 99. A área necessária para plantio (atribuída para a produção de cana-de-açúcar) resultou elevada parcela nas categorias de impacto respiração inorgânicos (*respiratory inorganics*), mudança climática (*climate change*), acidificação/eutrofização (*acidification/eutrophization*) e uso de solo (*land use*). Tal resultado pode ser atribuído ao fato da introdução de todos os fluxos de entrada estarem direcionados ao

manejo do solo e, dessa forma, possuírem maior ligação com tais categorias de impacto, além das emissões geradas no manejo e tratamento do solo.

Em uma abordagem em que se desconsiderem os implementos agrários gerais, tendo em vista a intensa necessidade e notoriedade de seu uso para cultivo do solo, pode-se identificar outros fluxos de grande importância em termos de porcentagem de contribuição nas categorias de impacto. A Tabela 4 apresenta esta avaliação.

Tabela 4 - Fluxos de maior contribuição nas categorias de impacto: Etapa Agrícola.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Tipo de fluxo</b>	<b>% de contribuição</b>
Carcinogenia	Herbicidas	54,979
	Calcário dolomítico	34,716
Respiração orgânicos	Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	27,643
	Fertilizante (N)	23,653
	Diesel	16,946
Respiração inorgânicos	Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	32,657
	Fertilizante (N)	43,036
	Calcário dolomítico	12,856
Mudanças climáticas	Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	11,657
	Fertilizante (N)	73,457
Radiação	Herbicidas	22,930
	Calcário dolomítico	71,008
Camada de ozônio	Herbicidas	89,513
Ecotoxicidade	Herbicidas	37,587
	Calcário dolomítico	53,991
Acidificação/eutrofização	Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	25,191
	Fertilizante (N)	64,410
Uso de solo	Herbicidas	26,235
	Calcário dolomítico	52,056
Minerais	Herbicidas	45,964
	Calcário dolomítico	48,417
Combustíveis fósseis	Fertilizante (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	20,081
	Fertilizante (K <sub>2</sub> O)	17,757
	Fertilizante (N)	47,418

Alguns fluxos (mão-de-obra, energia solar e mudas de cana-de-açúcar) não foram considerados por motivos como: não terem contribuição representativa, por não estarem presentes no banco de dados do software e/ou por terem caráter totalmente renovável como no caso da energia solar.

A partir da Tabela 4, fica claro que grande contribuição dos impactos ambientais pode ser atribuída ao consumo de fertilizantes. Ainda, o uso de herbicida apresenta percentuais de impacto importantes, principalmente na categoria camada de ozônio (*ozone layer*), com elevada porcentagem de contribuição de impacto (89,513%).

Já, a eficiência energética da etapa agrícola variou entre 9,98 - 19,03, de acordo com as análises e considerações realizadas, ressaltando que essa etapa proporciona um resultado positivo de energia, ou seja, produz muito mais energia do que consome. Os resultados encontram-se na Tabela 5, mostrando diversas considerações adotadas a fim de visualizar a importância de cada fluxo.

O fato de a energia solar ser totalmente renovável implica na sua desconsideração no cálculo da eficiência energética, no entanto, se esta for considerada, é responsável por maior influência em termos de eficiência energética, conforme pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Eficiência energética da etapa agrícola.

<b>Eficiência Energética (<math>E_{out}/E_{in}</math>)</b>	<b>Considerações</b>
9,98	Incluindo todos os fluxos
10,09	Exceto mão-de-obra e água
10,72	Exceto mão-de-obra, água, máquinas e implementos
10,60	Exceto máquinas e implementos
19,03	Exceto mão-de-obra, água e energia solar

A partir da análise ambiental e energética, é possível notar que o uso de máquinas e equipamentos implica em maior influência na análise ambiental do que na energética, pois a porcentagem de contribuição dos fluxos é mais distribuída em termos energéticos. Também, a mão-de-obra e consumo de água pouco influenciam.

A não contabilização da energia solar como um fluxo de entrada, pois é totalmente renovável, implica em um elevado aumento da eficiência energética do sistema.

O uso dos 3 tipos de fertilizantes e também o uso de herbicidas implicou em grandes porcentagens nas categorias de impacto, portanto, o estudo desses insumos se torna atrativo visando reduzir seus efeitos nocivos ao meio ambiente. Destaque para os fertilizantes ricos em nitrogênio que além de ter considerável parcela nos impactos ambientais, também apresenta elevada participação no consumo energético do sistema.

### 5.1.2 Resultados da etapa de transporte

Com base nos índices mássicos e energéticos, dispostos no Apêndice E, foram calculados os fluxos de entrada e saída da etapa de transporte.

Os demais passos seguem o mesmo procedimento da análise da etapa agrícola. Os fluxos quantificados para a etapa de transporte estão elencados no Quadro 12, em termos de produção anual. Ressalta-se que a mão-de-obra do transporte foi considerada dentro da etapa agrícola, tendo em vista que pouco influencia na análise.

Não se efetuou o cálculo individual da eficiência energética dessa etapa, pois se considerou como uma de ligação entre a etapa agrícola e industrial, no entanto, participa da análise ambiental e energética como um todo.

<b>Entradas</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade (J)</b>
1 Trator	3.018,00	kg	20.733,66	MJ	2,07E+10
1 Reboque	1.750,00	kg	12.549,25	MJ	1,25E+10
Diesel	276,75	L	13.228,65	MJ	1,32E+10
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>46.511,56</b>	<b>MJ</b>	<b>4,65E+10</b>
<b>Saídas</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade (J)</b>
Cana-de-açúcar	849.557,52	kg	3.763.539,82	MJ	3,76E+12
Emissão CO <sub>2</sub>	235,24	kg	811,57	kg CO <sub>2</sub>	-

Quadro 12 - Quantificação mássica e energética da etapa de transporte da cana-de-açúcar.

Os resultados ambientais são apresentados na Figura 24.



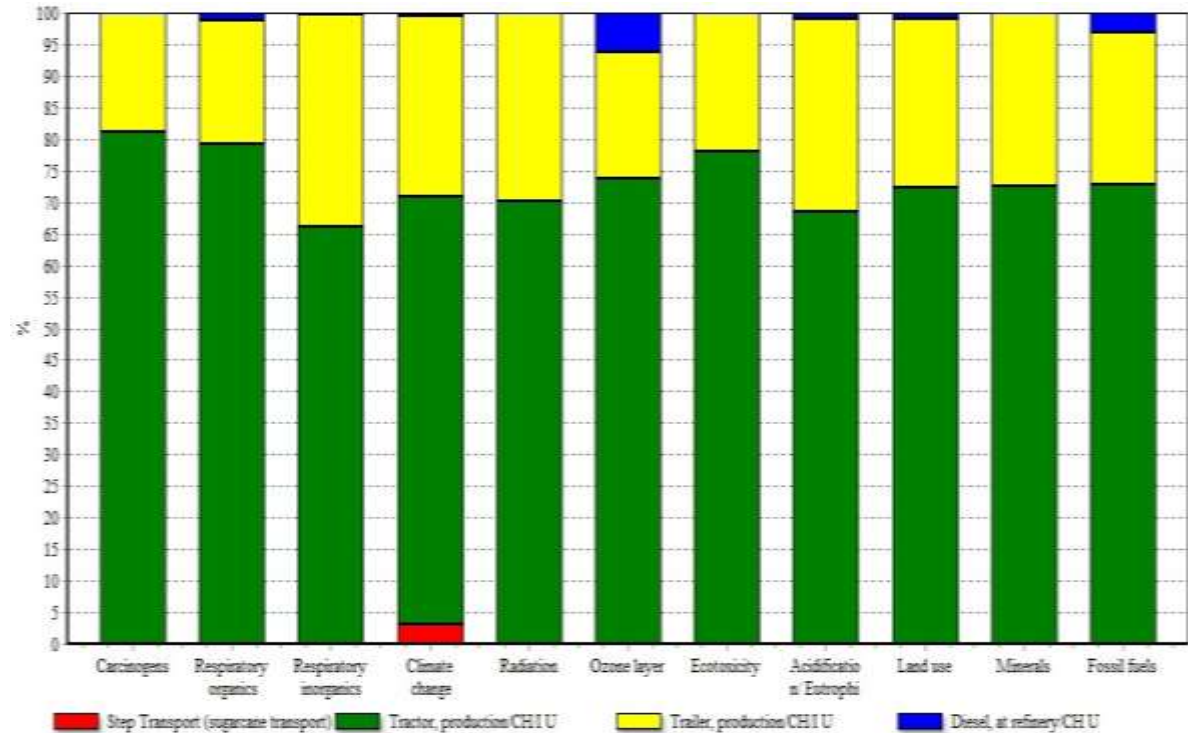


Figura 24 - Avaliação de impactos: Etapa de transporte da cana-de-açúcar.

Como esperado, o uso de implemento agrícola (reboque e trator) culminou em maiores porcentagens de impactos em todas as categorias de impacto avaliadas a partir da seleção do método Eco-Indicador 99. O trator, em especial foi o responsável por maiores impactos, com porcentagens superior a 65% na maioria das categorias de impacto.

Tomando a mesma situação da etapa agrícola referente a análise e excluindo-se esses fluxos, resta apenas o consumo de diesel como causa de impactos ambientais, no entanto, essa etapa configura-se como de ligação entre as demais.

### 5.1.3 Resultados da etapa industrial

Baseando-se nos índices mássicos e energéticos, respectivamente do Quadro 10 e Apêndice F, foram calculados os fluxos de entrada e saída da etapa industrial. Os demais passos seguem o mesmo procedimento da análise das etapas anteriores.

Os fluxos quantificados para a etapa industrial estão elencados no Quadro 13, em termos de produção anual, não computando a entrada da cana-de-açúcar, pois possui a maior participação da energia de entrada nesta etapa.

A partir da análise do Quadro 13, é possível concluir que o consumo de energia elétrica apresenta elevado consumo energético (60,19 %) para o processo. Tal fato é explicado devido o processo ser em batelada, ocasionando constantes acionamentos de equipamentos energizados (moenda) de alto consumo energético.

Utilização abaixo da capacidade mínima implica em baixa produção com elevado consumo energético, ou seja, há a necessidade de se produzir com capacidade perto da máxima a fim de evitar consumo energético desnecessário. Ainda assim, tal consumo foi além do previsto/esperado.

Em uma análise excluindo a quantificação do uso de energia elétrica, os fluxos que apresentaram os principais percentuais de contribuição energética são a lenha (90,44 %) e os equipamentos industriais (5,51 %).

Os equipamentos industriais são de suma importância na produção industrial de etanol hidratado, em especial em pequena escala, a ponto que esse trabalho faz uma análise comparativa entre a produção entre 2 tipos de colunas de destilação, em termos ambientais, visando indicar o mais favorável no sentido de evitar impactos e/ou danos ambientais.

<b>Entradas</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade energética</b>	<b>Unidade</b>	<b>Unidade (J)</b>	<b>%</b>
Energia elétrica <sup>1</sup>	208.888,89	kwh	752.000,00	MJ	7,52E+11	60,1941
Água (diluição, limpeza, GV)	206.400,00	L ou kg	863,58	MJ	1,02E+09	0,0816
Lenha	88,84 (34.647,60)	m <sup>3</sup> (kg)	449.725,85	MJ	4,50E+11	35,9985
Insumos	576,00	kg	800,64	MJ	8,01E+08	0,0641
Mão-de-obra	2.400,00	h	4.344,00	MJ	4,34E+09	0,3477
Construção predial	102,84	m <sup>2</sup>	14.007,50	MJ	1,40E+10	1,1212
1 Moenda de um terno	2.500,00	kg	10.836,80	MJ	1,08E+10	0,8674
1 Tanque decantador	30,00	kg	220,20	MJ	2,20E+08	0,0176
2 Bomba centrífuga	30,00	kg	325,10	MJ	3,25E+08	0,0260
3 Dornas fermentação	135,00	kg	990,90	MJ	9,91E+08	0,0793
2 Tanque armazenagem	6,00	kg	44,04	MJ	4,40E+07	0,0035
2 Tanque armazenagem	60,00	kg	440,40	MJ	4,40E+08	0,0353
1 Destilador	280,00	kg	1.958,30	MJ	1,96E+09	0,1568
2 Tanque armazenagem	240,00	kg	1.761,60	MJ	1,76E+09	0,1410
1 Caldeira	2.000,00	kg	10.816,00	MJ	1,08E+10	0,8658
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>1.249.290,95</b>	<b>MJ</b>	<b>1,25E+12</b>	<b>100,0000</b>
<b>Saídas</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade (J)</b>	<b>%</b>
Etanol hidratado	48.000,00	L	1.023.960,03	MJ	1,02E+12	23,64
	38.846,40	kg		MJ		
Bagaçó	369.557,52	kg	3.292.757,51	MJ	3,29E+12	76,02
Vinhaça	624.000,00	L	14.867,42	MJ	1,49E+10	0,34
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>4.331.584,96</b>	<b>MJ</b>	<b>4,33E+12</b>	<b>100,00</b>

<sup>1</sup> Para produção de 54 litros de etanol hidratado foi consumido 254 kWh de energia elétrica (média de 2 medições realizadas)

$\rho_{\text{etanol hidratado}} = 809 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{\text{vinhaça}} = 1,143 \text{ kg/L}$

Fator energético da vinhaça = 0,023826 MJ/L

Quadro 13 - Quantificação mássica e energética da etapa industrial.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos a partir da introdução dos fluxos mássicos no SimaPro<sup>®</sup>. Como não foi possível alocar os equipamentos diretamente, estes foram alocados na forma de sua composição mássica como ferro fundido (*cast iron*), aço inoxidável (*stainless steel*) e ferro e aço (*iron and steel*) comuns.

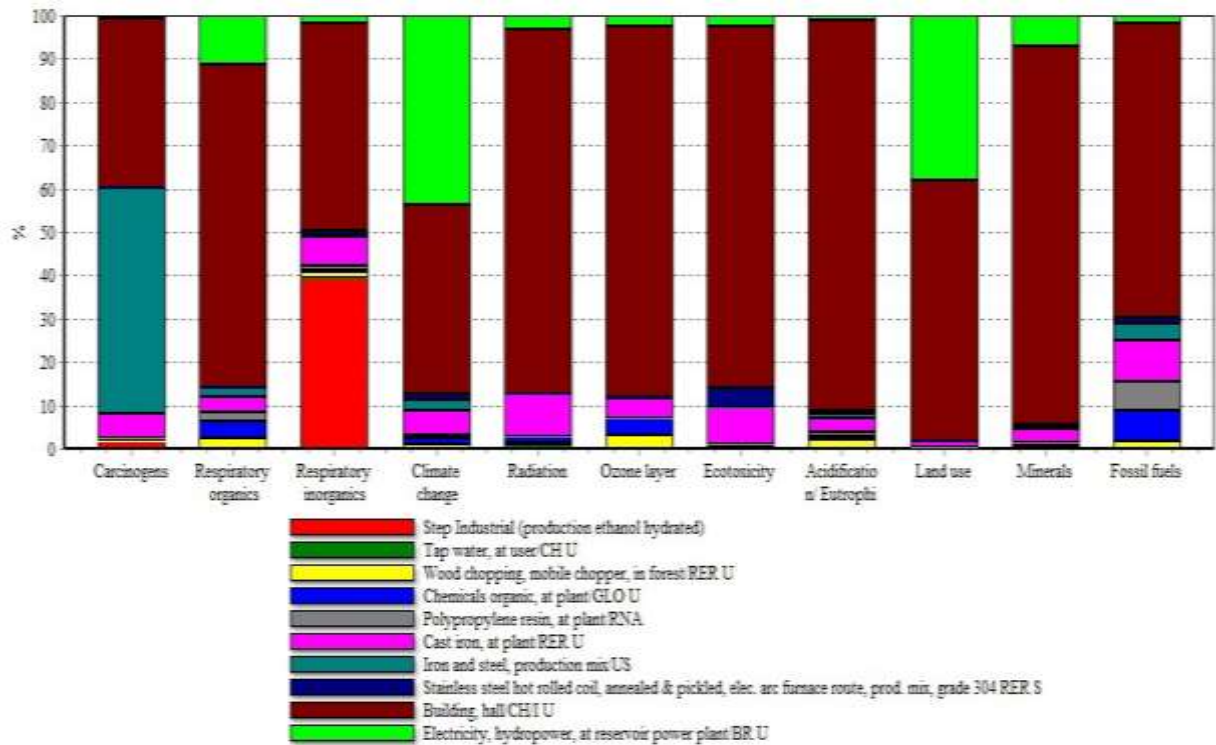


Figura 25 - Avaliação de impactos: Etapa Industrial.

A construção da infraestrutura, ou seja, do prédio industrial (*building*) consome elevada quantidade de materiais tais como cimento, ferro e energia (seja na forma elétrica, mecânica e humana) ocasionando maior porcentagem de impacto em todas as categorias de impacto ambiental, exceto na categoria carcinogênicos (*carcinogens*).

O alto consumo de energia no processo detém elevada parcela de impacto, principalmente nas categorias mudança climática (*climate changes*) e uso da terra (*land use*).

Analisando a etapa industrial, desconsiderando a construção predial, é possível notar uma mescla de contribuição em impactos ambientais distribuídos entre os demais fluxos. As porcentagens de maior importância são mostradas da Tabela 6.

Tabela 6 - Fluxos de maior contribuição nas categorias de impacto: Etapa Industrial.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Tipo de fluxo</b>	<b>% de contribuição</b>
Carcinogenia	Aço comum e ferro comum	85,932
	Ferro fundido	8,912
Respiração orgânicos	Eletricidade	44,262
	Ferro fundido	14,776
	Químicos	14,608
Respiração inorgânicos	Etapa industrial	75,270
	Ferro fundido	12,869
Mudanças climáticas	Eletricidade	77,523
	Ferro fundido	9,575
Radiação	Ferro fundido	61,531
	Eletricidade	19,398
	Químicos	10,397
Camada de ozônio	Ferro fundido	33,383
	Químicos	27,149
	Lenha	20,199
Ecotoxicidade	Ferro fundido	50,970
	Aço inoxidável	27,476
Acidificação/eutrofização	Ferro fundido	32,033
	Lenha	21,765
Uso de solo	Eletricidade	95,591
Minerais	Eletricidade	56,151
	Ferro fundido	26,775
Combustíveis fósseis	Ferro fundido	29,860
	Polipropileno	21,772
	Químicos	21,168

Sob essa análise, o uso de ferro fundido, principalmente na confecção de equipamentos como moendas, implica em importantes porcentagens em todas as categorias de impactos, a exceção do uso do solo (*land use*).

A utilização de lenha para geração de vapor é também um fluxo de grande impacto ambiental, principalmente em relação à categoria camada de ozônio e acidificação/eutrofização, pois sua extração e queima gera emissões que contribuem para tais impactos.

O consumo de eletricidade, apesar de grande percentual energético, se distribui de forma bem menos impactante ao meio ambiente. As categorias de impacto na qual ela possui expressiva parcela, foram as mudanças climática e uso do solo, onde uma razoável explicação pode ser dada pela alteração no cenário ambiental (inundação e grande extensão de terreno) para construção da hidroelétricas, já que foi assumido que a energia elétrica foi oriunda desse tipo de geração.

Na categoria de respiração inorgânicos, foi observado elevada parcela de contribuição referente à etapa industrial, fato atribuído às emissões de saída geradas no processo industrial como um todo, ou seja, desde a moagem da cana-de-açúcar até a obtenção do etanol hidratado.

A análise da etapa industrial, em termos de eficiência energética, mostrou que o processo é energeticamente inviável, se alocado a quantificação energética da cana-de-açúcar de entrada. A inviabilidade energética é minimizada considerando o potencial energético contido no bagaço gerado no processo. A Tabela 7 apresenta os resultados dos cálculos relativos à energia gasta no processo em razão da energia gerada.

Tabela 7 - Eficiência energética da etapa industrial.

<b>Eficiência Energética (Eout/Ein)</b>	<b>Considerações</b>
0,86	Considerando etanol e bagaço na saída e todos fluxos de entrada
0,87	Considerando etanol e bagaço na saída e excluindo mão-de-obra e água dos fluxos entrada
0,87	Incluindo todos fluxos de saída e excluindo mão-de-obra, água e equipamentos da entrada
0,21	Considerando apenas etanol na saída e excluindo água, mão-de-obra e equipamentos da entrada
0,20	Considerando apenas etanol na saída e considerando todos os fluxos de entrada

Analisando a Tabela 7, pode-se perceber que o bagaço é muito importante para o processo industrial visto que apresenta grande quantidade energética. Um processo que visa apenas à produção de etanol hidratado em microdestilarias de pequeno porte, cujo bagaço possa ser destinado à ração animal, usado como adubo etc, está desperdiçando a energia contida no bagaço oriundo da moagem, se considerado o seu potencial para uso industrial (combustível para abastecimento de caldeira e conseqüente geração de vapor).

Considerando a energia contida no bagaço, a relação  $E_{out}/E_{in}$  obtida para este processo (batelada em microdestilaria) apresenta considerável aumento resultando em termos de energia útil, apresentando uma faixa entre 0,86-0,87 unidades de energia.

A faixa de razão obtida de 0,20 - 0,87 unidade de energia (sem bagaço e com bagaço, respectivamente) indica déficit energético na etapa industrial, pois efetivamente para cada unidade de energia que entra no sistema se produz apenas 0,20 - 0,87. Logo, não se produziu excedente de energia, pelo contrário, tem-se perda de 0,80 - 0,13 unidade de energia.

#### 5.1.4 Resultados da comparação entre as etapas

Visando identificar qual das etapas é mais prejudicial em termos ambientais, foi realizada a comparação entre as etapas consideradas na produção de etanol hidratado em pequena escala.

A Figura 26 mostra o resultado obtido através da análise comparativa obtida no *software* SimaPro<sup>®</sup>. Dentre as 11 categorias de impacto, há uma diversificação dentre as etapas de produção de etanol hidratado.

De maneira geral, a etapa industrial foi responsável por maiores impactos em 5 categorias, a etapa de transporte obteve maiores impactos em 3 categorias e a etapa agrícola também obteve maiores impactos em 3 categorias de impacto.

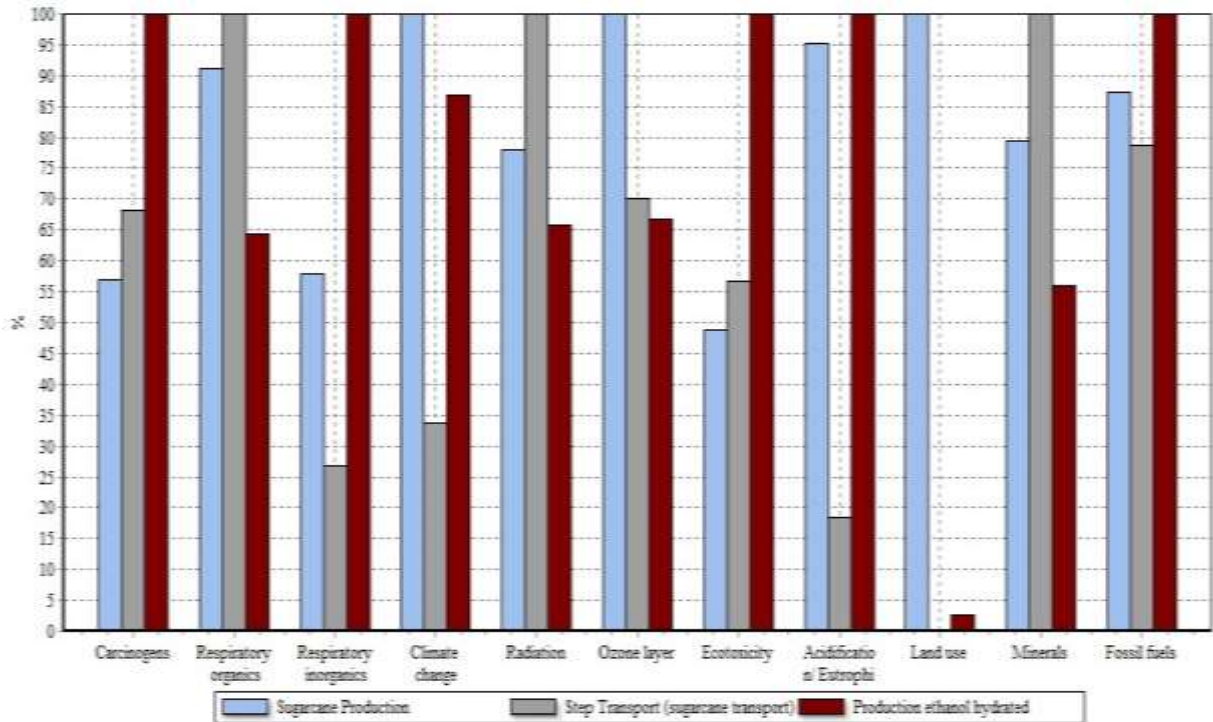


Figura 26 - Comparação, em termos de categorias de impacto, entre as etapas do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala.

A análise da Figura 26 também revela que nas categorias em que a etapa de transporte apresenta as maiores contribuições (em termos de porcentagens) de impacto, a etapa agrícola apresenta maiores contribuições em comparação com a etapa industrial.

Portanto, há uma distribuição bastante homogênea entre os impactos ambientais em relação a cada etapa do processo produtivo. Avaliando quantitativamente o total de categorias de impactos, é possível indicar, em uma análise que necessite optar pela ação em determinada etapa, que a etapa industrial impacta de forma mais elevada, já que possui maiores porcentagens em 5 das 11 categorias.

Fica duvidoso contabilizar a etapa de transporte como sendo parte da etapa agrícola ou industrial, dessa forma as análises se deram pertinentemente, comparando somente a etapa agrícola e a industrial.

Compilando as categorias de impacto em termos de danos (avaliação em termos de *endpoint*), é possível avaliar de forma mais ampla o impacto causado por cada etapa. O método escolhido (Eco-Indicador 99) permite obter resultados por meio de danos e o resultado é apresentado na Figura 27.



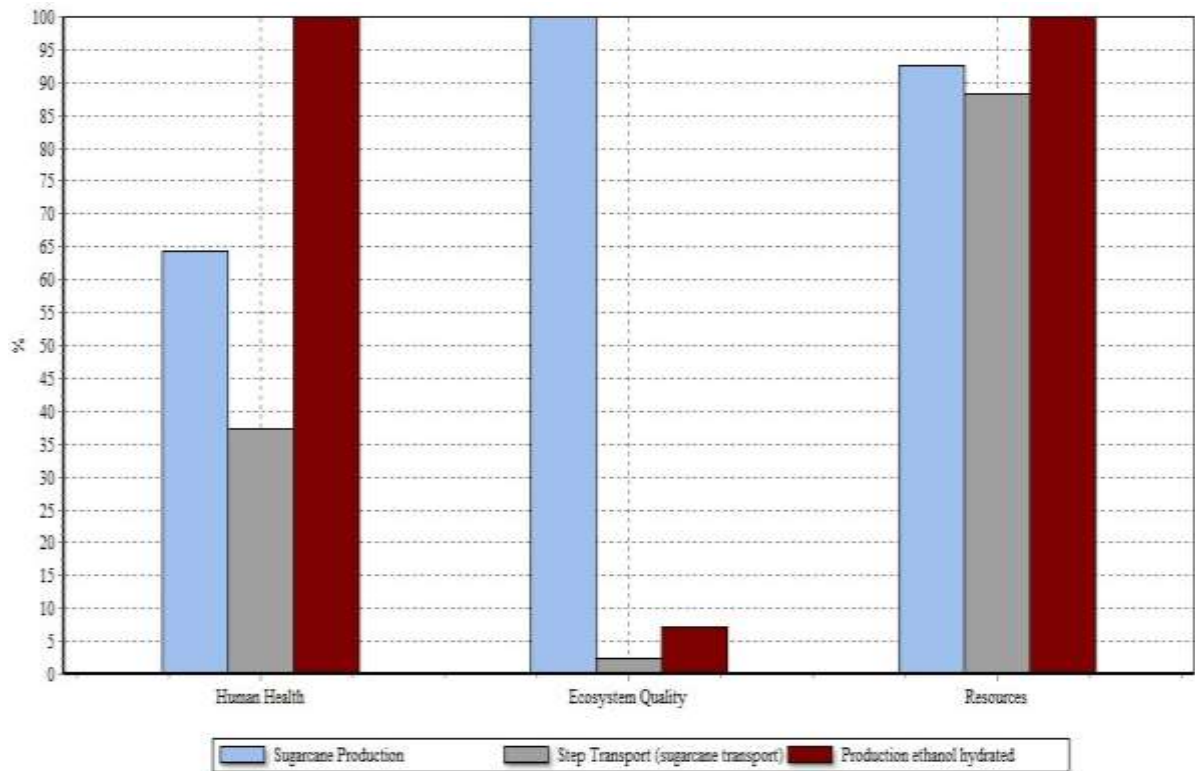


Figura 27 - Comparação, em termos de categorias de danos, entre as etapas do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala.

Mais claramente, é possível indicar que a etapa industrial proporciona maiores danos ao meio ambiente, já que é responsável pela maior porcentagem de danos em 2 das 3 categorias. Ainda, na categoria de dano qualidade do ecossistema (*ecosystem quality*) onde a etapa agrícola possui maior impacto, a etapa industrial apresenta a segunda maior parcela de dano, corroborando para indicar a etapa industrial como mais representativa em termos de danos.

Com isso, em caso de urgência em uma análise ambiental, devem-se direcionar os esforços no estudo da etapa industrial do processo. Dentro dessa etapa, destaque para os fluxos referentes aos equipamentos, lenha (geração de vapor) e uso de eletricidade, de acordo com os dados obtidos na Tabela 6.

A eficiência energética global do sistema, ou seja, o sistema analisado como um todo abrangendo a etapa agrícola, de transporte e industrial, se mostrou baixa, conforme a Tabela 8. É claro que pelo fato de o sistema operar em batelada, ocorre uma redução da eficiência em comparação com um processo operando em regime contínuo.

Tabela 8 - Eficiência energética global do sistema.

<b>Eficiência Energética (Eout/Ein)</b>	<b>Considerações</b>
2,59	Incluindo todos os fluxos de saída e de entrada
2,92	Incluindo todos os fluxos de saída e desconsiderando o consumo de água, mão-obra e energia solar
2,91	Considerando etanol e bagaço nos fluxos de saída e desconsiderando o consumo de água, mão-obra e energia solar na entrada
0,69	Considerando apenas o fluxo de etanol na saída e desconsiderando o consumo de água, mão-obra e energia solar na entrada
0,61	Considerando apenas o fluxo de etanol na saída e todos os fluxos de entrada

A Tabela 8 induz a concluir que a produção de etanol hidratado em microdestilaria é energeticamente viável para as condições propostas no processo avaliado, desde que levado em conta o bagaço.

O bagaço representa uma expressiva parcela na eficiência energética do processo, enquanto que a mão-de-obra e o consumo de água pouco influenciam no processo global.

O *input* mão-de-obra pode ser considerado uma fonte de energia que não usa energia fóssil em seu ciclo de vida e, portanto, pode ser desconsiderada na análise da eficiência energética do processo. Os resultados demonstraram que o *input* mão-de-obra pouco influenciou na eficiência energética das etapas individuais e na etapa global.

Capaz (2009) diz que pela dificuldade em quantificá-la, pelos pressupostos metodológicos convencionais e por implicar em pequena contribuição na análise da eficiência energética é tipicamente não considerada. Tal fato é também mencionado por Macedo (2004) e Wilting (1996).

Apesar de pouco influenciar energeticamente, analisando cada etapa individualmente, o uso de equipamentos (levando-se em conta a construção predial) tem importante influência em termos de impactos ambientais nas etapas individuais.

A questão da utilização do bagaço pode ser repensada, tendo em vista que este resíduo, que é utilizado como alimento animal e adubo, pode ser queimado na caldeira para geração de vapor diminuindo assim o consumo de madeira e implicando em um possível aumento da eficiência energética do processo global, já que não será tratado como resíduo e sim como um co-produto de saída. A baixa eficiência da moagem em microdestilarias culmina em

considerável porcentagem de açúcar remanescente no bagaço, tornando inadequada sua queima na caldeira e indicando a sua utilização de forma mais nobre, como alimento em ração animal.

Porém, ainda que este último *input* de energia não tenha sido considerado nessa análise, e dessa forma impede a indicação do melhor destino ao bagaço (ração animal ou queima), não impediu a demonstração do potencial energético contido no bagaço. Estudos visando obter maior eficiência de extração do caldo da cana-de-açúcar em microdestilarias poderiam ratificar a queima do bagaço, caso os resultados indicassem significativa melhora do rendimento de extração e conseqüente diminuição do teor de açúcar remanescente no bagaço.

Quanto aos equipamentos industriais, uma vez que o processo avaliado ocorreu em batelada, os mesmos apresentaram demasiada ociosidade. É necessário que se dimensionem equipamentos adequados ao processo e que operem em sua capacidade ótima, pois a ineficiente utilização desses equipamentos resultou elevado consumo energético em relação a produção energética.

Outros motivos podem estar ligados à dissipação da energia no processamento industrial, pois esta perda é ainda maior em processo batelada, devido à menor eficiência dos equipamentos e processos em geral. Também fica indutivo que deve haver uma capacidade de produção mínima para que ocorra uma eficiência energética positiva em microdestilarias.

É necessário que se pense na transposição do processo em batelada para processo contínuo em microdestilarias (ainda que necessite de mais análises), ou então que se avalie a questão do abastecimento de matéria-prima para microdestilarias operando em batelada, pois as diversas paradas e operação abaixo da capacidade ótima reduziram a eficiência dos equipamentos e do processo. Um processo operando em regime contínuo exigiria maior padronização e quantificação no que compete a disponibilidade de matéria-prima, mão-de-obra e equipamentos rurais e industriais, além de maiores recursos financeiros, mas poderia ser uma alternativa em caso de associação de pequenos agricultores rurais formando cooperativas.

A construção/operação de uma microdestilaria estruturada com base na capacidade de suprimento de matéria-prima visando sua operacionalidade ótima e/ou dimensionada com equipamentos que não fiquem ociosos e operem de forma eficiente tenderia a aumentar a eficiência do processo.

Resultado análogo é reportado por Mayer *et al.* (2013) que indica que a ineficiência do processo de produção de etanol hidratado em pequena escala afeta a viabilidade econômica devido a perdas de produtos no bagaço e vinhaça ou através consumo excessivo de energia. A

resolução de obstáculos tecnológicos através do aproveitamento integral de co-produtos permitiria a viabilidade econômica e maior eficiência energética.

Devido a isso, se torna importante o estudo dos equipamentos industriais, principalmente em moendas e colunas de destilação. A seguir foi avaliado, ambientalmente, o processo construtivo de dois tipos de colunas de destilação para produção de etanol hidratado visando indicar qual modelo é mais sustentável.

## 5.2 Resultados da análise ambiental comparativa entre modelos de colunas de destilação

A partir dos resultados obtidos na análise da etapa industrial de produção de etanol hidratado em microdestilaria, foi possível verificar que a utilização de equipamentos implica em importantes impactos ambientais. Dessa forma, a ACV foi usada como ferramenta alternativa para indicar qual tipo de coluna de destilação, por pratos ou mista (pratos e recheio) é ambientalmente mais oportuna.

Os Quadros 14 e 15 apresentam os resultados da qualificação e quantificação das entradas e saídas, para o processo de produção de uma coluna de destilação do tipo pratos e uma coluna de destilação do tipo mista, respectivamente. As colunas possuem capacidade de produção de etanol hidratado entre 15-30 L/h. Na coluna mista, o recheio é feito de anéis de Raschig de polipropileno (PP). A Tabela 9 apresenta as especificações quanto ao teor de álcool de entrada (mosto) e de saída para quais as colunas foram projetadas.

Tabela 9 - Parâmetros de projeto das colunas.

Parâmetro	Coluna de pratos	Coluna mista
Teor alcoólico do mosto, em massa de etanol (e em volume de etanol)	6 % (8 °GL)	6 % (8 °GL)
Teor alcoólico do etanol de saída, em massa (e em volume)	92,5 % (95,1-96 °GL)	92,5 % (95,1-96 °GL)
Fração mássica máxima de saída de etanol no fundo	-	0,5 %

Entrada	Tipo	Quantidade	Unidade	OBS/Composição do equipamento	Fonte
Matéria-prima	Aço carbono (1020 STM 285)	65,00	kg	Em média	Limana Polisserviços
	Aço inox em chapa (AISI 304)	285,00	kg	Em média	
	Vidro temperado	2,00	kg	Em média	
	Borracha	3,50	kg	Em média	
	Discos de corte (óxido de Al)	3,70	kg	Em média	
	Vareta de solda (21 % Cr e 12% Ni)	3,50	kg	Em média	
Água	Pluvial	150,00	L	Lavagem (equipamentos e produtos)	e
Mão-de-obra	Processo de construção	668,80	h	8 h/dia	
Energia	Elétrica	715,00	kwh	Rede local	
Equipamentos (Tipo/Peso)	Tesoura mecânica	40,00	kg	Aço carbono	considerações
	Esmerilhadeira	5,00	kg	Ferro fundido, Al e polipropileno	
	Máquina de corte por plasma	30,00	kg	Aço carbono, inox ou alumínio (Al)	
	Dobradeira	150,00	kg	Aço carbono	
	Prensa	150,00	kg	Aço carbono	
	Calandra	120,00	kg	Aço carbono	
	Máquina de solda	50,00	kg	Principalmente aço carbono e PP	
Saídas	Tipo	Quantidade	Unidade	OBS	Fonte
Produto	Coluna de destilação de pratos	1,00	unidade	15-30 L/h	Limana Polisserviços
Resíduos sólidos	Retalhos de aço inox	21,00	kg	Armanezados e coletados por empresa credenciada	
	Retalhos de aço carbono	4,50	kg		
	Discos de corte usados	1,50	kg	Reciclagem	
	Vareta de solda usada	1,90	kg		

Quadro 14 - Inventário da produção: coluna de destilação por pratos.

Entrada	Tipo	Quantidade	Unidade	OBS/Composição do equipamento	Fonte
Matéria-prima	Aço carbono (1020 STM 285)	65,00	kg	Em média	Limana Polisserviços
	Aço inox em chapa (AISI 304)	225,00	kg	Em média	
	Vidro temperado	2,00	kg	Em média	
	Borracha	3,50	kg	Em média	
	Polipropileno	17,00	kg	Em média	
	Discos de corte (óxido de Al)	3,50	kg	Em média	
	Vareta de solda (21 % Cr e 12% Ni)	3,50	kg	Em média	
Água	Pluvial	150,00	L	Lavagem (equipamentos e produtos)	e
Mão-de-obra	Processo de construção	633,60	h	8 h/dia	
Energia	Elétrica	668,00	kwh	Rede local	
Equipamentos (Tipo/Peso)	Tesoura mecânica	40,00	kg	Aço carbono	considerações
	Esmerilhadeira	5,00	kg	Ferro fundido, Al e polipropileno	
	Máquina de corte por plasma	30,00	kg	Aço carbono, inox ou alumínio (Al)	
	Dobradeira	150,00	kg	Aço carbono	
	Prensa	150,00	kg	Aço carbono	
	Calandra	120,00	kg	Aço carbono	
	Máquina de solda	50,00	kg	Principalmente aço carbono e PP	
Saídas	Tipo	Quantidade	Unidade	OBS	Fonte
Produto	Coluna de destilação mista	1,00	unidade	15-30 L/h	Limana Polisserviços
Resíduos sólidos	Retalhos de aço inox	17,00	kg	Armanezados/coletados por empresa credenciada	
	Retalhos de aço carbono	4,50	kg		
	Discos de corte usados	1,30	kg	Reciclagem	
	Vareta de solda usada	1,90	kg		

Quadro 15 - Inventário da produção: coluna de destilação mista.

Com os dados do inventário alocados no SimaPro<sup>®</sup> foi realizada a comparação do processo produtivo dos tipos de colunas usadas, com a escolha do método de avaliação de impacto Eco-Indicador 99.

A Figura 28 apresenta os resultados em termos de categorias de impacto.

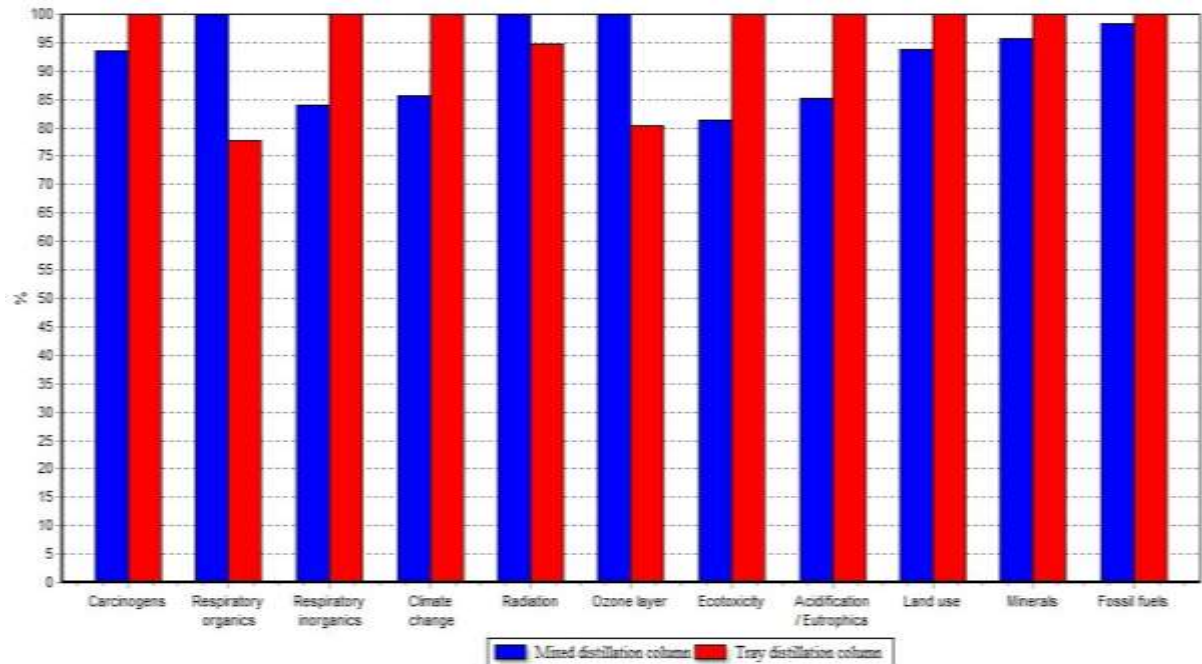


Figura 28 - Avaliação de impactos da produção dos modelos de colunas.

O modelo de coluna de destilação por pratos (*tray distillation column*) apresentou maior porcentagem de contribuição de impacto em 8 das 11 categorias de impacto, ou seja, pode-se concluir que esse tipo de coluna de destilação implica em maiores impactos ao meio ambiente em comparação com a coluna de destilação do tipo mista (*mixed distillation column*).

A Figura 29 corrobora a indicação de se optar pelo uso de uma coluna mista, considerando uma avaliação ambiental. Os resultados são em termos de categorias de danos, a partir da compilação das categorias de impacto (*midpoint*) e avaliando em termos de categorias de danos (*endpoint*) a qual é possível de se obter por meio do SimaPro<sup>®</sup> e com a escolha do método de avaliação de impacto Eco-Indicador 99.

Em todas as categorias de danos a coluna de destilação de pratos apresentou contribuição superior à coluna de destilação mista.

Apesar de que, em ambos os resultados, a diferença de contribuição não é elevada, é pertinente tal estudo e resultado, tendo em vista que pequenas diferenças de produção e uso de materiais podem surtir efeitos positivos e/ou negativos para o meio ambiente, que muitas vezes são desconsiderados em um processo de construção, devido à pequena diferença mássica e/ou energética que apresentam.

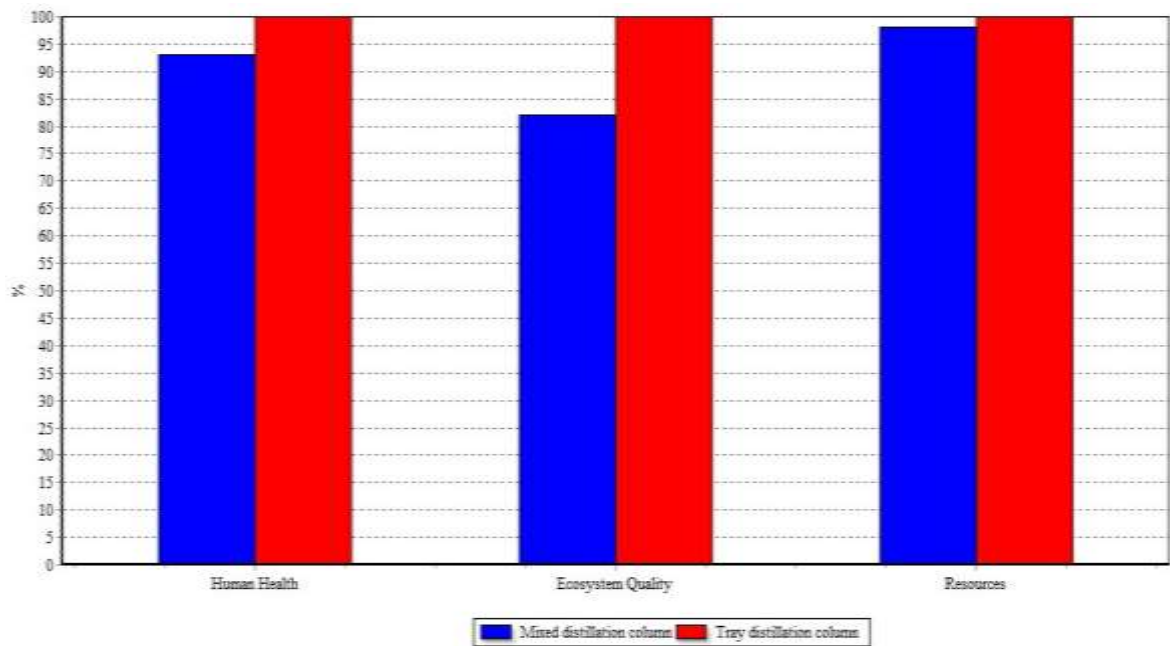


Figura 29 - Avaliação de danos: produção da coluna de destilação tipo prato e tipo mista.

Cabe mencionar que como os fluxos de entrada para construção de ambas as colunas não implicam em demasiada diferença, o tipo de dano recursos (*resources*) foi o que menos apresentou diferença significativa, enquanto que o dano qualidade do ecossistema (*ecosystem quality*) foi o que apresentou maior diferença de porcentagem, evidenciando que o tipo de coluna mista é mais sustentável que o tipo de coluna de pratos.

O uso de polipropileno (PP) para construção da coluna mista implica em menores impactos/danos ao meio ambiente, em detrimento de um maior uso de aço inox para construção da coluna de pratos. Para confecção da coluna de pratos foram usados 285,00 kg de aço inox enquanto que para coluna mista foram usados 225,00 kg, pois há necessidade de confecção de um maior número de pratos teóricos para a coluna do tipo pratos.

O PP foi usado apenas para construção da coluna mista (17,00 kg), mas essa quantidade implicou menos impactos em relação à diferença de 60,00 kg de aço inox a mais, usado para construção da coluna de pratos. Ainda, pelo fato da moldagem/construção de um maior número de pratos, há um maior consumo de energia elétrica para construção da coluna de destilação de pratos.

Tais resultados evidenciam a importância de uma análise qualitativa e quantitativa de um processo, destacando a ACV e a Análise da Eficiência Energética como importantes ferramentas/análises para avaliação e identificação de impactos ambientais e verificação da viabilidade energética de um sistema produtivo, respectivamente.



## 6 CONCLUSÃO

O fato de o RS produzir pouco do etanol que consome está ligado as condições edafoclimáticas que impossibilitam um modelo de agricultura extensiva de cana-de-açúcar e a consequente construção e operação de destilarias de grande porte. No entanto, o RS pode aumentar sua produção a partir da construção e operação de usinas de pequeno porte, as microdestilarias.

Nesse sentido, avaliou-se, em termos ambientais e energéticos, a fabricação de etanol hidratado em pequena escala a partir da análise individual de cada etapa de produção e na análise considerada como global.

Os resultados ambientais obtidos a partir da aplicação da ACV em conjunto com o *software* SimaPro<sup>®</sup> serviram para identificar os principais fluxos contribuintes para impactos ambientais dentro de cada etapa e qual das etapas é responsável por maiores impactos/danos ao meio ambiente, enquanto que os resultados energéticos foram obtidos através da análise da eficiência energética de cada etapa do processo e do processo global.

Como resultados ambientais das etapas individuais pode-se indicar que, na etapa agrícola, os principais fluxos que implicam em impactos ambientais são o uso de fertilizantes ricos em potássio e, em especial, ricos em nitrogênio, seguido do uso de herbicida e calcário.

Na etapa industrial destaca-se o elevado uso de eletricidade devido, principalmente, ao processo ser em batelada com diversas paradas ao longo do processo, necessitando demasiado acionamento de equipamentos altamente energizados, como por exemplo, a moenda. O elevado consumo de eletricidade foi responsável por maiores porcentagens em 4 categorias de impacto, sendo o uso de equipamentos o fluxo de principal contribuição de impactos, com maior porcentagem em 6 categorias de impacto (principalmente pelo uso do ferro fundido na confecção dos equipamentos).

Em termos de entrada e saída de energia, a etapa agrícola apresentou elevada eficiência energética, variando entre 9,98-19,03 unidades de energia, enquanto a etapa industrial apresentou eficiência energética baixa (0,20-0,21 unidades de energia). Tal índice é melhorado se levado em consideração a utilização do bagaço para fins energéticos (0,86-0,87 unidades de energia), ou seja, o bagaço possui uma parcela significativa na avaliação da eficiência energética do processo.

Comparando as etapas como um todo, ambientalmente a etapa industrial apresentou maiores porcentagens de contribuição em 5 das 11 categorias de impacto enquanto que a etapa agrícola apresentou em 3. Em termos de danos ambientais a etapa industrial obteve maior porcentagem em 2 das 3 categorias de danos, corroborando para indicá-la como a etapa de maior potencial poluidor ao meio ambiente. Energeticamente, o processo global apresentou-se ineficiente, com variação entre 0,61-0,69 unidade de energia, o que aumenta para 2,59-2,92 considerando o bagaço obtido da etapa de moagem (ou prensagem) como um produto de saída e não um resíduo. Assim, o processo passaria a ser tornar energeticamente viável.

Naturalmente, há que se considerar o bagaço e o seu conteúdo energético, pois pode ser usado na queima em caldeiras, como alimentação animal ou adubo (podendo desempenhar importante papel de deslocar os insumos químicos).

É possível concluir que, em um processo de produção de etanol hidratado em escala batelada, torna-se necessário o dimensionamento da usina e dos equipamentos de forma a funcionar de acordo com um abastecimento de matéria-prima já definido e garantido, pois dessa forma os equipamentos podem ser dimensionados e operacionalizados de acordo com a capacidade produtiva estabelecida, proporcionando funcionamento de forma otimizada, sem consumo excessivo de energia elétrica e sem ociosidade.

Outra análise desenvolvida nesse estudo foi a análise comparativa do processo construtivo de uma coluna de destilação tipo pratos e uma tipo mista, projetadas para operar em regime contínuo, tendo em vista uma futura transição do processo batelada para o processo contínuo. Assim, a avaliação ambiental se torna uma análise colaborativa em conjunto com outras análises, como a análise econômica, para tomada de decisão na escolha do modelo de coluna de destilação a ser adotado.

Os resultados indicaram a opção pela coluna tipo mista, já que a coluna de destilação tipo pratos apresentou maior contribuição de impacto em 8 das 11 categorias de impacto analisadas. Na avaliação em termos de categorias de danos, a mesma apresentou maior porcentagem de contribuição em todas as 3, apresentando diferença significativa em relação à coluna de destilação tipo mista na categoria de dano qualidade do ecossistema (*ecosystem quality*), ou seja, o processo construtivo de uma coluna tipo pratos causa maiores danos a qualidade do ecossistema do que o processo de construção de uma coluna de destilação tipo mista, portanto, seria menos sustentável.

O estudo e o desenvolvimento de equipamentos menos impactante ao meio ambiente, para uso na etapa industrial, são ações que devem ser tomadas. Isso abre espaço para a

Engenharia de Processos e para a Engenharia Química, fato que foi demonstrado com o desenvolvimento do presente estudo voltado à produção de etanol hidratado em pequena escala, em especial em microdestilarias.

Por fim, a aplicação da técnica de ACV se mostrou eficiente no conhecimento detalhado da produção de etanol hidratado em pequena escala, na identificação dos principais fluxos com maior potencial de impacto/dano em cada etapa do processo, na identificação da etapa do processo de maior impacto/dano, na indicação de equipamentos industriais ambientalmente melhores e no futuro direcionamento das ações para melhorias no processo ao passo que a eficiência energética colaborou para avaliar o real ganho de energia, a importância energética das saídas do processo e o ganho energético a partir da mudança de visão em relação ao bagaço, considerando-o como um co-produto ao invés de um resíduo.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para estudos futuros, necessários e importantes à complementação do apresentado, destacam-se:

- Realizar a ACV e a Análise da Eficiência Energética na produção de etanol hidratado a partir de outras matérias-primas, tais como batata, batata-doce, sorgo sacarino entre outras, visando o mapeamento de todo o processo e identificação dos principais fluxos impactantes ao meio ambiente;
- Comparar a produção de etanol hidratado a partir de cana-de-açúcar com o etanol produzido a partir de outras matérias-primas a fim de identificar qual processo implica em menores impactos/danos ambientais e em maior eficiência energética;
- Avaliar a produção de outros equipamentos industriais tais como a moenda ou sua substituição por outro equipamento/processo mais eficiente, pois pode apresentar significativa importância em termos ambientais e energéticos.
- Analisar a melhor alternativa para utilização do bagaço, em termos ambientais e energéticos, como por exemplo, a sua utilização como adubo, ração animal, queima ou produção de etanol (fermentação em estado sólido) pelo fato da considerável parcela de açúcar que ainda fica presente no bagaço após a moagem (prensagem).

Tais estudos auxiliarão na formação de um inventário do ciclo de vida da produção de etanol hidratado em pequena escala, em termos de diversificação de matéria-prima e processamento industrial.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica no Brasil - Fatores de Conversão**. 16 p. S/ano. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_fatoresdeconversao\\_indice.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2013.

ALBUQUERQUE, F. A.; BELTRÃO, N. E. M.; VALE, D. G. Análise Energética do Algodoeiro na Agricultura Familiar em Diferentes Regiões nos Estados do Ceará e do Mato Grosso do Sul. **Circular Técnica 116**, Campina Grande, p. 1-7, 2007, ISSN 0100-6460.

ALMEIDA, R. **Aula Simapro**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/102313828/Aula-Simapro>>. Acesso em: 14 mai. 2013.

BAIRD, G.; ALCORN, A.; HASLAM, P. The energy embodied in building materials - updated New Zealand coefficients and their significance. **IPENZ Transactions**, vol. 24, p. 46-54, 1997.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). **Relatório Final - Ano Base 2011**. Elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, Brasil, 2012, 282 p.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Bioetanol de Cana-de-Açúcar - Energia para o Desenvolvimento Sustentável**. 1º Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2008, 316 p. (Versão pdf).

BENEDET, G. J. **Avaliação de Incertezas em Inventários de Ciclo de Vida**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BLACK, M. J.; WHITTAKER, C.; HOSSEINI, S. A.; CHAVEZ, R. D.; WOODS, J.; MURPHY, R. J. Life Cycle Assessment and sustainability methodologies for assessing industrial crops, processes and end products. **Industrial Crops and Products**, vol. 34, p. 1332-1339, 2011.

BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305 p.

CABELLO, P. E. *et al.* Tratamento de vinhaça em um reator anaeróbio de leito fluidizado. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v.6, n.1, p. 321-338, 2009.

CALDAS, N. J.; LACERDA, A. I. de.; VELOSO, E.; PASCHOAL, L. C. M. **Internos de Torres**. Editora Interciência, 2º Edição, Rio de Janeiro, 2007. 510 p.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (CEPA). **Detailed California-Modified GREET Pathway for Brazilian Sugar Cane Ethanol**. 2009. Disponível em: <<http://www.calepa.ca.gov/>>. Acesso em: 28 mai. 2013.

CAMPOS, M. G. **Abordagem de Ciclo de Vida na Avaliação de Impactos Ambientais no Processamento Primário Offshore**. 2012. 142 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola Politécnica), Rio de Janeiro, 2012.

CAPAZ, R. S. **Estudo do desempenho energético da produção de Biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso**. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

CASTRO, L. A. S.; EMYGDIO, B. M.; ABRANTES, V. L.; ROCHA, N. E. M. Acessos de bata-doce do banco ativo de germoplasma da Embrapa Clima Temperado, com potencial de produção de biocombustível. **Documentos 258**, Pelotas, p. 1-23, 2008, ISSN 1806-9193.

CAVALETT, O.; JUNQUEIRA, T. L.; DIAS, M. O. S.; JESUS, C. D. F.; MANTELATTO, P. E.; CUNHA, M. P.; FRANCO, H. C. J.; CARDOSO, T. F.; FILHO, R. M.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, vol. 14, p. 399-410, 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA (CENBIO). Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy: State of the art and future challenges. **Bioresource Technology**, vol. 102, p. 437-451, 2011.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos - Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Ed. Qualitymark Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 1998, 104 p.

COBRA, C. Álcool, combustível verde do presente e do futuro. In: MELLO, M. G. (Org.). **Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Ed. UFMG, 2001. Cap. II - A Energia Agrícola, p. 49-58.

COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto-SP**. 1993. 152 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

CONTRERAS, A. M.; ROSA, E.; PÉREZ, M.; LANGENHOVE, H.; DEWULF, J. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. **Journal of Cleaner Production**, vol. 17, p. 772-779, 2009.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Particle Technology and Separation Processes**. Butterworth Heinemann, 5ª Edição, vol. 2002. 1183 p.

DAGNESE, F.; VON ENDE, M.; FERREIRA, G. M. V.; NOGUEIRA, C. U.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; ROSSÉS, G. F. Mapeamento do Processo Produtivo do Etanol de Cana-de-açúcar: Estudo de Caso da Microdestilaria do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. In: Jornada Acadêmica Integrada (JAI), 2012, Santa Maria. **Anais eletrônicos da Jornada Acadêmica Integrada (JAI)**. Disponível em: < <http://portal.ufsm.br/jai/trabalho/arquivo.html?arquivo=5743>>. Acesso em: 29 jul. 2013.

EGESKOG, A.; BERNSDES, G.; FREITAS, F.; GUSTAFSSON, S.; SPAROVEK, G. Integrating bioenergy and food production - A case study of combined ethanol and dairy production in Pontal, Brazil. **Energy for Sustainable Development**, vol. 15, p. 8-16, 2011.

EMMENEGGER, M. F.; STUCKI, M.; HERMLE, S. LCA of energetic biomass utilization: actual projects and new developments - April 23, 2012, Berne, Switzerland. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 17, p. 1142-1147, 2012.

ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATIONS OF THE EUROPEAN PLASTICS MANUFACTURERS. **Polypropylene (PP)**. Disponível em: < <http://www.afvalmanager.nl/epd2.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2013.

FARRELL, A. E; et al. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. **Science**, vol. 311, 2006.

FERRÃO, P. C. **Introdução à gestão ambiental - A avaliação do ciclo de vida de produtos**. Lisboa: IST Press, 1998, 219 p.

FERREIRA, M. M. B. **Avaliação de Ciclo de Vida de uma Central Hidroelétrica**. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; RODRIGUES, G. S.; PIRES, A. C.; ROSA, M. F.; MOTA, F. S. B. Métodos de avaliação do desempenho ambiental de inovações tecnológicas agroindustriais. **Espacios**, vol. 31, p. 13, 2010. Disponível em: <<http://www.revistaespacios.com/a10v31n04/10310441.html>>. Acesso em: 29 mai. 2013.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Editora LTC, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1982. 670 p.

HANAUER, J. G. **Crescimento, Desenvolvimento e Produtividade de Cana-de-Açúcar em cultivo de cana-planta e cana-soca de um ano em Santa Maria, RS**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

HANNON, B. M.; et al. **Energy use for building construction - Supplement**. University of Illinois Urbana-Champaign. 1977.

HEITSCHMIDT, R. K.; SHORT, R. E.; GRINGS, E. E. Ecosystems, sustainability, and animal agriculture. **Journal of Animal Science**, vol. 74, p. 1395-1405, 1996.

HOFFMANN, R. **Análise do desempenho de uma micro-destilaria anexa para a região das encostas basáltica do Rio Grande do Sul**. 1985. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables Information**. 2012, 497 p. Disponível em: <<http://www.iea.org/media/training/presentations/statisticsmarch/RenewablesInformation.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2013.

ISO 14040. **Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework**. 2006, 20 p.

ISO 14042. **Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment**. 2000, 24 p.



ISO 14044. **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. 2006, 54 p.

KLÖPFFER, W. The critical review of life cycle assessment studies according to ISO 14040 and 14044. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 17, p. 1087-1093, 2012.

LEME, R. M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana-de-açúcar**. 2005. 160 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LUO, L.; VOET, E.; HUPPES, G. Life Cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 13, p. 1613-1619, 2009.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L.V.; SILVA, J. E. A. R. **Balço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. Governo do Estado de São Paulo, 2004, 32 p. Disponível em:

<[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDsCDsQF&url=http%3A%2F%2Fwww.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D11168105&ei=rxOnUuv2GIPVkJQfi44CoAw&usq=AFQjCNH3cFbmUTr6JeN1VYqRx0r7LJjqBg&sig2=v\\_dMpEoPNPxCqo1y6okcew&bvm=bv.57799294,d.ee0](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDsCDsQF&url=http%3A%2F%2Fwww.unica.com.br%2Fdownload.php%3FidSecao%3D17%26id%3D11168105&ei=rxOnUuv2GIPVkJQfi44CoAw&usq=AFQjCNH3cFbmUTr6JeN1VYqRx0r7LJjqBg&sig2=v_dMpEoPNPxCqo1y6okcew&bvm=bv.57799294,d.ee0)>. Acesso em: 10 out. 2013.

MACEDO, I. C., SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R.. Greenhouse 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**. vol. 32, p. 582-595, 2008.

MAYER, F. D. **Desenvolvimento da tecnologia de destilação apropriada à produção de álcool combustível em pequena escala**. 2010. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MAYER, F. D.; FERIS, L. A.; MARCÍLIO, N. R.; HOFFMAN, R. Why small-scale fuel ethanol production in Brazil does not take off ?. **Trabalho não publicado**. 44 p., 2013.

MENDONÇA, R. M. L. **Avaliação do Ciclo de Vida do carbono na queima de biodiesel à base de óleo de soja**. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 2012: Ano Base 2011**. 282 p., 2012.

MURPHY, D. J.; HALL, C. A. S. Year in review - EROI or energy return on (energy) invested. **Ecological Economics Reviews**, vol. 1185, p. 102-118, 2010.

NARAYANASWAMY, V.; ALTHAM, W.; BERKEL, van R.; MCGREGOR, M. **Environmental Life Cycle Assessment (LCA) Case Studies for Western Australian Grain Products**. Curtin University of Technology, 2004, 155 p.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica**. 2007. 103 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

NETO, J. D.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a06.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2013.

NOGUEIRA, H. M. C. M. **Análise do potencial produtivo da cana-de-açúcar cultivada na Região Central do Rio Grande do Sul**. 2011. 225 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H. **Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar**. 1987. 164 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.

NOVO, A.; JANSEN, K.; SLINGERLAND, M. The sugarcane-biofuel expansion and dairy farmers' responses in Brazil. **Journal of Rural Studies**, vol. 28, p. 640-649, 2012.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS (NAE). **Biocombustíveis**. Cadernos NAE, Processos estratégicos de longo prazo. Nº 2, 235 p. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/publicacoes/etanol/NAEBiocombustiveis.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2013.

OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z., ROMA, W. N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 14, p. 236-247, 2009.

ORTEGA, E.; WATANABE, M.; CAVALETT, O. A PRODUÇÃO DE ETANOL EM MICRO E MINIDESTILARIAS. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Ed. UNICAMP, 2008. Cap. 14, p. 475-491.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. 2006. 200 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, vol. 24, p. 377-390, 1996.

PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. **Journal of Environmental Management**, vol. 96, p. 43-54, 2012.

PRÉ CONSULTANTS. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 17 mai. 2013.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro 7 - Database Manual - Methods library**. 2010. 57 p. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 6 mai. 2013.

PRÉ CONSULTANTS. **Eco-Indicador 99 - Manual for Designers - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment**. 2000. 49 p. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 15 abr. 2013.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro 7 - Introduction into LCA**. 2010. 88 p. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 6 mai. 2013.

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro 7 - Tutorial**. 2010. 79 p. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 6 mai. 2013.

RAMJEAWON, T. Life Cycle Assessment of Cane-Sugar on the Island Mauritius. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 9, p. 254-260, 2004.

RIBEIRO, F. L. Álcool rural, a solução que vem do alambique. In: MELLO, M. G. (Org.). **Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Ed. UFMG, 2001. Cap. II - A Energia Agrícola, p. 82-91.

ROSSILO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Ed. UNICAMP, 2005. 447 p.

SALLABERRY, R. R. **Emprego da Avaliação do Ciclo de Vida para levantamento dos desempenhos ambientais do biodiesel de girassol e do óleo diesel.** 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, R. E. R. **Análise da viabilidade energética e econômica da produção de etanol em microdestilarias.** 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

SATO, N. **Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers.** Elsevier Science & Technology Books, 2004, 142 p.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** 2008. 298 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, IRRIGAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (SEAGRI). Disponível em: < <http://www.seagri.ba.gov.br/canaac1.htm#pragas>>. Acesso em: 24 jul. 2013.

SOARES, F. U. **Estudo do potencial climático para cana-de-açúcar (*Sacharum ssp.*) no Rio Grande do Sul por meio de geoprocessamento: Estudo de caso no município de Jaguari.** 2008. 75 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida energético de edificações residenciais brasileiras.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TERRA, H. V. **Como construir, montar e operar uma microdestilaria de álcool combustível (etanol) de capacidade de 100 litros/dia.** S/ ano. Disponível em: <[www.canabrazil.com.br/cachaca-alcool-rapadura-biblioteca/doc\\_download/74-como-construir-montar-e-operar-uma-microdestilaria-de-alcool-combustivel-etanol+%26cd=1%26hl=pt-PT%26ct=clnk%26gl=br](http://www.canabrazil.com.br/cachaca-alcool-rapadura-biblioteca/doc_download/74-como-construir-montar-e-operar-uma-microdestilaria-de-alcool-combustivel-etanol+%26cd=1%26hl=pt-PT%26ct=clnk%26gl=br)>. Acesso em: 10 out. 2013.

TREYBAL, R. E. **Operaciones de transferencia de massa.** Ed. McGraw-Hill. 2º Edição, 1968.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 10 out. 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Disponível em:  
< <http://www.unica.com.br/faq/>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Life Cycle Initiative**. Disponível em: < <http://www.lifecycleinitiative.org/>>. Acesso em: 27 mai. 2013.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP) - Rede de Formação Docente (REDEFOR). **A Lei De Lavoisier**. Disponível em:  
<[http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/41532/6/2ed\\_qui\\_m4d8\\_tm01\\_box3.pdf](http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/41532/6/2ed_qui_m4d8_tm01_box3.pdf)>. Acesso em: 15 mai. 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Avaliação da Viabilidade da Produção de Álcool a Partir de Cana-de-açúcar e Mandioca em Pequenas Unidades Camponesas de Produção**. 4º Relatório Parcial, Santa Maria, 2010, 6p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, 2006, 88 p.

VIANA, M. M. **Inventário do Ciclo de Vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**. 2008. 237 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

WEIDEMA, B. P.; MEEUSEN, M. J. G. **Agricultural data for life cycle assessments**. Agricultural Economics Research Institute (LEI), The Hague. Report 2.00.01, ISBN 90-5242-563-9; Price NLG.120, v. 1, 2000, 195 p. Disponível em: < <http://www.imamu.edu.sa/topics/IT/IT%206/Agricultural%20data%20for%20Life%20Cycle%20Assessments.pdf> >. Acesso em: 22 set. 2013.

WILTING, H. C. **An energy perspective on economic activities**. 1996. 203 p. Tese. Disponível em: <<http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/1996/h.c.wilting/>> Acesso em: 22 ago. de 2013.

## APÊNDICES

### **Apêndice A - Produção de etanol, em grande escala, a partir da cana-de-açúcar**

O Brasil é reconhecido e elogiado mundialmente pelo forte componente renovável de sua matriz energética. Hoje, mais de 47% de toda a energia utilizada no país vem de fontes renováveis. O setor sucroenergético tem papel chave nesse quadro: a cana-de-açúcar, matéria-prima para a produção de etanol e bioeletricidade, é a segunda maior fonte de energia do país, respondendo por 18% de toda a energia consumida pelo Brasil (UNICA, 2013).

O etanol pode ser produzido pela fermentação de açúcares naturais (como a cana-de-açúcar e beterraba), amido (milho e trigo) ou da biomassa celulósica (palha de milho e bagaço da cana-de-açúcar), sendo, no Brasil, a cana-de-açúcar a principal matéria-prima para produção de etanol, possuindo grande importância energética e econômica.

Segundo UNICA (2013), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. O país produz mais de 490 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano (safra 2011/2012). O Brasil é também o primeiro produtor mundial de açúcar, responsável por 25% da produção mundial e 50% das exportações mundiais e o segundo produtor mundial de etanol, sendo responsável por 20% da produção mundial e 20% das exportações mundiais.

No que diz respeito às regiões de produção, nas regiões Centro-Sul e Nordeste dominam a produção em grande escala, alicerçadas por condições edafoclimáticas propícias e fatores culturais/coloniais. Esse modelo de organização está associado à enorme dimensão territorial do país, à grande disponibilidade de terras férteis e aptas para o cultivo da cana-de-açúcar e à tradição agrária do país, focando na produção de açúcar, álcool e cogeração de energia elétrica.

Na Figura A.1 é mostrado, de forma esquemática, os produtos e subprodutos obtidos a partir da cana-de-açúcar.

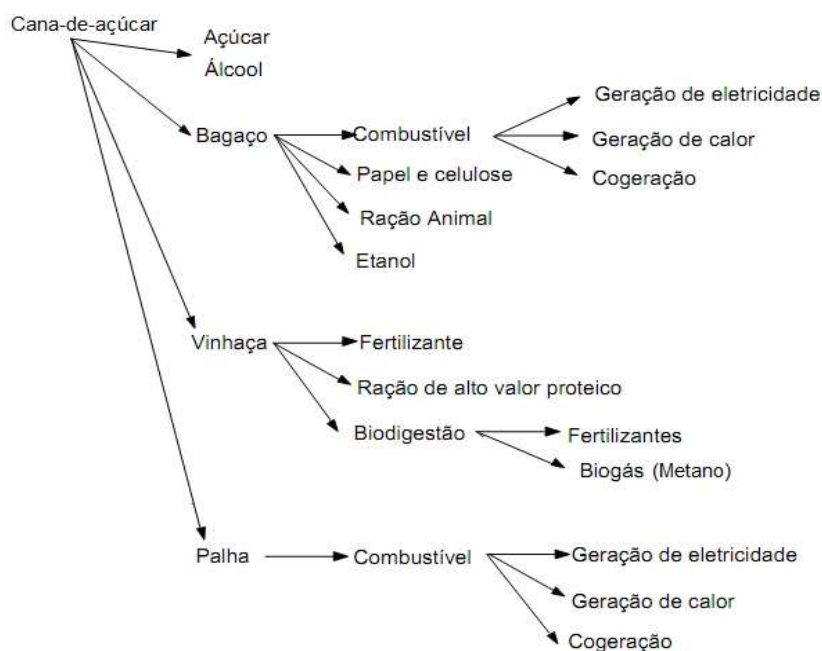


Figura A.1 - Cana-de-açúcar: produtos e subprodutos.

Fonte: Adaptado de Santos (2011).

Apesar de o Rio Grande do Sul apresentar uma inexpressiva contribuição na produção de etanol, devido à produção estadual estar radicada na agricultura familiar, em função das atividades em pequenas e médias propriedades e direcionada à alimentação do gado e ao processamento artesanal, o estado gaúcho parece despertar para a possibilidade de aumento do cultivo da cana-de-açúcar em suas pequenas e médias propriedades. Investimentos em destilarias como a Cooperativa dos Produtores de Cana de Porto Xavier (Coopercana) é um exemplo claro.

Atualmente, toda a produção de etanol do Estado emprega como matéria-prima a cana-de-açúcar onde, erroneamente, desconsiderou-se o potencial produtivo do RS. Mas, a partir do último zoneamento climático para a cana-de-açúcar, ratificou-se que o RS possui áreas propícias ao cultivo, o que estimula a produção de cana-de-açúcar para fins energéticos (etanol), também incentivado pelo projeto “Desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar para o RS - Foco na produção de álcool”, convênio FINEP: 01.09.039.00, onde busca-se ampliar o espaço da cana-de-açúcar, investindo na melhora e ampliação dos cultivos, direcionando-os à produção de álcool (SOARES, 2008).

Para que a produção de etanol no Rio Grande do Sul tenha êxito, ela deve respeitar as condições fundiárias e edafoclimáticas existentes, conduzindo assim à produção em pequena

escala, em mini ou microdestilarias (MAYER, 2010). Segundo Hoffmann (1985) as destilarias são classificadas como “macro” quando sua produção (litros por dia) é maior que 60 mil, “mini” quando a capacidade produtiva é maior que 5 mil e menor que 60 mil e “micro” quando sua capacidade produtiva é menor que 5 mil litros de etanol por dia.

Usinas de grande porte dependeriam demasiadamente de matéria-prima, o que torna o Estado deficitário e incapaz de atender a demanda de uma grande usina, no entanto, “mini” ou microdestilarias podem ter um futuro promissor no RS.

A transformação da cana-de-açúcar em álcool etílico (etanol), tanto em grandes usinas como em microdestilarias, se dá através de um trabalho conjunto entre as áreas agrícolas e industriais, as quais são igualmente importantes para uma produção eficaz de etanol.

## ETAPA AGRÍCOLA

A cana-de-açúcar cultivada para a produção de açúcar e álcool se dá por meio do sistema de rebrotamento, no qual o primeiro corte é feito 18 meses após o plantio e os demais anualmente por um período de 4 a 5 anos, com redução gradual do rendimento, especifica Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005).

Para a produção da cana-de-açúcar, fatores como plantio, cultivo e colheita, clima, água, tipo e preparo do solo, aplicação de insumos, controle de doenças e pragas e tipo de colheita devem ser analisados.

### Clima, Água e Solo

O melhor tipo de clima para o cultivo da cana-de-açúcar é aquele que apresenta duas estações distintas, sendo a primeira quente e úmida para proporcionar a germinação e desenvolvimento da cultura e a segunda fria e seca para promover a maturação e o acúmulo de açúcar nos colmos (CENBIO, 2013).

A disponibilidade de água é importante, pois está relacionada com a produtividade da cana-de-açúcar, variando a quantidade de água de acordo com o estado vegetativo em que se encontra e também do cultivar utilizado.



Já, os solos ideais para cultivo da cana-de-açúcar são os profundos, pesados, bem estruturados, férteis e com boa capacidade de retenção.

### Preparo do solo

Segundo Cenbio (2013), consideram-se duas situações. São elas:

- Implantação da cana-de-açúcar pela primeira vez: necessidade de aração profunda visando à destruição, incorporação e decomposição dos restos culturais existentes. Após, realização de gradagem e, em solos compactados, operação de subsolagem para romper a camada adensada. Na véspera do plantio deve ser realizada nova gradagem para melhor preparo do terreno e eliminação de ervas daninhas.
- Terreno ocupado pela cana-de-açúcar: inicialmente realiza-se a destruição da soqueira, logo após a colheita, através de uma operação de aração rasa seguida de gradagem ou uma gradagem profunda. Em solos compactados deve ser feita uma subsolagem.

Nas vésperas do plantio é realizada uma aração profunda seguida de gradagem para manter o terreno apto ao plantio.

### Calagem (Aplicação de calcário)

Necessária quando a acidez do solo indicar pH menor que 5,5. O calcário deve ser aplicado o mais uniforme possível sobre o solo, na época que vai desde o último corte da cana-de-açúcar, entre uma aragem e uma gradagem de preparo do terreno (LIMA e MARCONDES, 2002 apud VIANA, 2008).

Recomenda-se para esta prática a aplicação de aproximadamente 5 kg de calcário para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida, segundo Leme (2005).

### Adubação

A adubação para a cana-de-açúcar planta deve ser feita no fundo do sulco de plantio, após a sua abertura, já a adubação em relação à cana-de-açúcar soca deve ser feita misturada com a terra até a profundidade de 15 centímetros (CENBIO, 2013).

A Tabela A.1 apresenta os tipos de fertilizantes e sua quantidade aplicada, média, no cultivo de 1.000 kg de cana-de-açúcar.

Tabela A.1 - Necessidade média de aplicação de fertilizantes na produção de 1.000 kg de cana-de-açúcar.

Fertilizante	Unidade	Quantidade para 1.000 kg de cana-de-açúcar
N	kg	0,901
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	kg	0,128
K <sub>2</sub> O	kg	0,205

Fonte: Almeida, Marzullo e Martins (2007 apud VIANA, 2008).

### Semeadura

Na região Centro-Sul, existem duas épocas de semeadura, setembro a outubro e janeiro a março. A primeira é menos recomendada pelo menor rendimento devido a maior incidência de pragas, ervas daninha e assoreamento de sulcos.

Na semeadura, o processo mais recomendado é o sulcamento, sendo que o espaçamento entre os sulcos é de 1,4 metros e a profundidade varia de 20 a 25 centímetros.

São necessárias de 6 a 8 toneladas de mudas por hectare (CENBIO, 2013).

### Controle de plantas invasoras

Pode ser realizado através da capina manual, cultivo mecânico e/ou o uso de herbicidas.

O período crítico em relação à presença dessas plantas se estende desde a emergência das plantas até 90 dias de idade. Nesse período, o controle mais eficiente das erva é o químico, através da aplicação de herbicidas, sendo a quantidade estimada por Almeida, Marzullo e Martins (2007) apud Viana (2008) fica em torno de 1,85 kg/ha.

O controle manual e mecânico são feitos após a cultura já instalada e geralmente após o controle mecânico ocorre uma capina manual para completar o processo.

### Irrigação

Segundo Neto *et al.* (2006), a cultura da cana-de-açúcar requer um período de crescimento vegetativo com condições de temperatura e disponibilidade hídrica adequadas, que são indispensáveis para a formação da sacarose.

Segundo Leme (2005) a necessidade do uso de água na irrigação da cultura de cana-de-açúcar é desprezível, principalmente na região Centro-Sul, em virtude do uso da vinhaça na fertirrigação e da irrigação natural promovida pela chuva.

#### Controle de doenças e pragas

O melhor controle para doenças e pragas ocorre por meio da utilização de variedades de cana-de-açúcar resistentes, já desenvolvidas por institutos de pesquisa, segundo SEAGRI (2013). Em relação às pragas, a cana-de-açúcar é atacada por cerca de 80 espécies, mas apenas um pequeno número causa prejuízos à cultura, como os nematoides, cupins e besouros.

A utilização de inseticidas organofosforados tem levado a um promissor controle dessas pragas, relata Almeida, Marzullo e Martins (2007) apud Viana (2008).

#### Colheita e Transporte da cana-de-açúcar

A produção de açúcar e álcool é dependente da quantidade de cana-de-açúcar produzida e da sua riqueza em sacarose. Assim sendo, na colheita, é necessário que ela esteja em seu melhor estágio de maturação.

A cana-de-açúcar pode ser colhida crua ou queimada, de forma mecanizada ou manual. O corte mecanizado envolve o uso de colheitadeiras que podem fazer o corte da cana-de-açúcar inteira ou picada.

Já, o corte manual é o mais empregado no Brasil e nele o corte é precedido da queima da palhada da planta, no entanto, acredita-se que, em grande escala, haverá substituição do corte manual tendo em vista o acentuado crescimento do corte mecanizado. Apesar da queima não prejudicar a planta e diminuir os riscos de acidentes em virtude da eliminação das folhas cortantes, ela possui empecilhos como a geração de poluentes atmosféricos como dióxido de carbono e material particulado, que causam impactos na saúde e no conforto humano.

Além disso, os resíduos da cana-de-açúcar (palhada) que poderiam ser utilizados são perdidos no processo da queima (ROSILLO-CALLE, BAJAY e ROTHMAN, 2005). A palha representa aproximadamente 25 % a 30 % da energia total da planta.

Logo após o corte, a cana-de-açúcar é transportada para a indústria através de veículos especializados projetados para este trabalho como, por exemplo, caminhões tracionados por tratores.



### Descarregamento, Pesagem e Lavagem da cana-de-açúcar

A matéria-prima é descarregada através de sistemas receptores munidos com equipamentos como guindastes. Após é pesada e lavada para controle agrícola e retirada de impurezas como terra e areia, respectivamente.

Então, segue para picadores e desfibradores que destroem a estrutura da cana-de-açúcar, dando um ganho significativo na extração do caldo. No caso da colheita mecanizada, o produto já pode vir picado (o que impede seu armazenamento por período longo, diferentemente da cana-de-açúcar não picada).

### Extração e Purificação do caldo

Objetivando a retirada da maior quantidade possível de açúcar, a extração se dá por moagem e/ou difusão.

No Brasil, esta operação se dá quase que exclusivamente por moagem, consistindo na compressão da cana-de-açúcar entre rolos compressores, submetidos a uma determinada rotação. Deste processo são obtidos o caldo e o bagaço, sendo que para cada tonelada de cana-de-açúcar processada são gerados entre 240 a 280 kg de bagaço (LEME, 2005).

O teor energético do bagaço é aproximadamente 30 % a 40 % da energia total da planta.

Em seguida é iniciada a purificação do caldo através do peneiramento (remoção de material em suspensão). Após, o caldo passa pela pasteurização na qual é submetido a rápidos aquecimentos e resfriamentos seguido da adição de cal, aquecimento e decantação.

Nesse processo ocorre a geração da torta de filtro (material sólido e quente) que, geralmente, retorna aos campos como fertilizante (fonte de potássio), segundo Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005).

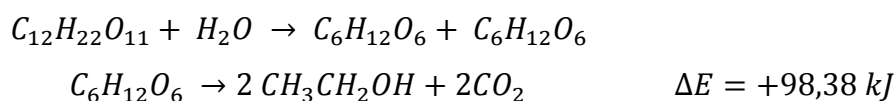
### Geração de energia

O bagaço oriundo da moagem é usado como combustível em caldeiras para geração de vapor, sendo parte deste é usado para acionamento de turbo gerador para produção de energia elétrica e parte é usada em equipamento do processo. Muitas usinas possuem um excedente de energia, o que as permite vender para a rede de distribuição de eletricidade.

### Produção de álcool

O álcool é obtido por meio de processo bioquímico que ocorre através da fermentação alcoólica do caldo extraído. Antes de passar para a etapa de fermentação o caldo é pré-diluído até atingir uma concentração e pH ideal, sendo a partir desse momento chamado de mosto.

A fermentação ocorre em tanques onde são misturados o mosto e a levedura acidificada na proporção 2:1. O açúcar é transformado em álcool de acordo com a reação simplificada de Gay-Lussac:



Durante a reação, a solução é aquecida ocorrendo intensa liberação de  $CO_2$ , sendo que ao final de 4 a 12 horas todo o açúcar será consumido formando um produto resultante chamado de vinho. Devido à liberação de calor, há necessidade do controle de temperatura (em torno de 32 °C) por meio do resfriamento do vinho através do uso de água.

Após, o vinho é levado às centrífugas para recuperação das leveduras que são levadas aos tanques de tratamento. A fase menos densa da centrifugação (vinho sem leveduras) é levada às colunas de destilação (ROSILLO-CALLE, BAJAY E ROTHMAN, 2005).

A fermentação ideal ocorre com o caldo de cana em uma concentração de açúcares em torno de 14° Brix. Normalmente o caldo apresenta uma concentração de açúcares de 14° a 22° Brix.

Acima de 14° Brix é necessário diluir o caldo para garantir a estabilidade do fermento ao longo de todo o processo de fabricação. Teores de açúcar acima de 15° Brix acarretam fermentações mais lentas e frequentemente incompletas, além de dificultarem a multiplicação do fermento.

Quando se destila um mosto com fermentação incompleta ocorrem perdas no rendimento da produção. Teores abaixo de 14° Brix permitem fermentações mais rápidas, sendo importantes na etapa de multiplicação do fermento, entretanto acarretam uma diminuição no rendimento.

Depois de fermentado, o vinho possui teor alcoólico médio na ordem de 7° a 10° GL (% em volume). Na destilação, o produto de topo é o álcool hidratado (~96° GL) e o produto de fundo é a vinhaça também denominada de vinhoto.

O álcool hidratado pode ser desidratado gerando o etanol anidro (~99,3° GL) através de uma destilação azeotrópica. Após, os álcoois produzidos são enviados para armazenagem.

Como subproduto da produção é formado o óleo fúsel, que é usado como matéria-prima para produção de solventes, vernizes, fixador em perfumaria, etc. Seu volume pode variar de 0,8% a 1% da produção de álcool.

Também é gerada grande quantidade de efluentes líquidos como águas de lavagem, além da vinhaça. As águas de lavagem são geradas em um volume de cerca de dez vezes o volume gerado de vinhaça, mas o poder poluente da vinhaça é muito maior devido sua alta DBO<sub>5</sub> (LIMA e MARCONDES, 2002 apud VIANA, 2008). É gerado, em média, de 13 litros de vinhaça por litro de álcool produzido, segundo Cabello *et al.* (2009).

As melhores tecnologias de aproveitamento do vinhoto, segundo Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005), são:

- Fertirrigação = método mais comum empregado no Brasil, sendo seu custo inicial baixo.
- Biodigestão = degradação do vinhoto para geração de biogás.
- Ração animal = usado para alimentação de animais, principalmente gado de corte.
- Produção de fungos = alternativa ainda em fase de estudos visando à produção de produtos de grande valor.
- Material de construção = usado na construção de tijolos, sendo ainda em fase de estudos.
- Incineração = na prática, não correspondeu às expectativas.

Na maioria das vezes a vinhaça é aplicada sob o solo como forma de adubo promovendo melhoria na fertilidade do solo, todavia, a quantidade e volume aplicado devem ser dosados de acordo com as características do solo uma vez que podem ocorrer alterações na composição química do mesmo e a lixiviação de vários íons como o nitrato e o potássio, acarretando impactos nas águas subterrâneas.

## Apêndice B - Eficiência Energética

O balanço energético visa estabelecer os fluxos de energia, refletido pelo ganho líquido e pela relação saída/entrada. As estimativas dos balanços de energia e de eficiência energética são importantes instrumentos no monitoramento da agricultura ante o uso de fontes de energia não renováveis (ALBUQUERQUE *et al.*, 2007).

Englobando a fase industrial, o estudo amplia a análise do processo de modo a avaliar o produto durante boa parte de seu ciclo de vida, introduzindo maior confiabilidade aos resultados. Essa eficiência vai determinar se o sistema produtivo está contribuindo positivamente, ou seja, se é produzida mais energia do que é consumida.

A eficiência medida pelo balanço de energia ou pela relação *output/input* é conduzida determinando-se a quantidade de energia obtida na forma de produto em relação à energia cultural utilizada no sistema para produzi-lo, segundo Heitschmidt *et al.* (1996).

Nesse processo identificam-se e quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que serão transformados em unidades de energia. A saída de energia é determinada pela conversão direta do rendimento mássico de produtos em energia (cal ou J), enquanto que a entrada de energia é determinada através da quantificação energética de todas as operações e insumos que são aplicados para produção.

A importância da análise do balanço energético é fornecer informações necessárias para mensurar, interpretar e subsidiar a tomada de decisões (COMITRE, 1993).

Segundo Patterson (1996), podem ser detectados quatro grupos mais influentes de indicadores de eficiência energética:

1. Termodinâmico;
2. Físico-termodinâmico;
3. Econômico-termodinâmico;
4. Econômico.

O primeiro refere-se às análises segundo as leis da termodinâmica, da eficiência da transformação de uma forma de energia em outra (eficiência energética); o segundo avalia os insumos energéticos necessários para produzir um determinado bem ou serviço e nesse caso, a energia que entra no sistema é mensurada em unidades termodinâmicas convencionais e a energia que sai do sistema em unidades; o terceiro é um indicador híbrido no qual o produto do processo é mensurado a preços de mercado e a energia que entra por unidades termodinâmicas convencionais e o quarto indicador mede as mudanças na eficiência



energética, puramente, em valores monetários tanto da energia que entra, quanto da que sai do sistema.

Será utilizado apenas o indicador físico-termodinâmico, pois é que está de acordo com o objetivo do estudo, tendo a vantagem de, usando medidas físicas e termodinâmicas, poderem mensurar objetivamente qual o consumo requerido atualmente pelo uso final.

Por ter a possibilidade de contabilizar o produto final em quantidades físicas, estes podem ser prontamente comparados e analisados em séries temporais, ainda que sua medida de eficiência energética não seja tão direta quanto parece, devido a ligação produtiva. A dificuldade esta na localização e análises das diferentes entradas e saídas de energia na indústria, para cada linha de produto.

A equação para o cálculo da eficiência energética (E.E) foi adaptada de Macedo *et al.* (2008):

$$E.E = \left( \frac{\sum \text{Energia gerada}}{\sum \text{Energia introduzida}} \right)$$

Onde:

*Energia gerada* = representa a energia final contida no(s) produto(s), onde se pode considerar também os co-produto(s) do processo.

*Energia fóssil introduzida* = representa a energia de entrada (no caso, as entradas no sistema de produção).

A Análise da Eficiência Energética é também conhecida como o retorno de energia sobre a energia investida ou EROEI (*Energy Returned On Energy Invested*), sendo a razão entre a quantidade de energia utilizável adquirida a partir de uma fonte de energia especial para a quantidade de energia gasta para obter esse recurso energético, conforme Murphy & Hall (2010). Quando o EROEI de um recurso é inferior a um, a fonte de energia não produz energia excedente consumindo mais energia do que a produzindo. Quando for igual a um, a produção de energia é nula, ou seja, não se consome mais energia do que se produz e tampouco se produz excedente energético.

### Apêndice C - Índices mássicos para a etapa agrícola

Entrada	Tipo	Quantidade	Unidade	Fonte	Média	Total	Média final
Fertilizantes	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	170,00	kg/ha	Nogueira (2011)	157,50	-	-
	K <sub>2</sub> O	220,00	kg/ha		227,50		
	N	100,00	kg/ha		120,00		
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	145,00	kg/ha	Seabra (2008)	Valores usados		
	K <sub>2</sub> O	235,00	kg/ha				
	N	140,00	kg/ha				
Calcário Dolomítico	CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub>	3.500,00	kg/ha	Nogueira (2011)	2.866,67	2.866,67	2.866,67
		3.200,00	kg/ha	Entrevista no Departamento de Fitotecnia da UFSM			
		1.900,00	kg/ha	Seabra (2008)			
Herbicida	Diuron Nortox 500 SC	2,34	kg/ha	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	3,25	3,25	3,25
	Paraquat	5,20	kg/ha	Entrevista no Departamento de Fitotecnia da UFSM			
	Geral	2,20	kg/ha	Seabra (2008); BNDES e CGEE (2008)			
Inseticida	Orthene e Engeo Pleno	0,47	kg/ha	Manual de alicação do produto	0,30	0,30	0,30
	Geral	0,12	kg/ha	Seabra (2008); BNDES e CGEE (2008)			
Água	C/ herbicida	300,00	L/ha	Manual de aplicação do produto	-	550,00	550,00
	C/ inseticida	250,00	L/ha		-		
Equipamentos	1 Trator Valmet 65id (Ano 76)	3.000,00	kg	Manual do maquinário (60% Ferro fundido , 1% PEAD e 39 % Aço 1020 a 1070)	-	3.000,00	3.000,00
	1 Sulcador	200,00	kg	Entrevista no Departamento de máquinas da UFSM (100 % Ferro fundido)	-	200,00	200,00
Diesel	Óleo diesel	1	ha/4h	Entrevista no Departamento de máquinas da UFSM (20 L/ha)	20,00	20,00	20,00
		5	L/h				
Mudas de cana	Mudas Cana-de-açúcar	12.000,00	kg/ha	Santos (2011)	12.000,00	12.000,00	12.000,00
Mão-de-obra	Cultivo	6,00	h/dia	Estimado, com base na produção local, por ano	-	-	1.651,76
	Colheita manual	8,00	h/dia				4 homens
Energia Solar	Contabilizado apenas em termos de energia						

\*Dados compilados pelo autor.

Quadro C.1: Índices mássicos utilizados para quantificação dos fluxos da etapa agrícola.

### Apêndice D - Índices energéticos para a etapa agrícola

Entrada	Fator energético	Unidade	Fonte	Fator energético (MJ/kg)	Média final
N	56,50	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	56,50	59,02
	14700,00	kcal/kg	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	61,53	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	9,50	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	9,50	9,56
	2300,00	kcal/kg	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	9,63	
K <sub>2</sub> O	7,50	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	7,50	7,10
	1600,00	kcal/kg	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	6,70	
Calcário Dolomítico	1,00	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	1,00	1,16
	315,00	kcal/kg	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	1,32	
Herbicida	308,30	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	308,30	288,71
	64290,00	kcal/kg	Pimentel (1980) apud Santos (2011)	269,12	
Inseticida	305,50	MJ/kg	Farrell et al. (2006)	305,50	305,50
Água	4,18	J/kg	Assumido	0,00000418	0,00000418
Mão-de-obra	8,00	MJ/TC	Nogueira (1987); Macedo et al. (2004)	0,00800	1,81
	2,28	MJ/h	Braga (2008) apud Capaz (2009)	2,28	
	321,00	kcal/h	Santos (2011)	1,34	
1 Trator (EM)	49,50	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	49,50	61,83
1 Trator (EF)	13,80	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	13,80	
1 Trator (ER/=EM+EF)	0,30	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	0,30	
Tratores	14350	kcal/kg	-	60,07	
1 Sulcador (EM)	62,80	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	62,80	71,71
1 Sulcador (EF)	8,60	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	8,60	
1 Sulcador (ER/=EM+EF)	0,31	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	0,31	
Diesel	47,80	MJ/L	Macedo et al. (2004)		47,80
Mudas de cana	3% do total	-	Macedo et al (2004)	-	3% do total
Energia Solar	16,50	GJ/ha	Pimentel e Patzek (2007) apud Capaz (2009)	16500	16500

\*Dados compilados pelo autor.

Quadro D.1: Índices energéticos utilizados para quantificação dos fluxos da etapa agrícola.

### Apêndice E - Índices mássicos e energéticos para a etapa de transporte

<b>Entrada</b>	<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Equipamento	1 Trator	3.018,00	kg	Manual do maquinário
Equipamento	1 Reboque	1.750,00	kg	Entrevista com Engenheiro Agrícola
Diesel	-	276,50	L	Estimado <sup>1</sup>
Cana-de-açúcar	-	849.557,52	kg	Tabela 4

<sup>1</sup> Assumindo distância média de 2 km do canal até a microdestilaria; consumo médio do trator de 0,45 L/km; gasto de 5% mais de diesel com reboque carregado. Mão-de-obra está contabilizada na etapa agrícola.

Quadro E.1: Índices mássicos utilizados para quantificação dos fluxos da etapa de transporte.

<b>Entrada</b>	<b>Fator Energético</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
1 Trator	61,83	MJ/kg	Apêndice D
1 Reboque	71,71	MJ/kg	Apêndice D <sup>1</sup>
Diesel	47,80	MJ/L	Apêndice D
Cana-de-açúcar	4,43	MJ/kg	-

<sup>1</sup> Mesmo que o sulcador (ou seja, para equipamentos agrícolas em geral).

Quadro E.2: Índices energéticos utilizados para quantificação dos fluxos da etapa de transporte.

## Apêndice F - Índices energéticos para a etapa industrial

Entrada	Fator energético	Unidade	Fonte	Fator energético final	Unidade
Energia elétrica	3.600.000,00	J/kwh	Atlas de energia elétrica - ANEEL (s/ ano)	3.600.000,00	J/kwh
Água	0,004184	MJ/kg	Calor específico da água	0,004184	MJ/kg
Lenha	12,98	MJ/kg	BEN (2012)	12,98	MJ/kg
Insumos	1,39	MJ/kg	Média dos valores dos insumos citados por Macedo et al.( 2004)	1,39	MJ/kg
Moenda (EF + EM)	104,20	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	108,37	MJ/kg
Moenda (ER = 4%)	4,17	MJ/kg			
Tanque decantador (EF+EM)	73,40	MJ/kg	Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers (2008)	73,40	MJ/kg
Tanque decantador (ER = 4%)	0,00	MJ/kg			
Bomba centrífuga (EF+EM)	104,20	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	108,37	MJ/kg
Bomba centrífuga (ER=4%)	4,17	MJ/kg			
Dornas fermentação (EF+EM)	73,40	MJ/kg	Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers (2008)	73,40	MJ/kg
Dornas fermentação (ER = 4%)	0,00	MJ/kg			
Tanque armazenagem (EF+EM)	73,40	MJ/kg	Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers (2008)	73,40	MJ/kg
Tanque armazenagem (ER = 4%)	0,00	MJ/kg			
Tanque armazenagem (EF+EM)	73,40	MJ/kg	Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers (2008)	73,40	MJ/kg
Tanque armazenagem (ER = 4%)	0,00	MJ/kg			
Destilador (EF+EM)	109,70	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	104,91	MJ/kg
	22.000,00	kcal/kg	Nogueira (1987)		
Destilador (ER = 4%)	4,39	MJ/kg	Macedo et al. (2004)		
	880,00	kcal/kg	Nogueira (1987)		
Tanque armazenagem (EF+EM)	73,40	MJ/kg	Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers (2008)	73,40	MJ/kg
Tanque armazenagem (ER = 4%)	0,00	MJ/kg			
Caldeira (EF+EM)	130,00	MJ/kg	Macedo et al. (2004)	135,20	MJ/kg
Caldeira (ER = 4%)	5,20	MJ/kg			
Mão-de-obra	1,81	MJ/h	Mesmo da etapa agrícola	1,81	MJ/h
Construção predial	2.700.000,00	kcal/m²	Hannon et al. (1977)	6.548,40	MJ/m²
	1.800,00	MJ/m²	Tavares (2006)		

\* Dados compilados pelo autor.

Quadro F.1: Índices energéticos utilizados para quantificação dos fluxos da etapa industrial.

## Apêndice G - Equipamentos da microdestilaria



(1)

Figura G.1 - Moenda de um terno.



(2)

Figura G.2 - Dornas de fermentação e Tanque de armazenamento.



(3)

Figura G.3 - Condensadores do sistema de destilação contínuo por pratos ou bandejas.

**Apêndice G - continuação**

(4)

Figura G.4 - Coluna de destilação em batelada.  
Microdestilaria do Colégio Politécnico da UFSM.



(5)

Figura G.5 - Coluna de destilação contínua tipo pratos ou bandejas.  
Microdestilaria do Colégio Politécnico da UFSM.



## Apêndice G - continuação



(6)

Figura G.6 - Coluna de destilação tipo mista.

Laboratório do prédio da Pós-Graduação em Engenharia de Processos (PPGEPro) - UFSM.



## ANEXOS

### ANEXO 1 - Caldeira vertical para queima de lenha (série GVL), Óleo diesel (série GVO) ou gás (série GVG)

Esta série de caldeiras é ideal para pequenos espaços, sendo especialmente utilizada em lavanderias, vulcanizadoras, laticínios e outras aplicações onde o espaço físico a ser ocupado pela caldeira é bastante reduzido.

São caldeiras de uma passagem de gases, efetuado na vertical e, sua fornalha é totalmente imersa na água, proporcionando vida útil elevada para a caldeira.

No caso das caldeiras para lenha (GVL), a combustão ocorre sobre grelhas de ferro fundido especial, admitindo o ar de combustão pela porta do cinzeiro. No caso das caldeiras para diesel (GVO) ou para gás (GVG) é utilizado queimador do tipo “*jet burner*”, ou seja, com ventilador incorporado para fornecer o ar de combustão.

As caldeiras são construídas em chapas de aço carbono ASTM 285-C e tubos ASTM 178-A, calculadas segundo a norma ASME e, soldados por soldadores qualificados.

Na Figura 1.A, é apresentado o layout da caldeira adotada para estudo, enquanto que no Quadro 1.A são disponibilizadas as especificações técnicas da caldeira.

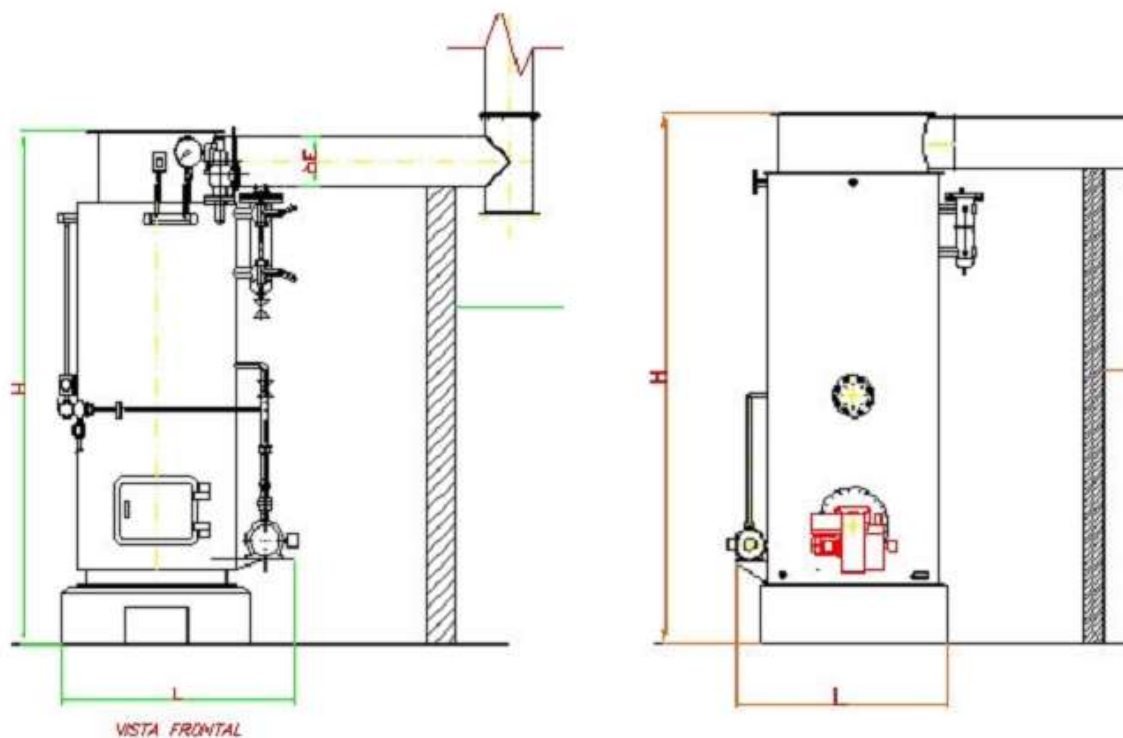


Figura 1.A - Layout da caldeira da série GVL, GVO e GVG.

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

LENHA			ÓLEO DIESEL			GÁS GLP OU NATURAL			
Modelo	Capacidade kg/h	Consumo m <sup>3</sup> /h	Modelo	Capacidade kg/h	Consumo l/h	Modelo	Capacidade kg/h	Consumo	
								GLP kg/h	Natural Nm <sup>3</sup> /h
GVL3/8	48	0,03	GVO3/8	72	6,60	GVG3/8	72	4,99	6,21
GVL6/8	96	0,06	GVO6/8	144	13,20	GVG6/8	144	9,98	12,42
GVL10/8	160	0,09	GVO10/8	240	22,00	GVG10/8	240	16,63	20,69
GVL15/8	240	0,14	GVO15/8	360	33,00	GVG15/8	360	24,94	31,04
GVL20/8	320	0,18	GVO20/8	480	44,00	GVG20/8	480	33,26	41,39
GVL30/8	480	0,28	GVO30/8	720	66,00	GVG30/8	720	49,89	62,08
GVL45/8	720	0,41	GVO45/8	1.080	98,99	GVG45/8	1.080	74,83	93,12
GVL55/8	880	0,50	GVO55/8	1.320	120,99	GVG55/8	1.320	91,46	113,81
GVL80/8	1.280	0,73	GVO80/8	1.920	175,99	GVG80/8	1.920	133,03	165,55

Pressão de trabalho: 8 kg/cm<sup>2</sup>

Temperatura da água de alimentação: 80 oC

Lenha: Pci=2900 kcal/kg - w=30 % - P=500 kg/m<sup>3</sup>

Óleo diesel: Pci=10.200 kcal/kg - d=0,83

Gás GLP: 11.200 kcal/kg

Gás Natural: 9.000 kcal/Nm<sup>3</sup>h

Quadro 1.A - Características técnicas da caldeira da série GVL, GVO e GVG.

Fonte:

<http://www.weco.ind.br/ManutencaoSite/Imagens/InformacoesTecnicas/Portugues/CaldeiraS%C3%A9rieGVLGVGGVO.pdf>. Acesso em 15/7/2013.

## ANEXO 2 - Esquema teórico de uma coluna de destilação por pratos e coluna de recheio

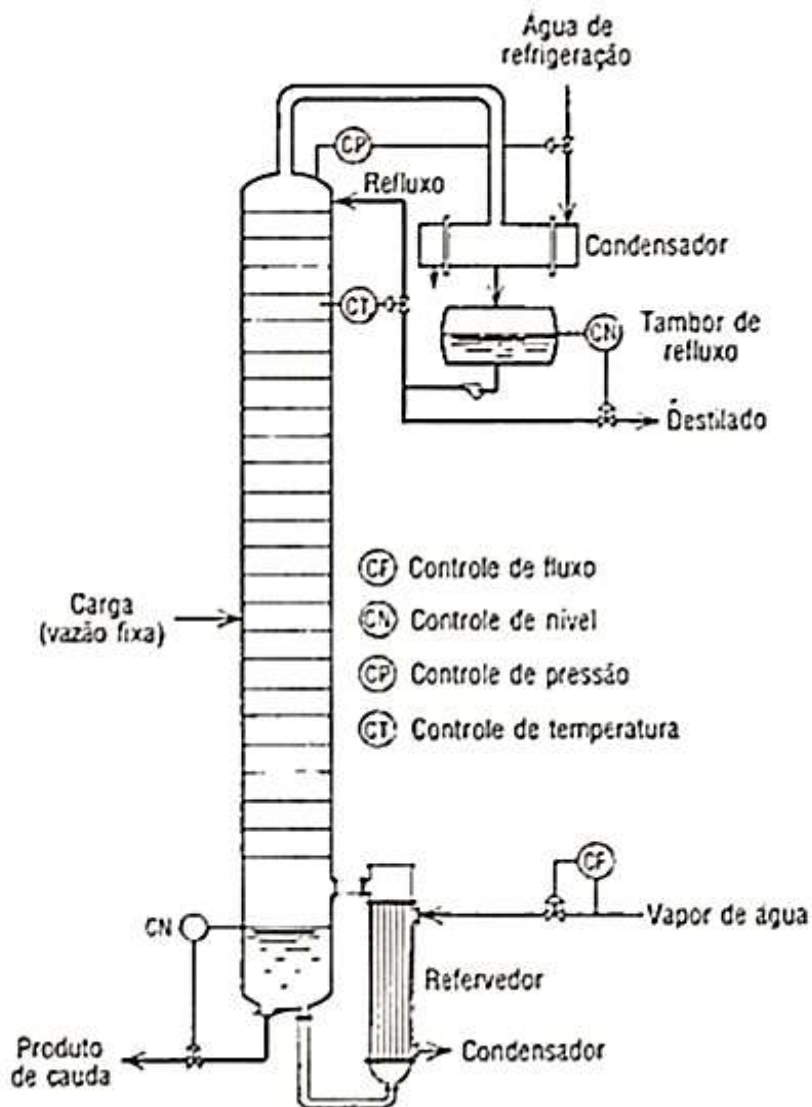


Figura 2.A - Esquema teórico de uma coluna de destilação de pratos.

Fonte: Foust *et al.*, 1982.

## ANEXO 2 - Continuação

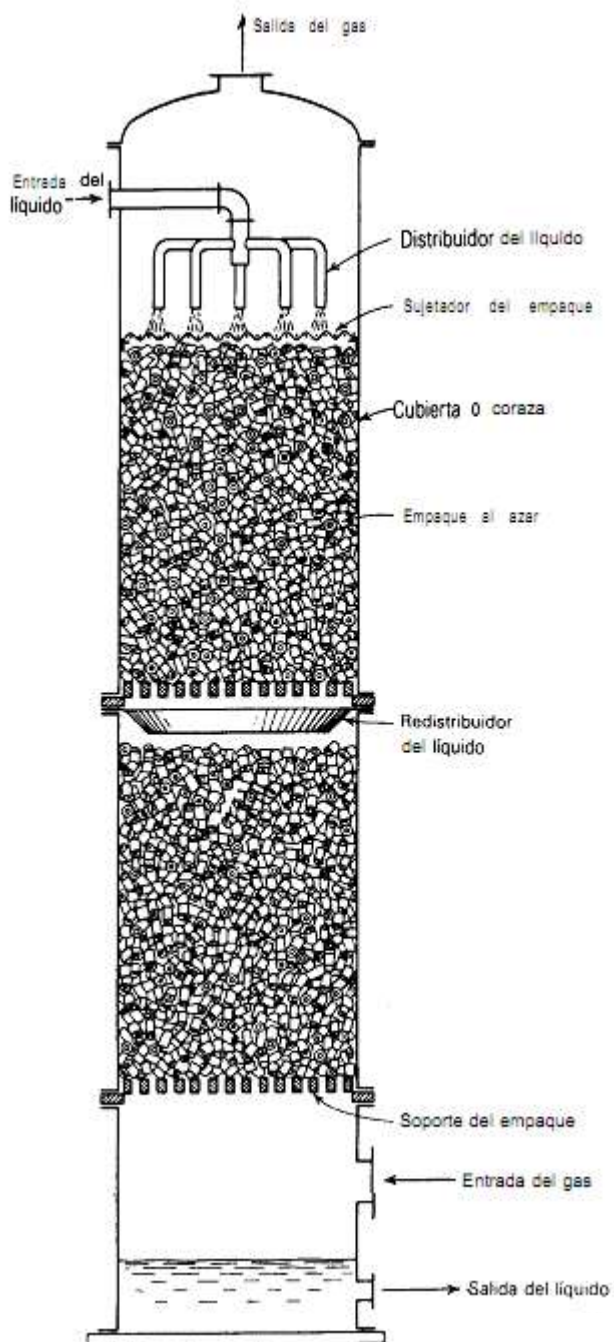


Figura 2.B - Esquema teórico de uma coluna de destilação de recheio.

Fonte: Treybal, 1968.