

Igor Tadashi Berto Fujita  
Sidney Csuzlinovics Pires

Análise do ciclo de vida do polietileno obtido a partir da cana de açúcar

**São Paulo**  
**2011**

Igor Tadashi Berto Fujita  
Sidney Csuzlinovics Pires

## Análise do ciclo de vida do polietileno obtido a partir da cana de açúcar

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da Escola  
Politécnica de Universidade de São Paulo com vistas a  
obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química

**São Paulo**

**2011**

Igor Tadashi Berto Fujita  
Sidney Csuzlinovics Pires

## Análise do ciclo de vida do polietileno obtido a partir da cana de açúcar

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da Escola  
Politécnica de Universidade de São Paulo com vistas a  
obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química

**Área de concentração:** Engenharia Química e Meio  
Ambiente

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay

**São Paulo**

**2011**

## RESUMO

A busca por uma melhor qualidade de vida eleva o consumo, tal fato, aliado a não renovabilidade dos recursos naturais, leva à procura por modelos de produção nos quais a variável ambiental é determinante.

O presente trabalho visa à avaliação do ciclo de vida do polietileno obtido através de fontes renováveis, que se apresenta como uma alternativa potencial para a substituição e complementação de um modelo baseado no extrativismo mineral.

A fonte de obtenção estudada é a cana de açúcar, para isso descrevem-se as etapas de produção, partindo do preparo do terreno, plantio, tratamentos culturais, queimada da palha e colheita, que dá sequência para o processo de obtenção de etanol, com a moagem, tratamento de caldo, fermentação, e destilação. Então, tem-se a descrição da desidratação do etanol obtendo-se eteno, culminando na polimerização do mesmo até o polietileno.

Para a avaliação do desempenho ambiental do polietileno obtido através deste processo, faz-se necessária a utilização de uma técnica que possa analisar as interações entre cada etapa ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a retirada do recurso natural até a saída de polietileno da fábrica. A técnica empregada é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Com a aplicação da metodologia da técnica conseguiu-se uma avaliação qualitativa e quantitativa dos fluxos materiais e energéticos ao longo de todo o processo.

Após uma revisão do estado da arte, tanto do processo estudado, quanto da avaliação de ciclo de vida, aplicou-se a técnica ao processo, obtendo o cenário da tecnologia de produção, utilizando dados secundários e compilando-os no software SimaPro, conseguindo a análise para alguns parâmetros ambientais, bem como quais processos são os principais contribuintes para cada impacto.

Na busca por um melhor desempenho ambiental foram propostas alterações no processo, bem como a análise do impacto dessas na configuração atual, obtendo melhorias significativas em todos os aspectos avaliados, com destaque para o aquecimento global e oxidação fotoquímica.

**Palavras chaves:** Eteno, polietileno, etanol, análise de ciclo de vida.

## **ABSTRACT**

The search for a better quality of life raises human consumption. This fact, associated with the no renewability of the natural sources leads to a demand of production models in which the environmental variable is determinant.

This paper aims the life cycle assessment of polyethylene obtained by renewable sources, which is shown as a potential alternative for the substitution and complementation to the production model based on the mineral extraction.

The obtaining source studied is the sugar cane, for which are described the steps of production, starting with the preparation of the land, plantation, farming treatment, straw burning and harvest, then, follows the process of obtaining of ethanol, with the milling, juice treatment, fermentation and distillation. After this proceeding, the process leads to the ethanol dehydration and consequent synthesis of ethylene, culminating in the polymerization and producing the polyethylene.

For the environmental performance evaluation of the polyethylene obtained by this process, it is necessary the application of a technique that can analysis the interactions in every step of the product life cycle, since the removal of the natural resource until the output of polyethylene of the fabric unit.

With this methodology used it is possible to obtain an evaluation qualitative and quantitative of the energetic and material fluxes along the process.

After the revision of the art state, for both the process studied and the life cycle assessment, the technique was applied in the process, obtaining the scene of this production technology, using secondary data and compiling them at SimaPro software, getting the analysis for some environmental parameters, as well what process are the main contributor for each impact.

In the search for a better environmental performance, proposals for process changes are made, in addition to the impacts analysis of these solutions in the current configuration, obtaining significant improvements in all aspects evaluated, with emphasis on global warming and photochemical oxidation.

**Keywords:** Ethylene, polyethylene, ethanol, life cycle assessment.

## Lista de ilustrações

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Reação de polimerização.....                                                                                       | 13 |
| Figura 2 – Aplicação de herbicida com operação de preparo de solo.....                                                        | 16 |
| Figura 3 – Plantio Manual.....                                                                                                | 17 |
| Figura 4 – Queima da palha de cana de açúcar .....                                                                            | 19 |
| Figura 5 – Esquema geral da produção de etanol e açúcar a partir da cana de açúcar<br>.....                                   | 20 |
| Figura 6 – Esquema simplificado dos métodos de embebição aplicados na extração<br>.....                                       | 25 |
| Figura 7 – Esquema geral do tratamento de caldo misto para produção de açúcar.....                                            | 26 |
| Figura 8 – Esquema geral do processo de fermentação Melle-Boinot.....                                                         | 34 |
| Figura 9 – Esquema geral de uma destilaria convencional.....                                                                  | 36 |
| Figura 10 – Ciclo de vida de um produto .....                                                                                 | 41 |
| Figura 11 – Etapas da ACV .....                                                                                               | 43 |
| Figura 12 – Perfil de impacto ambiental para o polietileno obtido a partir da cana<br>de açúcar.....                          | 53 |
| Figura 13 - Perfil de impacto ambiental do polietileno obtido a partir da cana de<br>açúcar após a melhoria de processo ..... | 58 |

## Sumário

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução.....</b>                                            | <b>11</b> |
| <b>2. Objetivos.....</b>                                             | <b>12</b> |
| <b>3. Revisão de Literatura.....</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>3.1. Polietileno.....</b>                                         | <b>13</b> |
| <b>3.2. Polietileno obtido a partir da cana de açúcar .....</b>      | <b>15</b> |
| <b>3.2.1. Cultivo da cana de açúcar.....</b>                         | <b>15</b> |
| <b>3.2.2. Produção de etanol.....</b>                                | <b>19</b> |
| <b>3.2.2.1. Matérias primas.....</b>                                 | <b>20</b> |
| <b>3.2.2.2. Recepção da cana.....</b>                                | <b>21</b> |
| <b>3.2.2.3. Lavagem da Cana.....</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>3.2.2.4. Preparo da Cana .....</b>                                | <b>23</b> |
| <b>3.2.2.5. Extração do Caldo .....</b>                              | <b>24</b> |
| <b>3.2.2.6. Tratamento do Caldo Misto .....</b>                      | <b>26</b> |
| <b>3.2.2.7. Produção de Etanol.....</b>                              | <b>31</b> |
| <b>3.2.2.7.1. Fermentação .....</b>                                  | <b>31</b> |
| <b>3.2.2.7.2. Destilação.....</b>                                    | <b>35</b> |
| <b>3.2.2.8. Geração de vapor e Acionamento de Equipamentos .....</b> | <b>37</b> |
| <b>3.2.2.9. Sistemas Auxiliares .....</b>                            | <b>38</b> |
| <b>3.2.3. Produção de eteno a partir de etanol.....</b>              | <b>39</b> |
| <b>3.3. Avaliação do ciclo de vida .....</b>                         | <b>40</b> |
| <b>3.3.1. Definição.....</b>                                         | <b>40</b> |
| <b>3.3.2. Histórico .....</b>                                        | <b>41</b> |
| <b>3.3.3. Metodologia.....</b>                                       | <b>42</b> |
| <b>3.3.4. Aplicações.....</b>                                        | <b>46</b> |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.5. Limitações da técnica .....                                                             | 48 |
| 4. Avaliação do desempenho ambiental do polietileno obtido a partir de fontes renováveis ..... | 49 |
| 4.1. Definição do escopo .....                                                                 | 49 |
| 4.1.1. Função.....                                                                             | 49 |
| 4.1.2. Unidade funcional .....                                                                 | 49 |
| 4.1.3. Desempenho técnico e fluxo de referência .....                                          | 49 |
| 4.1.4. Fronteiras do sistema .....                                                             | 50 |
| 4.1.5. Critérios de qualidade dos dados.....                                                   | 50 |
| 4.1.6. Alocação.....                                                                           | 50 |
| 4.1.7. Categorias e modelos de avaliação de impacto .....                                      | 51 |
| 4.2. Inventário de ciclo de vida.....                                                          | 51 |
| 4.2.1. Premissas.....                                                                          | 51 |
| 4.3. Resultados.....                                                                           | 52 |
| 4.3.1. Depleção abiótica .....                                                                 | 54 |
| 4.3.2. Acidificação .....                                                                      | 54 |
| 4.3.3. Eutrofização .....                                                                      | 54 |
| 4.3.4. Aquecimento global .....                                                                | 54 |
| 4.3.5. Depleção da camada de ozônio.....                                                       | 55 |
| 4.3.6. Toxicidade humana.....                                                                  | 55 |
| 4.3.7. Eco-toxicidade terrestre .....                                                          | 55 |
| 4.3.8. Oxidação fotoquímica .....                                                              | 55 |
| 5. Possibilidades de melhoria.....                                                             | 56 |
| 6. Dimensionamento da melhoria e impacto por ela gerado .....                                  | 57 |
| 7. Conclusão.....                                                                              | 59 |
| 8. Referência bibliográfica .....                                                              | 60 |

## **1. Introdução**

A busca constante por melhor qualidade de vida por parte da sociedade moderna faz aumentar significativamente a demanda por bens de consumo. Porém, a não renovabilidade de recursos naturais essenciais, bem como, o exercício constante – ao longo de décadas – de modelos de produção e consumo que desconsiderassem impactos sobre o meio ambiente, ameaçam sobremaneira o cumprimento desse mesmo objetivo. Dessa forma o uso de modelos alternativos de produção, que incorporem bom desempenho ambiental e social, à variável econômica – usada amplamente com critério de tomada de decisão – passa a ser tema de discussão corrente nos dias atuais.

O sucesso da adoção dessas abordagens vincula-se necessariamente a sua aplicação em commodities e, dentro desse grupo, deve merecer especial destaque as resinas termoplásticas, em particular, o polietileno. Isso porque, se por um lado, este polímero mostra vasta utilização como intermediário de muitos processamentos, por outro, as rotas tecnológicas atualmente empregadas para sua obtenção predisõem o consumo de petróleo e de gás natural, recursos que sustentam a principal fonte de energia do planeta, do que resulta uma competição bastante desvantajosa.

A produção de polietileno a partir de etanol aparece dentro desse ensejo, como uma possibilidade auspiciosa, sobretudo em virtude de seu aparente caráter de renovabilidade, proporcionado pelo uso de intermediários de origem agrícola no processamento.

A eficiência ambiental de um produto é hoje elemento chave e de aplicação recorrente em muitas corporações, dada a tônica exercitada pelo meio empresarial que busca minimizar os efeitos de suas atividades sobre o meio ambiente. Desta forma é de fundamental importância estudar o processo de obtenção de polietileno através da cana-de-açúcar para compreender sua eficiência ambiental.

Para tanto, faz-se necessário e quase que compulsório, o uso de uma ferramenta de foco sistêmico de abordagem e cuja resposta a aplicação corresponda a um indicador quantitativo e comparável. Ambas as características podem ser encontradas na Avaliação de Ciclo de Vida - ACV.

## **2. Objetivos**

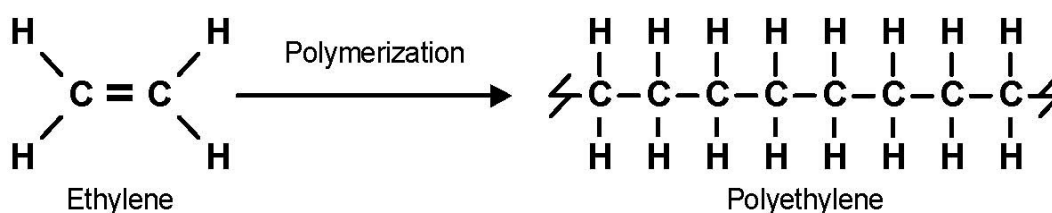
Tendo em vista o contexto antes apresentado, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) se propõe a avaliar o desempenho ambiental do polietileno (PE) originário de fontes renováveis.

Como objetivo decorrente desta análise, para os casos em que couber tal abordagem, o projeto tratara também – no nível conceitual – de oferecer soluções de melhoria dentro deste mesmo mérito.

### 3. Revisão de Literatura

#### 3.1. Polietileno

O polietileno é um hidrocarboneto que tem suas propriedades relacionadas à sua densidade, distribuição de massa molar e presença de insaturações ou ramificações, sendo essas características determinadas pelo meio reacional. É obtido através da polimerização do eteno, obtendo uma cadeia, que pode ou não conter ramificações, variando as propriedades do polímero obtido.



Coutinho, et al. (2003) descrevem os tipos de polietileno, propriedades e aplicações, que serão descritos a seguir.

A classificação pode ser feita de acordo com propriedades físico-químicas, dividindo-os em polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) e polietileno de ultra baixa densidade (PEUB). Para este trabalho, cabe aqui detalhar apenas o PEAD e o PEBDL, uma vez que essas são as variações obtidas a partir do etanol (Piacock, 2000).

O polietileno de alta densidade apresenta poucas ramificações e defeitos na rede cristalina, apresentando assim um elevado grau de cristalinidade, o que influencia na sua densidade que varia entre 0,94 – 0,97 g/cm<sup>3</sup>.

A principal característica do polietileno linear de baixa densidade está na ligação de grupos alquil à cadeia linear; esses grupos são obtidos por meio do uso de comonômeros – como buteno e hexeno, resultando na redução da densidade (0,90 – 0,94 g/cm<sup>3</sup>).

Outra maneira usual de classificação é quanto aos processos produtivos, de acordo com a espécie ativa ou ao meio reacional envolvido.

Quanto à polimerização por espécie ativa tem-se: polimerização via radicais livres e polimerização por coordenação. Na primeira a espécie ativa é um radical livre e ocorre no mínimo em quatro etapas: 1) iniciação, que gera continuamente os radicais durante a reação através da decomposição química de azo compostos e peróxidos; 2) propagação, na qual ocorre o crescimento da cadeia polimérica pela adição de monômero ao radical; 3) terminação biomolecular entre dois radicais; e 4) transferência de cadeia; A reação é exotérmica aumentando a viscosidade a baixas conversões.

Já na polimerização por coordenação as espécies ativas são os centros ativos dos catalisadores, que são compostos por um organometálico de um metal do grupo I-III e um haleto ou metal de transição (grupo IV-VIII). Existe uma ampla distribuição de massas molares devido à diferença de sítios ativos presentes, que varia a constante de propagação. A polimerização é influenciada pelo catalisador durante o crescimento da cadeia polimérica, alterando os mecanismos subsequentes (propagação, terminação e transferência). Os catalisadores mais utilizados são os chamados Ziegler-Natta (Z-N), produzindo polímeros isotáticos e PEAD, também vem sendo utilizado na produção de polímeros com  $\alpha$ -olefinas de alta massa molecular e microestrutura regular (Piacock, 2000).

O catalisador Ziegler-Natta é um complexo metálico constituído por metal (Ti e alumínio, por exemplo) e ligantes como Cl<sup>-</sup> e grupos alquil, sendo tipicamente composto por cloreto de titânio, e compostos organometálicos de alquil alumínio. A catálise se dá através de efeitos eletrônicos que facilitam o rompimento e formação de ligações necessárias, melhorando o fator de energia, também aproxima os reagentes na posição espacial correta, aumentando o fator de probabilidade.

O processo mais usual de polimerização compreende o uso de catalisadores Ziegler-Natta em processos *slurry*, no qual eteno é polimerizado em solvente contendo polímero em suspensão, com gases dissolvidos. A fase gasosa é composta por eteno, comonômeros, hidrogênio, solvente e gases inertes.

O solvente é utilizado na retirada de calor de reação, uma vez que essa é exotérmica, refrigerando o polímero em crescimento, esses reatores operam à pressão de 20 a 30atm, com tempo de residência entre 0,5 e 2h e temperaturas superiores a 150°C (Wells et al., 2001).

### **3.2. Polietileno obtido a partir da cana de açúcar**

Outra forma de obtenção do polietileno é a partir da desidratação do etanol, sendo o processo diferenciado até o momento da obtenção de eteno, com a etapa de polimerização idêntica ao do processo tradicional de obtenção partindo-se da nafta de petróleo. Particularmente, o etanol pode ser obtido da cana de açúcar, que é o foco desse trabalho, sendo assim, para a análise que se deseja, é necessária uma descrição dos processos vinculados à produção de eteno a partir do etanol.

#### **3.2.1. Cultivo da cana de açúcar**

O processo de produção do polietileno a partir da cana de açúcar inicia-se com a extração da mesma, que engloba as atividades da etapa agrícola do seu cultivo.

Considerando uma área previamente desmatada e que já esteja sendo utilizada para produção agrícola, o processo canavieiro inicia-se com a limpeza do terreno, nivelamento do solo, estudo da qualidade do mesmo, aração e gradagem (Instituto agrônômico de Campinas, 1994).

Depois realiza-se o preparo do solo, constituído de uma série de atividades visando fornecer as melhores condições físico-químico-biológicas ao solo para a germinação de sementes (Castro, 1985).

Algumas técnicas de preparo do solo visam a sua conservação, tais como a incorporação de material orgânico, curvas de nível, terraços e a subsolagem, ou seja, a promoção de uma maior infiltração de água através da remoção de camadas compactas.

O preparo é periódico, após o primeiro corte faz-se o preparo para a cana soca, repetindo-se por cinco cortes, encerrando o ciclo com o replantio (renovação do canavial). Além do método mecânico para a eliminação da soqueira, pode ser utilizado o método químico, como por exemplo, a aplicação de herbicidas (figura 2), em conjunto com as operações de preparo de solo (Ometto, A., 2000).



**Figura 2 – Aplicação de herbicida com operação de preparo de solo**

**Fonte – Ometto, A. (2000)**

O preparo de modo convencional, na renovação do canavial, é ordenado nas seguintes ações (Freitas, 1987):

- 1º Limpeza, enleiramento e queima da palha;
- 2º Calagem, apenas nos casos de insuficiência de cálcio e magnésio ou altos teores de alumínio tóxico;
- 3º Grade pesada para erradicação da soqueira;
- 4º Operações de conservação;
- 5º Gradagens;

- 6º Sistematização;
- 7º Subsolagem com aletas se necessário;
- 8º Gradeação pesada;
- 9º Gradagem leve de pré-plantio.

Pode ainda ser dividido em primário: aração, desmatamento e operações com rolo faca; e secundário: nivelamento do terreno, destorroamento, incorporação de herbicidas, eliminação de ervas invasoras, através de gradagem ou enxada rotativa (Castro, 1985).

O plantio pode ser realizado (figura 3) manualmente ou de forma mecanizada, de forma direta ou convencional. No método direto é feito um sulco sobre a palhada restante, já no convencional a preparação do terreno se dá através de aração e gradagem, sendo feito o sulco no solo sem palha. Em ambos os métodos o sulco é um canal entre 25 e 30 cm de profundidade, onde é colocada a muda de cana de açúcar. Nos casos de solo impermeável e compacto, faz-se a subsolagem para facilitar a penetração de água e das raízes no solo (Ometto, A., 2000).



**Figura 3 – Plantio Manual**

**Fonte – Ometto, A. (2000)**

Inicialmente a forma utilizada é a manual, em que um caminhão auxilia no carregamento de cana, para os funcionários arremessarem no sulco ao mesmo tempo em que outros picam essa cana arremessada em toletes, associado com a erradicação da soqueira pelo preparo convencional; esse é o modo mais usual na cultura canavieira, junto com o mecânico e o químico.

Terminado o plantio, começa-se a etapa de tratamento de cultura, que tem por objetivo: a preservação ou restauração das propriedades físicas e químicas do solo; a eliminação ou redução da concorrência das plantas concorrentes; a conservação do sistema de controle de erosão; e o controle de pragas e doenças, quando necessário (Corbini, 1987).

O controle de pragas e infestações daninhas pode ser: *preventivo* – com o levantamento de infestações para identificação no início de pequenos focos de infestação; *cultural* – pela cobertura total do solo e práticas de rotação com aplicação de adubos orgânicos; *mecânico* – pela utilização de enxada, ou por meio da aplicação de cultivadores tracionados por animais e mecanizado por tratores; ou, *químico* – com a aplicação de herbicidas (Corbini, 1987).

A etapa seguinte é a de colheita, realizada após os tratos culturais, que se inicia com a queima da palha (figura 4) seguida pelo corte, isso em 75% da área plantada no estado de São Paulo (Macedo et. al., 2004).

A queima da palha é explicada em três etapas: ignição, fase rápida realizada na presença de oxigênio e baixas temperaturas, na qual a concentração de poluentes ainda é baixa; combustão incompleta, onde ocorre a formação de gases como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, entre outros, é caracterizada também pelo alcance de altas temperaturas; por fim pelo resfriamento, que é a última etapa da queima, na qual a temperatura diminui e ocorre a liberação de material particulado, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outras substâncias orgânicas oriundas da combustão incompleta (Silva, 1998).



**Figura 4 – Queima da palha de cana de açúcar**

**Fonte – Ometto, A.R. (2000)**

Assim tem-se a cana de açúcar que será usada como insumo na produção de etanol, cujo processo será descrito a seguir.

### **3.2.2. Produção de etanol**

No Manual de Recomendações do Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) (1990) – Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool, Camargo, et al. fazem uma descrição detalhada do processo de obtenção do etanol a partir da cana de açúcar, que será descrito a seguir.

Uma usina pode ter seu foco na produção de açúcar e etanol, ou restringir sua atuação apenas a um dos dois. Essa versatilidade é possível devido a variações de mercado de cada produto e do fato de os processos serem similares até certa etapa, a seguir serão descritas as etapas do processo de obtenção de etanol, bem como outras peculiaridades, como matérias primas e processos auxiliares, pode-se ter uma visão geral desse processo no diagrama de blocos apresentado na figura 5.

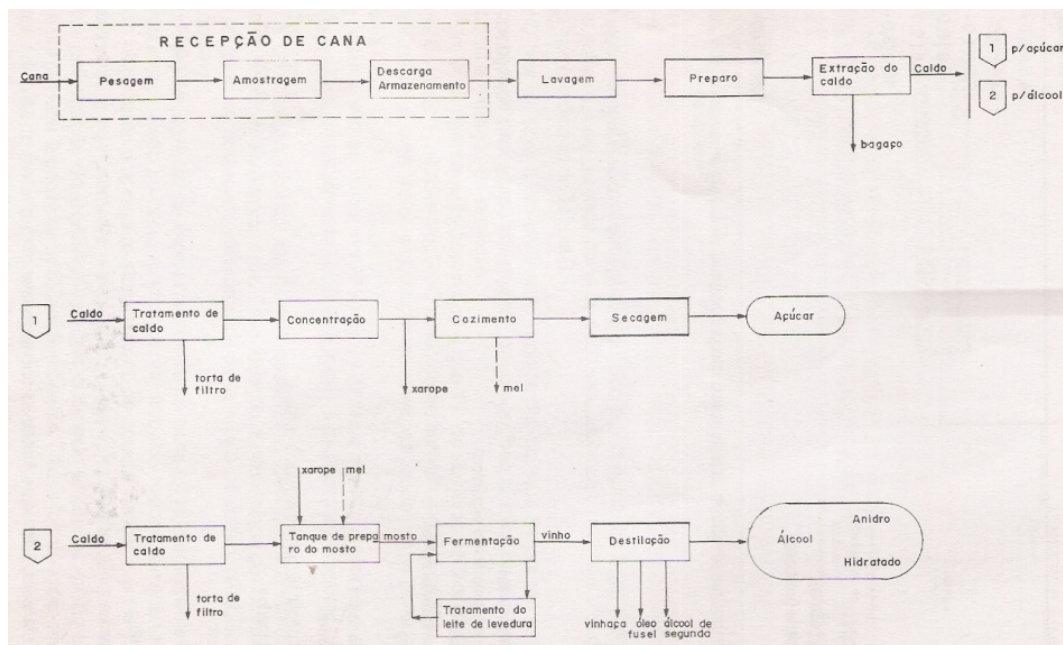


Figura 5 – Esquema geral da produção de etanol e açúcar a partir da cana de açúcar

### 3.2.2.1. Matérias primas

O etanol pode ser produzido através das seguintes matérias primas, divididas em três grupos: amiláceas (mandioca, milho e batata doce), celulósicas (madeira e resíduos agrícolas) e sacarinas (cana-de-açúcar e beterraba). Entretanto, o açúcar só pode ser obtido a partir de matérias-primas sacarinas, uma vez que as matérias-primas amiláceas e celulósicas são constituídas por açúcares não diretamente fermentescíveis, requerendo uma etapa de conversão das cadeias poliméricas em moléculas simples de glicose.

No Brasil, praticamente a totalidade do açúcar e do etanol produzido são obtidos da cana-de-açúcar, podendo isto ser justificado pela tradição histórica de cinco séculos de seu cultivo devido ao solo adequado, pela formação do bagaço, que é utilizado como combustível para as caldeiras, além de que, atualmente, essa é a matéria-prima que possui a maior relação kg de açúcar ou etanol por hectare.

A cana-de-açúcar é constituída de fibra e caldo, sendo esse último a real matéria-prima. A fibra é todo o material insolúvel em água e o caldo é o conjunto da água e de todos os sólidos solúveis (açúcares, cinzas, materiais nitrogenados e outros). O teor de fibra é um parâmetro importantíssimo, se por um lado fornece uma grande quantidade de bagaço para o equilíbrio térmico da indústria, por outro dificulta a extração da sacarose. Normalmente, quando o teor de fibra é alto, há uma maior embebição para facilitar o processo.

Assim como as fibras, o alto teor das cinzas prejudica também o processo de fabricação de açúcar, principalmente nas etapas de clarificação, evaporação e cristalização.

Além do caldo, extraído da cana-de-açúcar, outras matérias-primas são utilizadas no processo:

- Leite de Cal: É uma mistura preparada em um pequeno tanque de agitação na área de tratamento de caldo, e é utilizada para a correção do pH do caldo antes da decantação;
- Polímero: É um agente floculador utilizado na etapa de decantação. Age de modo a aglomerar as partículas sólidas ou mais densas, reduzindo o tempo e aumentando a eficiência da operação;
- Dispersante: É um tensoativo utilizado para homogeneização do leite de leveduras, auxiliando na quebra dos aglomerados formados;
- Antiespumante: Tem como função a redução da espuma formada pelo dióxido de carbono produzido no processo fermentativo nas dornas;
- Ácido Sulfúrico: Sua função é corrigir o pH da levedura tratada, evitando assim a contaminação com bactérias.

#### **3.2.2.2. Recepção da cana**

##### ***Pesagem***

A operação de pesagem da cana deve ser rigorosamente executada, pois esse valor é crucial para os cálculos de balanço e rendimento da fábrica. Ela deve ser uma operação ágil, sendo utilizadas duas balanças rodoviárias para a realização deste serviço.

### ***Amostragem***

Após a pesagem, amostras da matéria-prima são enviadas ao laboratório para análise dos teores de Pol (quantidade de sacarose presente num caldo), °Brix (medida de quantidade de sólidos solúveis) e fibra. É através dessas análises que se efetua o pagamento da cana, de acordo com o teor de sacarose.

### ***Descarga e Armazenamento***

A descarga da cana é realizada de forma mecanizada, podendo ser armazenada ou enviada diretamente para a mesa alimentadora da moenda. Na prática, o estoque de cana não é recomendado, principalmente se a cana estiver picada ou em toletes. Caso seja ultrapassado o prazo de armazenamento, algumas modificações podem ocorrer como:

- Ressecamento do colmo: perda de peso, aumento de teor de fibras e °Brix . Reduz a eficiência da moagem além de requisitar uma elevada embebição.
- Inversão de Sacarose: depois de cortada, a cana mantém suas atividades metabólicas, ocorrendo a inversão da sacarose em glicose e frutose, reduzindo o valor do caldo se for destinado à fabricação de açúcar.
- Contaminação por microorganismos: leveduras, fungos e bactérias se desenvolvem nesse meio rico em nutrientes. Eles produzem uma enzima, chamada invertase, que causa a inversão do açúcar.

#### **3.2.2.3. Lavagem da Cana**

Esta consiste da primeira etapa propriamente dita do processo industrial. Assim como em todas as outras etapas que necessitam da locomoção da cana, o transporte é feito através de esteiras.

Na colheita mecanizada, há o aumento da quantidade de impurezas (argila, areia, palha e pedras), variando em média de 4% em dias secos a 15% em dias úmidos.

A presença dessa matéria indesejada, além do desgaste dos equipamentos por erosão, causa o aumento do tempo de decantação do caldo, provocando o aumento da perda de açúcar por inversão da sacarose, destruição de açúcares redutores (AR) e outras reações indesejadas. Além disso, pode haver aumento do volume de cinzas na câmara de combustão das caldeiras e problemas de filtração no tratamento do lodo.

Para evitar essas inconveniências, procede-se a lavagem da cana antes de seu processamento. Essa operação pode acarretar uma perda adicional de sacarose, principalmente se houver exposição exagerada de colmo. O volume de água adicionada é bastante variável, sendo o mínimo de  $5\text{m}^3 / (\text{t de cana} \cdot \text{h})$  para a realização de uma lavagem razoável, podendo variar conforme a inclinação da mesa alimentadora.

#### **3.2.2.4. Preparo da Cana**

A cana pode oferecer uma alta resistência à recuperação de sacarose em função da proporção entre suas partes duras e moles. Assim, o principal objetivo dessa etapa é desintegrá-la, de modo que seja facilitada a extração do caldo (sacarose) contido nas células. Além disso, visa aumentar a densidade da massa de alimentação das moendas, bem como produzir um bagaço no qual ação da embebição se torne mais eficaz. Utiliza-se um índice para medição da eficiência de preparo, também chamado de índice de células abertas ("open-cells"), visto que o preparo excessivo pode prejudicar a moagem. Bons índices de preparação estão em torno de 90% para utilização de moendas e superiores a 90% para difusores.

Os equipamentos utilizados nessa etapa são as facas rotativas e desfibradores. Essas facas são divididas em dois tipos: as niveladoras, que regularizam e uniformizam a carga de cana formando um colchão uniforme e homogêneo; e as cortadoras (Picador).

Os desfibradores têm por sua vez a finalidade de destruir por completo a estrutura da cana, resultando num ganho significativo na extração, pois aumenta o número de células abertas.

### **3.2.2.5. Extração do Caldo**

Existem duas tecnologias referentes ao processo de extração da sacarose: a moagem e a difusão.

#### ***Moagem***

Os ternos de moendas são os equipamentos utilizados nesse tipo de extração, variando de quatro a sete ternos. A moenda é uma unidade esmagadora constituída basicamente por ternos, sendo cada um composto por três cilindros dispostos de tal forma que a união de seus centros forma um triângulo praticamente isósceles. Os cilindros inferiores possuem seus eixos fixos e giram no mesmo sentido. Já o rolo superior possui um regulador de pressão hidráulico que controla a posição de seu eixo. Atualmente, há uma tendência à incorporação de um 4º, o rolo de pressão, que efetua uma compressão prévia facilitando a extração.

No primeiro terno é alcançada uma extração de 50 a 70%, então, o bagaço é conduzido aos ternos seguintes onde é completado o processo de extração. Para aumentar a retirada da sacarose, realiza-se a adição de água, processo chamado de embebição, uma vez que o bagaço resultante ainda detém certa quantidade de caldo que escapou ao esmagamento. Adiciona-se certa quantidade de água a esse bagaço, assim esse caldo residual fica diluído, podendo ser extraído na próxima moagem. É interessante ressaltar que a umidade final do bagaço permanece a mesma, ocorrendo simplesmente a substituição do caldo original pela água adicionada. Há várias maneiras de se efetuar o processo de embebição, conforme ilustrado na figura 6.

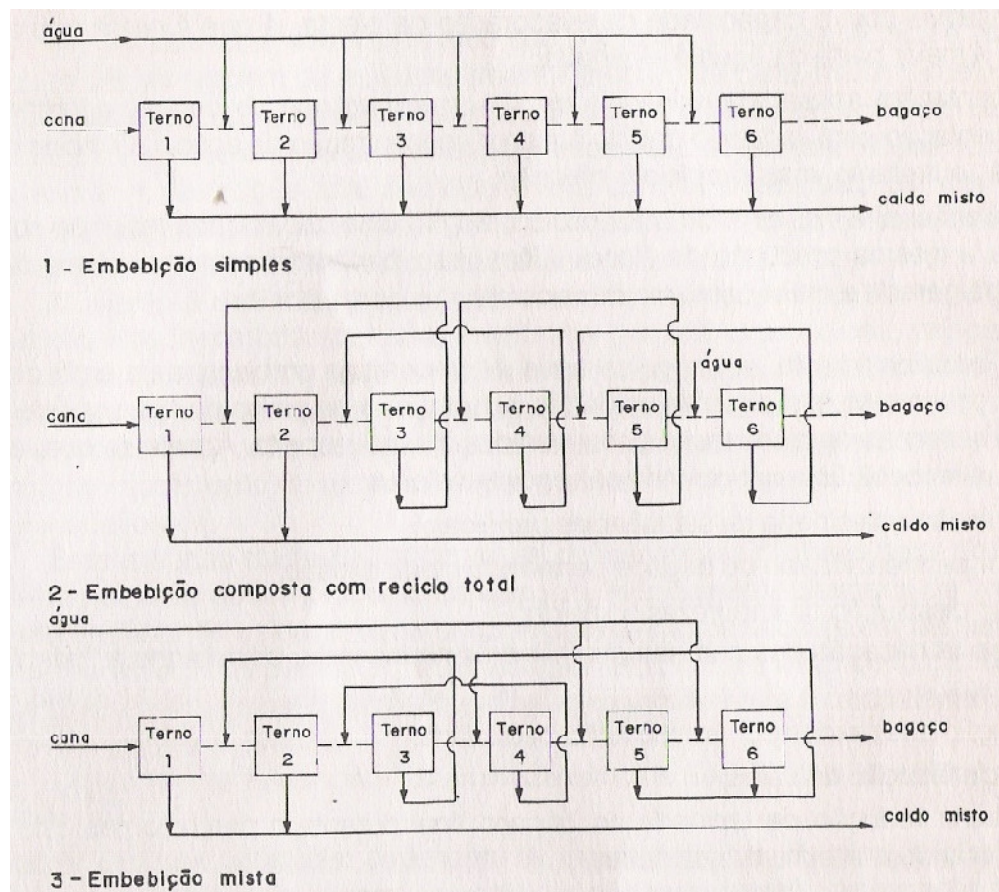


Figura 6 - Esquema simplificado dos métodos de embebição aplicados na extração

Um fato importante na eficiência da embebição é o preparo da cana, já que a água adicionada ao bagaço deve encontrar uma grande área de contato superficial para ser absorvida, e promover a diluição do caldo residual. Algumas usinas empregam embebição com água quente ( $T > 70^{\circ}\text{C}$ ), uma vez que as temperaturas elevadas facilitam o transporte de massa.

### Difusão

A cana desfibrada, ao invés de passar pelos ternos da moenda, passa por um banho de água, similar a embebição, de forma que todo o açúcar sai por transporte de massa da cana para a solução, formando desta maneira o caldo. Utiliza-se o aquecimento como facilitador dessa transferência. Contudo esta é uma tecnologia pouco empregada no Brasil.

### 3.2.2.6. Tratamento do Caldo Misto

A tecnologia para essa etapa foi estabelecida recentemente em comparação com outras etapas do processo. Hoje em dia quase todas as usinas utilizam o mesmo processo de tratamento para minimizar a quantidade de impurezas enviadas para a fermentação e/ou fábrica de açúcar.

O caldo proveniente da extração é enviado para uma peneira, para retirar tanto partículas sólidas sobreviventes da lavagem, como bagacilho (finos de bagaço). O caldo peneirado que é destinado à fabricação de açúcar passa por um processo de sulfitação. Então, é feita a alcalinização com leite de cal, devendo elevar o pH do caldo até um valor próximo da neutralidade. Em seguida, o caldo é aquecido a uma temperatura entre 100 e 105°C, para efetuar a decantação. Após a decantação, o caldo é enviado para a evaporação, enquanto o lodo decantado é enviado para um processo de filtração. O caldo extraído desse lodo retorna para o tanque de calagem, já a torta é enviada ao campo como adubo. As etapas do tratamento de caldo estão representadas na figura 7

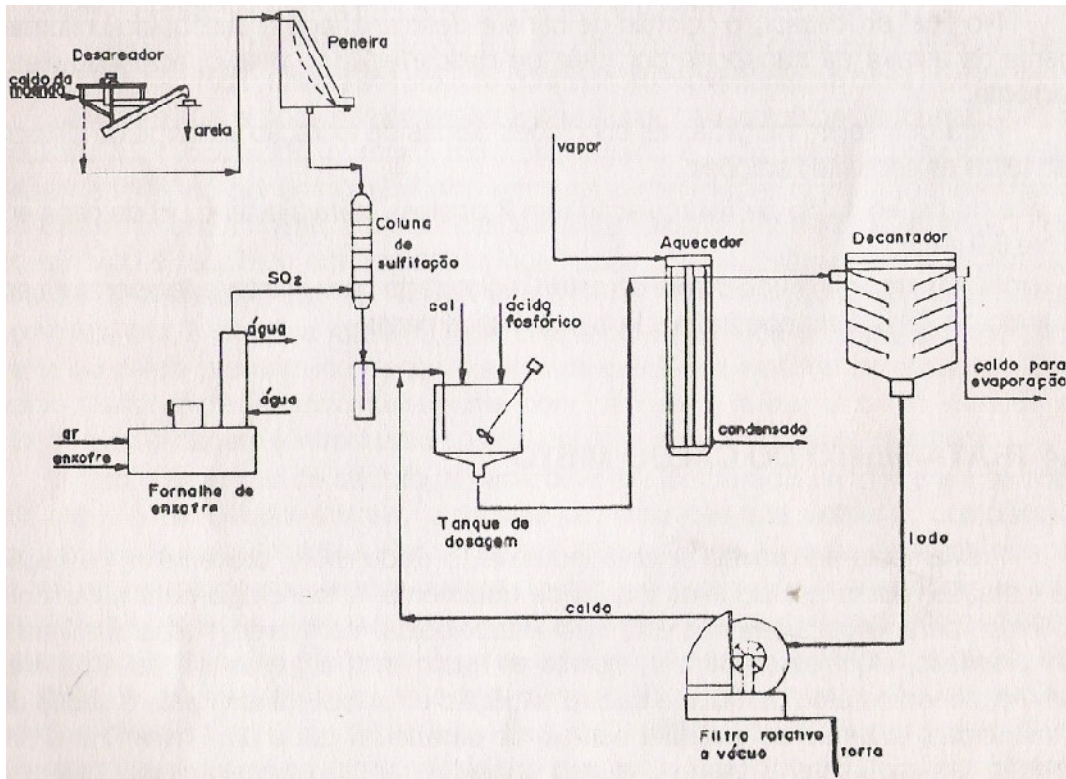


Figura 7 - Esquema geral do tratamento de caldo misto para produção de açúcar

### ***Peneiramento***

O caldo misto começa a ser purificado por remoção, via peneiramento, dos materiais em suspensão como areia, terra, pedaços de cana, bagaço, entre outros.

A quantidade de bagacilho (finos de bagaço) presente no caldo varia de maneira considerável, em função do grau de preparo da cana, do tipo de cultivar; do assentamento da bagaceira; entre diversos outros.

A presença de bagacilho durante a clarificação é indesejável, pois pode ocorrer a solubilização da celulose durante a calagem, liberando um produto de cor amarela, a sacaretina, que interfere na qualidade do açúcar. A peneira mais utilizada no mercado é a peneira rotativa.

### ***Sulfitação***

O emprego de anidrido sulfuroso no tratamento do caldo restringe-se à produção de açúcar branco. A indústria de açúcar utiliza-se da combustão de enxofre para obtenção do gás sulfuroso. Esta operação é realizada em fornalhas e a combustão do enxofre se realiza a 250°C, produzindo dióxido de enxofre. Esse gás é então resfriado, para reduzir ao máximo a possibilidade de formação de SO<sub>3</sub> que representa um consumo inútil de enxofre.

Entre as ações do gás sulfuroso no tratamento, citam-se:

- Ação descorante: considerada a mais importante, pois a sua propriedade redutora faz com que substâncias coloridas sejam transformadas em compostos menos coloridos.
- Ação precipitativa: facilita a aglomeração de colóides hidrófobos (natureza inorgânica) e provoca precipitação dos colóides hidrófilos (natureza orgânica), através da estabilidade de cargas;
- Ação preservativa: é um poderoso anti-séptico;
- Ação fluidificante: reduz a viscosidade do caldo, como consequência do efeito precipitativo;
- Ação purificante;

### ***Calagem***

O processo de calagem consiste em adicionar leite de cal ao caldo, de forma contínua ou intermitente, até que o pH do caldo, que após a sulfitação é de 3,8 a 4,3, atinja valores em torno de 6,8 a 7,2, com o intuito de se obter açúcar branco.

O leite de cal, que nada mais é que uma suspensão de hidróxido de cálcio, deve ser preparado anteriormente, fazendo-se a hidratação da cal. A adição da cal em pó não é recomendada devido ao seu efeito novicho sobre os componentes do caldo, principalmente aos açúcares redutores, e o perigo da superalcalinização localizada.

A reação mais importante do leite de cal é com o fósforo, formando o fosfato de cálcio, que é insolúvel no caldo e se precipita. A remoção desse elemento é da ordem de 80 a 90% quando o pH atinge 7,5, o restante permanece no caldo clarificado na forma de compostos orgânicos. Outra reação importante é entre o anidrido sulforoso e a cal, dando origem a um sal pouco solúvel em meio neutro e alcalino, o sulfito de cálcio.

Enfim, a finalidade da adição de leite de cal é precipitar as impurezas. A determinação e o controle de sua quantidade deve ser a mais correta possível, pois com o leite em excesso, açúcares redutores são decompostos, formando produtos escuros que dificultam a decantação, filtração e cristalização. Por outro lado, a falta dele faz com que o caldo permaneça turvo, mesmo depois de decantado; além disso, há perdas de sacarose por inversão.

### ***Adição de ácido fosfórico e auxiliares de clarificação (polímeros)***

A adição de ácido fosfórico ou outros produtos fosfatados ao caldo em tratamento, antes da decantação, constitui uma prática bastante difundida em usinas. Para o caldo ser decantado eficientemente, deve conter no mínimo 0,3% de  $P_2O_5$ . Isso porque o precipitado de cálcio que se forma ao ser adicionado junto com a cal é caracteristicamente de natureza floculante, e quando em sedimentação, exerce papel de absorvente, aprisionando e arrastando outros não açúcares, contribuindo para obtenção de um caldo mais límpido, melhor clarificado.

### ***Aquecimento***

Essa fase consiste na elevação da temperatura do caldo até valores em torno de 100 a 105°C, visando remover albuminas e impurezas coloidais, induzindo sua separação por floculação e precipitação nos decantadores. A temperatura limite de 105°C é adotada, pois, quando ultrapassada, existe a possibilidade das ceras presentes no caldo emulsificarem-se, tornando difícil sua separação.

Os aquecedores utilizados atualmente são tubulares verticais, e os vapores utilizados como fluidos térmicos possuem as seguintes fontes: “escape” das turbinas, e vapor “vegetal” originado no pré-evaporador ou no conjunto de evaporadores.

Esses equipamentos podem ser divididos em primários e secundários. Nos primários, o caldo é pré-aquecido até uma temperatura de 82°C a 93°C com vapor proveniente do segundo e do terceiro efeito da evaporação. Já no secundário, o aquecimento é finalizado atingindo a temperatura de 105°C através do vapor vegetal gerado na pré-evaporação ou vapor de escape proveniente das turbinas.

Com o caldo passando pelos aquecedores, parte das impurezas é depositada formando incrustações como silicatos, sulfitos fosfatados e fibra de cana. Isto reduz a eficiência da troca térmica, requerendo limpeza periódica das superfícies de aquecimento.

Em resumo, com a clarificação química anteriormente descrita, há a formação de flóculos que se apresentam amorfos. Aumentando a temperatura, há maior movimentação desses, colocando-os em maior contato, e conseqüentemente, aumentando seu tamanho e densidade. Isso faz com que a viscosidade do caldo diminua, induzindo uma melhor e mais eficiente separação nos decantadores.

### ***Decantação***

Após o tratamento químico e térmico, o caldo é colocado em repouso para que haja a remoção das impurezas tanto por floculação quanto por sedimentação. Assim, os objetivos dessa etapa são:

- Precipitação e coagulação dos colóides tão completa quanto possível;
- Alta velocidade de assentamento;
- Mínimo volume de borra;
- Produção de caldo o mais clarificado possível.

A precipitação incompleta pode ocorrer devido ao pequeno tamanho das partículas e a ação coloidal protetora, ou ainda pela densidade de algumas partículas semelhante à do líquido.

A precipitação lenta é atribuída à alta viscosidade do caldo, à excessiva área superficial das partículas ou como já mencionada, à pequena diferença entre as densidades do líquido e do particulado.

Nessa etapa é que se verifica se a dosagem dos produtos no tratamento químico foi correta, pois caso contrário, o caldo poderá ficar turvo e será gerada uma alta quantidade de lodo.

O tempo de decantação, feita normalmente em bateladas, varia entre 2,5 e 3h. A relação com a temperatura deve ser levada em conta, pois na temperatura de 105°C, a alta exposição do caldo poderá causar a inversão da sacarose, destruição de açúcares redutores, influenciando diretamente na eficiência.

### ***Filtração***

Durante o processo de decantação, a matéria em suspensão e os colóides, ambos coagulados, são separados do caldo clarificado, que por sua vez representa cerca de 90% do caldo original. O lodo decantado sofre um tratamento e é levado à filtração, onde é separado do precipitado. Normalmente essa separação é feita pelo filtro rotativo a vácuo, sendo também muito utilizado o filtro prensa. O caldo extraído retorna à fase de calagem.

O lodo decantado e muito gelatinoso não pode ser submetido à filtração diretamente. Assim, adiciona-se o bagacilho, proveniente do peneiramento, que serve como auxiliar filtrante, aumentando a porosidade do bolo. E também é muito comum a adição de leite de cal antes da filtração, pois as características físicas do lodo são melhoradas, tornando os flocos mais densos por aglomeração.

Altas temperaturas do lodo também beneficiam essa etapa devido à redução da viscosidade de caldo que impregna nos poros do filtro. Verificou-se que é vantajoso realizar a filtração acima de 80°C.

#### **3.2.2.7. Produção de Etanol**

O caldo misto proveniente da extração e após o tratamento, é enviado para a etapa de fermentação. Atualmente, grande parte das usinas utiliza um pré-evaporador entre essas etapas de modo a corrigir o °Brix e reduzir a elevada quantidade de água adicionada na etapa da embebição. Outro modo de realizar essa correção é através da adição de melaço, mel residual da fábrica de açúcar, ou do xarope da etapa de evaporação.

Essa próxima etapa, em que se verifica a transformação do açúcar em etanol, geralmente é realizada de forma descontínua (bateladas) em tanques denominados dornas.

As leveduras, microorganismos unicelulares, produzem um conjunto de enzimas que catalisam a reação de fermentação. No Brasil, utiliza-se o processo denominado Melle-Bionot, no qual se promove a reutilização das leveduras após a separação, por centrifugação, do mosto fermentado em duas frações: leite de levedura e vinho delevedurado ou centrifugado.

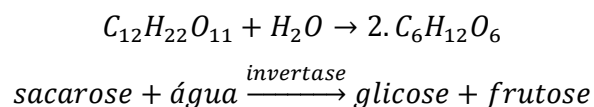
O vinho centrifugado segue para a dorna volante (tanque de mesma capacidade que a dorna de fermentação, que serve de pulmão da destilaria); o leite de levedura é diluído em água e tratado com ácido sulfúrico em tanques chamados cubas e posteriormente retorna ao processo.

##### **3.2.2.7.1. Fermentação**

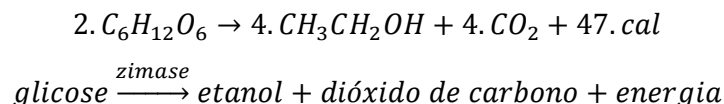
A fermentação alcoólica consiste na transformação dos açúcares do mosto em etanol, gás carbônico e energia, sob a ação enzimática das leveduras.

Embora o processo seja complexo, para fins práticos, pode-se representá-lo segundo as etapas a seguir:

- Sacarificação: consiste no desdobramento de substâncias não diretamente fermentescíveis em outras diretamente fermentescíveis.



- Fermentação alcoólica



A invertase e a zimase constituem-se em enzimas produzidas pelas leveduras. Quando as condições de temperatura, acidez, concentração de açúcares, qualidade de cana, higiene, preparação de pé de cuba e mosto são impróprias, outros tipos de microorganismos podem se desenvolver, consumindo os açúcares ou o etanol já produzido, transformando-os em produtos indesejáveis, reduzindo o rendimento do processo e a qualidade do álcool. Em termos energéticos, essa etapa não representa grande significado na usina, mas o rendimento desta operação é fundamental ao processo global, uma vez que, nessa etapa, ocorre a conversão da matéria-prima em álcool.

As dornas de fermentação são normalmente construídas em aço carbono, sendo a alimentação feita pela parte superior. Na parte inferior, são instalados trocadores de calor de placas para realizarem o resfriamento do mosto durante o processo fermentativo, pois como a reação é exotérmica e produz grande quantidade de calor, a temperatura precisa ser mantida constante, em média de 32 a 35°C, de modo que o ambiente permaneça mais favorável para a conversão do açúcar em álcool. Nesse resfriamento é utilizada água proveniente das torres de resfriamento, construídas exclusivamente para esse propósito. Temperaturas acima dessa faixa são prejudiciais às leveduras, além de aumentar a evaporação de álcool.

O fechamento das dornas permite a recuperação de perdas de álcool por evaporação e arraste, através da lavagem dos vapores liberados com água, em uma coluna com enchimento.

### ***Processos Descontínuos***

Em escala industrial, a produção de etanol ocorre por fermentação de acordo com os requisitos cinéticos propostos pelo processo Melle-Boinot. Este consiste basicamente na recuperação das células de leveduras de uma dorna, depois de concluída a fermentação e conseqüente reutilização, na fermentação seguinte, evitando a etapa trabalhosa de elaborar um pé-de-cuba para cada dorna. Essa reutilização minimiza a multiplicação celular, portanto, o consumo de açúcar para esse fim passa a ser utilizado na atividade de conversão em álcool.

A recuperação do fermento é feita mediante a centrifugação do vinho resultante da fermentação do mosto, resultando em duas correntes, uma constituída pelo vinho livre das leveduras (delevedurado ou centrifugado) e uma suspensão de leveduras, denominada leite de levedura. Normalmente, a relação é de 90% de vinho centrifugado e 10% de leite de levedura.

As centrífugas de vinho são equipamentos constituídos por um rotor com boquilhas de descarga. A alimentação é realizada no centro desse rotor, sendo distribuída à periferia, ocasionando a separação entre o creme de levedura e a fração menos densa. Normalmente, são instalados filtros antes desses equipamentos, pois partículas em suspensão podem ocasionar o entupimento das boquilhas.

O vinho separado pela centrífuga é enviado para a dorna volante, e posteriormente, para a destilaria. O leite de levedura é encaminhado às cubas de tratamento, onde é diluído com água na proporção de dois volumes de água para 1 de leite quando se trabalha com mosto de melaço, e na proporção de 1:1 quando se trabalha com caldo de cana-de-açúcar.

Adiciona-se também ácido sulfúrico até atingir pH entre 2,5 – 3,0, agitando-se a cuba durante a acidificação. O leite de leveduras é mantido em repouso por duas ou três horas.

Na figura 8, aparece representado o processo Melle-Boinot.

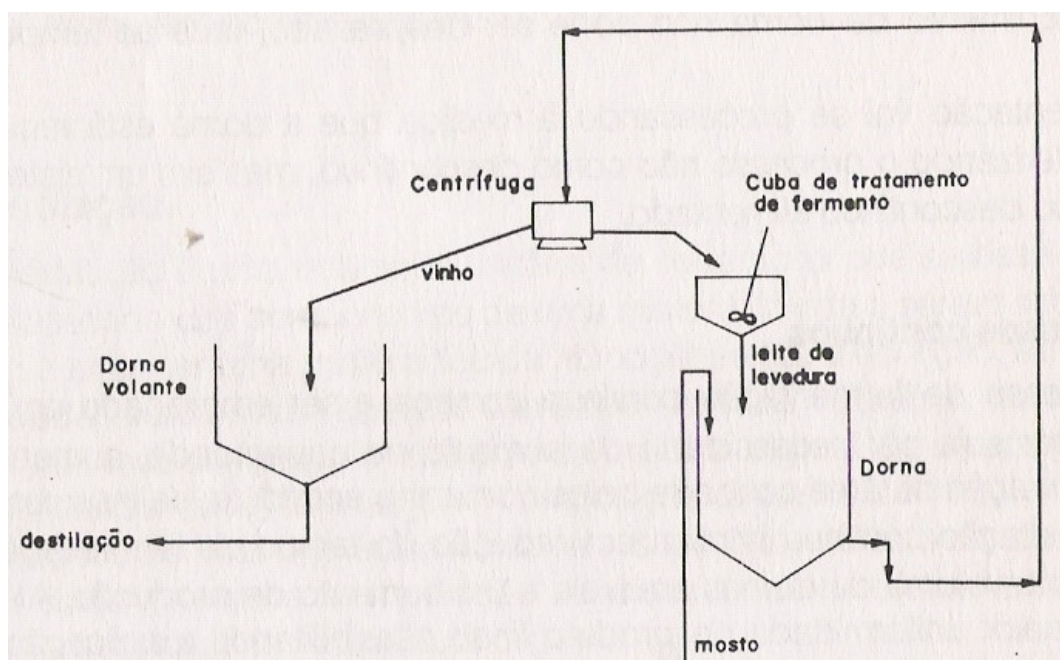


Figura 8 - Esquema geral do processo de fermentação Melle-Boinot

O tempo de fermentação é de, em média, 8h. O processo será acompanhado pela determinação horária da concentração ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) na dorna. Como o grau  $^{\circ}\text{Brix}$  representa o teor de sólidos solúveis na solução, esta medida vai reduzindo ao longo da fermentação. Quando os valores  $^{\circ}\text{Brix}$  começam a se repetir, o conteúdo da dorna está pronto para ser enviado à centrifugação.

Em escala industrial, quando se trabalha com dornas de grande capacidade, o tempo de carga e descarga da dorna não pode ser desprezado perante o tempo total de fermentação.

### ***Processos Contínuos***

A fermentação contínua implica na redução do tempo de fermentação para um mesmo volume de dornas, representando um ganho de produção. Além disso, proporciona uma maior uniformidade ao produto final, possibilitando a aplicação de controle automático.

Os problemas relacionados à utilização desse processo em escala industrial são atribuídos às dificuldades técnicas em se manter funcionamento normal, em condições assépticas, e sem interrupções por um longo período de tempo, além do desconhecimento parcial do comportamento cinético dos processos fermentativos contínuos.

#### **3.2.2.7.2. Destilação**

Destilação é uma operação unitária de separação que se baseia na diferença de volatilidade dos componentes de uma mistura líquida a serem separados.

Ao se aquecer uma mistura líquida homogênea até o ponto de ebulição, as bolhas de vapor formadas são mais ricas nos componentes mais voláteis, e, portanto, o líquido remanescente terá composição diferente da mistura original, o mesmo acontecerá com o vapor removido que, caso seja condensado, também terá diferente composição em relação à mistura original.

Repetindo-se esta operação várias vezes e utilizando-se o condensado de uma operação como mistura da operação seguinte, pode-se efetuar a separação dos componentes constituintes da mistura original. Esse é o princípio da coluna de destilação.

Esse equipamento é um vaso cilíndrico que conta com dispositivos internos para promover o contato líquido-vapor. Esses dispositivos de contato podem ser uma série de pratos ou bandejas (perfuradas, valvuladas ou com borbulhadores) ou ainda um leito fixo de enchimento.

Normalmente, quando se tem pratos acima e abaixo da alimentação (coluna fracionada), existe a possibilidade de ambos os produtos, de topo e de fundo, serem “ricos”, sendo o primeiro rico em componentes voláteis e o segundo de componentes menos voláteis. O vapor que sai do topo da coluna é condensado e parcialmente retornado para o prato de topo, como refluxo, garantindo a corrente líquida nos pratos localizados acima da alimentação.

A fase vapor é gerada a partir do uso de um trocador de calor indireto (refervedor) instalado na base da coluna, ou então, o vapor é inserido diretamente na base da coluna (borbotagem).



O vapor gerado no topo da coluna D segue para os condensadores R1 e R2, uma parte retorna à coluna como refluxo, enquanto que outra parte constitui o álcool de segunda (92°GL), que pode ser armazenado, ou em algumas usinas, é destilado novamente, sendo enviado à dorna volante.

A corrente de flegma alimenta a coluna seguinte, entrando no fundo da coluna B (coluna de retificação) e resultando em flegmaça, óleo fusel e álcool hidratado. A flegmaça sai do fundo da coluna B' (coluna de esgotamento), sendo utilizada para a limpeza das dornas de fermentação, dorna volante e dorna para as centrífugas.

O óleo fusel é formado por produtos secundários da fermentação, como alcoóis superiores, aldeídos e compostos orgânicos de elevado ponto de ebulição. O óleo fusel segue para armazenagem ou pode retornar ao processo, caso seja feita uma lavagem com água, que recupera os alcoóis presentes na mistura. O álcool hidratado é resfriado e encaminhado para armazenagem ou é enviado para a coluna C (coluna de desidratação).

Na maioria das destilarias, o benzeno é utilizado na desidratação. A coluna C conta com um decantador encarregado de separar a mistura ternária, uma vez que a ligação química do benzeno com a água é mais forte do que com o álcool. Assim, o álcool já desidratado, ou seja, anidro é enviado para armazenagem, enquanto a fase superior da coluna vai para a coluna P, onde é feita a recuperação do benzeno, que volta para o processo. Atualmente, o benzeno vem sendo substituído pelo etileno glicol (MEG), que se mostra mais eficiente na desidratação.

#### **3.2.2.8. Geração de vapor e Acionamento de Equipamentos**

O acionamento de equipamentos nas usinas e destilarias é feito basicamente através de vapor e energia elétrica.

O combustível básico utilizado é o bagaço da cana-de-açúcar proveniente da seção de extração, que antigamente era descartado. As caldeiras mais utilizadas são do tipo grelha basculante ou grelha inclinada.

As pressões de vapor obtidas pelas caldeiras variam muito, dependendo da necessidade energética da usina; atualmente grande parte das usinas utiliza vapores de 21 ou 42 kgf/cm<sup>2</sup>. Existem destilarias que já operam com caldeiras de 67 kgf/cm<sup>2</sup>.

Esse vapor primário é utilizado para dois fins: acionamento de equipamentos e geração de energia elétrica. O primeiro é feito por turbinas a vapor, predominantemente de simples estágio e de contrapressão, que também são empregadas nos conjuntos de turbogeradores. Equipamentos turbo acionados são, em geral, os picadores, desfibradores, ternos de moenda e bomba de alimentação de água de caldeira. A energia elétrica consumida é na maior parte autogerada e o restante é adquirido pela rede concessionária, sendo a relação entre essas parcelas dependentes do balanço energético de cada unidade.

O vapor de contrapressão proveniente das turbinas, em média à pressão de 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, é utilizado no processo produtivo propriamente dito. Na eventualidade de falta de vapor de escape, existe uma linha de vapor com válvula redutora de pressão (válvula condicionadora), que permite o fornecimento de vapor diretamente das caldeiras para o coletor de vapor secundário.

O condensado, isento de impurezas, é retornado ao conjunto de caldeiras, e a parcela contaminada é empregada para fins de aquecimento, como por exemplo, água de lavagem das dornas e cubas, embebição, lavagem dos filtros entre outros.

#### **3.2.2.9. Sistemas Auxiliares**

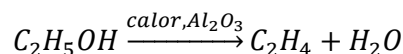
Assim como toda indústria, as usinas possuem uma área destinada às águas utilizadas em seus processos. Nessa área estão alocadas torres de resfriamento, estação de tratamento de água e de desmineralização, e tanques para os diversos tipos de águas.

### 3.2.3. Produção de eteno a partir de etanol

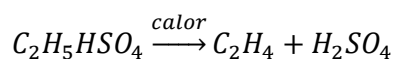
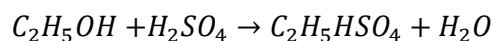
A produção de eteno a partir do etanol é realizada pela desidratação catalítica do último com temperatura relativamente alta (acima de 150°C), resultando em eteno e água.

O catalisador pode ser um óxido metálico, como por exemplo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou um ácido que funciona como agente desidratante, dentre esses o mais usual é o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). As reações que ocorrem são as seguintes:

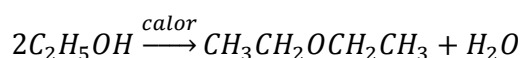
- Óxido metálico:



- Ácido:



A temperatura é um fator crucial, pois existe a formação de um éter em temperaturas inferiores a 150°C, além de a reação ser reversível, sendo o equilíbrio favorecido por temperaturas elevadas (Chen, 2010):



Para se atingir uma temperatura favorável à formação de eteno, inicialmente o etanol é aquecido, para depois ser enviado a reatores adiabáticos, sendo a temperatura do reagente controlada através do aquecimento destes entre cada reator.

Após a reação, parte do fluido é reciclada e o restante enviado para uma torre de resfriamento, depois é comprimido e entra em uma coluna de lavagem com hidróxido de sódio. Concluída a etapa, este passa por um secador, e finalmente é enviado à coluna de destilação, onde eteno será separado dos subprodutos de maior massa molecular formados no processo.

Por fim, passa ainda por um aquecedor e um “stripper” para separar frações mais leves presentes na corrente, para finalmente chegar a uma corrente com elevado grau de pureza de eteno (maior que 99%) (Chen, 2010).

### **3.3.Avaliação do ciclo de vida**

#### **3.3.1. Definição**

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que permite avaliar o desempenho ambiental de um produto ao longo de toda sua trajetória. Portanto, para se compreender o conceito de ACV, faz-se necessário entender a definição de ciclo de vida e as implicações relacionadas a esta concepção.

A primeira abordagem que engloba este conceito se faz presente na “Filosofia de Ciclo de Vida”, ou Life Cycle Thinking (LCT) (SONNEMAN, 2002).

De acordo com esta concepção, o LCT apregoa que o bom desempenho ambiental de uma única unidade da cadeia produtiva não garante a sustentabilidade de todo o processo produtivo. Para a obtenção deste fim, é necessário que todas as partes integrantes deste conjunto de processos apresentem desempenho ambiental adequado.

Uma avaliação importante a respeito do produto parte do princípio de que sua fabricação não é simplesmente para atender à demanda da sociedade, e sim para cumprir uma determinada função. Dessa forma, os impactos ambientais gerados por um bem de consumo não se limitam apenas no processo de produção do mesmo, como abrange também toda a trajetória do produto até o cumprimento de sua função (Kulay, 2010).

Todo o caminho percorrido por um bem até que seja atendida sua função, desde a retirada de matéria prima até sua disposição final, pode ser compreendido como o ciclo de vida deste produto (Vigon, 1993). Como é ilustrado na figura 10.

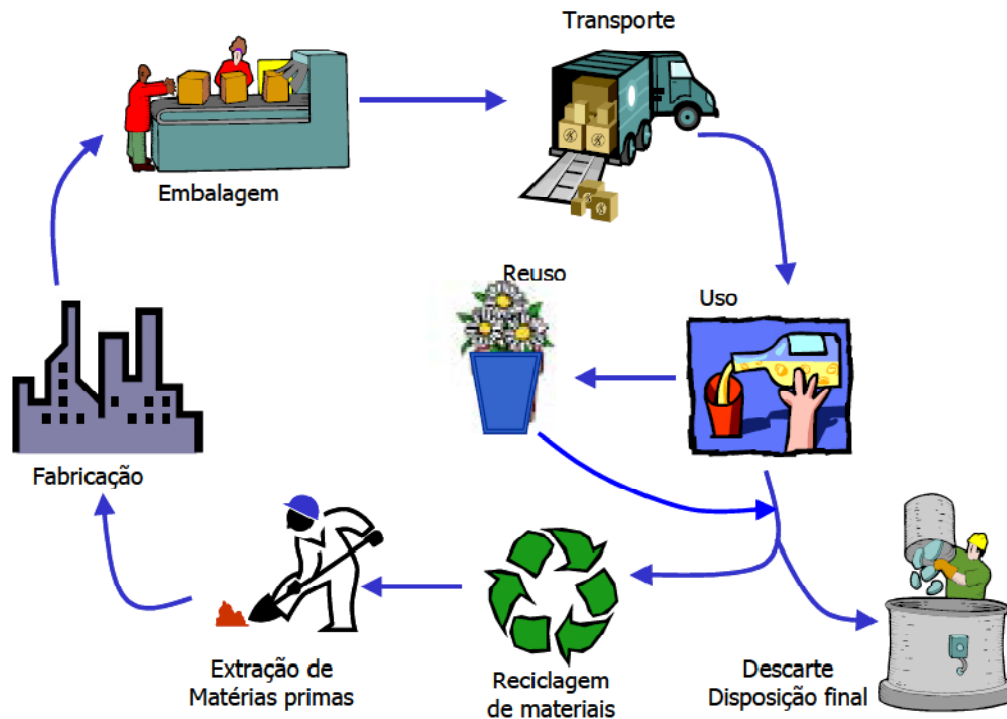


Figura 10 – Ciclo de vida de um produto

Fonte – EEA (2001)

Retomando a definição de Avaliação do Ciclo de Vida, este conceito pode ser visto como uma ferramenta de foco sistêmico que avalia o desempenho ambiental de produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Tal análise é procedida de forma a avaliar todas as interações entre os processos compreendidos pelo ciclo de vida do material e os impactos ambientais gerados em cada uma destas etapas (Curran, 1996).

### 3.3.2. Histórico

No final da década de 1960, foram realizados os primeiros estudos ambientais relacionados com ciclo de vida de produtos, com o objetivo de avaliar a eficiência energética, consumo de recursos naturais e disposição de resíduos.

Dentro dos exemplos de análises ambientais desenvolvidas nesta época, merece especial destaque o estudo realizado pela Coca Cola Co., no qual foram avaliados os aspectos referentes ao consumo de matéria prima e às emissões ao ambiente, relacionados ao tipo de embalagem do produto (EEA, 2001).

Nesta época, foi desenvolvida uma metodologia para análises com esse enfoque, conhecida como *Resource and Enviromental Profile Analysis* (REPA), cujo embasamento teórico forneceu a fundamentação necessária para a criação da ACV posteriormente.

Porém, com o passar do tempo, a variação entre os padrões e critérios descritos pela metodologia então utilizada, aliada a uma escassez de dados confiáveis, fez com que as abordagens ambientais fossem desacreditadas, fazendo-se necessário a elaboração de uma nova metodologia, que pudesse solucionar as limitações da REPA e avaliar de forma mais eficiente e confiável o desempenho ambiental de um produto. A evolução desta metodologia levou ao surgimento da ACV.

Para se evitar problemas de diversidade de critérios, como ocorria anteriormente, e dado ao reconhecimento adquirido pela ACV, a *International Organization for Standardization* (ISO) padronizou a metodologia aplicada pela Avaliação do Ciclo de Vida através da família 14040 da série ISO 14000.

### **3.3.3. Metodologia**

De acordo com a ISO 14040, a metodologia da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida é composta por quatro fases, mostradas na figura 11:

- Definição de objetivos e escopo;
- Análise do inventário;
- Avaliação dos Impactos ambientais;
- Interpretação dos resultados.

Todas estas etapas se inter relacionam, o que confirma o caráter iterativo desta metodologia.

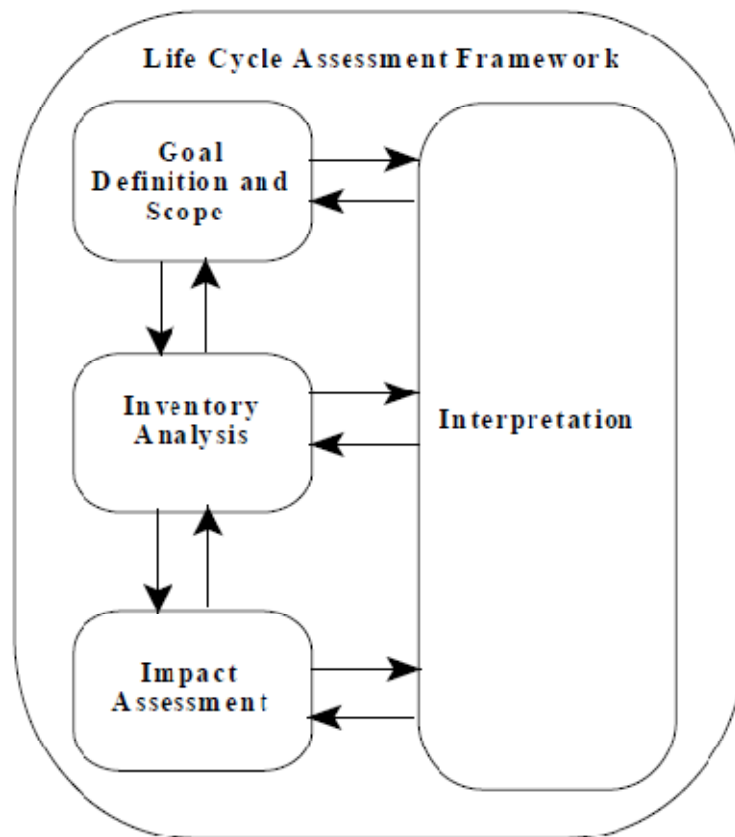


Figura 11 - Etapas da ACV

Fonte - ISO (2006)

### ***Definição de objetivos e escopo***

Na fase de definição de objetivos, são decididas as razões que levam à realização do estudo, a profundidade da análise e o público alvo para o qual serão apresentados os resultados.

Na definição do escopo, são estabelecidos os parâmetros como unidade funcional, função e fluxo de referência, delimitadas as fronteiras do sistema, e adotados os critérios e hipóteses a serem utilizadas, e explicitadas as categorias de impacto que serão analisadas em etapas futuras (ISO 14040, 1997).

### ***Análise do Inventário***

A segunda etapa do procedimento metodológico de ACV consiste na análise de inventário. Nesta fase, são coletados e quantificados todos os dados referentes aos fluxos de massa e energia relacionados ao ciclo de vida do produto.

A construção do inventário deve ser dada de modo iterativo e envolve a checagem de procedimentos de forma a garantir a qualidade estabelecida na primeira etapa. Caso seja necessária, a avaliação de inventário pode levar a uma redefinição.

Conforme a ISO 14040 (1997), para a execução dessa segunda etapa da ACV, deve ser seguida uma seqüência lógica de atividades compreendida por:

- Preparação para a coleta de dados, na qual será desenvolvido o diagrama de fluxo de processo, envolvendo todas as etapas do ciclo de vida do produto;
- Coleta de dados;
- Definição e refinamento dos limites do sistema;
- Determinação dos procedimentos de cálculo;
- Procedimentos de alocação.

Além disso, a mesma norma citada ainda apregoa que o inventário deve compreender:

- Apresentação do sistema de produto a ser estudado e dos limites envolvendo as etapas do ciclo de vida do produto, além das unidades de processo e das entradas e saídas do sistema;
- Definição de uma base para comparação entre sistemas, no caso de análises comparativas;
- Procedimentos de cálculo e da coleta de dados, levando em consideração a alocação de produtos e o tratamento dispensável à energia;
- Elementos necessários e suficientes para que o leitor seja capaz de efetuar uma interpretação correta dos resultados da análise do inventário.

### ***Avaliação dos Impactos Ambientais***

A avaliação dos impactos ambientais é a etapa da ACV responsável por identificar, caracterizar e analisar de forma quantitativa e qualitativa os impactos ambientais definidos na fase anterior.

Segundo a ISO 14040 (1997), esta avaliação de impactos deve apresentar três constituintes:

- Definição de categorias;
- Classificação;
- Caracterização.

Durante a definição de categorias, ocorre a seleção e identificação das categorias de impacto a serem avaliadas no estudo. Os tipos de impactos devem ser estabelecidos com base no conhecimento científico dos processos compreendidos pela análise e nos mecanismos ambientais. Quando isso não é possível, o julgamento de valores pode substituir parte do conhecimento científico (CHEHEBE, 1998).

As categorias selecionadas podem ser recursos abióticos, recursos bióticos, uso do solo, aquecimento global, destruição da camada de ozônio, impactos ecológicos, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação, eutrofização e ambiente de trabalho.

A classificação, portanto, consiste justamente na alocação de dados do inventário em alguma dessas categorias escolhidas. Este estágio é fundamental para a validação dos dados considerados na avaliação de impacto.

A caracterização compreende a modelagem das categorias em termos de indicadores que permitam agregar os dados obtidos no inventário. Estes índices são denominados fatores de equivalência. Com a conclusão desta etapa, é possível realizar o perfil de impactos ambientais, com o qual se pode analisar e comparar os impactos relevantes ao estudo.

Uma etapa opcional na avaliação de impactos é a normalização e valoração, que transforma todos os índices de impacto em uma única base de referência,

permitindo a mensuração dos impactos gerados em cada categoria, e, em alguns casos, melhorando o desempenho ambiental do sistema.

### **Interpretação dos resultados**

No estágio de interpretação dos resultados, ocorre a contabilização e análise dos dados obtidos nas etapas anteriores. Esta fase é fundamental para a obtenção de conclusões e recomendações, que, além de justificar a realização do estudo, têm grande influência na tomada de decisões.

A ISO 14040 (1997) define a interpretação dos resultados como o agrupamento de três etapas:

- Identificação das questões ambientais mais significativas baseadas nos resultados da análise do inventário ou ACV.
- Avaliação, que pode incluir elementos como a checagem da integridade, sensibilidade e consistência;
- Conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais significativas.

### **3.3.4. Aplicações**

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica cuja metodologia permite a análise do produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, tornando possível a avaliação das interações entre cada etapa e os impactos decorrentes desta trajetória.

A Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC, 1993) apregoa que a realização da ACV deve ter como premissas:

- Fornecer uma imagem de maneira mais fiel possível de todas as interações existentes com o meio ambiente;

- Contribuir para o entendimento da natureza global e interdependente de consequências ambientais das atividades humanas;
- Gerar subsídios capazes de definir os efeitos ambientais dessas atividades;
- Identificar oportunidades para a obtenção de melhorias do desempenho ambiental do sistema compreendido pelo estudo.

De uma maneira geral, pode-se definir as aplicações da ACV em dois grupos principais: a identificação de oportunidades para melhoria do desempenho ambiental de um produto e a comparação ambiental entre materiais que cumprem funções equivalentes (Kulay, 2010).

Na primeira aplicação citada da ACV, procura-se fazer o estudo para que, após a identificação e avaliação de todas as interações e impactos compreendidos no ciclo de vida do produto, seja possível a tomada de medidas que visem à melhoria do desempenho ambiental do sistema e, em alguns casos, a redução de custos.

Já a aplicação da ACV com foco na comparação entre produtos de função equivalente é usualmente utilizada por empresas que têm como objetivo demonstrar que o desempenho ambiental de seu material é superior ao da concorrência, e, com isso, ampliar seu mercado de atuação.

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser ainda utilizada em uma variedade de propósitos. A SETAC (1993) cita algumas aplicações para esta técnica:

- Desenvolvimento do planejamento estratégico;
- Otimização e melhoria de projeto de produtos e processos;
- Identificação de oportunidades de melhoria ambiental;
- Auxílio ao estabelecimento de procedimentos comerciais ou especificações;
- Suporte à auditoria ambiental e à minimização de resíduos;
- Desenvolvimento do marketing ambiental;
- Definição de políticas públicas e privadas;

- Auxílio às metodologias educacionais.

Vale ressaltar que a aplicação de ACV vem ganhando cada vez mais importância para o atendimento à demanda por bens de consumo, principalmente no que se refere à concorrência por mercados, uma vez que a variável ambiental passa a ser cada vez mais considerada no ato de aquisição de um produto, principalmente em mercados internacionais. Dessa forma, em um futuro próximo, o desempenho ambiental pode ser fator decisivo para a opção de compra de um determinado bem.

### **3.3.5. Limitações da técnica**

Apesar de ser uma excelente ferramenta para a determinação do desempenho ambiental de um produto, a ACV ainda possui algumas limitações.

Um dos principais problemas para a aplicação desta técnica consiste na necessidade de uma grande quantidade de dados para a execução do estudo, o que pode levar ao desinteresse da entidade que desejaria utilizar a ACV, ou tornar inviável a coleta de informações no caso de preservação da confidencialidade de dados por parte uma determinada empresa.

Outra dificuldade em se proceder com a ACV é baseada no fato de que algumas companhias temem que o resultado desta avaliação prove a ineficiência de seu produto quanto ao quesito ambiental, levando a uma perda de mercado.

Além dos fatores citados, vale ainda mencionar a falta de modelos de aplicação de ACV para avaliação de impactos ambientais no hemisfério sul, o que leva a utilização de modelos europeus e norte americanos, os quais foram desenvolvidos para as características destas regiões do hemisfério norte.

## **4. Avaliação do desempenho ambiental do polietileno obtido a partir de fontes renováveis**

A análise de ciclo de vida do polietileno obtido a partir da cana de açúcar foi conduzida de acordo com a padronização conceitual nos termos estabelecidos pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044

### **4.1. Definição do escopo**

#### **4.1.1. Função**

Produzir polietileno a partir de etanol oriundo da cana de açúcar.

#### **4.1.2. Unidade funcional**

Produzir uma tonelada de polietileno obtido através da cana de açúcar.

#### **4.1.3. Desempenho técnico e fluxo de referência**

Como para esta avaliação de ciclo de vida do produto foi utilizada uma abordagem do tipo “nascimento até a saída da unidade fabril”, o fluxo de referência equivale à unidade funcional, que é produzir uma tonelada de polietileno obtido através de cana de açúcar.

#### **4.1.4. Fronteiras do sistema**

Foram considerados todos os processos elementares diretamente ligados à obtenção do produto, sendo eles: polimerização; desidratação do etanol a eteno; produção de etanol a partir da cana de açúcar; plantio da cana de açúcar; preparação do solo para cultivo; obtenção de matérias primas; atividades de transporte; utilidades de processo como geração de vapor, geração e transmissão de energia elétrica por ciclo combinado e adquirida da concessionária.

#### **4.1.5. Critérios de qualidade dos dados**

Os consumos e emissões relacionados para a avaliação de ciclo de vida do polietileno obtido a partir da cana de açúcar foram modelados usando dados secundários, provenientes de fontes citadas na referência bibliográfica e, em alguns casos, do banco de dados do software SimaPro.

#### **4.1.6. Alocação**

Não foram utilizados critérios de alocação para a realização deste estudo, uma vez que essa não se aplica, haja vista que o processo estudado tem como único produto o estudado.

#### **4.1.7. Categorias e modelos de avaliação de impacto**

Para este trabalho, foi selecionado o modelo CML baseline 2000 adaptado para o inventário de ciclo de vida, esse modelo inclui análise de: depleção abiótica, acidificação, eutrofização, aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica e eco-toxicidade terrestre

### **4.2. Inventário de ciclo de vida**

#### **4.2.1. Premissas**

Para a realização desta avaliação de ciclo de vida, foi considerada uma série de premissas, as quais são mostradas a seguir:

- Para as situações nas quais não foi possível obter dados referentes às emissões e consumo do processo, os dados foram calculados a partir de balanços de massa e energia;
- Para o cálculo das emissões relacionadas ao transporte, foi considerada a média das distâncias do etanol produzido no estado de São Paulo até o porto de Santos, usando como modal o transporte rodoviário; do porto de Santos ao porto do Rio Grande do Sul por navio e desse porto até a planta de eteno novamente por caminhão. Não foram considerados os impactos referentes ao transporte da fábrica de eteno à fábrica de polietileno;
- Somente foram consideradas as entradas e saídas de material e energia que puderam ser efetivamente verificadas nas fronteiras do processo;

- Para o sistema de produto foram consideradas apenas as cargas ambientais associadas ao processo até a obtenção de polietileno, não considerando as transformações e usos deste produto após esta etapa.

### 4.3. Resultados

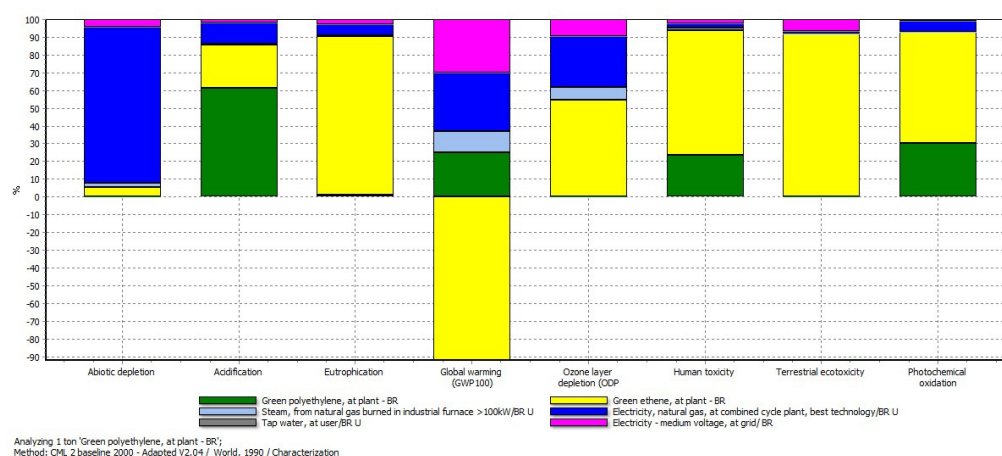
O perfil de análise de impacto ambiental para o polietileno obtido a partir de fontes renováveis foi gerado utilizando o SimaPro 7.0 – versão 7.3, que é uma ferramenta computacional específica para análises dessa natureza.

A tabela 1 mostra o cenário geral, considerando todas as categorias de impacto analisadas no modelo CML 2000 adaptado.

**Tabela 1 – Perfil de impacto ambiental para o polietileno obtido a partir da cana de açúcar – CML baseline 2000**

| Impact category             | Unit                             | Total   |
|-----------------------------|----------------------------------|---------|
| Abiotic depletion           | kg Sb eq                         | 83.90   |
| Acidification               | kg SO <sub>2</sub> eq            | 46.44   |
| Eutrophication              | kg PO <sub>4</sub> eq            | 2.96    |
| Global warming (GWP100)     | kg CO <sub>2</sub> eq            | 119.94  |
| Ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq                     | 0.00016 |
| Human toxicity              | kg 1,4-DB eq                     | 1712.30 |
| Terrestrial ecotoxicity     | kg 1,4-DB eq                     | 15.05   |
| Photochemical oxidation     | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 4.73    |

Na figura 12 pode-se observar melhor a influência de cada processo no impacto em cada categoria.



**Figura 12 – Perfil de impacto ambiental para o polietileno obtido a partir da cana de açúcar**

As contribuições associadas à polimerização estão representadas pelas barras verdes; as de geração de vapor por barras azuis claras; as de água de processo por barras cinzas; as de eteno obtido a partir da cana de açúcar, que engloba desde a obtenção de matérias primas até a obtenção do eteno, pelas barras amarelas; as de eletricidade obtida por ciclo combinado pelas barras azuis escuras e as de eletricidade obtida da rede pelas barras rosas.

Devido à peculiaridade do processo estudado estar justamente na desidratação etílica para a geração de eteno, cabe uma análise do processo até esse instante, sendo os valores do impacto até essa etapa mostrados na tabela 2 a seguir:

**Tabela 2 - Perfil de impacto ambiental para o eteno obtido a partir da cana de açúcar**

| Impact category             | Unit                             | Green ethene, at plant - BR |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Abiotic depletion           | kg Sb eq                         | 4.55                        |
| Acidification               | kg SO <sub>2</sub> eq            | 11.44                       |
| Eutrophication              | kg PO <sub>4</sub> --- eq        | 2.64                        |
| Global warming (GWP100)     | kg CO <sub>2</sub> eq            | -1400.40                    |
| Ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq                     | 8.76E-05                    |
| Human toxicity              | kg 1,4-DB eq                     | 1202.54                     |
| Terrestrial ecotoxicity     | kg 1,4-DB eq                     | 13.79                       |
| Photochemical oxidation     | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 2.95                        |

Cabe agora uma análise em separado de cada categoria de impacto do modelo CML 2000 até a produção de eteno.

#### **4.3.1. Depleção abiótica**

Apesar do caráter renovável do produto, existe uma contribuição importante em seu ciclo de vida para a depleção abiótica de 4,55 kg Sb eq., oriunda principalmente da produção de gás natural (28,79%), usados na obtenção de energia por ciclo combinado e geração de vapor, e obtenção de petróleo bruto (51,57%) usado principalmente na fabricação de combustíveis usados no transporte.

#### **4.3.2. Acidificação**

A acidificação corresponde à outra categoria de impacto de grande importância para este sistema de produto. As cargas ambientais associadas a este impacto se devem à formação de 11,44 kg de SO<sub>2</sub> eq. por tonelada de PE produzida, dos quais 36,5% devem-se ao cultivo de cana de açúcar, 12,5% à produção de etanol, 14,28% ao SO<sub>2</sub> gerado no refino de petróleo, 12,51% ao ácido sulfúrico oriundo da polimerização de eteno e 8,29% ao transporte, sendo 5,81% relativo ao transporte rodoviário e 2,48% ao transporte naval.

#### **4.3.3. Eutrofização**

Para a eutrofização, que corresponde a uma carga ambiental de 2,64 kg PO<sub>4</sub> eq. por tonelada de polietileno, 40,86% devem-se à cultura da cana de açúcar, 14,03% à produção de etanol, 12,90% à produção de fertilizantes fosfatados e 6,50% ao transporte rodoviário.

#### **4.3.4. Aquecimento global**

O perfil de aquecimento global apresenta um caráter peculiar para esta rota tecnológica de produção de polietileno. Apesar das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do processo, principalmente devido à geração de vapor a partir da queima de gás natural, transporte e energia hidroelétrica, no processo onde a discussão está focada, ocorre a fixação de 1,40 t CO<sub>2</sub> eq. devido ao cultivo de cana de açúcar.

#### **4.3.5. Depleção da camada de ozônio**

Nessa categoria merece destaque a produção de petróleo bruto, bem como seu transporte até o Brasil em petroleiros, sendo essas duas atividades responsáveis por 66,33% dos  $8,76 \times 10^{-5}$  kg CFC eq. totais. O transporte de gás natural através de dutos também contribui significativamente com 4,62%.

#### **4.3.6. Toxicidade humana**

O principal contribuinte para o total de 1202,54 kg 1,4 DB eq. é o cultivo de cana de açúcar, responsável por 48,6% do total, podendo ser atribuído ao uso de defensivos agrícolas. Outro importante processo é o de produção de etanol, que responde por 19,7% das emissões totais.

#### **4.3.7. Eco-toxicidade terrestre**

O resultado de 13,79 kg 1,4 DB eq. deve-se mais uma vez principalmente ao uso de defensivos agrícolas no cultivo de cana de açúcar (76,52%) e produção de etanol (3,15%), merecendo destaque ainda a produção de fertilizantes fosfatados (2,18%).

#### **4.3.8. Oxidação fotoquímica**

O principal processo responsável pelos 2,95 kg de  $C_2H_4$  eq. é a desidratação etílica para produção de eteno. Esta etapa responde individualmente por exatos 90,44% do total deste impacto, por conta da emissão de óxidos de nitrogênio e, de hidrocarbonetos de cadeia média ( $C_xH_y$ ), agentes promotores de formação de  $O_3$  troposférico por natureza.

## **5. Possibilidades de melhoria**

Como o mote do trabalho é a tecnologia de desidratação do etanol a eteno, as possibilidades de alteração para melhorar o desempenho ambiental do produto serão focadas nessa etapa do processo.

As alternativas de melhoria devem visar: redução de consumo de matéria prima; melhor aproveitamento energético, com integração entre plantas e redução do consumo de utilidades energéticas; redução de emissões através de recuperação no processo, diluição ou aproveitamento em outras unidades.

Assim, a possibilidade de melhoria pensada foi a utilização dos gases oriundos do processo de desidratação etílica para queima na fornalha, uma vez que esses gases já são queimados;

Não serão feitas propostas para melhoria em termos de redução de consumo de matéria no fluxo principal do processo, pois dada a alta conversão do processo, essa modificação não traria resultados significativos, e, portanto, seria inviável.

## 6. Dimensionamento da melhoria e impacto por ela gerado

A desidratação do etanol produz, além de eteno, também uma quantidade de gases indesejáveis no processo, cujas quantidades, expressas em termos de fluxo de referência definido são apresentadas a seguir na Tabela 3.

**Tabela 3 – Emissão e poder calorífico inferior dos gases oriundos da desidratação etílica**

| Componente | Emissão (kg/t PE) | PCI (kcal/kg) |
|------------|-------------------|---------------|
| Etano      | 5,305             | 11352         |
| Propeno    | 0,637             | 10940         |
| Buteno     | 25,46             | 10830         |

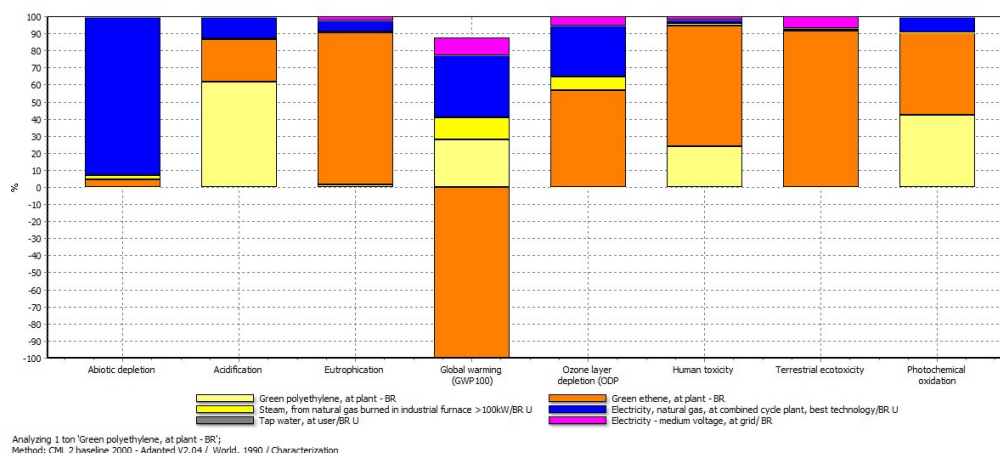
Dessa forma, é possível utilizar estes gases para queima na fornalha, o que possibilitaria a economia de exatos, 1.435.846 KJ para cada tonelada de polietileno produzido.

É possível realizar um comparativo dos impactos entre o cenário inicial e aquele *a posteriori* da implementação da solução de melhoria de desempenho ambiental. A Tabela 4 indicada a seguir apresenta ambas as situações.

**Tabela 4 – Comparativo do perfil de impacto ambiental para o polietileno obtido a partir da cana de açúcar: cenário inicial e após melhoria energética**

| Categorias de Impacto       | Unidades                         | Cenário original | Cenário com melhoria |
|-----------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------|
| Abiotic depletion           | kg Sb eq                         | 83.90            | 79.83                |
| Acidification               | kg SO <sub>2</sub> eq            | 46.44            | 45.88                |
| Eutrophication              | kg PO <sub>4</sub> eq            | 2.96             | 2.94                 |
| Global warming (GWP100)     | kg CO <sub>2</sub> eq            | 119.94           | -170.63              |
| Ozone layer depletion (ODP) | kg CFC-11 eq                     | 0.00016          | 0.00015              |
| Human toxicity              | kg 1,4-DB eq                     | 1712.30          | 1698.19              |
| Terrestrial ecotoxicity     | kg 1,4-DB eq                     | 15.05            | 15.06                |
| Photochemical oxidation     | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 4.73             | 3.38                 |

O perfil de impacto do processo com a implementação pode ser visualizado de maneira esquemática no gráfico indicado pela Figura 13.



**Figura 13 - Perfil de impacto ambiental do polietileno obtido a partir da cana de açúcar após a melhoria de processo**

Como se pode notar a recuperação de gases originariamente emitidos para a atmosfera como alternativa de fornecimento de energia por meio de queima na fornalha altera significativamente o impacto gerado na produção de polietileno a partir de etanol, sendo a mudança mais evidente na categoria aquecimento global, em que o processo global, outrora emissor de CO<sub>2</sub>, passa a fixar o mesmo, uma vez que o consumo de gás natural reduz, apresentando uma melhora de 242%.

Outra categoria com alteração significativa é a oxidação fotoquímica, que apresenta redução de 1,35 kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente, devido à retirada da emissão de hidrocarbonetos na desidratação. As outras categorias também apresentam melhorias, porém as mesmas não são tão impactantes quanto às acima citadas (alteração inferior a 5%).

## **7. Conclusão**

A avaliação do desempenho ambiental do polietileno obtido a partir de cana de açúcar atingiu às expectativas para o nível de detalhamento proposto neste trabalho.

Esta avaliação possibilitou uma melhor compreensão das categorias dos impactos e cargas ambientais associadas à rota tecnológica para produção de polietileno estudada.

Dentro das categorias de impacto, vale ressaltar o aspecto de aquecimento global, para o qual o processo apresenta um desempenho ambiental favorável, por possibilitar a absorção de 1,40 t CO<sub>2</sub> eq. Para as demais categorias, pode-se observar cargas ambientais elevadas associadas a este sistema de produto, o que leva a possibilidade de melhorias.

Como o foco do trabalho é na rota tecnológica de produção do eteno a partir da desidratação do etanol, as soluções buscadas visaram melhorias nesta etapa do processo.

Uma possível alteração pensada foi a queima dos gases provenientes da desidratação etílica na caldeira em operação no ciclo combinado, obtendo-se uma redução da quantidade de gás natural necessária e da emissão de hidrocarbonetos, reduzindo assim os impactos gerados pela extração do primeiro e consumo do segundo. Essa solução mostrou-se promissora, haja vista a redução dos impactos por ela gerados, especialmente no aspecto de aquecimento global, onde a redução foi superior a 240% e oxidação fotoquímica, com uma melhora de 29%.

## 8. Referência bibliográfica

Brasil. Ministério de ciência e Tecnologia. BEM - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – Edição 2010.

Bedia, J.; Barrionuevo, R.; Rodríguez, J.; Cordero, T. Ethanol dehydration to ethylene on acid carbon catalysts.

Camargo, Carlos Augusto; Ushima, Ademar H.; Ribeiro, Alice Maria de M.; Souza, Maria Eugênia de P.; Santos, Newton F. - Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool - Manual de Recomendações - Instituto de Pesquisa Tecnológicas (IPT) - 1990.

Castro, O. M.: Aspectos de manejo do solo. Fundação Cargill. 1985. 67pg.

CHEHEBE, J.R.B. Análise do Ciclo de Vida de Produtos - Ferramenta Gerencial da ISO 14.000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.104p.

Chen, Y.; Wu, Y.; Tao, L.; Dai, B.; Yang, M.; Chen, Z.; Zhu, X. Dehydration reaction of bio-ethanol to ethylene over modified SAPO catalysts. Microbiology Monographs, 2010, Volume 14/2010, 389-404.

Coutinho, F. M. B. et al. – Polietileno: Principais tipos, propriedades e aplicações, 2003.

Corbini, J. L. (1987). Operações agrícolas em tratos culturais. In: Paranhos, S. B., coord. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. 1.ed. Campinas, Fundação Cargill. 1987. 67pg.

CURRAN, M. A. (coord.). **Environmental Life Cycle Assessment**. New York: McGraw Hill, 1996.

EEA - European Environment Agency – Life Cycle Assessment – A guide to approaches, experiences and information sources. Copenhagen. Dinamarca. 2006.

EEA - European Environmental Agency. **Life Cycle Assessment – LCA**. EEA Service Envirowindows. Copenhagen. Dinamarca. 2001.

Freitas, G. R.: Preparo do solo. In: Paranhos, S. B., coord. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. 1.ed. Campinas, Fundação Cargill. 1987. 56pp.

IAC – Instituto Agrônômico de Campinas. Estudo de caso: Destilarias de álcool e usinas de açúcar. Campinas, Documentos técnicos. IAC, n.49. 1994.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Environmental Management – Life cycle assessment: Principles and framework – ISO 14.040*. Genebra: ISO, 2004.

Kulay, L. Avaliação de Ciclo de Vida. Trabalho de Conclusão de Curso I. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Entrevistas semanais. 2010.

Macedo, I. C. et. al. (2004). Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e uso do etanol no Brasil. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretária do Meio Ambiente.

Ometto, A. R. (2000). Discussão sobre fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação socioambiental. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Piacock, A. J. Handbook of Polyethylene. Basel, Nova York: Ed. Marcel Dekker, Inc, 2000.

SETAC. Guidelines for life cycle assessment: a code of practice. Brussels: Society of Enviromental Toxicology and Chemistry, 1993.

Silva, M. R. S. Simpósio: Saúde e Meio Ambiente. Ribeirão Preto. 1998.

SONNEMAN, G. *Environmental damage estimations in industrial process chains –Methodology development with case study on waste incineration and special focus on human health*. Tese (doutorado) - Tarragona. 332p. Universitat Rovira i Virgili – Espanha. 2002.

The Resin Review. The Annual Statistical Report for the U.S. Plastics Industry. American Plastics Council. 2003.

VIGON, B.W. (coord.). *Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles*. Cincinnati, RREL / USEPA, 108 p. 1993 (EPA 1600 / R-92 / 245).

Wells, G. J.; Ray, W. H. E Kosek, J. Effects of Catalyst Activity Profiles on Polyethylene Reactor Dynamics. AIChE Journal, 47, 2768-2780, 2001. <http://www.udop.com.br/>

Acesso: 18 de dezembro de 2010