

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e  
Desenvolvimento Sustentável**

**Autor : Cláudio Plaza Pinto  
Orientador: Luís Augusto Barbosa Cortez**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

# **Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**

**Autor : Cláudio Plaza Pinto**

**Orientador: Luís Augusto Barbosa Cortez**

Curso: Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 1999

S.P. - Brasil

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| UNIDADE      | BC                                  |
| N.º CHAMADA: |                                     |
| V.           | EX.                                 |
| TOMBO BC/    | 39349                               |
| PROG.        | 229/99                              |
| S            | <input type="checkbox"/>            |
| D            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO        | R\$ 11,00                           |
| DATA         | 29/10/99                            |
| N.º CPD      |                                     |

CM-00136592-2

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP**

Pinto, Cláudio Plaza

P648t Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável. / Cláudio Plaza Pinto.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Luis Augusto Barbosa Cortez  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Digestão anaeróbia. 3. Vinhaça. 4. Biodigestor. 5. Cana-de-açúcar - Indústria. 6. Termoeconomia. I. Cortez, Luis Augusto Barbosa. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

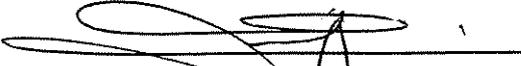
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e  
Desenvolvimento Sustentável**

**Autor : Cláudio Plaza Pinto**

**Orientador: Luís Augusto Barbosa Cortez**



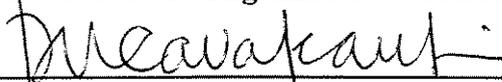
---

**Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez, Presidente  
Faculdade de Engenharia Agrícola**



---

**Prof. Dr. José Tomaz Vieira Pereira  
Faculdade de Engenharia Mecânica**



---

**Profa. Dra. Rachel Negrão Cavalcanti  
Instituto de Geociências**

Campinas, 21 de abril de 1999

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho à minha companheira Júlia, com amor e carinho. Grato pela paciência.

## **Agradecimentos:**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais pelo exemplo de luta e vitória, que continuem ainda por muitos anos, com saúde e serenidade.

Ao meu orientador, sem dúvida, peça fundamental do quebra-cabeças acadêmico, pelo respeito e amizade.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho, especialmente: a Silvia, pela teoria dos custos exergéticos; a Edna, pelos toques, principalmente, o do Brasil Açucareiro; a Neusa, o Rodrigues, o Ênnio, a Branca e a Sônia pelo apoio na infra. Grato.

A Gilson Fuzaro, Jorge Lucas Jr. e Paulo de Lamo, espero ter feito bom uso das valiosas informações.

*“Se sabes pouco, também amas pouco. O Amor é filho do Conhecimento. O Amor arde tanto mais quanto mais profundo for o Conhecimento. Saber Perfeito e Amor Perfeito devem ser a mesma coisa” (Leonardo da Vinci).*

# Índice

|  |             |
|--|-------------|
| <b>ÍNDICE.....</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>RESUMO .....</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>X</b>    |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>   | <b>XI</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>  | <b>XIII</b> |
| <b>NOMENCLATURA .....</b>  | <b>XIV</b>  |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>1. CAPÍTULO 1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E VINHAÇA .....</b>                     | <b>5</b>    |
| 1.1- CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....                                   | 5           |
| 1.1.1- <i>Introdução</i> .....   | 5           |
| 1.1.2- <i>Crescimento, Desenvolvimento, Ciência e Tecnologia</i> .....               | 10          |
| 1.1.3- <i>O Conceito de Desenvolvimento Sustentável</i> .....                        | 18          |
| 1.2- ENERGIA, TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....                         | 26          |
| 1.3- CONTEXTO ATUAL DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....                             | 31          |
| 1.4- TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL ..... | 36          |
| <b>CAPÍTULO 2 ÁLCOOL E VINHAÇA NO BRASIL.....</b>                                    | <b>41</b>   |
| 2.1- A PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL.....   | 41          |
| 2.1.1- <i>Histórico</i> .....  | 41          |
| 2.1.2- <i>Proálcool</i> .....  | 46          |
| 2.1.3- <i>Conjuntura Atual</i> .....   | 47          |
| 2.1.4- <i>Aspectos Ambientais</i> .....  | 52          |
| 2.2- A VINHAÇA .....   | 62          |
| 2.2.1- <i>Histórico</i> .....  | 62          |
| 2.2.2- <i>Destinação</i> .....   | 66          |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 3 TECNOLOGIA DA DIGESTÃO ANAERÓBIA .....</b> | <b>77</b>  |
| 3.1- DIGESTÃO ANAERÓBIA .....                            | 77         |
| 3.1.1- <i>Microbiologia</i> .....                        | 80         |
| 3.1.2- <i>Influências no Processo</i> .....              | 85         |
| 3.2- DIGESTORES ANAERÓBIOS .....                         | 89         |
| 3.2.1- <i>Digestores de Fluxo Ascendente</i> .....       | 93         |
| 3.3- UTILIZAÇÃO DO GÁS .....                             | 99         |
| 3.4- DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA .....                 | 103        |
| 3.4.1- <i>Considerações Finais</i> .....                 | 114        |
| <b>CAPÍTULO 4 DIGESTÃO ANAERÓBIA E EXERGIA .....</b>     | <b>118</b> |
| 4.1- EXERGIA E MEIO AMBIENTE .....                       | 118        |
| 4.2- CUSTOS EXERGÉTICOS .....                            | 122        |
| 4.2.1- <i>Sistema 1</i> .....                            | 125        |
| 4.2.2- <i>Sistema 2</i> .....                            | 127        |
| 4.2.3- <i>Sistema 3</i> .....                            | 133        |
| 4.3- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                          | 134        |
| <b>CONCLUSÕES.....</b>                                   | <b>136</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>                                | <b>138</b> |

## **Resumo**

PINTO, Cláudio Plaza, *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 145p. Dissertação (Mestrado)

Este trabalho considera a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça no novo contexto que emerge neste fim de século, no qual o conceito de desenvolvimento vem sendo esclarecido e modificado sob a influência de pontos de vista que até então tinham permanecido em segundo plano, notadamente as questões ecológicas. Neste sentido, são examinados os aspectos que compõem essas modificações, culminando numa apreciação crítica do conceito de desenvolvimento sustentável, seus desdobramentos na área do planejamento energético, bem como sua relação com a produção de biogás através da digestão anaeróbia da vinhaça. É apresentado um histórico do problema da destinação da vinhaça, de maneira a situá-lo junto ao desenvolvimento da indústria do álcool no Brasil e a colocar as alternativas de tratamento daquele que é o seu resíduo mais importante. A seguir, a tecnologia da digestão da vinhaça é detalhada no seu funcionamento e são indicadas as alternativas de aproveitamento do biogás. São relatadas as principais experiências de uso desta tecnologia no Brasil. É apresentada, também, uma análise exérgica de uma usina, onde, foi, supostamente, instalado um biodigestor anaeróbio de vinhaça para a produção de biogás. O trabalho conclui que a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça contribui para a melhoria da sustentabilidade da produção de álcool, é viável economicamente, em alguns casos, e pode vir a ocupar importante lugar na indústria deste produto no Brasil, dependendo da direção em que caminharem os melhoramentos necessários para utilização integral da energia da biomassa da cana de açúcar.

### *Palavras Chave*

Desenvolvimento Sustentável; Digestão Anaeróbia; Vinhaça; Biodigestores; Indústria da Cana; Termoeconomia.

## **Abstract**

PINTO, Cláudio Plaza, *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 145p. Dissertação (Mestrado)

This work considers the anaerobic treatment of stillage in the context of the present improvements in the concept of development which is being explained and modified in the light of environmental questions. In this sense, the aspects of this modification are examined and the concept of sustainable development, its relationships with the energy planning and the production of biogas through anaerobic digestion are reviewed. An historical survey about vinasse disposal, the different alternatives for it and the development of alcohol industry in Brazil is presented. The technology for vinasse anaerobic digestion and use of biogas is detailed as well as the main experiences in the utilization of this technology in Brazil. An exergy analysis is made in an alcohol distillery which were hypothetically installed an reactor in order to produce biogas to be used in the plant. The work concludes that the anaerobic treatment of stillage helps to improve the sustainability of alcohol production. It is economical too, depending on the case, and may occupy an important place in regard to the total energy utilization from biomass of sugar cane, relying on the needed improvements to do so.

### *Key words*

Sustainable Development; Anaerobic Digestion; Stillage; Biodigestors; Sugar Cane Industry, Termoeconomics.

## Lista de Figuras

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 1: PROCESSAMENTO PADRÃO DO MODELO MUNDIAL .....  | 7   |
| FIGURA 2: ECOSISTEMA GLOBAL FINITO RELATIVO AO SUBSISTEMA ECONÔMICO EM CRESCIMENTO.....       | 25  |
| FIGURA 3: PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NO BRASIL.....   | 45  |
| FIGURA 4: EVOLUÇÃO DO PREÇO DO PETRÓLEO .....   | 50  |
| FIGURA 5: CADEIA ENERGÉTICA PARA TRANSPORTE UTILIZANDO ÁLCOOL NUM SISTEMA ENERGÉTICO .....    | 53  |
| FIGURA 6: INTERAÇÕES NA FASE AGRÍCOLA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL .....                             | 55  |
| FIGURA 7: INTERAÇÕES NA FASE INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DO ÁLCOOL .....                           | 61  |
| FIGURA 8: ANÚNCIO PUBLICITÁRIO EM REVISTA DIRECIONADA AO CULTIVO DA CANA, EM 1956.....        | 64  |
| FIGURA 9: CAMINHÃO-TANQUE PARA A DISTRIBUIÇÃO DE VINHAÇA.....                                 | 71  |
| FIGURA 10: VEÍCULO PARA ASPERSÃO DE VINHAÇA .....   | 73  |
| FIGURA 11: CHEGADA DA VINHAÇA NO CANAVIAL .....   | 74  |
| FIGURA 12: CANAL DE DISTRIBUIÇÃO DE VINHAÇA.....  | 74  |
| FIGURA 13: ETAPAS DA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA PARA PRODUÇÃO DE METANO.....                       | 84  |
| FIGURA 14: BIODIGESTOR BATELADA EM TAMBOR METÁLICO.....                                       | 90  |
| FIGURA 15: BIODIGESTOR EM PLÁSTICO FLEXÍVEL.....  | 90  |
| FIGURA 16: TANQUE SÉPTICO DE IMHOFF.....  | 91  |
| FIGURA 17: BIODIGESTOR EMPREGADO EM TRATAMENTO DE ESGOTO.....                                 | 92  |
| FIGURA 18: BIODIGESTOR MODELO INDIANO .....   | 92  |
| FIGURA 19: BIODIGESTOR MODELO CHINÊS.....   | 93  |
| FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM BIODIGESTOR DE FLUXO ASCENDENTE.....               | 94  |
| FIGURA 21: LODO GRANULADO .....   | 95  |
| FIGURA 22: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REATOR IC.....  | 98  |
| FIGURA 23: ESTAÇÃO PARA BIOGÁS AUTOMOTIVO .....   | 101 |
| FIGURA 24: EXEMPLO DE INSTALAÇÃO INDUSTRIAL DE BIODIGESTÃO DA VINHAÇA.....                    | 105 |
| FIGURA 25: VISTA AÉREA DA PLANTA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA NA DESTILARIA SÃO JOÃO..... | 108 |
| FIGURA 26: REATOR PARA DIGESTÃO DA VINHAÇA NA USINA SÃO MARTINHO.....                         | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 27: VISTA DO CONJUNTO QUE COMPÕE O SISTEMA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA NA USINA SÃO MARTINHO..... | 113 |
| FIGURA 28: QUEIMADOR PARA SECAGEM DE LEVEDURA UTILIZANDO O BIOGÁS NA USINA SÃO MARTINHO.....                  | 113 |
| FIGURA 29: CENTRO DE ARMAZENAGEM DA LEVEDURA ENSACADA PARA A VENDA NA USINA SÃO MARTINHO.....                 | 114 |
| FIGURA 30: VISTA AÉREA DO REATOR DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA NA USINA SÃO MARTINHO.....                  | 115 |
| FIGURA 31: SISTEMA 1 - USINA SEM BIODIGESTÃO.....   | 124 |
| FIGURA 32: SISTEMA 2 - USINA COM BIODIGESTÃO DA VINHAÇA E QUEIMA DO BIOGÁS NA CALDEIRA.....                   | 129 |
| FIGURA 33: SISTEMA 3 - USINA COM BIODIGESTÃO DA VINHAÇA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS E USO DO METANO NA FROTA.....  | 131 |

## Lista de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 1: CARACTERÍSTICAS DA VINHAÇA RESULTANTE DE MOSTOS DE MELAÇO, DE CALDO DE CANA E DE MOSTOS MISTOS..... | 67  |
| TABELA 2 : BACTÉRIAS NÃO-METANOGÊNICAS ISOLADAS EM DIGESTORES ANAÉROBIOS .....                                | 81  |
| TABELA 3: ALGUMAS ESPÉCIES DE BACTÉRIAS METANOGÊNICAS E COMPOSTOS ORGÂNICOS USADOS POR ELAS .....             | 82  |
| TABELA 4: CLASSIFICAÇÃO DE BIODIGESTORES .....  | 89  |
| TABELA 5: CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS E OUTROS COMBUSTÍVEIS .....   | 100 |
| TABELA 6: ALTERNATIVAS PARA O ARMAZENAMENTO DO METANO .....   | 102 |
| TABELA 7: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO TOTAL DE BIOGÁS NA DESTILARIA SÃO JOÃO.....                                    | 106 |
| TABELA 8: DADOS DA FROTA DA DESTILARIA SÃO JOÃO (SAFRA 93/94) .....   | 107 |
| TABELA 9: CONSIDERAÇÕES COMPARANDO AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ENERGIA E EXERGIA .....                   | 120 |
| TABELA 10: COMPARAÇÃO ENTRE EXERGIA CONTIDA E EXERGIA LIBERADA NO MEIO AMBIENTE.....                          | 121 |
| TABELA 11: VALORES NUMÉRICOS REFERENTES AOS FLUXOS DO SISTEMA 1 .....   | 126 |
| TABELA 12: VALORES NUMÉRICOS REFERENTES AOS FLUXOS DO SISTEMA 2.....  | 130 |
| TABELA 13: VALORES NUMÉRICOS REFERENTES AOS FLUXOS DO SISTEMA 3.....  | 132 |
| TABELA 14: CUSTOS EXERGÉTICOS PARA OS TRÊS SISTEMAS.....  | 133 |

## **Nomenclatura**

Proálcool - Programa Nacional do Álcool

ONU - Organização das Nações Unidas

PNB - Produto Nacional Bruto

IUCN - União Internacional para Conservação da Natureza

WWF - Fundo Mundial para Vida Selvagem

UNEP - Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas

WCS - Estratégia Mundial para Conservação

DBO - Demanda Biológica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

IAA - Instituto do Açúcar e Álcool

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico e Ambiental

UASB - reator de Leito de Lodo Anaeróbio Ascendente

IC - reator de Circulação Interna

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

PAISA - Penedo Agroindustrial Destilaria

## **Introdução**

Numa época de dificuldades para o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), os aspectos ambientais positivos da produção do etanol e do seu uso como combustível têm sido os principais temas da defesa do programa, como o foi a questão da independência energética nacional nos primeiros anos de sua implantação.

Em julho de 1992, a Reunião da Cúpula da Terra das Nações Unidas (ONU), no Rio de Janeiro, apelou aos países industrializados para que limitassem o consumo, impulsionassem a eficiência energética e reduzissem a poluição e exaustão dos recursos naturais, de modo a tornar o crescimento econômico menos prejudicial ao meio ambiente.

Estava lançada as bases para a construção dos paradigmas ambientais que norteariam diversos trabalhos sobre a produção de etanol e seu impacto positivo ao meio ambiente, principalmente, no que se refere ao balanço de CO<sub>2</sub> e às possibilidades da produção de excedentes de energia elétrica através da cogeração nas usinas.

O protocolo recentemente firmado em Kyoto prevê, entre 2008/2012, uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> em torno de 6% em relação à emissão de 1990, nos países de economia avançada e nos de economia em transição. Um grande esforço se faz necessário para atingir esta meta porque, atualmente, os países desenvolvidos já estão emitindo 13% acima dos níveis de 1990. Fazendo-se uma estimativa grosseira, estes países, se nenhuma providência for tomada, estarão emitindo cerca de 39% de CO<sub>2</sub> acima do nível de 1990, ou seja, para atender o compromisso de Kyoto, será necessário reduzir em 45% este tipo de poluição. Esta tarefa exigirá, da parte de todos, um esforço para incrementar o uso de fontes renováveis não causadoras dessas emissões.

Além dos aspectos internacionais do uso do etanol, a indústria da cana no Brasil, responsável pela sua produção, influi de forma marcante o cenário energético, econômico e social do país, e faz do Brasil o maior produtor do mundo de cana-de-açúcar, com cerca de 300 milhões de toneladas na safra 1997/1998, sendo aproximadamente 2/3 utilizados na produção do etanol, num total de 15,1 milhões de m<sup>3</sup> e 14,7 milhões de toneladas de açúcar. Estes números representam a geração de cerca de 600 mil empregos diretos no campo, num total de 328 usinas produtoras, cultivando uma área próxima de 5,5 milhões de hectares, numa movimentação de cerca de 11 bilhões de reais, representando 3% do Produto Interno Bruto brasileiro. Os subprodutos principais desta estrutura são por volta de 80 milhões de toneladas de bagaço e cerca de 200 milhões de m<sup>3</sup> de vinhaça (Macedo, 1997).

Mesmo considerando-se somente as questões energéticas, essa grande quantidade de material que resta no processo de fabricação do açúcar e álcool já indica um potencial significativo ainda pouco aproveitado da indústria da cana, com todas as vantagens que representa o uso de uma fonte renovável no setor energético, principalmente, no médio e longo prazo.

Para a situação específica da vinhaça, na grande maioria dos casos, este resíduo é empregado “in natura” na lavoura da própria cana-de-açúcar, em quantidades que variam de 120 a 300 m<sup>3</sup>/ha, substituindo, em parte, o uso de fertilizantes, com a fertilidade do solo sendo mantida após anos de cultivo de cana-de-açúcar, a matéria orgânica é rapidamente mineralizada e o conteúdo de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo do solo aumentam. Esta prática, chamada fertirrigação, parece ter oferecido a solução para o problema da disposição desse resíduo, quando foi proibido o seu simples descarte no curso d’água mais próximo da usina. Contudo, nitrogênio na forma de nitrato pode, se alguns cuidados não forem tomados, infiltrar e atingir camadas mais profundas do solo e o lençol freático, representando um risco para a saúde humana, principalmente nos casos em que, para evitar custos de transporte, uma única área, chamada área de descarte, recebe grandes concentrações de vinhaça (acima de 400 m<sup>3</sup>/ha).

Mais pesquisas são necessárias para esclarecer estes pontos. Contudo, ainda que a prática da fertirrigação possa não representar atualmente um problema ecológico de maiores proporções, parece claro que seu objetivo principal é se livrar de um resíduo incômodo e perigoso, a vinhaça,

da forma mais rápida e econômica possível, sem causar maiores danos paralelos. Com o tratamento da vinhaça, os ganhos ambientais são relevantes quando considerados sob o ponto de vista do aproveitamento integral da energia da biomassa da cana, contribuindo para a melhoria da sustentabilidade desta fonte renovável e aumentando sua taxa de conversão energética, podendo tornar a unidade produtora de etanol totalmente independente de combustíveis de origem fóssil, tanto na área agrícola como na planta industrial, já suprida pelo uso do bagaço.

A exequibilidade da digestão anaeróbica da vinhaça vem sendo provada por vários estudos operando com plantas-piloto em condições reais; contudo apenas algumas plantas em escala normal foram instaladas até o momento no Brasil, devido a um balanço econômico desfavorável, causado, principalmente, pelo baixo preço dos competidores diretos do biogás produzido na biodigestão, principalmente óleo Diesel, no caso da utilização em veículos. Além disso, a falta de prática na aplicação da tecnologia da digestão anaeróbica também influi para colocá-la na posição marginal que ocupa atualmente na indústria do álcool.

A dissertação de mestrado que será apresentada pretende considerar a tecnologia da digestão anaeróbica da vinhaça no novo contexto que emerge neste fim de século, no qual o conceito de desenvolvimento vem sendo esclarecido sob a influência de pontos de vista que até então tinham permanecido em segundo plano, notadamente as questões ecológicas que aparecem juntamente com uma visão integrativa do meio ambiente humano, o qual se compõe de aspectos ecológicos, econômicos e sociais, sendo que estes, sob esta perspectiva, guardam uma estreita relação um com os outros.

A essência do trabalho parte do pressuposto que a tecnologia da digestão anaeróbica da vinhaça é o que se chama de “tecnologia limpa”, que contribui diretamente ao desenvolvimento sustentável por razões que serão analisadas. Será revisto o conceito de desenvolvimento sustentável, seus limites e contradições. A própria definição de “tecnologia limpa” (que a rigor não existe) merece ponderações para deixar explícitas as considerações e observações que guiarão o trabalho. Dessa maneira, a partir do esclarecimento sobre do que está sendo tratado, o próximo passo será situar historicamente a digestão da vinhaça na indústria da cana no Brasil, o que auxiliará a percorrer seu o futuro. Será apresentada, também, uma avaliação dos custos

exergéticos em duas possibilidades de aproveitamento energético da vinhaça numa planta de fabricação de etanol.

## **1. Capítulo 1**

### **Desenvolvimento Sustentável e Vinhaça**

Neste capítulo serão discutidas as bases em que estão fundamentadas as colocações mais importantes sobre a maneira de abordar o problema da destinação da vinhaça tendo em vista que o contexto atual é de mudanças, as quais podem, por sua vez, apresentar novas e melhores oportunidades de se tratar essa complexa questão.

#### ***1.1- Conceito de Desenvolvimento Sustentável***

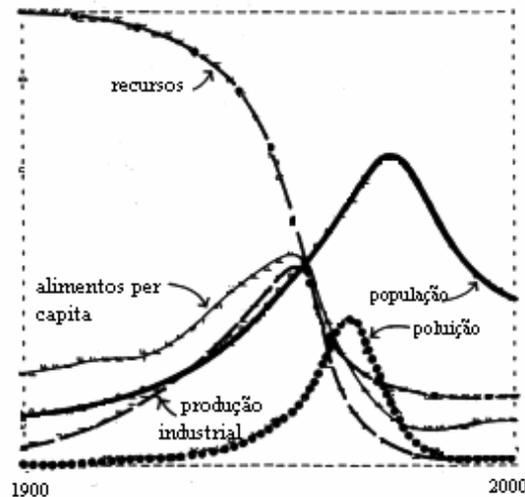
##### **1.1.1- Introdução**

Entende-se por cosmologia, ou cosmovisão, o conjunto de representações de diferente natureza, que formam a imagem do universo que uma sociedade projeta para orientar-se e para situar o lugar do ser humano no conjunto dos seres (Boff, 1998). E foi no início da era moderna, depois de diversas revoluções do pensamento, que foram lançadas as bases da imagem atual, ou cosmologia, que fazemos do nosso mundo: finito, solto no vazio, arredondado, flutuando na escura imensidão do universo. A essa visão se impõe agora, como remate, a idéia da fragilidade da vida, inclusive a nossa, impressada numa lâmina fina de água, de terra e de ar, dependente do bom funcionamento de nossa “ nave-mãe”.

É certo que a idéia da limitação de recursos não seja nova na história do pensamento. O primeiro autor que trabalha sistematicamente este assunto é Malthus, no século XVIII, com sua lei de rendimentos decrescentes, a qual sugere simplesmente que se a quantidade de terras é fixa, a produção pode aumentar somente de forma aritmética, enquanto que a população aumenta geometricamente. Ricardo, bastante influenciado por Malthus, elabora um refinado modelo que relaciona aluguel, lucros e salários na agricultura, no qual está presente a noção de que o crescimento econômico deveria eventualmente se esgotar devido à escassez de recursos naturais. Depois dos dois primeiros, e também bastante influenciado por eles, Mill refuta veementemente a idéia de crescimento continuado, em moda na Inglaterra da época (segunda metade do século XIX). Ele acreditava que a luta incessante por bens materiais, como progresso, não era nem natural, nem desejável para a humanidade. Outros dois trabalhos que merecem destaque são o de Jevons, de 1865, que analisa o problema da escassez do carvão e a coloca como o maior obstáculo ao desenvolvimento econômico da Grã-Bretanha, e o de Pigou, que foi um dos primeiros, em 1929, a sistematizar a idéia da distribuição de renda entre gerações (Kula, 1992).

Todavia, o trabalho que mais influenciou na consolidação dessa imagem atual do nosso planeta e nos debates sobre seu futuro foi o de um grupo chamado Clube de Roma, composto por cerca de 30 indivíduos de 10 países, entre economistas, cientistas naturais, matemáticos, executivos e educadores, que produziram vários documentos, o principal deles conhecido como Relatório Meadows, ou Limites do Crescimento, publicado em 1972. A partir de cinco grandes variáveis - o estoque de capital industrial, a população, a poluição, a oferta de alimentos e a disponibilidade de recursos naturais não renováveis, os autores do Relatório montaram um modelo matemático capaz de evidenciar grandes tendências, construindo em computadores os futuros possíveis do sistema mundial constituído até então. Em linhas gerais, o relatório mostrou que todas as variáveis estavam sujeitas a ciclos positivamente realimentados, de modo que a variação das quantidades era exponencial. Várias possibilidades de combinação reversa foram testadas, representando os diferentes encadeamentos possíveis entre as variáveis, mas, em todas, aparecia a mesma tendência em direção a situações insustentáveis, mesmo mantendo-se estável uma ou diversas variáveis. Um detalhe importante é que, surpreendentemente, nem a hipótese de recursos ilimitados garantiria a sustentação do crescimento, sendo o limite, neste caso, dado pela

poluição. Como proposta, o relatório coloca a necessidade de se deterem todos os ciclos positivos de realimentação, e isto exige mudança profunda no modelo de desenvolvimento



**Figura 1: Processamento padrão do modelo mundial**

O processamento-“padrão” do modelo mundial supõe que não haja alterações importantes nas relações físicas, econômicas ou sociais que, historicamente, têm regido o desenvolvimento do sistema mundial. As variações traçadas aqui seguem os valores históricos de 1900 a 1970. Alimentos, produção industrial e população crescem exponencialmente até que a diminuição rápida de recursos force uma diminuição no crescimento industrial. Devido a atrasos naturais no sistema, tanto a população como a poluição continuam a crescer durante algum tempo, depois do apogeu da industrialização. O crescimento da população é, finalmente, interrompido por um da taxa de mortalidade, devido à diminuição de alimentos e serviços médicos (Meadows, 1978: p.122)

(Benjamin, 1993). Uma típica curva de resultados, entre as dezenas que foram apresentadas no relatório, é mostrada na figura 1.

O Relatório Meadows usa um modelo inspirado na lei de rendimentos decrescentes malthusiana, na qual uma ou algumas variáveis do sistema se desenvolvem e são projetadas para o futuro, enquanto as outras permanecem fixas. Neste caso, são projetados população e consumo

crescentes, considerando a base de recursos, a base técnica de produção e a capacidade de tratar a poluição constantes; contudo, na vida real estes também evoluem. A utilização de um ecossistema por um grupo social só encontra um limite mais ou menos fixo se as forças produtivas utilizadas por esse grupo também forem fixas (Benjamin, 1993). Sendo assim, a crítica mais dura ao relatório é dirigida aos seus pressupostos, que omitem as renovações permanentes no sistema econômico devido ao avanço tecnológico, além de considerar o mundo um lugar totalmente homogêneo, ao tratá-lo sem qualquer subdivisão geográfica (Kula, 1992).

Apesar das críticas atingirem diretamente as bases do Relatório Meadows, este resta como um dos mais notáveis documentos publicados na área de recursos naturais e meio ambiente, contribuindo grandemente para intensificar o debate sobre as questões relacionadas à escassez de recursos e degradação ambiental, que continuam, sem dúvida, atuais. É interessante, portanto, minuciar as críticas, com o intuito de aprofundar a discussão.

Se a Terra é finita, a oferta de recursos é rígida; e se os estamos consumindo, eles acabarão. Estas são idéias facilmente assimiladas pelo bom senso, mas estão equivocadas por não traduzirem a especificidade do conceito de recursos. Estes são aquelas partes da natureza que podem ser aproveitadas num momento dado. É, portanto um conceito dinâmico. O trabalho e a inteligência humanos é que fazem com que a matéria passe à condição de recurso. Até o século XIX, o petróleo não era recurso. Antes do desenvolvimento da física nuclear, também não era recurso o urânio, e o mesmo raciocínio se aplica à energia potencial das cachoeiras, às ondas de rádio, às ligas metálicas, à roda e até à pedra lascada. Assim, se a tecnologia varia de forma contínua, se modificam incessantemente os fatores, escapando-se ao determinismo da lei de rendimentos decrescentes de Malthus. Esta não se aplica, portanto, a situações nas quais ocorrem desenvolvimento das forças produtivas e progresso tecnológico. Os sucessivos níveis técnicos permanecem ocultos até serem atingidos através de novas descobertas, definindo situações históricas irreversíveis. Os próprios autores do Relatório Meadows rejeitaram a noção de limites físicos ao crescimento em 1982, num encontro realizado em Filadélfia, Estados Unidos, chamando atenção, na ocasião, para a qualidade do crescimento e para os problemas enfrentados pelos países pobres (Kula, 1992).

Seguindo este encadeamento, as alternativas tecnológicas para os problemas atuais do nosso mundo já são visíveis: o domínio da fusão nuclear poderá eliminar o limite representado hoje pelas reservas de combustíveis fósseis; a eficiência no aproveitamento da energia solar tem aumentado; se pesquisa intensamente sobre supercondutividade; novas técnicas permitem visualizar o trabalho com minérios mais pobres, além da exploração do espaço e do fundo dos mares, que está apenas começando.

Contudo, esse raciocínio não leva em conta a aceleração das mudanças promovidas pelo homem. Consumimos cada vez mais minérios e combustíveis, e continuamos a observar a crescente extinção de espécies animais e a perda contínua da cobertura vegetal do planeta. Apesar da existência destes mesmos problemas no passado, e da tecnologia ter ajudado a resolvê-los (substituindo a madeira pelo carvão - como combustível, e pelo ferro - como material); a atual tecnologia industrial tem um impacto completamente novo: os efeitos de um derramamento de toneladas de petróleo, de um acidente nuclear, de emissões de CO<sub>2</sub>, outros gases-estufa ou compostos de cloro-flúor-carbono alcançam regiões inteiras de uma só vez, podendo, em seguida, afetar todo o planeta. Vem daí a idéia da fragilidade da vida complementando a de finitude, na imagem atual do nosso mundo.

Há um outro lado importante dessa discussão. As relações econômicas e políticas fazem com que a utilização das reservas esteja sujeita a diversas circunstâncias, de natureza comercial e estratégica, capazes de tornar as mercadorias mais caras, graças a sua escassez, fazendo mais poderoso um grupo ou um país. Todo um conflito de conquista, perda e distribuição de poder envolve essa discussão sobre limites físicos da Terra. Isto nos remete ao problema das relações dos homens entre si, e não somente destes com uma natureza que lhes seja exterior. Entre 80% e 90% do comércio mundial de cobre, minério de ferro, bauxita, produtos florestais, algodão, juta, tabaco, café, cacau e outros produtos são controlados, no caso de cada produto, por três a seis grandes empresas (Benjamin, 1993).

É preciso então abrir a discussão sobre a qualidade do crescimento, em direção a serviços menos poluentes e menos exigentes de recursos naturais, o que se liga à necessária mudança nos padrões de consumo. É necessário abordar muitas das questões críticas relacionadas ao

crescimento desigual e pobreza, que impõem pressões sem precedentes sobre terras, águas, florestas e outros recursos naturais do planeta. Se o nosso mundo pode ser finito e ilimitado graças à nossa capacidade de recriá-lo a cada era de inovações, a tecnologia por si só não pode resolver os problemas da natureza humana a que, cedo ou tarde, os homens terão que fazer face. A religação com o mistério subjetivo dessa cosmologia, na qual o universo é um movimento incessante buscando seu equilíbrio sempre frágil e exposto a mutações; e na qual a própria vida nasce da matéria longe do seu equilíbrio (total equilíbrio equivale à morte), e aparece como uma complexíssima rede de energias e matéria em permanente interação; em suma, esta religação deverá ser no interior do ser humano. Todos os enormes gastos com as alternativas tecnológicas na tentativa de resolver os impasses devidos à limitação de recursos sujeitam-nos a esgotar nosso crédito em recursos naturais e humanos antes que as soluções sejam encontradas, e, neste caso, as possibilidades estarão bastante reduzidas. É arriscado desperdiçar oportunidades, e o tempo vai mostrar aos que puderem ver.

### 1.1.2- Crescimento, Desenvolvimento, Ciência e Tecnologia

A tomada de consciência dos problemas ambientais aparece como umas das causas e como um sintoma das críticas ao atual estilo de desenvolvimento. Para Norgaard (1994), a chamada modernidade prometeu controlar a natureza por meio da ciência, abundância material, tecnologia avançada, governo efetivo e seguro, e através de uma organização social racional. Ela prometeu paz e justiça através de uma forte moralidade individual e uma cultura coletiva superior, às quais todos iriam ascender. A modernidade, em suma, prometeu transformar a, até então, vagarosa e incerta trajetória do progresso humano numa trilha veloz. A crença no progresso (aqui entendido como algo capaz de transformar a vida social e de conferir-lhe maior significação e alcance no contexto da experiência humana) tornou fácil a difusão do padrão de desenvolvimento ocidental, baseado na modernidade, para quase todo o mundo. Esta crença pareceu se confirmar com a revolução industrial na Europa, e, logo após, nos Estados Unidos. A fé no progresso resistiu a uma guerra mundial, à Grande Depressão e ao tumulto político da primeira metade do século XX, que levou a outra guerra mundial. Ainda na segunda metade deste século, a confiança nas possibilidades de progresso encorajou o apoio ao desenvolvimento de um sistema econômico internacional capaz de modificar a vida do mais tosco proprietário e camponês do mais

longínquo canto do globo. As promessas não foram, ou foram só em parte, cumpridas, e o progresso foi traído.

Norgaard (1994) enumera o que ele considera as principais lacunas nas promessas da modernidade: fomento do consumo material desequilibrado; acentuação das desigualdades; declínio dos entusiastas da modernidade nos embustes burocráticos; depauperação acelerada do estoque de recursos e degradação do meio ambiente do qual o progresso depende; oposição de povos contra povos num grande número de guerras regionais; conversão de uma grande parte da população do globo em reféns e refugiados políticos e econômicos; existência da possibilidade da aniquilação nuclear mútua e global. O autor ressalta que as críticas à modernidade se tornaram numerosas e fáceis; contudo, o principal desafio é desenvolver uma explanação que considere a mudança e a evolução conjunta dos sistemas ambientais (ecológicos, sociais e econômicos), com vistas à construção de novas bases para um verdadeiro desenvolvimento.

Sachs (1986) identifica o estilo de desenvolvimento atual com o crescimento econômico e os desgastes ambientais e, por esta razão, não ser possível nem desejável para os países pobres a repetição do caminho percorrido pelos países industrializados. Todavia, o debate permanece em aberto já que, para uns, a qualidade de vida é obtida às custas da limitação das produções materiais, enquanto que, para outros, ela é, ao contrário, proporcional à abundância de produtos. O ambiente é, portanto, uma dimensão do desenvolvimento no seu sentido mais amplo. Para o autor, os problemas de recursos, energia, ambiente, população e desenvolvimento só poderão ser corretamente percebidos quando examinados em suas relações mútuas, o que implica um quadro conceitual unificado.

O fato é que, com o sucesso da reconstrução econômica no pós-guerra, a amenização do conflito russo-americano no fim da guerra da Coreia e o encaminhamento mais ou menos pacífico da questão colonial, se começou a difundir que havia sido encontrada a chave para a resolução de todos os problemas humanos. Esta chave era o crescimento econômico, que se tornara, então, sinônimo de desenvolvimento. Mas o que é desenvolvimento? Por que o desenvolvimento? Desenvolvimento de quê e em direção a quê? É necessário trabalhar melhor a noção de desenvolvimento no seu sentido mais amplo, como escreveu Sachs (1986),

desvinculando-o de vez do crescimento econômico puro e simples, e procurando chegar a uma idéia satisfatória de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade.

Dos debates em torno do pioneiro Relatório Meadows, pela primeira vez no campo da economia e gestão de recursos, admitiu-se de forma consensual a necessidade de se pensarem as interseções dos sistemas social, econômico e natural. Foi o reconhecimento da importância das interações entre sistemas, do papel da complexidade numa visão mais integrada da realidade e, ainda que implicitamente, a aceitação da limitação dos modelos científicos, que gozavam então de grande prestígio. Isto levou, entre outras coisas, à idéia de que a natureza não é uma fonte de recursos inesgotáveis e gratuitos, além de uma grande lixeira, com a capacidade mágica de absorver não importa qual resíduo sem ao menos abalar sua estrutura. Isto, portanto, atinge a própria idéia de economia (Benjamin, 1993).

A economia vinha sendo tratada como um sistema fechado, cuja reprodução no tempo dependia apenas do equilíbrio que se consiga obter entre fluxos de produção e circulação de mercadorias, de um lado, e dinheiro, de outro. Contudo, os materiais já existiam, antes de serem mercadorias, na forma de recursos naturais, e continuam a existir, depois de serem utilizados, na forma de resíduos ou dejetos. Estas duas pontas externas do processo produtivo, que estão intimamente interrelacionadas, ainda não puderam ser incorporadas numa estrutura teórica que supere a da economia tradicional, proporcionando uma visão mais abrangente. O consumo de recursos naturais do planeta, o empobrecimento dos solos, a poluição dos ares e mares, o extermínio da biodiversidade e, em suma, a diminuição das alternativas futuras de desenvolvimento da humanidade não importam para a economia tradicional. Não há diferença entre o lazer de uma pessoa e a desocupação de um desempregado. Dentro deste arcabouço, se se gasta mais gasolina num engarrafamento e depois se compram calmantes, cresce o produto interno bruto. Pelos pressupostos básicos nos quais se baseou este modelo, mais vale produzir e vender mercadorias que estraguem tudo e depois vender o conserto, que simplesmente se abster de poluir. É uma imagem invertida do real, que explica as dificuldades da ciência, praticada sob esta visão, em tratar certos problemas, resultantes do mau funcionamento dos sistemas social, econômico e natural.

A própria ciência, incontestável baluarte da modernidade, causa e consequência do progresso, não foi capaz de socorrê-lo quando se precisou dela, e, com isso, não escapou das críticas. O cientista responsabilizava o político pelo “lado mau”, iludindo sua própria tomada de consciência das interações entre ciência, técnica, sociedade e política. No entanto, não faz sentido a visão simplista de “lado bom” ou “lado mau” da ciência. Para Edgar Morin (1982), é evidente que o conhecimento científico determinou progressos técnicos inauditos, sendo a ciência, pois, elucidativa, enriquecedora, conquistadora e triunfante. No entanto, ainda segundo o autor, estas mesmas características que tornam a ciência libertadora, colocam cada vez mais problemas graves que se referem ao conhecimento que produz, à ação que determina, à sociedade que transforma, trazendo ao mesmo tempo possibilidades terríveis de subjugação.

Alguns trabalhos, como os de Karl Popper (1972) e, também, Thomas Kuhn (1975) apontam, como ponto comum, para a existência de uma parte imersa enorme (como nos icebergs) que não é científica, mas que é indispensável para o desenvolvimento da ciência. É a chamada zona cega da ciência, que crê que a teoria reflete o real. Segundo Popper (1972), as teorias resistem algum tempo, não por serem verdadeiras, mas por serem as mais bem adaptadas ao estado contemporâneo dos conhecimentos, como numa seleção natural. Já Kuhn (1975) traz a idéia de que se produzem transformações revolucionárias na evolução científica, onde um paradigma desaba para dar lugar a um novo paradigma; estes princípios fundamentais, inconscientes e invisíveis comandam, de forma oculta, a organização do conhecimento científico e a própria utilização da lógica.

Morin (1982) indica a existência de uma complexidade intrínseca, uma ambivalência, que se encontra no cerne da ciência, e que supera a alternativa grosseira de pensar numa ciência “boa” (que só traz benefícios) e ciência “má” (que só traz prejuízos). Assim, o mesmo desenvolvimento disciplinar das ciências que traz as vantagens da divisão do trabalho, responsável, sem dúvida, por grande progresso do conhecimento científico, da tecnologia e da indústria moderna, leva à fragmentação do saber, responsável pela dificuldade da ciência em tratar o funcionamento de sistemas complexos como os que ocasionam os problemas ambientais e de desenvolvimento. A fragmentação do saber, outrora de grande valia, também é a

responsável pela disjunção entre as ciências naturais e ciências humanas e pela manipulação do conhecimento reconcentrado pelos poderes políticos e econômicos.

Observa-se, então, que o progresso incrível dos conhecimentos científicos é correlato com um progresso da ignorância devido à fragmentação, progresso dos aspectos benéficos da ciência é correlato com um progresso dos seus aspectos nocivos e, ainda, progresso acrescido dos poderes da ciência é correlato com a impotência acrescida dos científicos a respeito destes mesmos poderes: é a ambivalência de que fala Morin (1982).

Tem-se, pois, que a ciência, como um mapa, é um reflexo da realidade, mas o mapa não é o território que representa, o reflexo não é o objeto. Se o mapa estiver correto, ele possui uma estrutura semelhante à do território, o que justifica sua utilização. Da mesma forma, a ciência apenas traduz o real em teorias mutáveis e refutáveis. As teorias científicas são sistemas de idéias que se aplicam aos dados verificados para serem adequadas a esses dados, e são úteis na medida em que são capazes de explicá-los coerentemente. No entanto, tornam-se obsoletas quando os dados não se encaixam nos seus pressupostos. O mapa, então, torna-se pobre em detalhes, e já não serve mais para representar o território.

Um ponto interessante distinguido por Morin (1982), é que o progresso das certezas científicas não vai no sentido de uma grande certeza e, ao contrário, produz um progresso das incertezas. As extraordinárias descobertas da organização molecular e informacional da máquina viva, por exemplo, conduzem-nos, não ao conhecimento final da vida, mas às portas do problema da organização. O universo é muito mais misterioso que se pensava há algum tempo, e está longe de ser uma máquina determinista da qual uma equação-chave nos daria o segredo. Textualmente (p.31): *“Podemos dizer até que, de Galileu a Einstein, de Laplace a Hubble, de Newton a Bohr, perdemos o trono de segurança que colocava nosso espírito no centro do universo: aprendemos que somos, nós mesmos cidadãos do planeta Terra, os suburbanos de um Sol de subúrbio, ele mesmo exilado na periferia de uma galáxia periférica de um universo mil vezes mais misterioso do que ninguém teria imaginado ainda há um século. O progresso das certezas científicas produz, pois, um progresso da incerteza. Mas é uma ‘boa’ incerteza que nos liberta de uma ilusão ingênua e nos desperta de um sonho lendário: é uma ignorância que se*

*conhece como ignorância. E assim, tanto as ignorâncias como os conhecimentos provenientes do progresso científico trazem um esclarecimento insubstituível aos problemas ditos filosóficos.”*

Assim, a ciência é um campo sempre aberto onde se combatem não só as teorias, mas também os princípios de explicação, ou seja, as visões do mundo e os postulados metafísicos, ou seja, referenciais de pensamento ou paradigmas. As teorias científicas surgem dos espíritos humanos no seio de uma cultura. Neste sentido, quando desenvolvimento era sinônimo de crescimento econômico, o problema dos países que ainda não eram desenvolvidos consistia em atingir um nível de crescimento que permitisse gerar mais crescimento, isto é, um crescimento auto-sustentado. A tarefa era conduzir estas sociedades até a etapa de “decolagem”, quando, a partir daí, cuidariam de si próprias, se adentrando no reino dos civilizados. Da mesma maneira, o problema da ciência era encontrar essa fórmula do crescimento, o que significava, muitas vezes, encontrar a melhor maneira de se apropriar dos recursos naturais.

O estado normal de uma sociedade consistia na capacidade desta de crescer indefinidamente, sendo pois, o Ocidente modelo para o mundo inteiro. Quanto aos países menos desenvolvidos, eles se encontravam desta forma devido à existência de “obstáculos” aos desenvolvimento. Considerou-se, no começo, que estes obstáculos eram puramente econômicos; em consequência, houve injeções de capitais na tentativa de criar “pólos de desenvolvimento”. A ordem era importar máquinas, e como estas precisavam de homens para fazê-las funcionar, o problema passou a ser a aquisição de qualificações profissionais. Mesmo assim, havia algo errado, e se tentou culpar a ausência de uma classe de empresários nesses países. Houve fórmulas criadas para desenvolver esta classe lamentavelmente ausente. Contudo, começou-se a perceber que não existiam obstáculos ao desenvolvimento particulares e discerníveis. Nas palavras de Castoriadis (1987: p.142): “... *para que o Terceiro Mundo pudesse se ‘desenvolver’, era preciso se modificarem as estruturas sociais, atitudes, a mentalidade, as significações, os valores e a organização psíquica dos seres humanos. O crescimento econômico não era algo que pudesse ser ‘acrescentado’ a estes países, como os economistas tinham pensado*”. O problema era que as pessoas não eram “desenvolvidas”. O Ocidente acreditava haver descoberto,

não uma maneira para produzir mais mercadorias, mais rapidamente e mais eficientemente, mas sim o modo de vida apropriado para todas as sociedades humanas.

É óbvio que este modelo sofria críticas de toda a sorte, não somente porque ele distribuía desigualmente os “frutos do crescimento”, mas também porque se preocupava apenas com um determinado tipo de crescimento, que acarretava determinadas conseqüências humanas e sociais. Nos anos sessenta, diversos indivíduos e grupos buscaram estabelecer para si mesmos novas formas de vida comunitária. Começou-se a levantar com insistência a questão do “preço” que os seres humanos e a coletividade tinham que “pagar” pelo crescimento, e se descobriu um elemento novo e importantíssimo nesta discussão, e que dizia respeito também aos filhos, e aos filhos dos filhos dos que estavam ali presentes: o acúmulo maciço e, talvez, irreversível de danos infligidos à biosfera terrestre, resultantes das interações destrutivas dos efeitos da industrialização. Foram estabelecidos novos organismos burocráticos para cuidar da “qualidade de vida”, novos “indicadores sociais” e “indicadores de bem-estar” vieram para completar os já existentes indicadores econômicos. A idéia de se questionar o quadro conceitual estabelecido ainda não havia sido cogitada. Mesmo os que viam no crescimento problemas incontroláveis, não vacilaram em começar a propagar o “crescimento zero” ou o “não crescimento”. Contudo, os aspectos dramáticos da questão foram deixados de lado: crescimento era tudo o que se tinha para oferecer às pessoas; e mais, será que deveria ser mantido o fosso entre países que apresentam um PNB anual de até 30 mil dólares por habitante, e outros que apresentam um de 200 dólares por habitante? E caso se devesse cobrir este fosso, como seria triplicar o produto mundial bruto, com um consumo enorme de energia e recursos? E, dadas as estruturas políticas e sociais existentes, será que os países ricos aceitariam se tornar uma minoria impotente frente a países asiáticos, africanos e latino-americanos, tão ricos quanto eles e bem mais populosos? Enfim, quando se chega às questões verdadeiramente importantes, fica difícil endireitar algo torto.

Mas afinal o que é o desenvolvimento? Desenvolver significa chegar a algo, ou a uma “*norma natural*” como define Castoriadis (1987). Desenvolvimento é, então, um processo de efetivação de algo suscetível de se realizar, predeterminado. “*Há uma norma referente à essência daquilo que se desenvolve*” Castoriadis (1987: p.143). Não pode haver

desenvolvimento sem um ponto de referência, um estado definido que deve ser atingido; e a natureza fornece para todo ser um estado deste tipo. A identificação de desenvolvimento com crescimento ilimitado surge, segundo Castoriadis (1987), na emergência de dois processos: a expansão da burguesia e a ascensão do racionalismo ocidental, de uma nova “idéia”, a idéia de que o crescimento ilimitado da produção e das forças produtivas é, de fato, o objetivo central da vida humana. Não há limites para os poderes e as possibilidades da razão, e o casamento destes dois processos se dá na aplicação racional da ciência à indústria, base de toda a ideologia do “progresso” (“traído?”, como se viu em Norgaard, 1994).

*“Uma vez que não há limites para a progressão de nosso conhecimento, tampouco os há para a progressão de nosso ‘poder’ (ou da nossa ‘riqueza’)”. Com esta frase Castoriadis (1987: p.145) firma, no seu contundente ensaio, no qual trata de diversos recortes já apresentados aqui, as bases da identificação entre crescimento e desenvolvimento. Textualmente: “Vem daí a idéia curiosa, ainda hoje compartilhada pela maioria dos cientistas, de uma progressão assintótica do conhecimento em direção à verdade absoluta. Não pode existir, portanto, nenhum ponto fixo de referência para nosso ‘desenvolvimento’, um estado definido e definitivo a atingir; mas este ‘desenvolvimento’ é um movimento com uma direção física e, bem entendido, esse próprio movimento pode ser medido sobre um eixo no qual ocupamos, a cada instante, uma abscissa de valor crescente”.*

Desse modo, chega-se à situação na qual o desenvolvimento histórico e social consiste em abandonar qualquer estado definido, em atingir um estado que não é definido por nada, exceto pela capacidade de atingir novos estados. Para usar os termos de Castoriadis (1987), a norma é que não há norma. E assim, finalmente, o desenvolvimento chegou a significar um crescimento indefinido, e sua maturidade, a capacidade de crescer sem fim. Isto se deveu, em grande parte, a essa crença na racionalidade dos mecanismos econômicos, na ilusão da progressão assintótica do conhecimento científico, e, também, na crença da onipotência virtual da técnica (Castoriadis, 1987).

A técnica era considerada um puro meio, em si mesmo neutro quanto aos fins. Todavia, como na argumentação descrita acima sobre ciência, nenhuma conquista técnica importante está

livre da possibilidade de ser utilizada de maneira diversa da que foi originalmente especificada, nenhuma está desprovida de efeitos colaterais indesejáveis, nenhuma deixa de interferir com o restante da sociedade. E, também, um aumento do poder da técnica constitui, igualmente, um aumento do poder de fazer surgir o contrário daquilo que se visava. Quando se consideram sistemas maiores, a idéia de isolar e controlar os fatores, de medir e circunscrever seus efeitos, em suma, a idéia da separação da técnica se torna uma ilusão perigosa (Morin, 1982; Castoriadis, 1987).

Não se trata, entretanto, de subestimar tudo o que foi trazido pela ciência e técnica modernas ou pela racionalidade ocidental. Não se pode renunciar à razão ou considerá-la um instrumento que deveria ser melhor empregado, porque ela faz parte da cultura, e esta chega aos seres humanos sempre por inteiro. Mas é possível, com consciência e responsabilidade, reconhecer no racionalismo, na ilusão da onipotência da ciência e da técnica, na supremacia do cálculo econômico e na idéia do crescimento pelo crescimento criações do homem, colocá-los todos no lugares onde eles devem ficar, e dar os passos que precisam ser dados no sentido da evolução do espírito humano, proporcionando a religação com a natureza e uma compreensão mais fina de seus mecanismos. Neste sentido, alarga-se o universo de possibilidades e alternativas à disposição da humanidade.

### 1.1.3- O Conceito de Desenvolvimento Sustentável

A construção do conceito de desenvolvimento sustentável está ligada ao debate internacional em torno dos problemas ambientais e da qualidade do crescimento, à superação da idéia de desenvolvimento ligado necessariamente ao crescimento econômico e à percepção que se tem da crise da chamada modernidade. Como será detalhado a seguir, durante a Conferência de Estocolmo (1972), as discussões centraram-se nos aspectos técnicos da contaminação provocada pela industrialização, no crescimento populacional e na urbanização, o que imprimiu nitidamente um caráter elitista à reunião<sup>1</sup>. Em contraste, a percepção dominante a partir da

---

<sup>1</sup> Um representante da Índia presente à conferência resumia em reunião prévia a Estocolmo: “Aos ricos preocupa a fumaça que sai de seus automóveis; a nós preocupa-nos a fome.” Citado por Becker (1994).

Conferência do Rio (1992) tem sido a de que os problemas do meio ambiente já não podem ser dissociados dos problemas do desenvolvimento.

Além das preocupações com o meio ambiente, a história do pensamento sobre o desenvolvimento sustentável está também relacionada ao pensamento e atitudes dos seres humanos para com a natureza, e seu aparecimento figura como resposta à mudança progressiva no entendimento de ciência e tecnologia, e das idéias sobre o planeta e a sociedade humana, conforme foi discutido no item anterior (1.1.2).

Os primeiros movimentos na estruturação do pensamento sobre desenvolvimento sustentável e sustentabilidade têm suas raízes nas iniciativas de preservação da vida selvagem e de conservação da natureza de diversos grupos e organizações no século passado, responsáveis pelo surgimento dos primeiros parques nacionais e das primeiras legislações aplicadas à preservação, principalmente da fauna, e, em particular, de pássaros “úteis na agricultura”. Nessa época, os caçadores se espalhavam pelas estepes africanas atrás de marfim e peles, acompanhando a expansão comercial européia e as atividades missionárias. Um aspecto deste fenômeno de aproximação do homem branco das regiões ditas selvagens foi um crescente interesse pela história natural e taxonomia, o que levou à emergência de idéias de controle da caça e, eventualmente, da idéia de conservação. Todavia, a ciência da ecologia viria a ser desenvolvida somente no final do século XIX.

Observam-se, de alguns trabalhos sobre o assunto (Adams, 1990; Beder, 1994), ligações estreitas entre o surgimento da ecologia e o fortalecimento dos movimentos de preservação e conservação da natureza, na Europa, particularmente na Inglaterra, e EUA. A ecologia está também intimamente relacionada ao surgimento do ambientalismo nos anos 70. Neste período, a palavra “ecologia” e seus derivados eram usados largamente, mesmo onde as idéias estavam pouco ou nada relacionadas aos métodos da ciência; contudo, não há como duvidar de que as mais proeminentes figuras do movimento ambientalista eram ecologistas ou conheciam a fundo o assunto.

O crescimento do ambientalismo nos anos 60 e 70 contribuiu para o avanço significativo nos debates sobre o papel da ecologia e da conservação da natureza no

desenvolvimento, bem como para a construção da noção de “Espaçonave Terra”, uma característica importante da cosmologia atual<sup>2</sup>. De fato, a preocupação com problemas ambientais globais, que transcende fronteiras, foi uma das principais distinções do movimento nesta época. Aparece como uma perfeita síntese dessa perspectiva o livro escrito na preparação para a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, em Estocolmo, 1972, cujo título era *Only One Earth*.

Foi, portanto, em 1972, na Conferência de Estocolmo, que ocorreu a primeira grande discussão internacional sobre o futuro do desenvolvimento econômico e social e a degradação ambiental. Foram 113 nações presentes. O caráter eminentemente técnico da conferência pode ser sentido na citação a seguir retirada do texto de preparação (citado por Cavalcanti, 1995): “*Se as atuais tendências de crescimento da população mundial, industrialização, poluição e produção de alimentos, bem como as de diminuição de recursos naturais, continuarem imutáveis, os limites de crescimento do planeta seriam alcançados algum dia dentro dos próximos cem anos. O resultado mais provável seria um declínio súbito e descontrolado, tanto da população quanto da capacidade industrial. (...) É possível modificar essas tendências de crescimento e formar uma condição de estabilidade ecológica e econômica que se possa manter até um futuro remoto.*”

A inserção das questões ambientais<sup>3</sup> na agenda política de todos os governos está dentre os impactos imediatos da Conferência de Estocolmo. Isto deu origem a um grande número de órgãos governamentais de controle da poluição ambiental e conferências com temas mais específicos (desertificação, habitação, fontes de energia), e a uma intensificação dos trabalhos de legislação ambiental nos países. A posição brasileira na conferência foi ativa e oscilava, em linhas gerais, entre a oferta de espaço nacional para a instalação de indústrias poluidoras que se encontravam ameaçadas, nos seus países de origem, pelo crescente aumento da preocupação

---

<sup>2</sup> Como já foi dito no início do capítulo, entende-se por cosmologia o conjunto de representações que formam a imagem do universo que uma sociedade projeta para orientar-se e situar-se no contexto da sua relação com os outros seres e componentes do universo.

<sup>3</sup> As questões ambientais eram entendidas, naquele momento, como questões relacionadas à ecologia e à economia, excluindo-se, por ora, qualquer consideração de caráter social

com o meio ambiente, e a ressalva de que as questões ambientais não poderiam se constituir em veículos que permitissem a interferência de outros países nos “assuntos internos”.

Neste contexto, paralelamente à crescente visão de uma crise neomalthusiana, explicitada principalmente pelo relatório Meadows, já discutido anteriormente, emerge o conceito de desenvolvimento sustentável. Para tanto, contribuiu decisivamente o encontro de especialistas promovido pela Nações Unidas, como um dos seguimentos de Estocolmo, em Cocoyoc, México, em outubro de 1974. Este conseguiu aquilo que a Conferência de Estocolmo não foi capaz de alcançar: considerar os problemas ambientais sob a perspectiva do Terceiro Mundo, especialmente dos países mais pobres. O resultado do encontro foi uma declaração contundente, apontando para o problema da má distribuição dos recursos e satisfação das necessidades básicas do ser humano, bem como para uma redefinição das metas de desenvolvimento e do estilo de vida das sociedades mais ricas do planeta.

Em 1980, foi publicado pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), Fundo Mundial para a Vida Selvagem (WWF) e Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas (UNEP), o documento intitulado Estratégia Mundial para a Conservação (WCS)<sup>4</sup>, que enfatizava que o futuro da humanidade é parte integrante da natureza, e está indissolivelmente unido à sua conservação. O desenvolvimento era apresentado, pela primeira vez, como um meio indispensável para se atingir os objetivos de conservação, não como algo capaz de obstruí-los. O raciocínio era que o desenvolvimento mitigaria a pobreza e a miséria de milhões de pessoas, o que contribuiria para a diminuição do uso indiscriminado dos recursos naturais e, por consequência, um alívio das pressões sobre suas fontes<sup>5</sup>. Era a primeira vez, também, em que se ligava o termo sustentável ao desenvolvimento, referindo-se, prioritariamente, às espécies e ecossistemas, como pesca, pradarias e recursos florestais.

---

<sup>4</sup> Do inglês, World Conservation Strategy (WCS).

<sup>5</sup> Embora inovador por considerar, de uma maneira mais difundida, a problemática social na discussão ecológica, o raciocínio não leva em conta a enorme pressão sobre os recursos naturais exercida pelo modelo de desenvolvimento que vinha sendo implementado pelos países ricos, haja vista a grande diferença entre o consumo energético per capita entre os países industrializados e os não industrializados.

Apesar de seu inegável valor como um diagnóstico da situação ambiental mundial e da necessidade de preservação dos recursos naturais, a principal crítica ao documento WCS é que este não examina, nem ao menos expõe, a questão das mudanças sociais e políticas que seriam necessárias aos objetivos de conservação; ou seja, parece que a conservação está além de qualquer ideologia, e flutua tranqüilamente no oceano das visões, cosmologia e paradigmas humanos, acima das questões de como a natureza e a cultura interagem entre si. Isto faz o documento sugerir, de forma sutil, que a conservação ultrapassa, de alguma maneira, as estruturas de poder e as desigualdades presentes no seio da sociedade, o que, no contexto do desenvolvimento e da teoria social, é algo ingênuo (Adams, 1990). Assim, embora a Estratégia Mundial para a Conservação deva ser encarada como um documento que faz parte de um processo de elaboração, que continua ainda hoje na agenda das discussões sobre desenvolvimento, economia política internacional e temas afins, ela padece do fato de ser muito mais uma elaboração teórica do que algo passível de um tratamento aplicável na prática, além de lidar mais com a escala local do que com os assuntos globais.

A colocação definitiva de elementos do desenvolvimento sustentável, no contexto político e econômico do desenvolvimento internacional, foi alcançada com a publicação do Nosso Futuro Comum (Our Common Future), ou Relatório Brundtland, apresentado à Assembléia Geral da ONU, em 1987. Este foi o resultado do trabalho encomendado pelas Nações Unidas à Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, estabelecida também em Assembléia Geral, em dezembro de 1983. A presidência da Comissão foi entregue à ex-primeira-ministra da Noruega, Gro Brundtland. Tratava-se, por parte das Nações Unidas, de “... *apelo urgente para se encontrar os caminhos do desenvolvimento sustentável, os quais devem fornecer uma busca renovada de soluções multilaterais e da reestruturação do sistema econômico internacional de cooperação*” (Brundtland, 1987: p.xi).

O ponto de partida dos trabalhos da Comissão Brundtland foi deliberadamente abrangente, e resistiu bravamente a toda tentativa de restringir suas preocupações apenas ao meio ambiente. “*Isto teria sido um grave erro. O meio ambiente não existe como uma esfera desvinculada das ações, ambições e necessidades humanas, e tentar defendê-lo sem levar em conta os problemas*

*humanos deu à própria palavra ‘meio ambiente’ uma conotação de ingenuidade em certos círculos políticos” (Brundtland, 1987: p.xiii).*

O Relatório Brundtland coloca com firmeza as questões ambientais na agenda política. Ele parte da premissa que desenvolvimento e meio ambiente não podem ser separados. Além disso, reconhece um vínculo explícito entre os problemas ambientais e a pobreza. *“É, portanto, fútil tentar lidar com problemas ambientais sem uma perspectiva mais ampla que inclua os fatores por trás da pobreza mundial e desigualdades internacionais. (...) Muitas formas de desenvolvimento desgastam os recursos ambientais nos quais se deviam fundamentar, e a deterioração do meio ambiente pode prejudicar o desenvolvimento econômico. A pobreza é uma das principais causas e um dos principais efeitos dos problemas ambientais no mundo” (Brundtland, 1987: p.3)<sup>6</sup>.*

No “Nosso Futuro Comum”, a definição de desenvolvimento sustentável, *“(...) que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades” (Brundtland, 1987:p.46)*, está baseada em dois conceitos. O primeiro é o conceito de necessidade, e prioritariamente, de necessidade dos mais pobres; e o segundo é a idéia de que os limites do meio ambiente não são dados pelo próprio meio ambiente, mas pela organização social e tecnologia. A diferença parece pequena, mas representa uma transformação extremamente importante no conceito de desenvolvimento sustentável baseado unicamente em premissas ecológicas, este último preocupado apenas com a “saúde ambiental”. Para o Relatório Brundtland, o desenvolvimento sustentável é definido como a obtenção de certos objetivos sociais e econômicos, para os quais é, a partir daí, estabelecida uma política ambiental. *“Em essência, o desenvolvimento sustentável é um processo de transformação no qual a exploração de recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro, a fim de atender às necessidades e aspirações humanas” (Brundtland, 1987: p.49).*

---

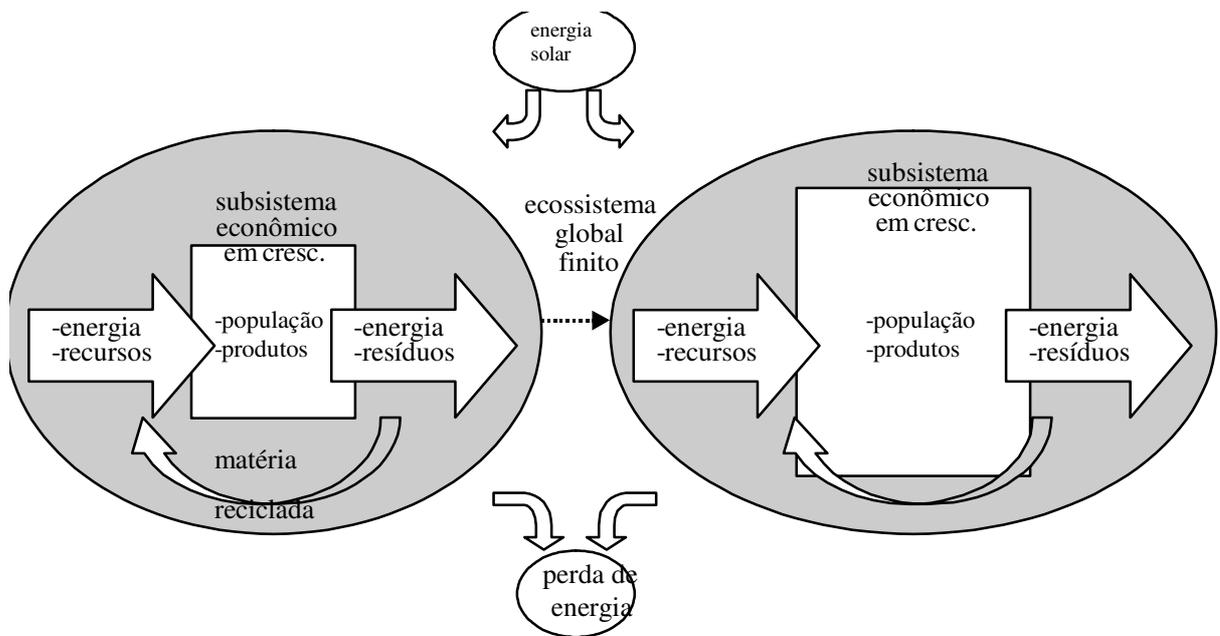
<sup>6</sup> É provável que a pobreza seja, primeiramente, um efeito e, só então, uma causa dos problemas ambientais, já que ela é também fruto da exploração econômica dos países periféricos por parte dos países centrais, o que inclui remessa de riqueza, manutenção de poderes estratégicos e outras questões ligadas às relações entre países de riqueza desigual.

Os elementos do desenvolvimento sustentável presentes no Nosso Futuro Comum representam uma mistura interessante de preocupações relacionadas ao meio ambiente e ao desenvolvimento. Entre as primeiras estão a necessidade de “manter um nível populacional sustentável”, reconhecendo, todavia, a maior demanda de recursos de uma criança do mundo industrializado em relação ao mundo pobre; conservar (e melhorar) a base de recursos; e reorientar a tecnologia, particularmente administrando o risco. Entre as preocupações com o desenvolvimento estão a proeminente meta de “*atender às necessidades essenciais de emprego, alimentação, energia, água e saneamento*” (Brundtland, 1987: p.56); de incluir o meio ambiente e a economia no processo de tomada de decisões; e de retomar o crescimento, visto como a única forma de enfrentar a pobreza. Contudo, este crescimento deve ser de um novo teor, a fim de “*torná-lo menos intensivo em matérias-primas e energia, e mais eqüitativo em seu impacto*” (Brundtland, 1987: p.56).

Está clara a visão de um novo paradigma que situe o ser humano como o centro do processo de desenvolvimento, e que deverá, necessariamente, considerar o crescimento econômico como um meio e não como um fim, terá que proteger as oportunidades de vida das gerações atuais e futuras, e terá, finalmente, que respeitar a integridade dos sistemas naturais que possibilitam a existência de vida na Terra. Como bem lembra Guimarães (1994), “*o novo estilo de desenvolvimento requer uma nova ética.*” O crescimento econômico não é, e jamais foi, requisito para o desenvolvimento do ser humano; assim, o fator decisivo é o uso que uma coletividade faz de sua riqueza, e não a riqueza em si.

Não obstante, o relatório afirma a exigência de manter e revitalizar a economia mundial para combater a pobreza (insustentável) e de se obter o desenvolvimento sustentável, o que significa um crescimento anual, segundo o relatório, de no mínimo 3% na renda *per capita* dos países em desenvolvimento e, também, “*um crescimento econômico mais rápido tanto nos países em desenvolvimento como nos industrializados, maior liberdade no acesso ao mercado para os produtos dos países em desenvolvimento, taxas de juros mais baixas, mais transferência de tecnologia, e fluxos de capitais muito maiores, tanto em termos concessionários como comerciais*” (Brundtland, 1987: p.97). Contudo, não dá resposta à questão de como ficaria um aumento da demanda por energia e matéria-prima, e também ao problema da poluição. De fato, alguns autores como Goodland (1996) trabalham o caso em que o mundo já atingiu seus limites

de crescimento e apresentam como evidência a apropriação humana da biomassa; o aquecimento global pelo efeito estufa; a ruptura da camada de ozônio; a crescente degradação do solo; e a diminuição da biodiversidade. O autor considera improvável que o mundo possa sustentar um sistema econômico duas vezes maior do que é hoje, quanto mais de cinco a dez vezes, como seria necessário para vencer, segundo consta no relatório, o problema da pobreza. Ele conclui apontando a falta de disposição política do mundo industrializado, e afirmando de forma contundente que não adianta levantar o fundo sem também abaixar o topo do sistema econômico planetário. A figura 2 mostra o tamanho do sistema econômico em relação ao planeta. Na visão de Goodland (1994), já estamos no limite, e é arriscado prosseguir, como o propõe a Comissão Brundtland.



**Figura 2: Ecosistema global finito relativo ao subsistema econômico em crescimento**

Fonte: Goodland, 1994: p.5

Apesar das críticas se centrarem, principalmente, na questão da necessidade de crescimento advogada pelo relatório e na ausência de propostas que vencessem as dinâmicas sócio-políticas concretas, os trabalhos da Comissão Brundtland conseguiram uma espantosa unanimidade, trazendo o desenvolvimento sustentável para a ordem do dia no debate

internacional, e situando-o no contexto mais amplo possível. Seus desdobramentos deram origem a vários documentos, como a Carta da Terra, sobre os principais objetivos do desenvolvimento sustentável; o Protocolo de Montreal, sobre a camada de ozônio; e a Agenda 21, com o cronograma de ações e metas a serem atingidas, todos obtidos a partir da Conferência Rio-92. Mas o mais importante foi a constatação de que as conseqüências ambientais de como os seres humanos utilizam, via atividades produtivas, os recursos do planeta revelam nada mais do que a estrutura e o padrão de relações sociais entre os próprios seres humanos; e isto significa superar visões segmentadas e/ou politicamente interessadas que opõem o meio ambiente ao desenvolvimento, pois o primeiro nada mais é do que o resultado do segundo.

### ***1.2- Energia, Tecnologia e Desenvolvimento Sustentável***

O Relatório Brundtland dedica um capítulo de quase 50 páginas ao desdobramento de suas premissas e discussões sobre o desenvolvimento sustentável aplicadas na área da energia, e delinea as opções para o meio ambiente e o desenvolvimento neste campo. Ele apresenta um breve diagnóstico sobre energia, economia e meio ambiente, detalhando mais as problemáticas referentes aos combustíveis fósseis, à energia nuclear, às fontes renováveis e à eficiência energética.

O relatório reconhece a importância da energia para o desenvolvimento sustentável, uma vez que ela é indispensável à sobrevivência diária, e chama atenção especial ao problema do desperdício de energia. É colocado que as atuais fontes primárias de energia são quase todas não-renováveis: gás natural, petróleo, carvão, turfa e energia nuclear, havendo também as renováveis como: madeira, vegetais, esterco, quedas d'água, fontes geotermiais, energia solar, eólica, das marés e das ondas, além da força muscular animal e humana. Cada forma de energia tem seus custos, benefícios e riscos econômicos, sanitários e ambientais e estes são fatores que interagem ativamente com outras prioridades governamentais e globais. É preciso fazer opções sabendo que a escolha de uma estratégia energética determinará inevitavelmente a escolha de uma estratégia ambiental. Isto porque a maneira do homem lidar com a natureza está estreitamente relacionada às transformações de energia em suas diversas manifestações, tais como energia cinética, elástica, gravitacional, térmica, elétrica, química, radiante ou nuclear.

Os principais elementos a serem abordados e conciliados na área da energia, do ponto de vista da sustentabilidade, segundo o relatório, são: i) aumento dos suprimentos de energia em quantidades suficientes para atender às necessidades humanas (o que significa ajustar-se a um mínimo de 3% de crescimento *per capita* nos países em desenvolvimento); ii) medidas que visem à conservação e ao rendimento energético, de modo a minimizar o desperdício dos recursos primários; iii) saúde pública, reconhecendo os riscos à segurança inerentes às fontes energéticas; e iv) proteção da biosfera e prevenção de formas mais localizadas de poluição. Os elementos apresentados acima são considerados “elementos-chave” pelo relatório na área de energia, e estão em consonância com o que foi dito anteriormente no item 1.1 desta dissertação.

No entanto, a questão que surge imediatamente da análise desses pontos é, simplesmente, a de como garantir o suprimento de energia para a sociedade, de modo a contribuir para o desenvolvimento sustentável, o que significa contribuir para o combate à pobreza e a redistribuição da renda; garantir o suprimento para sustentar um crescimento de 3% na renda, como advoga o relatório; utilizar da maneira mais eficiente possível a energia proveniente dos recursos naturais; proteger estes recursos e prevenir as formas de poluição; além de levar em conta a qualidade de vida da população de uma forma geral, preocupando-se com o desenvolvimento qualitativo, ao invés do crescimento quantitativo existente hoje!?

O relatório não apresenta uma resposta objetiva a essa pergunta, muito menos uma “receita de bolo” para os que trabalham no assunto. No entanto, ele não esconde o tamanho do desafio que é colocado a todos. Tomando os dados de 1980, se o consumo de energia permanecesse nos níveis daquele ano (10 TW), por volta de 2025, para uma população global de 8,5 bilhões de pessoas, o consumo estaria por volta de 14 TW, 5 TW para os países em desenvolvimento e 9 TW para os industrializados, um aumento de 40% distribuídos de forma extremamente desigual (Brundtland, 1987: p.188). Se o consumo de energia *per capita* se uniformizasse em todo mundo nos níveis atuais dos países industrializados, por volta de 2025, a mesma população global necessitaria de aproximadamente 55 TW (Brundtland, 1987: p.189)<sup>7</sup>. É improvável que qualquer

---

<sup>7</sup> Embora TW seja uma medida de potência e não de energia, o texto do relatório esclarece, numa nota na página 187, que TW-anos/ano aparece, a partir daquele ponto, como TW. Conforme consta na nota, 1 TW-ano é igual a cerca de 1 bilhão de toneladas de carvão.

um dos dois casos se mostre realista, mas dão uma idéia aproximada da faixa em que se pode se situar o consumo de energia no futuro, pelo menos hipoteticamente.

Um consumo elevado de energia agrava as inquietações decorrentes dos riscos e incertezas ambientais, das quais o relatório destaca quatro: i) a séria probabilidade de alteração climática devido ao “efeito estufa” de gases emitidos na atmosfera, sendo o mais importante o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) produzido pela queima de combustíveis fósseis; ii) a poluição do ar urbano pelas indústrias, devido a poluentes atmosféricos gerados pela queima de combustíveis fósseis; iii) acidificação do meio ambiente devido às mesmas causas; e iv) risco de acidentes em reatores nucleares, os problemas de deposição dos rejeitos e da desativação dos reatores após seu tempo de vida útil, e os perigos da contaminação associados ao uso da energia nuclear (Brundtland, 1987: p.190). Além destes, a escassez de lenha nos países em desenvolvimento merece grande atenção.

Em relação à questão de quais fontes de energia serão capazes de fazer frente ao desafio do desenvolvimento sustentável, os combustíveis fósseis, gás natural, petróleo e carvão mineral, são vistos com reservas, principalmente, por causa da poluição que provocam (efeito estufa, poluição do ar urbano e acidificação). Além disso, apesar de haver divergências e do estoque de gás natural e carvão ainda serem grandes, muitos analistas estão convencidos de que o mundo deveria implementar imediatamente uma vigorosa política de conservação do petróleo (Brundtland, 1987; Jackson, 1992; Campbell, 1998). É certo que os preços do petróleo não acompanharam as previsões de aumento feitas após seu primeiro choque em 1973, e que, todos pensavam, iriam ser a solução para o problema do incentivo à pesquisa para a viabilidade de outras fontes energéticas, em especial as fontes renováveis. Mesmo com a recente crise do Golfo, o mercado mundial foi capaz de superar a perda completa de produção do Iraque e do Kuwait, não se concretizando, portanto, as condições econômicas nas quais as outras fontes de energia viriam a ser competitivas.

Contudo, o fato de, até o momento atual, as fontes de energia alternativas ao petróleo não terem conseguido se firmar sob condições de mercado, significa apenas que a composição de preço dessas fontes, na contabilidade do sistema econômico, ainda não consegue considerar seus ganhos, por não levar em conta aspectos ecológicos e sociais; e, assim, suas deficiências e

desvantagens adquirem, portanto, maior importância, principalmente se comparadas com as vantagens do petróleo. O mundo acostumou-se a utilizar petróleo, e o faz há quase 150 anos. O motor a combustão interna é o conversor por excelência da moderna civilização tecnológica, tendo os derivados de petróleo como os combustíveis essenciais. A sociedade certamente seria diferente da sua atual configuração se o petróleo não fosse abundante e barato.

No entanto, o fantasma da escassez e do aumento dos preços permanece rondando. Em trabalho publicado numa importante revista científica nos Estados Unidos (*Scientific American*), em março de 1998, dois consultores, com experiência de mais de 40 anos de serviços prestados para a indústria do petróleo, analisam os atuais números das reservas de petróleo, e previnem que o próximo choque não será mais tão temporário quanto foram os dois primeiros, em 1973 e 1979 (Campbell, 1998). Esta conclusão contradiz o quadro pintado pela indústria do petróleo, no qual são reportados 1020 bilhões de barris de óleo ( 1020 Gbo) de reserva; dividindo este valor pela taxa de produção atual de 23,6 Gbo por ano, haveria petróleo convencional abundante e barato por mais 43 anos. Todavia, segundo Campbell e Laherrère (1998), estes números estão baseados em três erros críticos: primeiro, eles se fundamentam em estimativas distorcidas das reservas; segundo, consideram que a produção vai permanecer constante; e terceiro, e mais importante, assumem que a derradeira gota de óleo pode ser bombeada do solo tão facilmente quanto o foram todas as outras gotas até hoje.

Na busca por dados que traduzam a real situação das reservas de petróleo, os autores chamam atenção para o fato de o aumento das reservas reportado por diversos países, mais de 300 Gbo ao todo, não ter sido acompanhado de nenhuma nova descoberta. A explicação de como são feitas as estimativas das reservas dá uma idéia do quão imprecisos estes números podem ser, e de como eles estão sujeitos à conjuntura política que influi nas cotas de exportação dos países, na queda ou aumento dos preços, na capacidade de obtenção de empréstimos, etc. No final dos anos 80, 11 países da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) aumentaram suas cifras em grandes quantidades, variando de 42 a 127%; “... *nenhuma nova descoberta ou inovação tecnológica justifica a surpreendente adição de 287 Gbo. Este valor é maior do que todo o petróleo descoberto nos Estados Unidos, mais 40 por cento.*” (Campbell, 1998: p.61). Campbell e Laherrère não estão sozinhos em seus prognósticos de que, em

aproximadamente dez anos, a produção global de petróleo convencional terá atingido seu pico e começará a declinar. Outros pesquisadores chegaram à conclusão bem parecida de que isto ocorrerá em doze ou quinze anos, sendo que a indústria do petróleo tem somente uma chance de 5% de que o pico seja alcançado em vinte anos (Campbell, 1998: p.63).

A questão da escassez do petróleo e seu impacto na sociedade é um campo fértil para debates que não podem ser aprofundados aqui, pois envolvem assuntos que vão além do escopo dessa dissertação. O Relatório Brundtland também evita esta polêmica, e somente sugere que um programa de conservação seria uma atitude prudente. Como já foi mencionado, as maiores restrições feitas aos combustíveis fósseis no relatório se baseiam no problema da poluição. Os comentários sobre energia nuclear vão no mesmo sentido, além de incluir o problema dos custos das usinas, que não pararam de crescer desde o início dos programas nucleares nos vários países; e o perigo da proliferação das armas nucleares. É reconhecida a existência de grande controvérsia também neste assunto da energia nuclear; os debates na Comissão Brundtland refletiram esta controvérsia, e pararam neste ponto.

Entretanto, o recado é claro e conclusivo em relação à problemática da energia, desenvolvimento e meio ambiente: *“Seja qual for a política adotada, o importante é que se dê a máxima prioridade à promoção de práticas que conduzam ao rendimento energético em todos os setores ligados à energia e de programas de pesquisa, desenvolvimento e demonstração para um uso seguro e não atentatório ao meio ambiente de todas as fontes supridoras de energia, especialmente as renováveis”* (Brundtland, 1987: p.209).

As fontes renováveis de energia são vistas pelo relatório como um enorme potencial ainda inexplorado, mas sem deixar de reconhecer que todas as fontes não deixam de apresentar riscos à saúde e ao meio ambiente. É feito um alerta sobre aumento do consumo de combustível vegetal nos países em desenvolvimento, notadamente lenha e carvão, o que faz dessa suposta fonte renovável algo também sujeito ao esgotamento. O rendimento energético e a conservação de energia recebem um tratamento especial, ressaltando a importância destes para o desenvolvimento sustentável, na medida em que se aproveitam melhor os recursos naturais.

O Relatório Brundtland conclui com um parágrafo a parte dedicada à energia, que resume o teor do que foi defendido ao longo do texto: *“A energia não é um produto único, mas uma combinação de produtos e serviços da qual dependem o bem-estar dos indivíduos, o desenvolvimento sustentável das nações e as possibilidades de manutenção da vida do ecossistema global. No passado, permitiu-se que essa combinação fosse usada ao acaso, em proporções ditadas por pressões de curto prazo e pelos objetivos imediatistas de governos, instituições e empresas. A energia é importante demais para que continue a ser tratada desta forma aleatória. Uma diretriz energética segura, sensata do ponto de vista ambiental e economicamente viável, que garanta o progresso humano até um futuro distante, é evidentemente indispensável. E também possível. Mas para que isso seja conseguido serão necessárias novas dimensões de empenho político e cooperação institucional”* (Brundtland, 1987: p.225).

### **1.3- Contexto Atual do Desenvolvimento Sustentável**

Afinal, o que é desenvolvimento sustentável na prática? Como implementá-lo? Como este conceito se aplica para um determinado setor? O que ele significa no contexto de uma região? Como já foi mencionado, o Relatório Brundtland, apesar das críticas, popularizou o termo “sustentável” ou “sustentabilidade”, mas não o estendeu a todos os cantos do conhecimento.

Existem, atualmente, dezenas de visões daquilo que representa o desenvolvimento sustentável, algumas das quais são verdadeiros “desiderata”, e incluem liberdade, democracia, igualdade de gênero, fim do preconceito racial, e toda uma lista de desejos sociais. Outras procuram medir a sustentabilidade, em um dado contexto, através de índices numéricos calculados de acordo com procedimentos bem definidos e baseados em premissas científicas. Sem dúvida, em muitos casos, o termo “sustentável” é utilizado de forma irresponsável, por interessados em tirar proveito próprio de sua quase unanimidade, dando origem a uma espécie de modismo. Isto ocorre, muitas vezes, com pessoas que vêem a oportunidade de maquiar práticas duvidosas de negócios e legitimar ganhos escusos. Fatos como este têm levado, inclusive, a um desgaste do termo “sustentável” entre as pessoas que trabalham seriamente com a questão do meio ambiente e desenvolvimento.

Daquilo que foi apresentado até aqui, está claro que trabalhar pela sustentabilidade, em qualquer área, significa procurar atender às necessidades de emprego, alimentação, energia, água e saneamento, ou seja, combater a pobreza. Este ponto é apresentado como prioridade no Relatório Brundtland, e, em nome dele, até um crescimento adicional nada desprezível de 3% ao ano é proposto, dando margem às críticas de quem pensa que os limites do planeta já foram alcançados. Não há, no momento, meios de saber se isto já ocorreu, embora a situação atual da humanidade, principalmente dos países pobres, não seja confortável no que se refere a efeitos de catástrofes e mudanças climáticas, fome, falta de saúde, analfabetismo, concentração de renda, guerras e outras disfunções do sistema humano. No entanto, como já foi ressaltado, para que a recuperação dos países pobres adquira signos de sustentabilidade, é preciso resolver as situações de extrema desigualdade dentro das nações e entre elas.

O fato é que o Relatório deixa claro que o desenvolvimento sustentável é a obtenção de certos objetivos sociais e econômicos, estabelecidos para atender as aspirações humanas e, a partir daí, é definida a política ambiental. O foco está no ser humano, e este procedimento requer, com certeza, uma nova ética.

Goodland (1994) procura amarrar o conceito de desenvolvimento sustentável apresentado no Relatório Brundtland, dando-lhe uma definição mais precisa. Para isto, distingue a sustentabilidade em três tipos interdependentes:

1) Sustentabilidade Social: necessária para a sustentabilidade ecológica, a sustentabilidade social enfatiza o desenvolvimento qualitativo em relação ao crescimento quantitativo para vencer a pobreza; poderá ser alcançada somente por uma forte e sistemática participação da comunidade ou sociedade civil. Coesão social, identidade cultural, solidariedade, senso de comunidade, amizade, fraternidade, amor, padrões comuns de honestidade, instituições, leis, disciplina, etc, constituem o que foi chamado de capital social (ou “capital moral”) que depende da vida cultural e religiosa da comunidade e está sujeito a deterioração, da mesma maneira que o capital físico.

2) Sustentabilidade Econômica: a melhor definição de sustentabilidade econômica é a manutenção do capital nas suas quatro formas: construído, natural, social e humano. A manutenção do primeiro é bem conhecida dos economistas desde os tempos mais remotos, isto é, a busca do melhor investimento com a melhor taxa de retorno faz parte da sustentabilidade

econômica. O capital natural é mais difícil de se avaliar, e o que se observa atualmente é uma tendência à internalização dos custos ambientais através de políticas ambientais e técnica de valoração. O capital humano, investimentos em educação, saúde e nutrição, já é aceito como parte importante da economia, mas o capital social, como descrito acima, ainda não foi adequadamente incorporado.

3) Sustentabilidade Ecológica: buscar a sustentabilidade ambiental significa procurar viver dentro dos limites estabelecidos pelo meio ambiente, tanto com relação às fontes dos recursos, quanto à capacidade de assimilação dos rejeitos. Isto significa também manter e melhorar a base de recursos, proteger os recursos renováveis, e utilizar os não renováveis numa taxa de esgotamento igual à taxa de substituição.

Na área da energia, o desenvolvimento sustentável significa, portanto, aumentar a oferta de energia, principalmente nos países pobres, com o objetivo de garantir o crescimento e o atendimento das necessidades básicas, explorar todas as formas de energia mas especialmente as renováveis, com ênfase prioritária na conservação e no rendimento energético e, ao mesmo tempo, sem atentar contra o meio ambiente.

Em termos institucionais, Daly (1997) apresenta quatro sugestões de políticas interrelacionadas para o desenvolvimento sustentável, que deveriam se aplicar a qualquer país. Segundo o autor, as quatro políticas, as quais apenas citaremos aqui mas que são bem explicadas no artigo, são apresentadas em ordem crescente de radicalismo. *“As duas primeiras mostram-se razoavelmente conservadoras, fundamentalmente neoclássicas, e relativamente não possuem caráter controverso, ainda que freqüentemente o tenham. A terceira será acentadamente debatida por muitas pessoas e a quarta será considerada fora de propósito pela maioria dos economistas. Seria político omiti-la, mas realmente não posso fazê-lo, uma vez que ela é política externa complementar logicamente requerida”* (Daly, 1997: p.179). São elas: 1)parar de contar o consumo do capital natural como renda; 2)tributar menos a renda e taxar mais o uso de recursos naturais na produção; 3)maximizar a produtividade do capital natural no curto prazo e investir no crescimento de sua oferta no longo prazo; e 4)sair da ideologia da integração econômica, do livre movimento de capitais e do crescimento promovido por exportações – e para uma orientação mais nacionalista que busque desenvolver a produção doméstica para

mercados internos como primeira opção, recorrendo ao comércio internacional apenas quando claramente muito mais eficaz.

Guimarães (1994) vai direto ao ponto: “*A sustentabilidade do desenvolvimento exige planejamento, e, quase por definição, a democratização do Estado e não o seu abandono e substituição pelo mercado.*” Contudo, essa não é a tendência que se observa na conjuntura atual. É muito provável que a Convenção de Prevenção de Mudanças Climáticas, assinada por 161 países, que pressupõe o estabelecimento de limites à emissão de CO<sub>2</sub>, se encontre hoje num impasse por esta razão

Resultado prático mais significativo da Rio-92, considerada o primeiro passo na melhoria da sustentabilidade do sistema de produção atual, a Convenção tem um interesse especial para o Brasil, e mais diretamente, para o setor canavieiro. Isto porque a Convenção prevê que grande parte dos custos adicionais incorridos pelos países em desenvolvimento para limitar sua contribuição para a mudança climática são passíveis de financiamento pelos países industrializados. No caso do cultivo da cana para a produção de álcool, a retirada de CO<sub>2</sub> da atmosfera, ocorre na fotossíntese durante a vida da planta. Este CO<sub>2</sub> é depois liberado com a utilização da biomassa da cana e o uso do álcool combustível, mas o balanço global é, no mínimo, nulo, ou seja, mesmo que não haja incorporação definitiva do CO<sub>2</sub> retirado da atmosfera, pelo menos não há aumento deste gás com o uso do álcool. Este fato é apresentado atualmente como uma das principais vantagens da produção e utilização deste combustível, ou de qualquer outro que seja originário da biomassa.

Há a proposta da instituição de certificados de emissão de CO<sub>2</sub> que poderiam ser negociados no mercado internacional. Esse mecanismo, ainda em estágio bastante embrionário, permitiria, aos países com dificuldade de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, realizar projetos em conjunto com outros países em uma posição mais favorável em relação ao problema, como o Brasil e, assim, dividir os direitos potenciais destes certificados. Desta maneira, projetos visando uma melhor utilização da energia da biomassa da cana poderiam atrair novos investimentos, que ajudariam a compartilhar os custos desses projetos com a comunidade internacional. Estas iniciativas são conhecidas como Implementação Conjunta (Joint Implementation).

Entretanto, a exaustiva jornada de negociações concluídas em 14/11/98, na 4ª Convenção da ONU sobre Mudanças Climáticas em Buenos Aires, onde, após 10 dias, 4 mil representantes de 160 países tentaram estabelecer formas de reduzir em até 5,2% as emissões dos gases que provocam o aquecimento global, teve como único resultado um plano que estabelece uma data-limite para por em prática as definições do Protocolo de Kyoto de 1997, o que deve ocorrer até o ano 2000. O balanço que se pode fazer da reunião é que ela não conseguiu atender a nenhum de seus objetivos e se limitou a adiar qualquer decisão importante, ao menos por um ou dois anos.

A principal expectativa era dar andamento às importantes resoluções tomadas em Kyoto em 1997, tais como reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> entre 2008 e 2012 a 6% dos níveis de 1990, e regulamentar o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, de modo que o setor privado dos países industrializados começasse a investir nos países em desenvolvimento, a fim de receber créditos pela redução das emissões de carbono, que poderiam ser comercializados mais tarde. Estima-se que esse “mecanismo” poderia gerar um fluxo de vários bilhões de dólares dos países ricos em direção aos países em desenvolvimento (O Estado de São Paulo, 17/11/98).

A razão principal da polêmica é que um grande esforço se faz necessário para atingir a meta de Kyoto porque, atualmente, os países desenvolvidos já estão emitindo 13% acima dos níveis de 1990. Fazendo-se uma estimativa grosseira, estes países, se nenhuma providência for tomada, estarão emitindo cerca de 39% de CO<sub>2</sub> acima do nível de 1990, ou seja, para atender o compromisso de Kyoto, será necessário reduzir em 45% este tipo de poluição.

O resultado a que se chegou, depois de dez dias de exaustivas discussões, foi o de solicitar ao secretariado da Convenção do Clima que prepare um plano de trabalho a ser submetido à Convenção. Mesmo esse resultado medíocre correu o sério risco de não ser adotado, por causa da insistência dos EUA e da Argentina de incluir no plano de trabalho um novo mecanismo, não previsto em Kyoto, que é o da adoção de “compromissos voluntários”, que os países em desenvolvimento assumiriam, de reduzir suas emissões, apesar de a Convenção do Clima isentá-los claramente desses compromissos. A redução das emissões poderia significar, em alguns casos, limitar o “desenvolvimento” do país (O Estado de São Paulo, 17/11/98).

Outra expectativa também frustrada foi a de que se esclarecesse a questão do uso de florestas plantadas, recuperando áreas degradadas. Essa ação daria origem a créditos, porque

florestas plantadas retiram carbono da atmosfera. A causa mais profunda das divergências que paralisaram a reunião de Buenos Aires é a decisão do Senado dos Estados Unidos de não ratificar o Protocolo de Kyoto “enquanto os países em desenvolvimento não adotarem medidas significativas para reduzir suas emissões”. O protocolo prevê que os EUA, maior consumidor de combustíveis fósseis do planeta, teriam de reduzir significativamente suas emissões, em cerca de 25%, até o ano 2010. A resolução do Senado americano é inaceitável para o Grupo dos 77 (ao qual o Brasil se alinha) e para a China, não só por violar o espírito da Convenção do Clima, assinada no Rio de Janeiro em 1992, como também por se basear em premissas incorretas (O Estado de São Paulo, 17/11/98).

O fato de o Protocolo de Kyoto não ter sido ratificado foi o que gerou a paralisia da conferência em Buenos Aires e ameaça tornar a Convenção do Clima letra morta, o que prejudica não só os países em desenvolvimento, mas os próprios países industrializados. A conclusão que se pode tirar da reunião de Buenos Aires é a de que muitos governos que assinaram a Convenção do Clima, assoberbados como estão por crises financeiras, desemprego, recessão e desastres naturais, consideram prematuro engajar-se em programas sérios que reduzam o perigo de mudanças climáticas que só ocorrerão no médio e no longo prazos. Apenas duas coisas poderiam mudar essa atitude de complacência com um problema que pode afetar o futuro da humanidade: uma deterioração do clima claramente resultante do aumento das emissões (como ocorreu com a destruição da camada de ozônio) ou o surgimento de uma liderança clara nos países em desenvolvimento, o que faltou em Buenos Aires (O Estado de São Paulo, 17/11/98). Enfim, como já foi dito, quando se chega às questões verdadeiramente importantes, parece difícil encaminhar algo torto.

#### **1.4- Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável**

O Programa Nacional do Alcool (Proálcool) brasileiro ganha elogios da Comissão Brundtland como um exemplo de exploração do potencial de uma fonte renovável de energia: *“O programa de álcool combustível do Brasil produziu cerca de 10 bilhões de litros de etanol a partir da cana-de-açúcar em 1984 e substituiu cerca de 60% da gasolina que o país necessitaria. O custo foi estimado em cerca de US\$50-60 por barril de gasolina substituída.*

*Quando se retiram os subsídios e se emprega uma taxa cambial real, esse custo mostra-se competitivo em relação aos preços do petróleo de 1981. Considerando-se as atuais cotações mais baixas do petróleo, o programa torna-se antieconômico; porém, ajuda o país a poupar moeda forte, além, de proporcionar outros benefícios, como o desenvolvimento rural, a geração de empregos, o aumento da auto-suficiência e uma vulnerabilidade menor às crises nos mercados mundiais de petróleo” (Brundtland, 1987: p.214). O relatório cita como fonte o trabalho de J. Goldemberg et alli, Ethanol Fuel: a Use of Biomass Energy in Brazil, Ambio, 1985.*

Os aspectos ambientais positivos da produção do etanol e do seu uso como combustível têm sido o principal tema da defesa do Proálcool, como o foi a questão da independência energética nacional nos primeiros anos de sua implantação. Os diversos trabalhos publicados na literatura especializada sobre a produção de etanol e seu impacto no meio ambiente consideram, principalmente, o balanço positivo de CO<sub>2</sub> e as possibilidades da produção de excedentes de energia elétrica através da cogeração nas usinas, onde as necessidades energéticas são supridas pelo bagaço, subproduto do esmagamento da cana.

A indústria da cana no Brasil, responsável pela produção do etanol, influi de forma marcante no cenário energético, econômico e social do país, e faz do Brasil o maior produtor do mundo de cana-de-açúcar, com cerca de 300 milhões de toneladas na safra 1997/1998, sendo aproximadamente 2/3 utilizados na produção do etanol, num total de 15,1 milhões de m<sup>3</sup> e 14,7 milhões de toneladas de açúcar.

A grande quantidade de material que sobra do processo de fabricação do açúcar e álcool já indica um potencial significativo ainda pouco aproveitado da indústria da cana, com todas as vantagens que representa o uso de uma fonte renovável no setor energético, principalmente no médio e longo prazo.

O bagaço é o subproduto queimado em caldeiras que fornecem vapor para diversas fases do processo de fabricação do etanol e açúcar, inclusive para a geração de eletricidade utilizada pela própria unidade industrial. Ele é responsável, portanto, pela auto-suficiência energética das unidades industriais, havendo também um excedente que pode gerar eletricidade para ser

vendida à rede para consumo dentro do sistema elétrico integrado. Diversos trabalhos tratando do potencial para a geração de eletricidade utilizando resíduos da indústria da cana já foram publicados na literatura especializada, apresentando cenários variantes de acordo com a previsão de excedente de bagaço e a tecnologia usada na geração de eletricidade. Entretanto, em todos os prognósticos de aproveitamento da energia do bagaço resta um problema, referente ao preço de venda da eletricidade dos produtores para as concessionárias, que ainda não viabiliza economicamente a cogeração (Cortez, 1994; Walter, 1994). Apesar disso, o bagaço ocupa um lugar importante no aproveitamento da energia da biomassa da cana, mesmo se consideradas somente as fronteiras da área industrial das usinas, e ainda com possibilidade de consolidar de uma forma mais sólida sua participação na matriz energética nacional.

A questão da vinhaça, ou vinhoto, por sua vez, envolve questões ainda bem menos trabalhadas no contexto da produção de etanol no Brasil. Ela é produzida na razão de 10-14 litros de vinhaça por litro de álcool, constituindo-se no maior efluente da indústria do álcool, e representando um problema ecológico devido à sua alta DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), 13 e 25 g/l em média, respectivamente, temperatura de aproximadamente 85°C e pH 4,5. Na grande maioria dos casos, a vinhaça é empregada “in natura” na lavoura da própria cana-de-açúcar, substituindo em parte o uso de fertilizantes. Esta prática, chamada fertirrigação, é apresentada como a solução para o enorme problema da disposição desse resíduo desde quando foi proibido o seu simples descarte no curso d’água mais próximo da usina, prática adotada historicamente.

A destinação que a vinhaça vem recebendo ao longo da evolução da indústria da cana no Brasil será detalhada no capítulo 2. Por ora, é importante colocar que, ainda que a prática da fertirrigação seja apresentada atualmente, no setor sucroalcooleiro, como a solução para o problema da disposição da vinhaça, e, na maioria dos casos, com ganhos na fertilidade do solo, sem atentar contra o meio ambiente no curto prazo, parece claro que seu objetivo principal é se livrar de um resíduo incômodo e perigoso, da forma mais rápida e econômica possível, sem causar maiores danos paralelos.

Quando tratada através da digestão anaeróbia, num biodigestor apropriado, um litro de vinhaça pode gerar até 13 litros CNTP de biogás, com cerca de 60 a 65% de metano (CH<sub>4</sub>) e 35

a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este biogás pode ser usado diretamente em queimadores para a produção de calor ou em motores estacionários; o metano pode ser separado do CO<sub>2</sub> e utilizado em motores a combustão interna de veículos. Tratando, hipoteticamente, toda a vinhaça produzida no Brasil na safra de 1997/1998 (198 milhões de m<sup>3</sup>), o metano produzido seria cerca de 1,6 bilhões de m<sup>3</sup> (aproximadamente 4,5 milhões de m<sup>3</sup> por dia, considerando o ano de 365 dias), combustível suficiente, nas condições tecnológicas atuais, para movimentar mais de 23 mil ônibus de transporte coletivo urbano, o dobro da frota da cidade de São Paulo. O efluente do biodigestor guarda as mesmas propriedades fertilizantes da própria vinhaça, com a diferença de que o risco ecológico é significativamente reduzido, já que a DQO é removida em cerca de 90% e o pH aumentado.

A exequibilidade da digestão anaeróbia da vinhaça vem sendo provada por vários estudos operando com plantas-piloto em condições reais, e algumas plantas em escala normal foram instaladas até o momento no Brasil. O capítulo 3 está dedicado a apresentar a tecnologia, seu emprego no tratamento da vinhaça e as experiências que fizeram ou fazem uso desta técnica no contexto da indústria canavieira no Brasil, suas vantagens, desvantagens, benefícios e problemas encontrados.

A tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça é o que se chama de “tecnologia limpa” porque possui as características de auxiliar no uso do recurso natural, no caso a biomassa da cana, da maneira mais eficiente possível, e gerar produtos e rejeitos com reduzido potencial de danos ecológicos (OECD, 1995). Além disso, ela pode ser uma tecnologia lucrativa, dependendo da utilização que se fizer do biogás, ou da estrutura de contabilização dos custos, e este é, sem dúvida, fato importante para a sua difusão e sucesso.

Desta maneira, a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça colabora diretamente para o desenvolvimento sustentável, indo ao encontro de seus princípios, e se constituindo, portanto, na melhor opção para o tratamento da vinhaça. Isto, porque contribui para a melhor exploração do recurso natural, a biomassa da cana; diminui o desperdício de energia; contribui para o crescimento da oferta de energia de um modo menos intensivo em matéria-prima e energia; contribui na diminuição do efeito estufa; aumenta a participação do gás, reconhecidamente menos poluente, na matriz energética; e, em suma, explora ao máximo uma fonte renovável de

energia, melhorando seu rendimento energético, sem atentar contra o meio ambiente, e mesmo contribuindo para a melhoria deste. Dependendo da utilização que se faz do biogás, como será visto no capítulo 3, a digestão anaeróbia da vinhaça é lucrativa; porém, se se taxasse mais o uso de recursos naturais e se parasse de contar o seu consumo como renda, como propõe Daly (1997)<sup>8</sup>, ela seria, sem dúvida, um grande negócio.

---

<sup>8</sup> Ver item 1.3, 7º parágrafo.

## **Capítulo 2**

### **Álcool e Vinhaça no Brasil**

Neste capítulo tem-se o objetivo de situar o problema da destinação da vinhaça no contexto mais amplo de funcionamento da indústria da cana no Brasil, partindo-se de uma análise histórica, até os aspectos ambientais da produção de álcool, para se chegar na questão da vinhaça.

#### ***2.1- A Produção de Álcool no Brasil***

##### **2.1.1- Histórico**

Ao ser implantada no Brasil, nos primeiros anos da década de 30, a política de defesa da economia canavieira tinha como objetivo fundamental a preservação do setor açucareiro, ameaçado por uma oferta excessiva de açúcar, que causava instabilidade no mercado internacional e era responsável pela crise que os produtores enfrentavam na época. Em 20 de fevereiro de 1931, pelo Decreto nº 19.117, o então Presidente Getúlio Vargas oficializou o primeiro ato de intervenção do Estado na economia açucareira, dando novos rumos à secular indústria do açúcar. Estava instituída a aquisição obrigatória de álcool na proporção de 5% da gasolina importada. Esse decreto é seguido ainda de outros que, entre suas diversas medidas, tiveram a finalidade de regulamentar a fiscalização técnica do assunto, atribuída ao Ministério da Agricultura; autorizar a assinatura de contratos, entre governo e partes interessadas, para a

montagem de usinas destinadas à produção de álcool; abrir linhas de crédito para aquisição de equipamentos; limitar a produção de açúcar; e incrementar o fabrico de álcool-motor.

Organizou-se também, pelo Decreto nº 20.761, de 7 de setembro de 1931, a Comissão de Defesa da Produção Açucareira, órgão que viria a ser extinto menos de três anos depois com a criação, em 1933, do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), que englobaria suas funções. Assim, cuidou-se de estimular a fabricação de álcool, encaminhando para ela não só os excedentes de açúcar que não encontravam saída, como, igualmente, a parte da matéria-prima, o caldo da cana, que não podia, por motivos de equilíbrio de mercado, ser destinada à sua produção. A mistura do álcool à gasolina para fins carburantes foi uma maneira de garantir a sua colocação regular no mercado, com o objetivo de dar vazão à produção crescente e continuada.

O emprego do álcool como combustível não era idéia nova. Já nos fins do século passado, na França, haviam sido realizadas experiências bem sucedidas neste sentido e são estas as primeiras de que se tem registro na literatura (Xavier, 1970); sendo que, nessa época, somente se produzia álcool de 95,0 a 96,0° GL. Posteriormente, pesquisadores ingleses e suecos também apresentaram contribuições importantes sobre álcool combustível em congressos internacionais. O tema começava a interessar a indústria açucareira brasileira, que buscava resolver o problema das aplicações industriais do álcool, com sua utilização como combustível se revelando um tanto promissora, conforme as experiências mostravam. Em 1922, o Ministério da Agricultura determinou a realização de uma série de experimentos que aproveitassem as iniciativas existentes<sup>9</sup> e que pudessem servir de base para uma legislação sobre o assunto.

Verificou-se, na ocasião, que as corrosões e ataques ao metal, principal problema da utilização de álcool em motores, não provinham de uma combustão deficiente, como se suspeitara até então, mas, exclusivamente, de impurezas contidas no produto. Numerosos outros

---

<sup>9</sup> A literatura registra os trabalhos pioneiros de três antigos senhores de engenho de Pernambuco que em 1918 possuíam, cada um deles, um automóvel do tipo chamado de “Ford Bigode”, que era utilizado em suas viagens e passeios. Eles usavam apenas álcool sem qualquer adição de gasolina, sendo que o produto era do tipo hidratado, pois, até então, não se produzia o anidro. Um pequeno depósito de gasolina pura era mantido como reserva ao lado do carburador, para facilitar a partida do motor. Em 1919, o governador de Pernambuco, José Bezerra Cavalcanti, determinava o emprego de álcool nos veículos oficiais, fato que disseminou a prática entre inúmeros usineiros daquele Estado (Coutinho, 1976).

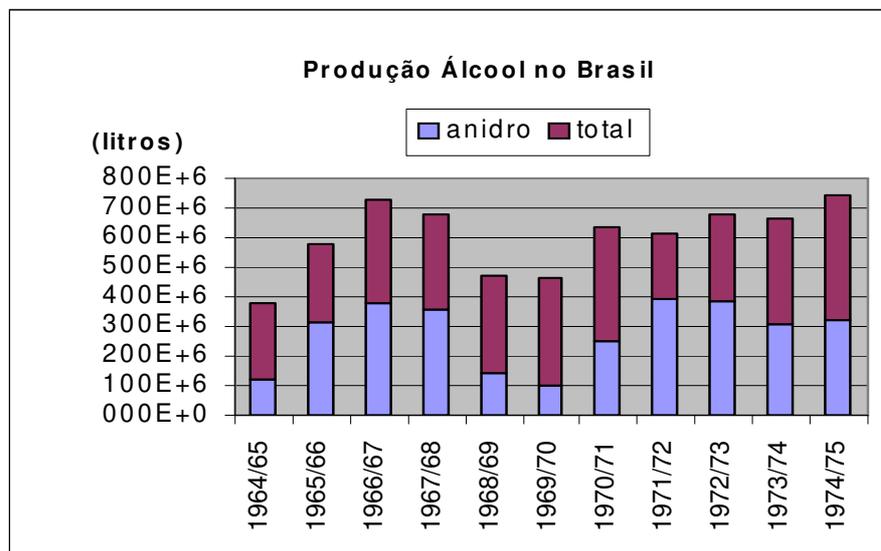
estudos e experimentos foram executados e se intensificaram a partir do ano de 1931. Foram obtidas, em diferentes partes do país, misturas que foram logo popularizadas: a “Gasolina Rosada” e a “Cruzeiro do Sul”, em São Paulo; a “Alcoolina”, a “Motorgás”, a “Nortina”, a “Nacionalina” e a “Azulina”, em diversas usinas no Estado de Pernambuco; a “USGA”, amplamente conhecida em Alagoas; a “Motorina” na Paraíba; e a “NOG” no Rio de Janeiro. Tais produtos careciam, no entanto, de condições de sobrevivência. Além do volume reduzido da produção e das falhas da distribuição, apresentavam deficiências técnicas que contribuíram para desacreditar a utilização permanente.

A maior causa das deficiências estava no emprego do álcool hidratado na mistura e a solução brasileira, encampada pelo IAA em 1953, veio do Laboratório de Motores, do Instituto Nacional de Tecnologia, no Rio de Janeiro. Diz o expediente do relatório do laboratório, citado por Coutinho (1976): *“1)A fórmula a ser empregada imediatamente em qualquer motor a gasolina sem necessidade de regulagem do carburador ou ajuste de qualquer espécie: o álcool terá de ser anidro – graduação 99,5 ° Gay Lussac – mistura fixada: - 90% de gasolina e 10% de álcool anidro. 2)Fórmula destinada a funcionar em motores cujos carburadores podem ser eventualmente regulados para ela, (...) a partir de 30% de álcool, já começa a haver queda importante de aceleração, em alguns tipos de motores; embora a maioria dos motores aceitem percentagens de álcool bem maiores que 30%, alguns não o fazem, o que nos impede de recomendar misturas mais ricas em álcool para todos os motores. 3)Mistura destinada ao uso em qualquer motor, admitindo-se a regulação do carburador e a alteração do sistema de aquecimento da mistura; neste caso, pode-se adotar qualquer fórmula, inclusive álcool puro.”* Ao se tratar da primeira fórmula, ou seja, da mistura de 10% de álcool na gasolina, constatou-se aumento de quilometragem da ordem de 15% devido ao avanço da ignição permitido pelos motores de alta compressão, isto é, a referida mistura, com 10% de álcool anidro, era igual a uma ótima gasolina (Coutinho, 1976).

Entretanto, apesar dos avanços nas pesquisas com o álcool como carburante, as possibilidades de um consumo economicamente apreciável sempre estiveram condicionadas à mistura com a gasolina. No início da década de 70, o mercado interno de combustível líquido sofria grande transformação, operada, principalmente, pela forte atuação da Petrobrás. O Brasil já produzia toda a gasolina consumida internamente, com mais de um terço da produção sendo

obtida de óleo cru extraído em território nacional, configurando, portanto, uma situação totalmente distinta da existente em 1933. A perspectiva da economia petrolífera era de um desenvolvimento ainda maior nos anos subseqüentes e a mistura do álcool à gasolina começou a ser questionada. No entanto, a mistura álcool – gasolina não se resumia ao problema puramente energético da qualidade da gasolina; tratava-se de uma injunção econômica importante para a indústria canavieira. Xavier (1970), no seu artigo sobre as razões para a utilização do álcool carburante no Brasil, defende explicitamente os motivos pelos quais o álcool era fabricado no Brasil. Tratava-se, desde o início, de um imperativo de preservação da economia açucareira no seu conjunto e o problema da mistura devia ser colocado em função da estabilidade das atividades agroindustriais vinculadas à fabricação de açúcar e de álcool. Cabia, portanto, à indústria alcooleira, através do IAA, negociar com o Conselho Nacional do Petróleo um reajustamento à economia brasileira, definindo o futuro da mistura do álcool à gasolina e visando a aplicação do álcool em outras atividades industriais, bem como o aproveitamento de leveduras na elaboração de alimentos para animais, como foi cogitado pelo autor naquele momento (Xavier, 1970). Observa-se que o mote de aproveitar os subprodutos da indústria da cana, que se repete atualmente, aparece sempre quando o setor encontra-se numa situação de indefinição.

Para completar o quadro do começo dos anos 70, o preço do açúcar experimentava uma forte alta no mercado internacional<sup>10</sup>, chegando a ser cotado no valor de US\$1400/t em 1974, refletindo-se diretamente na produção de álcool. A figura 3 mostra o gráfico correspondente à produção de álcool anidro entre 1964 e 1975, ano da institucionalização do Proálcool. A queda abrupta, no início dos anos 70, deveu-se ao desvio de matéria-prima para a produção do açúcar e o aumento nos anos subsequentes deveu-se aos fortes investimentos realizados no setor com o objetivo de aumentar a capacidade instalada em quase 75% da existente em 1972, incrementando significativamente a produção de açúcar, em função dos altos preços<sup>11</sup>.



**Figura 3: Produção de álcool no Brasil**

Fonte: Coutinho (1976).

<sup>10</sup> É importante lembrar que a produção de álcool está, de certa maneira, vinculada à produção de açúcar porque, nas usinas de açúcar, o álcool é fabricado com o mel final resultante da produção de açúcar. Assim, a grande maioria das usinas de açúcar possui destilaria anexa para o fabrico de álcool. Foi somente com o Proálcool que se multiplicou o número de destilarias autônomas que produzem álcool diretamente do caldo da cana, sem se preocupar com o açúcar.

<sup>11</sup> Esperava-se, para o final da década de 70, um acréscimo líquido da capacidade de produção de 73,2 milhões de sacos. Isto representava uma expansão sem precedentes, já que, em 1972, foram produzidos 98 milhões de sacos (Ferreira, 1992).

### 2.1.2- Proálcool

Com a emissão do Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975, pelo Presidente Ernesto Geisel, foi institucionalizado o Programa Nacional do Álcool, Proálcool, visando, segundo o artigo 1º do decreto, o atendimento das necessidades dos mercados interno e externo de combustíveis automotivos e sua política. O artigo 2º declara que a produção do álcool, oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca e de quaisquer outros produtos, será incentivada através da expansão da oferta de matérias-primas, em especial, decorrentes da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades, anexas às usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras.

A crise do petróleo, que estourou em 1973, ameaçava levar o preço do barril do combustível a níveis bem altos. Um estudo do Banco Mundial, divulgado à época, citado por Cavalcanti (1992), indicava que o barril de petróleo, cujo preço histórico era de 3 dólares, poderia vir a custar 90 dólares. O Proálcool foi projetado, então, como um investimento rentável, caso o combustível da cana tivesse que concorrer com a gasolina retirada de barris de petróleo vendidos ao preço de, pelo menos, 40 dólares cada um. Caso o petróleo custasse menos do que isso, o Programa seria antieconômico, pois o custo real de um barril de álcool ficava em torno de 45 dólares, no início de 1979 (Cavalcanti, 1992).

Além disso, os preços do açúcar colapsaram. Entre primeiro de janeiro de 1975 e 31 de dezembro do mesmo ano, os preços do açúcar caíram de 990 dólares a 300 dólares a tonelada, contrastando com os níveis extremamente elevados dos seus preços em 1974 (chegando a US\$1400/t, como já foi mencionado). Essa situação ameaçava seriamente a economia canavieira com uma crise sem precedentes.

Na Exposição de Motivos (EM) nº 021/75, datada de 05 de novembro de 1975, o Governo propôs a instituição do Programa Nacional do Álcool, destinado a expandir rapidamente a produção do álcool e a viabilizar o seu emprego como combustível, através de crescentes proporções de misturas; como matéria-prima para a indústria química, além de assegurar o fornecimento para outros usos. Acentua aquela EM que, integrado num amplo elenco de medidas para fazer face às tendências de desequilíbrio do balanço de pagamentos, o Programa abre extraordinárias perspectivas de expansão da agroindústria canavieira, gera novas

alternativas para o cultivo de outros produtos agrícolas e cria novas oportunidades de desenvolvimento para as regiões vazias ou deprimidas (Coutinho, 1976).

De uma maneira bastante explícita, o Governo corria em socorro da tradicional e quadrissecular indústria da cana do país e encontrava as melhores justificativas para fazê-lo. Ainda nos termos precisos da Exposição de Motivos citada, o Programa, eficientemente coordenado, deverá contribuir significativamente para: *“1- a economia de divisas, que será um dos seus principais objetivos, através da substituição de importações de combustíveis petrolíferos; 2- a redução de disparidades regionais de renda, dado que todo o país, inclusive as regiões de baixa renda, dispõe das condições mínimas para a produção de matérias-primas, em volume adequado, sobretudo de mandioca; 3- a redução das disparidades individuais de renda, por ter os seus maiores efeitos sobre o setor agrícola e, dentro deste, sobre produtos altamente intensivos no emprego de mão-de-obra; 4- o crescimento da renda interna pelo emprego de fatores de produção ociosos, ou em desemprego disfarçado – terra e mão-de-obra principalmente, considerando que se poderá orientar a localização das culturas para onde haja essa disponibilidade; e, finalmente, 5- a expansão da produção de capital, através da crescente colocação de encomendas de equipamentos, com alto índice de nacionalização, destinados à ampliação, modernização e implantação de destilarias”* (Coutinho, 1976). Cabia à Comissão Nacional do Alcool, dentro do conjunto de medidas tomadas, se aparelhar e manter constante articulação com o Instituto do Açúcar e do Alcool e com o Conselho Nacional do Petróleo para enfrentar seus encargos. Foi previsto um incentivo adicional à produção, propondo-se que o Conselho Nacional do Petróleo garantisse aos produtores a compra, ao preço de paridade com o açúcar cristal, de todo o álcool anidro produzido para fins carburantes. Esta conta, a chamada “conta-álcool”, estaria especificamente a cargo da Petrobrás, a estatal brasileira com monopólio no trato do petróleo e derivados no país, financiada por um imposto sobre o preço da gasolina.

### 2.1.3- Conjuntura Atual

Avaliar profundamente todos os impactos do Próalcool é uma tarefa ampla e complexa, e está além do intuito desta dissertação. Porém, depois de quase 25 anos da implantação do Programa, quando se analisam os motivos alegados para o seu estabelecimento, pode-se confrontar os argumentos com os resultados de fato atingidos até o momento.

A economia de divisas, colocada como principal objetivo do Proálcool, parece ter sido plenamente atingida. Diversos autores apresentam números que procuram demonstrar que, na ponta do lápis, os investimentos feitos na produção do álcool carburante compensaram largamente, em função dos gastos que deixaram de ser feitos numa eventual importação de gasolina para substituí-lo. Dados levantados por Fernandes (1995) mostram que, avaliando-se o período de 1976 a 1994, a economia de divisas para o Brasil foi da ordem de 27 bilhões de dólares, transformado o total de consumo de etanol carburante, a cada ano, em equivalente de gasolina; enquanto que os investimentos realizados tanto pelo setor público quanto pelo privado na produção de álcool, durante este mesmo período foram de 11,28 bilhões de dólares, uma diferença entre receita e investimento de aproximadamente 140%. Cavalcanti (1992) fala do período de 1976 a 1989 e conclui que a receita foi 119,5% maior do que os investimentos. Da mesma forma, um trabalho da Copersucar (1989) coloca que, no período de 1976 a 1987, a gasolina equivalente que teria que ser importada valeria 12,5 bilhões de dólares, enquanto que os investimentos realizados no Proálcool somaram 7 bilhões de dólares, uma diferença de 78%. É importante mencionar que o país economiza moeda forte e faz investimentos em moeda nacional na aquisição de bens e serviços no mercado interno. Porém, os números apresentados se baseiam na gasolina que seria importada se o álcool combustível não existisse, refletindo, portanto, uma situação hipotética, a qual supõe que a gasolina seria efetivamente importada; entretanto, não se pode prever quais os caminhos que seriam trilhados caso a opção álcool não existisse. A comparação com a gasolina oferece um parâmetro a ser considerado, mas nada garante que esta situação de enormes gastos com a importação deste combustível se configuraria. Além disso, como será visto adiante, a venda de álcool causou um desequilíbrio com gasolina obrigatoriamente produzida pelo parque de refino do país e que nem sempre era bem exportada<sup>12</sup>.

Outro efeito direto do Proálcool, embora não fosse dos motivos alegados para a implantação do Programa, foi a extraordinária expansão da agroindústria canavieira. Esta, por sua vez, dominou plenamente a produção de álcool, frustrando-se qualquer perspectiva de

---

<sup>12</sup> A própria crise do álcool resolveria esta questão alguns anos depois.

utilização de outros produtos agrícolas, como a mandioca<sup>13</sup>, por exemplo, e a criação de novas oportunidades para regiões deprimidas. Se existia algum intento verdadeiro de redução das disparidades regionais de renda ou de disparidades individuais, por meio do emprego intensivo de mão-de-obra, como foi declarado na exposição de motivos apresentada na ocasião do lançamento do Programa, esse intuito, pode-se dizer, foi malogrado. O Proálcool contribuiu, de fato, para manter os padrões tradicionais de comportamento da agroindústria canavieira, reforçando a concentração de renda no campo, obedecendo aos princípios da modernização intensiva em energia e capital e tornando o aproveitamento de uma fonte renovável de energia, a biomassa da cana, dependente de um combustível fóssil, o óleo Diesel<sup>14</sup>. Há, portanto, desequilíbrios sócio-ambientais. Apesar da atividade de cultivo da cana empregar grande número de trabalhadores, sendo este um aspecto positivo que merece ser mencionado, o trabalho se revela um tanto insalubre e explorador<sup>15</sup>. Para maiores detalhes sobre as condições de trabalho na indústria da cana no Brasil e os impactos sociais da modernização do setor, ver Scopinho (1995) e Ferreira (1996).

O Proálcool passou por uma fase de expansão e consolidação, que compreende o período de 1975 a 1985. Neste intervalo, a produção de álcool saltou de 700 milhões de litros em 1975, para 11.773 milhões em 1985, um aumento de 17 vezes. Foram enquadrados no Programa 537 projetos de montagem de novas usinas e destilarias autônomas. O Brasil ainda respirava os ares do chamado milagre econômico dos anos 70 e a produção de álcool recebia incentivos de toda espécie, devido aos altos preços do petróleo no comércio internacional, frutos do 2º choque do combustível, em 1979. Neste mesmo ano, houve um acordo entre o Governo e a indústria automobilística para a produção seriada de veículos movidos exclusivamente a álcool hidratado; e, em 1985, 96% dos automóveis vendidos no mercado interno brasileiro eram deste tipo.

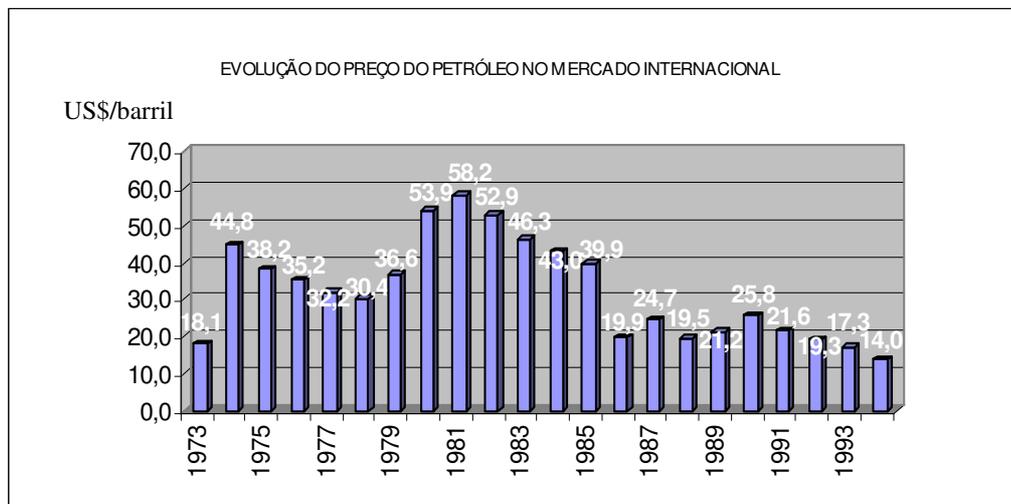
---

<sup>13</sup> A única experiência da efetiva produção de álcool da mandioca de que se tem registro na literatura especializada foi numa iniciativa financiada pela Petrobrás, na cidade de Curvelo-MG, já desativada.

<sup>14</sup> Sobre o assunto do alto consumo de óleo Diesel na agroindústria canavieira, ver Ferreira (1992).

<sup>15</sup> Embora, haja quem defenda o setor, argumentando que ali os salários são, em média, 1,35 vezes maior do que em outros setores da agricultura (Fernandes, 1995). É importante ressaltar também a participação de produtores independentes em cerca de 35% da cana fornecida às usinas para produção de álcool e açúcar, mostrando a contribuição das pequenas e médias propriedades.

Contudo, a partir de 1985, a economia brasileira sofreu um processo de deterioração, com forte aceleração inflacionária. Vários planos de estabilização foram tentados sem sucesso e a situação política era confusa sob os primeiros governos democráticos, depois de mais de 20 anos de regime militar. Essas dificuldades atravessadas pela economia brasileira provocaram sérios reflexos no Proálcool, bem como os preços do petróleo que iniciaram um processo ininterrupto



**Figura 4: Evolução do preço do petróleo**

Fonte: BEN, vários anos.

de queda (ver figura 4). A crise tem o seu auge com o desabastecimento em 1990, obrigando a importação de álcool para atender a demanda e afetando a credibilidade do Programa; com as vendas de carros a álcool caindo vertiginosamente e culminando com sua participação em apenas 3,3% do mercado interno em 1995. A “conta-álcool” (parcelas do custo do álcool incluídas nos preços da gasolina e do Diesel) que financia as diferenças nos preços pagos aos produtores de álcool no país, revelou-se insuficiente para cobrir também os custos de importação de produtos para suprir a demanda, causando um déficit nas contas da Petrobrás, empresa estatal responsável pela compra, distribuição e venda de grande parte do álcool combustível.

O quadro atual do Proálcool é um prolongamento dessa crise. Em 1994, foi lançado o Plano Real cuja principal meta era estabilizar a economia brasileira, detendo a todo o custo o processo inflacionário. Não houve, nesse contexto, planejamento energético, além de não haver

uma política energética convincente e esta situação perdura até hoje. Importantes mudanças institucionais se configuraram, como a abertura de mercado do setor petróleo, por exemplo, colocando dentro de uma conjuntura diferenciada a produção de álcool<sup>16</sup>. O seu futuro a longo prazo necessita de uma política clara e um compromisso com as inevitáveis mudanças para uma adaptação às circunstâncias. No começo dos anos 70, a principal preocupação era política energética. Nos anos 80, durante a crise que se iniciava e os baixos preços do petróleo, a principal preocupação foi a questão ambiental; contudo, atualmente, mesmo esta última parece ter perdido o apelo, dando lugar às questões ligadas à competitividade, privatização e globalização do setor energético.

Apesar de toda essa problemática séria e, ao mesmo tempo, desafiadora, o Proálcool obteve êxitos importantes. O álcool representou a entrada de um novo energético<sup>17</sup>, renovável, contribuindo para a redução do efeito estufa, além de gerar subprodutos que podem ser aproveitados para fins energéticos e outros. Houve um significativo aumento de produtividade e redução de custos desde o início do Programa: a produção de álcool cresceu de 2400 l/ha, nos primeiros anos, para 5000 l/ha e, até, 7900 l/ha nos anos recentes (Rosillo-Calle, 1998). Isto mostra uma resposta satisfatória do setor à necessidade de inovações tecnológicas. Algumas unidades produtoras já se apresentam ao mercado como empresas energéticas e não mais somente como produtoras de álcool, dispostas a diversificar suas atividades no sentido de melhor aproveitar a energia da biomassa da cana. Estima-se que o uso do álcool combustível no Brasil reduziu em 20% os níveis de poluição e emissão de CO<sub>2</sub>. O setor agroindustrial canavieiro é o que mais emprega no Brasil, chegando a 800 mil trabalhadores o número de pessoas formalmente empregadas, embora o valor desta cifra varie de 20 a 30%, dependendo da fonte consultada.

---

<sup>16</sup> Oficialmente, o Programa Nacional do Álcool foi finalizado em 15 de fevereiro de 1991, com a extinção da Comissão Nacional do Álcool e do Conselho Nacional do Petróleo, ficando, assim, a cargo da Comissão Interministerial do Álcool a tarefa de coordenar a produção e uso do álcool combustível no país.

<sup>17</sup> Atualmente, o álcool contribui com 3,5% do suprimento primário de energia do Brasil (BEN, 1997).

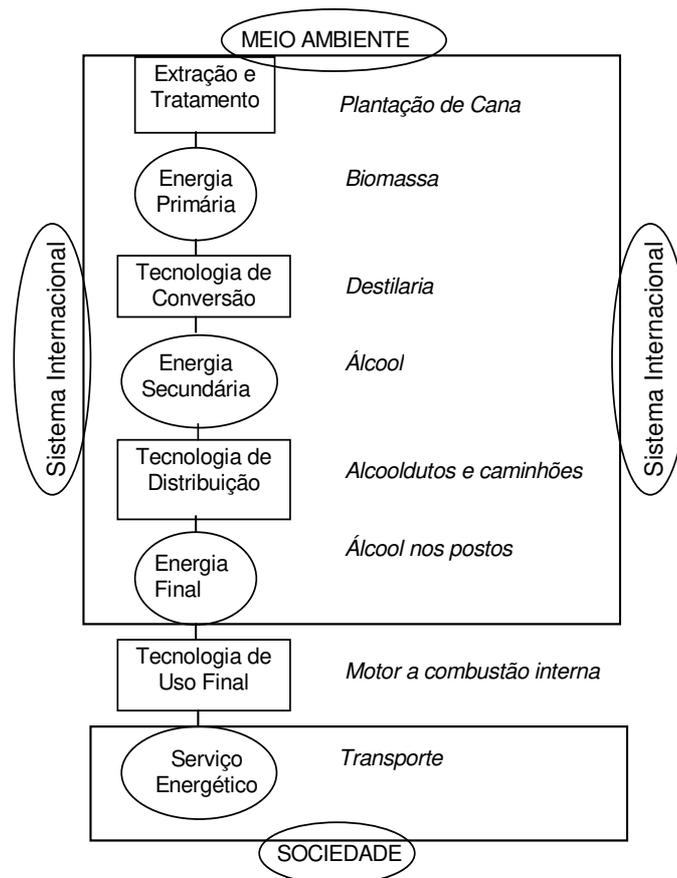
#### 2.1.4- Aspectos Ambientais

Para analisar os aspectos ambientais envolvidos na produção do álcool carburante e seus impactos no sistema energético em que está inserido, é necessário avaliar o ciclo de vida do combustível e as influências ao longo de sua cadeia energética, a qual engloba a sua cadeia de produção; as relações com o meio ambiente, nos seus componentes ecológica, social e econômica; as relações com o sistema internacional; e as conseqüências do uso do combustível para a sociedade.

Em linhas gerais, a avaliação de ciclo de vida é um processo que visa analisar a carga ambiental de um produto, processo ou atividade, identificando a energia, o uso de materiais e descargas no meio ambiente; avaliar o impacto ambiental desta energia, uso de materiais e descargas; e identificar e avaliar oportunidades de melhorias ambientais. A avaliação inclui o completo ciclo de vida do produto, do processo ou da atividade, englobando a extração e o processamento de matéria-prima; manufatura, transporte e distribuição; uso, reutilização, manutenção, reciclagem e disposição final. Muitas atividades possuem uma grande variedade de processos de produção, distribuição, uso e disposição final. Estes processos possuem igualmente uma grande variedade de emissões e rejeitos e estes, por sua vez, afetam de diversas formas o meio ambiente. A operação e o funcionamento de todo este sistema imprime uma dinâmica social que envolve questões políticas, econômicas e culturais, progresso técnico e outros fatores qualitativos.

A avaliação de ciclo de vida vem se tornando o termo no qual se englobam outras análises chamadas do “berço ao túmulo”, isto é, dos impactos e conseqüências resultantes do desenvolvimento e operação de sistemas complexos. Os primeiros trabalhos datam do começo dos anos 70 e incluem estudos de avaliação total de impactos, análise total (integrada) de custos, avaliação de ciclo de combustível, avaliação de impacto ambiental, simulação do sistema econômico e energético e, mais recentemente, planejamento integrado e a custo mínimo de recursos (Pinto, 1998). Estes procedimentos vão ao encontro das modernas formas de planejamento e análise, abrindo espaço para o estabelecimento de uma base científica interdisciplinar e saindo da abordagem tradicional do termo “planejamento”, que sugere uma ênfase determinista e excessivamente tecnicista.

Neste contexto é fundamental o conceito de sistema energético. Por sistema energético entende-se um completo sistema para a geração, suprimento e uso da energia num dado contexto social, como um país, região ou outro tipo de campo, que pode ser definido em relação às fronteiras do sistema, com exportações e importações conhecidas de energia. O sistema energético é um sistema social, com atores individuais e institucionais, do qual fazem parte



**Figura 5: Cadeia energética para transporte utilizando álcool num sistema energético**

grandes e pequenas empresas que fornecem energia, os provedores de tecnologia para o sistema, o governo que detém o controle de muitas das variáveis críticas do sistema e todos os membros da sociedade como usuários da energia em suas diversas formas (Dell Valle, 1984).

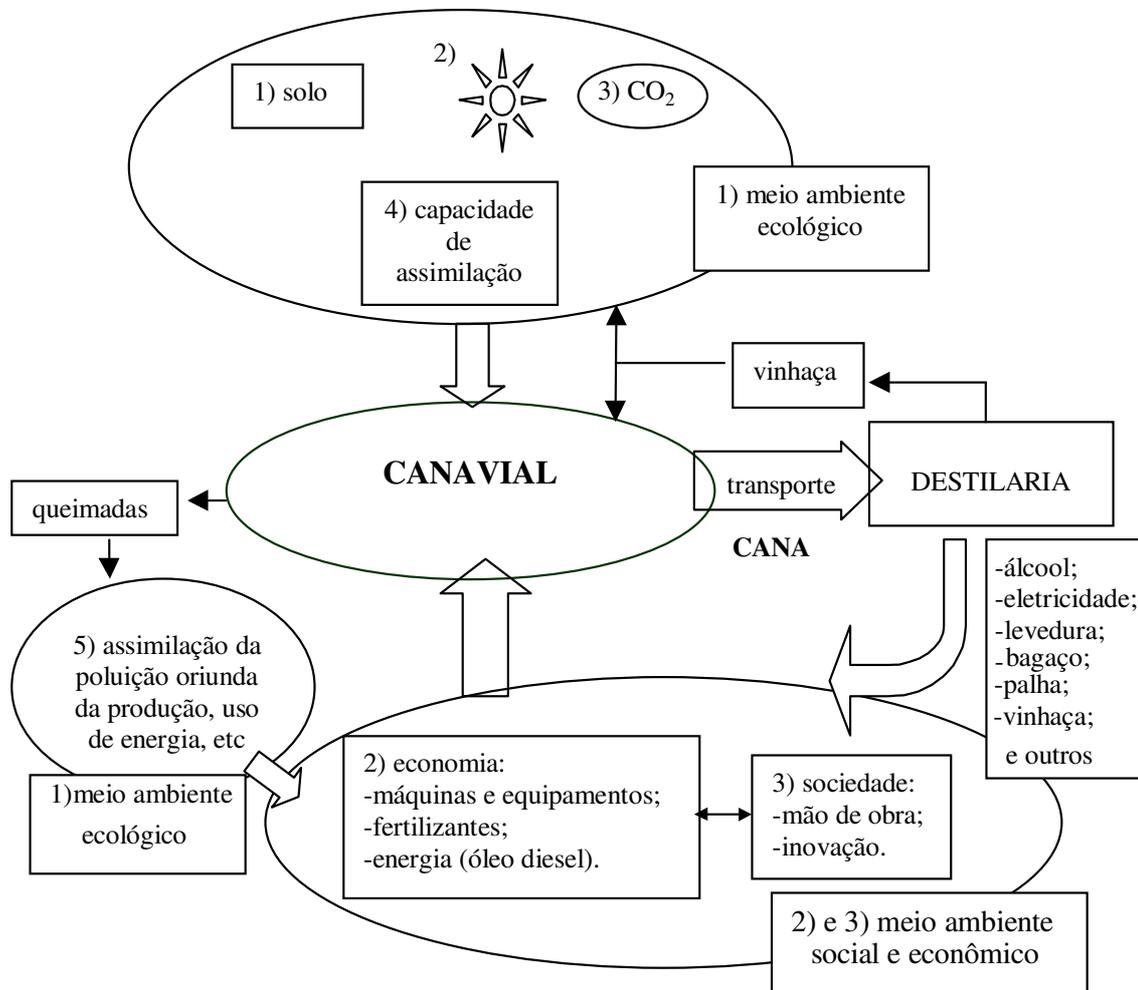
O sistema energético é altamente dinâmico e funciona sob condições de incerteza. Entre as principais variáveis que relacionam os membros do sistema entre si estão os fluxos físicos de energia, formando cadeias energéticas, os preços e as qualidades de energia que se requerem nos

diversos pontos das cadeias. Como todo sistema social, o energético é aberto, funcionando dentro de um entorno ou vizinhança e está fortemente influenciado por ela (Dell Valle, 1984). O entorno do sistema energético consta de três partes: 1) o meio ambiente, do qual retira os recursos de energia primária e elimina o calor e poluentes, entre outros efeitos; 2) a sociedade, de quem ele deve satisfazer as necessidades de energia útil para a moradia, comércio, serviços públicos, transporte e toda atividade industrial, agrícola e de mineração; e 3) o sistema internacional, do qual importam-se bens de consumo que utilizam energia, tecnologias diversas, com conseqüências sobre o sistema financeiro, balança de pagamentos, etc. Ver figura da cadeia de produção do álcool (figura 5).

O contexto de um sistema energético é descrito por fatores naturais (geografia, demografia), fatores sociais (desenvolvimento social, diversidade da sociedade, infra-estrutura, tipo de governo) e fatores humanos (valores e atitudes culturais); todos eles influenciando tanto a natureza quanto a magnitude dos impactos. Uma lista não exclusiva dos impactos de um sistema energético podem ser divididos nas categorias: a) ecológicos: poluição local do solo, ar e água, impactos globais referentes à mudança climática (efeito estufa, camada de ozônio), impactos visuais, poluição sonora; b) sociais: satisfação das necessidades, efeitos na saúde humana e no ambiente de trabalho, satisfação no trabalho, riscos associados, tipos de instituições requeridas; c) econômicos: dinâmica da economia nacional, importação, exportação e balanço de pagamentos, nível de emprego; d) políticos: impactos das necessidades de controle, centralização ou descentralização do sistema de decisão; e) relativos ao desenvolvimento: consistência com as metas de desenvolvimento da sociedade, contribuição ou impedimento de tais metas; f) relativos à segurança do sistema energético; g) relativos à resiliência do sistema energético; entre outros que se mostrarem importantes.

O sistema energético tem papel decisivo para o cumprimento de objetivos sociais básicos. São eles: a) melhoria da qualidade de vida da população: relaciona-se à capacidade do sistema energético de satisfazer os requerimentos de energia útil que são a expressão das necessidades sociais da população em termos energéticos, com o objetivo de permitir o desenvolvimento das potencialidades pessoais de seus membros; b) aumento da capacidade da sociedade para sua autodeterminação: relaciona-se às diferentes conseqüências sociais das interações internacionais do sistema energético, sendo elas a segurança no abastecimento, a vulnerabilidade sob forte

endividamento externo, a dependência tecnológica e outras similares; c) melhoria da sustentabilidade ecológica da sociedade: refere-se às conseqüências sociais das interações entre



**Figura 6: Interações na fase agrícola da produção de álcool**

o sistema energético e o meio ambiente, sendo elas o esgotamento dos recursos não renováveis, a destruição dos recursos renováveis, os efeitos da contaminação e a destruição dos ecossistemas e outros similares (Dell Valle, 1984).

Vê-se que estes objetivos correspondem às componentes do entorno do sistema energético. Os objetivos serão ou não realizados de acordo com os modos de interações e as ações dos diversos atores do sistema. Como organizar estas ações é o problema do planejamento energético.

As figuras 6 e 7 mostram diferentes recortes da produção de álcool no Brasil e auxiliam na descrição de sua cadeia energética e interações com o sistema energético, bem como na descrição de suas relações com o meio ambiente ecológico, social, econômico e as influências de seu uso pela sociedade.

A figura 6 mostra o canal como ponto de confluência entre diversos elementos do sistema que correspondem, aproximadamente, à fase agrícola da produção de álcool. O **meio ambiente ecológico** é subdividido em cinco elementos:

1) Solo: embora a produção de biomassa seja considerada uma fonte renovável de energia, o solo, no qual ela se baseia, não o é necessariamente; as práticas agrícolas e manejo do solo podem comprometer a contínua utilização desse recurso. O um dos principais problemas relativo a este ponto é a erosão, que é considerada o fator principal na redução do potencial produtivo do solo. Na literatura especializada encontram-se trabalhos que consideram o cultivo da cana como responsável pelo maior índice de erosão por atividade agropecuária individual no Estado de São Paulo, apesar de representar apenas 14% do total de perdas por erosão (Guarnieri, 1992). Outros trabalhos, como o de Fernandes (1995), ressaltam, ao contrário, o potencial de conservação do solo dessa cultura, devido às técnicas avançadas de manejo que são atualmente empregadas. Sem dúvida, a raiz do problema está na perda desordenada e contínua da cobertura vegetal natural original, com a agropecuária e o reflorestamento cobrindo praticamente toda a área agricultável do Estado de São Paulo. A conservação do solo é de grande importância na proteção do recurso renovável e as técnicas de manejo merecem grande atenção, mesmo ao nível estratégico de longo prazo.

2) Energia Solar: é a fonte primária da energia que produz toda a biomassa do planeta, através da fotossíntese e da absorção de CO<sub>2</sub>. A luz do Sol, que chega dia após dia à Terra, é uma fonte de baixa entropia que vem mantendo e, ao mesmo tempo, renovando o acervo da vida. A sua utilização pela sociedade humana é condição necessária mas não suficiente para garantir a perpetuação da própria vida humana e a sustentabilidade dos sistemas humanos. A energia solar é, portanto, uma fonte renovável de energia que, sendo apreendida através do cultivo da cana, torna este cultivo também renovável, se tomados os devidos cuidados com o solo e a capacidade de assimilação ou suporte do meio.

3) Absorção de CO<sub>2</sub>: este item assume grande importância no contexto atual por causa dos efeitos nocivos da emissão excessiva de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre, principalmente pelo uso de combustíveis fósseis, que afetam globalmente todo o planeta e contribuem para a maior parte do chamado efeito estufa. Este é o nome dado ao aumento da temperatura da atmosfera devido à absorção da energia dos raios infravermelhos do Sol pelo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e, em menor parcela, outros gases. A retirada de CO<sub>2</sub> da atmosfera, que ocorre na fotossíntese durante a vida da planta, é apresentada atualmente como a principal vantagem da produção e utilização do álcool carburante. Esta questão representa também um impasse político internacional e é o maior desdobramento prático do Relatório Brundtland e da Rio-92, como já foi colocado no capítulo 1.

4) Capacidade de Assimilação: é a capacidade do meio ambiente ecológico de suportar o uso ou a descarga de elementos estranhos à sua dinâmica natural, sem perder a configuração original. No caso do cultivo da cana, o descarte de vinhaça, o uso de agrotóxicos e a perda da diversidade biológica decorrente da expansão da cultura da cana são os elementos que mais exigem da capacidade de assimilação do meio ambiente. Os efeitos desses elementos podem se fazer sentir no longo prazo, o que torna esta questão complicada e polêmica, envolvendo temas como contaminação de lençol freático, importância da biodiversidade, modernização da agricultura com o uso intensivo de defensivos agrícolas e outros. O caso específico da vinhaça será tratado com mais detalhes nesta dissertação. Ela é largamente utilizada atualmente com o objetivo de fertilização do solo, retornando, portanto, ao canavial; porém, é importante antecipar que ainda hoje, uma parte dela é depositada em áreas de descarte, a níveis de acima de 1000m<sup>3</sup>/ha, com grande potencial poluente.

5) Capacidade de Assimilação da Poluição Oriunda da Produção: é uma subdivisão do item anterior com o objetivo de focar os elementos relacionados à produção e ao trato da cana, interagindo mais diretamente com o meio ambiente social e econômico. Neste item destacam-se as queimadas, além da poluição resultante da produção de máquinas e equipamentos para o cultivo da cana, da produção de fertilizantes e novas variedades e do uso de energia na fase agrícola da produção de álcool, notadamente o óleo Diesel. O problema das queimadas é uma discussão antiga que acompanha o cultivo da cana no Brasil desde a década de 50, constituindo-se, pois, numa questão referente à própria estrutura de produção. Existem

justificativas técnico-sócio-econômicas perfeitamente plausíveis para se efetuar a queima na época da colheita e as principais são: facilidade nas operações de preparo do solo e cultivo; rendimento do corte, tanto manual quanto mecânico, mais alto, implicando menores custos de produção (em alguns casos, de 30 a 50% menor); menor teor de impurezas junto à matéria-prima; corte basal mais baixo, portanto, maior produtividade; menor risco de acidentes; e, caso os restos culturais resultantes da não queima sejam deixados no campo, há inúmeros problemas referentes à proliferação de pragas, brotamento da soqueira e danos à matéria-prima (Sachs, 1996).

Contudo, os problemas gerados pela queima são muitos: é fonte geradora de poluição atmosférica pela emissão de CO<sub>2</sub>, CO e da “neve negra” (carvãozinho), causando problemas de saúde pública e trazendo transtornos para cidades circunvizinhas a canaviais na época de safra; é responsável pela diminuição da vida microbiana existente na camada superficial do solo e conseqüente empobrecimento do solo, devido a altas temperaturas atingidas no momento da queima do canavial; é responsável, muitas vezes, pela interrupção no fornecimento de energia elétrica devido à queima de canaviais plantados embaixo de linhas de transmissão. Há ainda a questão de que a queima representa, sem dúvida, um desperdício da biomassa que poderia ser utilizada para a produção de energia ou outros fins. Por outro lado, a introdução maciça da colheita mecanizada, que mudaria a estrutura do cultivo da cana, possibilitando melhor aproveitamento dos subprodutos do canavial, causaria fortes repercussões sociais, principalmente nas camadas excluídas do processo de modernização. Isto sem considerar as dificuldades técnicas inerentes à implantação deste procedimento de colheita mecanizada de cana crua<sup>18</sup>.

O **meio ambiente econômico** da figura 6 coloca questões de ordem econômica envolvidas na fase agrícola da produção do álcool. Entre elas, o estímulo ao setor de produção de máquinas e equipamentos, tanto para a fase agrícola, quanto para a industrial, estava previsto como um dos objetivos da instituição do Proálcool (ver item 2.1.2). O fornecimento de maquinário especializado, bem como as pesquisas tecnológicas nesta área, movimentam parte importante da

---

<sup>18</sup> Para maiores detalhes sobre a problemática das queimadas nos canaviais, colheita mecanizada e aproveitamento da biomassa da cana, ver Sachs (1996).

atividade econômica, repercutindo significativamente em diversos setores da produção industrial em geral. Os avanços tecnológicos podem permitir um aproveitamento mais eficiente da energia, melhorando a eficiência dos processos, utilizando subprodutos como o bagaço, por exemplo, para a produção de eletricidade através de sistemas de cogeração, gerando empregos e minimizando os danos ambientais ecológicos. Contudo, como já foi discutido no capítulo 1, a tecnologia por si só não é a solução para todos os problemas, já que ela depende também de melhorias nas instituições e nas relações sócio-econômicas.

A questão da cogeração, por exemplo, aparece como a possibilidade mais viável atualmente para a indústria da cana diversificar suas atividades, produzindo eletricidade para ser vendida na rede. Entende-se por cogeração a produção combinada de potência eletromecânica e calor útil a partir da queima de um único combustível, permitindo aproveitar parte do calor inevitavelmente rejeitado na conversão de energia térmica em trabalho. Sendo assim, a rigor, não há cogeração na indústria da cana, já que, apesar de se queimar um único combustível (bagaço), o calor é usado somente na geração de vapor e este distribuído aos sistemas de potência, entre eles o sistema para a geração de eletricidade. Diversos trabalhos tratando do potencial para a geração de eletricidade utilizando resíduos da indústria da cana já foram publicados na literatura especializada (Macedo, 1997), (Coelho, 1997), (Cortez, 1994), (Walter, 1994), (Fernandes, 1995), (Coelho, 1992).

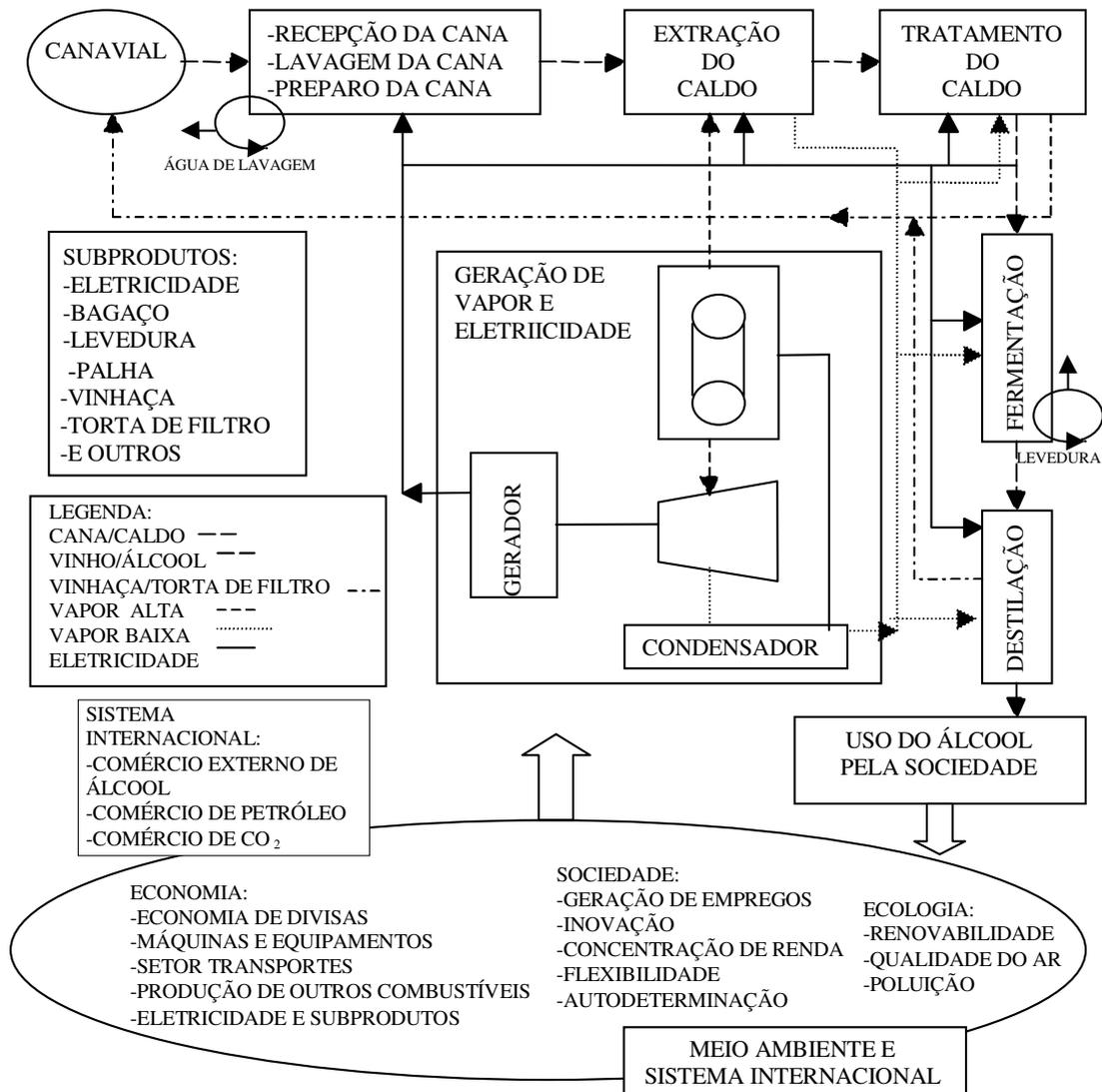
As estimativas com relação aos excedentes de bagaço divergem ligeiramente, considerando os atuais níveis de consumo de vapor nas usinas. Para Macedo (1997), o bagaço excedente na fabricação de álcool é de 12%, com uma produção total de 76 milhões de toneladas de bagaço com 50% de umidade, na safra 1996/7. Já Coelho (1997) adota um valor mais otimista em seus cálculos: 26,5% de bagaço excedente. Cortez (1994) estima em 15% o bagaço excedente, podendo este número crescer para 18% com os avanços tecnológicos. Entretanto, os autores citados concordam ao afirmarem que a quantidade de energia elétrica produzida com o excedente de bagaço depende da tecnologia do sistema de geração utilizado. Os trabalhos apresentam cenários variados de acordo com tecnologia empregada, sendo considerados desde o sistema atualmente operante nas usinas, até a última palavra na tecnologia de aproveitamento da biomassa, ainda não testada comercialmente, com a gaseificação e o uso de turbinas a gás (BIG/GT), considerando inclusive o aproveitamento de 70% da palha da cana, que seria colhida

sem queima. Assim, os valores oscilam desde o pior caso com 0,6 GWh utilizando a tecnologia atual e nenhuma medida de conservação (Coelho, 1997), até o incrível valor de 18700 GWh, utilizando as BIG/GT com 70% da palha da cana, correspondendo este valor a 25% da energia consumida no Estado de São Paulo no ano de 1994 (Cortez, 1994).

Os autores citados também concordam que, devido ao baixo preço da energia elétrica pago pelas concessionárias aos produtores de álcool (US\$ 13 a 24/MWh), não é viável economicamente, para estes últimos, gerá-la além das suas necessidades e vendê-la para a rede, apesar dos excedentes de bagaço. O Protocolo assinado em 1993 entre o setor sucroalcooleiro e o Governo fixava como parâmetro o custo marginal de expansão do sistema elétrico da região Sul/Sudeste, na época US\$ 48/MWh e hoje US\$ 38/MWh, de acordo com a Eletrobrás. Estima-se que a viabilidade econômica de excedentes de eletricidade ocorreria para um preço de compra igual a US\$ 55/MWh. No caso de tecnologias mais modernas e eficientes, disponíveis a longo prazo, os custos de geração podem vir a ser menores que os atuais, mas ainda assim superiores ao atual preço de compra proposto pela concessionária (Coelho, 1992).

Ainda do ponto de vista do **meio ambiente econômico** da figura 6, o consumo de energia na forma de óleo Diesel representa uma questão de grande importância, sendo analisada de maneira aprofundada no trabalho de Ferreira (1992). O autor aponta o histórico aumento do consumo de óleo Diesel na produção de cana como algo que compromete a dita renovabilidade desta fonte de energia e, em consequência, do próprio álcool carburante. A relação encontrada pelo autor é um consumo de 1 litro de óleo Diesel para 14,6 litros de álcool produzidos. Outros trabalhos são citados por Ferreira (1992: p.72), reforçando seus números, com pequenas diferenças atribuídas aos métodos de cálculo e confirmando a dependência da produção de álcool de um combustível fóssil. O autor propõe diversas medidas para reduzir esta dependência, entre elas a produção de metano através da digestão anaeróbia da vinhaça, o que será abordado detalhadamente mais adiante.

O **meio ambiente social** da figura 6 contribui com o fornecimento da mão-de-obra para o trabalho nos canaviais e com as inovações tecnológicas. Este mesmo ambiente sofre ou se beneficia dos resultados destas inovações, como a modernização e mecanização da agricultura;



**Figura 7: Interações na fase industrial da produção do álcool**

sofre com a perda da capacidade de assimilação da poluição, ou degradação, do meio ambiente ecológico; e sofre ou se beneficia com os impactos provocados pelo uso dos produtos e subprodutos da cana, isto é, do álcool, do bagaço, etc. A figura 7 enfoca a fase industrial da produção de álcool, e mostra outras questões concernentes ao meio ambiente social, além daquelas que já foram comentadas até aqui: a flexibilidade que o uso do álcool proporciona, face

às instabilidades das variáveis do sistema energético, por exemplo, preços do petróleo; e a autodeterminação da sociedade, que, neste caso, produz a própria energia que utiliza.

A figura 7 apresenta a produção de álcool de forma simplificada, já que são omitidas os motores elétricos das bombas e outros equipamentos, as minúcias de cada operação, a reposição e tratamento de água da caldeira, o ar e produtos de combustão na caldeira, o benzeno utilizado na produção do álcool anidro e o destino das leveduras e água de lavagem. Contudo, pode-se, através dela, ter uma idéia “macro” das relações entre os diversos componentes do sistema ligado a uma típica destilaria de álcool no Brasil do período atual.

Observa-se que a tecnologia envolvida é relativamente simples se comparada à maioria das indústrias químicas. A cana chega do canavial, é pesada, analisada quanto aos teores de fibra e açúcar, descarregada, e, dependendo do seu estado, lavada com  $5\text{m}^3/\text{t}$  de água a, no máximo,  $15\text{m}^3/\text{t}$ . Esta água, em geral, é reciclada, depois de sofrer tratamento, e repostada quando saturada. A partir daí, passa-se ao processo de extração do caldo, utilizando picadores, desfibradores e moendas, e, em algumas unidades, difusores. Estes equipamentos, normalmente, são movidos diretamente por turbinas, as quais necessitam de vapor de alta pressão. O tratamento do caldo é feito por peneiramento, aquecimento, decantação e filtragem. O caldo, então, entra nas dornas de fermentação, que é feita, em geral, pelo processo Melle-Boinot e chega às colunas de destilação, onde o álcool é obtido na concentração  $96^\circ\text{GL}$ .

Além do álcool, o processo também produz grande quantidade de vinhaça (de 10 a 15 litros/litro de álcool) que sai da primeira coluna de destilação; excesso de levedura que vai sendo retirado do processo de fermentação; grande quantidade de bagaço após a moagem, que é queimado na caldeira, produzindo energia para toda a unidade industrial, sendo que, nas mais eficientes, há um excesso que pode ser utilizado na produção de eletricidade para a venda; torta de filtro que é obtida no tratamento do caldo e usada como fertilizante.

## **2.2- A Vinhaça**

### **2.2.1- Histórico**

Dos resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é, sem dúvida, o mais importante, não só em termos do volume gerado, mas, também, pelo seu enorme potencial poluidor. O problema da

sua disposição remonta desde os primórdios da fabricação do álcool no Brasil e tem sido um controverso objeto de discussão. Na literatura especializada são listados inúmeros episódios de disputas envolvendo usineiros e a população, por motivos de despejos pelos primeiros das “caldas de destilaria”<sup>19</sup> nos cursos d’água, com graves problemas de poluição local. Rezende (1984) cita, no seu livro, um resumo dos dez principais casos de contaminação com vinhaça publicados na imprensa nacional de 1943 a 1984, todos cercados de catástrofes locais, contendo casos de mortandade maciça de peixes, desabastecimento de água potável para cidades, proliferação excessiva de insetos, problemas de saúde pública e desorganização de economias locais dependentes do pescado. Em 1984, por exemplo, entre as barragens de Sobradinho e Moxotó, viu-se o que foi considerado o maior desastre ecológico no Rio São Francisco: a morte de 300 toneladas de peixe causadas pelo rompimento de uma barragem de contenção de vinhaça e o lançamento de 45 mil m<sup>3</sup> deste resíduo no Riacho Tourão, afluente do São Francisco. A empresa dona das barragens, a Agrovale, tentou encobrir os vestígios de contaminação deixados pelo produto na caatinga, revolvendo a terra com tratores, e, com isso, demover as suspeitas que logo recaíram sobre a ela. Este fato ganhou notoriedade por causa da revolta que causou à população ribeirinha, de uma região do agreste nordestino, dependente da pesca para sobreviver (Rezende, 1984: p.123).

Na Revista Brasil Açucareiro, publicação mensal do IAA desde sua criação em 1933, o problema das “caldas de destilaria” sempre ocupou espaço de discussão. Nas notas e artigos publicados na revista era cogitada a utilização deste resíduo como fertilizante desde os primeiros números, devido ao problema que causava se fosse despejado num curso d’água (Brasil Açucareiro, 1947; 1956; 1957). A figura 8 mostra um anúncio publicitário colocado em vários números da revista no ano de 1956.

O lançamento da vinhaça nas águas litorâneas e interiores do país é uma prática vetada por dispositivos legais desde 1934. Este problema veio sendo controlado pelos Artigos nº 267 e 271 do Código Penal Brasileiro, por diversas leis estaduais e pela Portaria nº 69, expedida em 3 de março de 1943 pela Divisão de Caça e Pesca do Ministério da Agricultura. Em fins de novembro

---

<sup>19</sup> Além da denominação antiga “calda de destilaria”, a vinhaça recebe também outras denominações regionais: vinhoto, restilo, vinhote, tiborna, caxixi e garapão (Resende, 1984).



órgãos do meio ambiente, com base nos parâmetros da legislação, não dava o resultado esperado.

Os primeiros estudos visando resolver o problema da vinhaça foram desenvolvidos pela Comissão de Estudos de Caldas, criada em 1943 pela Secretaria de Agricultura, Indústria e Comércio do Estado de Pernambuco. O relatório da Comissão, divulgado em 1946, apresentava um exame dos processos patenteados para tratamento ou aproveitamento da vinhaça e pesquisas sobre a irrigação com vinhaça diluída. Os processos patenteados foram considerados inadequados, em face da pouca eficiência dos resultados obtidos e, ainda, por razões de ordem econômica. Quanto à técnica de irrigação, foi julgado satisfatório o emprego da vinhaça diluída na proporção de 1:10. O grande volume de água necessária limitava a prática desta técnica; além disso, a irrigação se torna desnecessária, e mesmo prejudicial, nos meses chuvosos. Ocorre ainda que, embora diluída, a vinhaça atacava as bombas e os encanamentos, tornando-se, assim, o problema muito dispendioso (Rezende, 1984).

Mas foi em 1950, no VIII Congresso Internacional das Indústrias Agrícolas, realizado em Bruxelas, na Bélgica, que Almeida e alli (1950) apresentaram um trabalho que discutia os efeitos da adição de vinhaça ao solo e que lançaria as bases para outros trabalhos que viriam reforçar este procedimento e, por conseqüência, a prática atual da indústria canavieira, a chamada fertirrigação. A adição de vinhaça ao solo será melhor discutida adiante; no entanto, é importante colocar que, embora já superados, os trabalhos pioneiros de Almeida (1950; 1955) representam um marco no que se preconizava a respeito da vinhaça na época (Glória, 1984). Eles revelaram que, ao contrário do que se acreditava, a incorporação do resíduo ao solo não baixou o seu pH. Ao invés disso, os dados experimentais evidenciaram um acréscimo no pH e no poder de embebição do solo, além do aumento da capacidade de troca de cátions e da população microbiana com predominância dos fungos, como foi verificado depois. Foi sugerida a aplicação de 500 a 1000 m<sup>3</sup> de vinhaça por hectare, quantidade que se revelaria, mais tarde, perigosa, dependendo do tipo de solo. Isto porque o solo assim tratado fornecia condições de um grande desenvolvimento vegetativo das plantas e, posteriormente, em períodos de seca, verificou-se que as plantas sentiam demasiadamente os efeitos da estiagem. Possivelmente, este aspecto não permitiu que a prática se generalizasse, conforme era de se esperar naquele momento (Glória, 1984).

### 2.2.2- Destinação

A vinhaça pode ser considerada uma suspensão de sólidos orgânicos e minerais, contendo os componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcool e compostos voláteis mais pesados. Por se tratar de uma suspensão com teor de sólidos em torno de 7%, dos quais 75% orgânicos e biodegradáveis, apresenta elevadas DQO (Demanda Química de Oxigênio) e DBO (Demanda Biológica de Oxigênio), daí seu potencial altamente poluidor. É uma solução tamponada com pH em torno de 4,3, fato que, aliado à alta temperatura na qual é obtida, lhe confere caráter altamente corrosivo.

A composição da vinhaça depende de uma série de fatores enumerados a seguir: 1) natureza e composição da matéria-prima, isto é, se o mosto é proveniente de melaço obtido da fabricação de açúcar, se o melaço é diluído em água ou caldo das últimas moendas, ou ainda se o mosto é proveniente de caldo puro; 2) natureza e composição dos vinhos; 3) sistema de fermentação; 4) aditivos utilizados na fermentação, produtos químicos, ácidos, antibióticos e nutrientes à base de nitrogênio e fósforo; 5) tipos de aparelhos utilizados na destilação; 6) raça de levedura utilizada; 7) qualidade da água usada; e, finalmente, 8) sistema de trabalho e influência dos operadores. Assim, a composição química da vinhaça pode variar dentro de largos limites, dependendo do processo de fabricação do álcool, e parece não existir qualquer relação com os teores dos elementos do caldo. Entretanto, depois de inúmeras pesquisas realizadas, a vinhaça pode ser caracterizada como um resíduo rico em matéria orgânica e potássio, relativamente pobre em nitrogênio e carente de fósforo. Além destes elementos, apresenta teores apreciáveis de cálcio, magnésio e enxofre, como também de outros minerais em menores quantidades. Foram observadas correlações positivas somente entre os teores de cinza e de potássio (Bolsanello, 1980) (Copersucar, 1979) (Bittencourt, 1978) (Brieger, 1977). A tabela 1 apresenta a variação dos elementos encontrados na vinhaça.

**Tabela 1: Características da vinhaça resultante de mostos de melação, de caldo de cana e de mostos mistos**

| <b>Parâmetro</b>                             | <b>Melão</b>  | <b>Caldo</b>  | <b>Misto</b> |
|--|---------------|---------------|--------------|
| pH   | 4,2 - 5,0     | 3,7 - 4,6     | 4,4 - 4,6    |
| Temperatura                                  | 80 - 100      | 80 - 100      | 80 - 100     |
| DBO (mg/IO <sub>2</sub> )                    | 25000         | 6000 - 16500  | 19800        |
| DQO (mg/IO <sub>2</sub> )                    | 65000         | 15000 - 33000 | 45000        |
| Sólidos totais (mg/l)                        | 81500         | 23700         | 52700        |
| Sólidos voláteis (mg/l)                      | 60000         | 20000         | 40000        |
| Sólidos fixos (mg/l)                         | 21500         | 3700          | 12700        |
| Nitrogênio (mg/lN)                           | 450 - 1600    | 150 - 700     | 480 - 710    |
| Fósforo (mg/lP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 100 - 290     | 10 - 210      | 9 - 200      |
| Potássio (mg/lK <sub>2</sub> O)              | 3740 - 7830   | 1200 - 2100   | 3340 - 4600  |
| Cálcio (mg/lCaO)                             | 450 - 5180    | 130 - 1540    | 1330 - 4570  |
| Magnésio (mg/lMgO)                           | 420 - 1520    | 200 - 490     | 580 - 700    |
| Sulfato (mg/lSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )  | 6400          | 600 - 760     | 3700 - 3730  |
| Carbono (mg/lC)                              | 11200 - 22900 | 5700 - 13400  | 8700 - 12100 |
| Relação C/N                                  | 16 - 16,27    | 19,7 - 21,07  | 16,4 - 16,43 |
| Matéria orgânica (mg/l)                      | 63400         | 19500         | 38000        |
| Substâncias redutoras (mg/l)                 | 9500          | 7900          | 8300         |

Fonte: Sopral, 1986.

O tratamento dado à vinhaça depende do uso a que ela se destina. A princípio, como já foi colocado, este resíduo era simplesmente descartado nos rios e riachos próximos à destilaria, acarretando muitos problemas. Devido, principalmente, ao aumento das preocupações relacionadas ao meio ambiente, este hábito ficou cada vez mais difícil de ser prolongado e, com o advento do Proálcool e as perspectivas do aumento substancial da produção de álcool, cresceram as preocupações com o destino a ser dado ao resíduo da destilação, que representa um volume de 10 a 14 vezes maior que o de álcool produzido.

Em linhas gerais, pelos trabalhos publicados na literatura especializada sobre a destinação da vinhaça, observa-se os seguintes conjuntos de tratamentos possíveis: 1) concentração do resíduo a cerca de 60% de sólidos totais, permitindo uma diminuição do seu volume para facilitar a manipulação e, assim, o uso como fertilizante, a transformação em proteína para ração ou mesmo a incineração; 2) fermentação ou digestão tanto aeróbia quanto anaeróbia, para o

obtenção de concentrado de levedos e bactérias com alto teor proteico no processo aeróbio, e gás metano e fertilizante no anaeróbio; 3) aplicação “in natura” na lavoura para a utilização como fertilizante.

No final da década de 70 e início dos anos 80, foi grande o número de idéias e projetos que buscavam uma solução definitiva, que fosse viável e segura, para o problema da disposição da vinhaça. Esta solução ideal ainda não foi encontrada, embora tenha havido, sem dúvida, grandes avanços com o uso da vinhaça na lavoura, propiciando seu aproveitamento econômico com um risco menor de poluição. Será feito, a seguir, uma breve apresentação das diferentes propostas de tratamento da vinhaça pensadas desde os primeiros anos do Proálcool. A maioria delas se enquadram em um dos grupos citados acima ou numa mistura deles. O uso da vinhaça “in natura” na lavoura é a prática mais difundida atualmente, na indústria da cana no Brasil, e será abordada com maiores detalhes. A digestão anaeróbia da vinhaça, por sua vez, será tratada de maneira aprofundada no capítulo 3.

#### **2.2.2.1- Eliminação**

Os tratamentos que visam o aproveitamento efetivo e rentável da vinhaça, com o objetivo de empregá-la como fertilizante, ração animal ou insumo para a produção de energia, pressupõem, é claro, que o resíduo já foi produzido e necessita de algum destino. Porém, antes disso, há ainda a opção de minimizar ao máximo sua produção e, com isso, o tamanho do problema.

No processo normalmente usado para a produção de álcool no Brasil, o Melle-Boinot<sup>20</sup>, é possível aumentar o grau alcóolico do vinho e, por conseqüência, diminuir a proporção

---

<sup>20</sup> De maneira breve, o processo Melle-Boinot é um processo descontínuo que consiste na recuperação, através de centrifugação, das células de levedura de uma dorna, após concluída a fermentação, e conseqüente reutilização na fermentação seguinte, evitando a trabalhosa etapa de elaborar um pé-de-cuba para cada dorna; ou seja, minimiza a necessidade de multiplicação celular e, portanto, do consumo do açúcar para este fim, que passa a ser utilizado na fabricação do álcool. A grande maioria das destilarias pratica uma variação do processo Melle-Boinot, que é o processo descontínuo alimentado, já que, com o tamanho das dornas, a fermentação vai se processando à medida que a dorna está recebendo o mosto, caracterizando o processo não como descontínuo, mas sim como semi-descontínuo ou descontínuo alimentado.

vinhaça/álcool. Isto pode ser feito através de um melhor aproveitamento do fundo de dorna, seleção de leveduras, melhor aeração do processo e, também, um efetivo controle de infecções. Um outro caminho é adotar o processo de fermentação contínua com destilação integrada, cuja tecnologia ainda não se encontra plenamente desenvolvida. Neste caso, o mosto concentrado na dorna é diluído com vinhaça da primeira coluna de destilação; somente uma parte da vinhaça passa para a seção de esgotamento da coluna de destilação, resultando em vinhaça concentrada. A proporção vinhaça/álcool cai para cerca de 0,8 litro de vinhaça para cada litro de álcool produzido. Existiam, em 1990, quatro unidades industriais no Brasil operando com este sistema (IPT, 1990).

Outra forma de diminuir a quantidade de vinhaça é reduzir seu teor de água, através do uso de refeedor no aquecimento do vinho na destilação, ao invés de vapor direto. O uso de vapor direto, apesar de mais simples, se dá em contato direto, o que permite a sua condensação dentro da coluna. O refeedor aumenta em 5% o uso de vapor indireto, mas reduz em 45% o volume da vinhaça (IPT, 1990). Existem outras medidas que contribuem para a redução do volume de vinhaça, como a separação da flegmaça (resíduo da segunda coluna de destilação em diante), que tem um potencial poluidor significativamente menor; e a reciclagem da vinhaça de volta à fermentação, com o objetivo de diluir o mosto e melhorar o rendimento do processo.

#### **2.2.2.2- Concentração**

A concentração da vinhaça é normalmente realizada pelo processo de evaporação em múltiplo efeito, tendo ainda como alternativas a evaporação com recompressão mecânica de vapor e a centrifugação. A evaporação de tipo múltiplo efeito revela-se com um custo energético muito alto, já que para concentrar um litro de efluente seria necessário queimar pelo menos dois litros de combustível. A alternativa com recompressão mecânica de vapor, na qual o vapor é comprimido para elevar seu nível de energia, precisa de um maior investimento inicial, mas seu custo operacional é menor.

Quando concentrada, a vinhaça pode ser empregada como fertilizante ou complemento para ração animal; pode, também, sofrer incineração para a geração de vapor e obtenção de cinzas potássicas. A vinhaça concentrada para uso como fertilizante mantém as características organominerais da vinhaça “in natura”, representa um menor volume a ser transportado para a

lavoura e apresenta maior estabilidade; por outro lado, ocorrem problemas de bombeamento e dificuldades de incorporação ao solo. A vinhaça concentrada usada como ração é, normalmente, seca até se tornar pó, possuindo grande valor nutritivo. A incineração da vinhaça concentrada tem, além da vantagem de gerar calor, a propriedade de remover praticamente toda a DBO do resíduo, com as cinzas ainda servindo de fertilizante<sup>21</sup>.

Na Revista Brasil Açucareiro constam alguns trabalhos com propostas para a concentração da vinhaça através de diversos processos, os quais apenas serão mencionados aqui, devido à sua pouca ou nenhuma importância na prática da produção de álcool no Brasil. Deixa-se o registro dos dois mais importantes: Nicolaiewsky, E. propõe um tratamento físico-químico da vinhaça, consistindo de floculação, sedimentação e filtração, e conclui que o processo remove cerca de 30% da DBO e é necessário um grande investimento para concretizá-lo (Brasil Açucareiro, vol.98, nº4, out/1981); Silva, G.M., por sua vez, apresenta um processo de clarificação e decantação contínua de vinhaça e o uso da “torta” produzida como fertilizante, pouco testado na prática (Brasil Açucareiro, vol.87, nº3, jun/1978).

### **2.2.2.3- Fermentação**

A fermentação aeróbia considera a utilização da vinhaça como substrato microbiano para a produção de proteína unicelular (puc), a ser empregada como complemento na formulação de rações animais. A vantagem de se produzir proteína por processo fermentativo está na velocidade de desenvolvimento da biomassa, superior à velocidade de obtenção de fontes convencionais de proteína, através dos ciclos agrícolas. Além disso, essa produção independe de condições climatológicas e não está sujeita à sazonalidade. A principal desvantagem reside nos investimentos e custos operacionais elevados, devido à necessidade de instalar um complicado sistema de controle de processo, além de manter as condições assépticas.

A utilização de lagoas de oxidação para a redução da vinhaça é, também, baseada na fermentação aeróbia combinada, desta vez, com a fermentação anaeróbia. A estabilização da matéria orgânica é levada a cabo através de bactérias, fungos e algas, que fornecem a maior parte

---

<sup>21</sup> Para maiores detalhes, Pérez e Cortez (1996) apresentam um trabalho detalhado sobre incineração de vinhaça misturada com óleo combustível.

do oxigênio proveniente de sua própria atividade fotossintética. É possível, através deste sistema, atingir a completa utilização das substâncias orgânicas oriundas da vinhaça, depois de um determinado tempo de retenção. O conteúdo do reservatório deve ser passado a um separador contínuo para coletar a biomassa com alto valor proteico e descarregar o efluente tratado.

A fermentação ou digestão puramente anaeróbia da vinhaça será abordada detalhadamente no próximo capítulo, como já foi dito.

#### **2.2.2.4- Fertilização “in natura”**

A aplicação de vinhaça na cultura da cana parece ter sido iniciada de forma acidental, prosseguindo empiricamente até o início dos anos 50, quando foram iniciados os trabalhos pioneiros de Almeida (1950; 1955). Antes desta data, a vinhaça era considerada inadequada para este uso devido a sua elevada acidez. Porém, as experiências mostraram que, ao contrário, a vinhaça era corretivo de acidez do solo e um fertilizante de alta qualidade, provocando um aumento na capacidade de troca de cátions do solo, embora este efeito não seja de duração prolongada, tendendo a decair caso as aplicações não sejam anuais. Há aumento da população e da atividade microbiana do solo e, também, indicações de que as propriedades físicas (capacidade de retenção de água, porosidade, etc) são, em geral, melhoradas (Glória, 1984).

Desde os primeiros estudos acerca dos efeitos da vinhaça na cultura da cana, ficou comprovado que a vinhaça traz um aumento da produtividade agrícola por hectare. Entretanto, a aplicação de quantidade elevada do resíduo (cerca de 1000 m<sup>3</sup>/ha), conduz a efeitos negativos à qualidade da matéria-prima, principalmente, atraso na maturação, diminuição do teor da



**Figura 9: Caminhão-tanque para a distribuição de vinhaça**

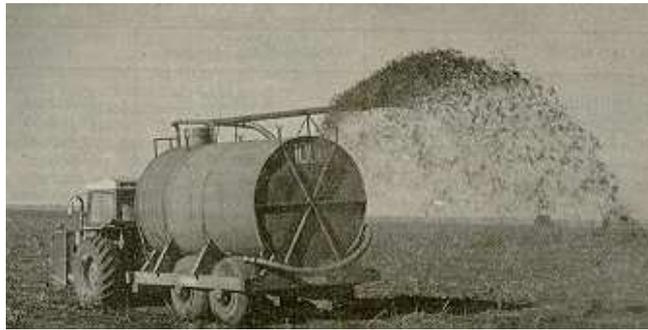
Foto: Brasil Açucareiro, vol. 86 (4), 1977

sacarose aparente (pol), aumento no teor de cinzas e elevação no nível de potássio e amido do caldo. Magro e Glória (citados por Brieger, 1977) estabeleceram uma sistemática experimental em que compararam o efeito de uma adubação química própria para soqueiras (10-5-15, 400 kg/ha) com 35 m<sup>3</sup>/ha de vinhaça; tomando como ponto de comparação o nitrogênio, o resultado é um valor de 4,2 vezes menos de fósforo e 4,4 vezes mais de potássio. Procurou-se, em outros experimentos, complementar os elementos em falta (nitrogênio e fósforo), mas não houve resposta por parte da cana, sendo o acréscimo de fertilizante químico à vinhaça não recomendado (Glória, 1984) (Brieger, 1997) (Robaina, 1984).

Portanto, a aplicação de vinhaça sem o conhecimento da dosagem adequada poderá promover um desequilíbrio de nutrientes, comprometer a qualidade da matéria-prima, além de não satisfazer totalmente às necessidades da cultura. Resultados diferentes foram observados em diferentes variedades, não se podendo generalizar uma única dosagem para todos os padrões de solo e todas as variedades. Ensaio realizados por Robaina (1984) mostram que a aplicação da vinhaça em áreas com teores de argila inferiores a 35% proporcionou acréscimos significativos na produção da cana soca, enquanto que em solos argilosos, apenas 20% dos ensaios revelaram efeitos positivos do resíduo na produção.

Glória (1984) ressalta o valor fertilizante da vinhaça, principalmente para solos arenosos, mas alerta para o risco da aplicação de grandes volumes por hectare. Os dados apresentados demonstram que até 50 m<sup>3</sup>/ha não representam perigo de salinização do solo, sendo que o sistema que permite uma aplicação realmente racional e econômica, dependendo da fertilidade do solo e da composição da vinhaça, é através de caminhões dotados de barra distribuidora.

Atualmente, a indústria da cana no Brasil aplica largamente a vinhaça na lavoura, na chamada fertirrigação, sendo esta a destinação mais difundida para o resíduo. Distinguem-se dois grandes sistemas de aplicação: os caminhões-tanque (figura 9 e 10), que transportam o produto diretamente das unidades industriais ou entrepostos para a lavoura; e aspersão com canhão hidráulico acionado por moto-bomba, que succiona a vinhaça diretamente de canais construídos ao longo da lavoura (figura 11 e 12). Um estudo realizado por Matioli (citado por



**Figura 10: Veículo para aspersão de vinhaça**

Foto: Brasil Açucareiro, vol 86 (4), 1977

Ferreira, 1992) indica que a utilização de caminhões-tanque predomina nos canaviais paulistas, atingindo 80% da área total irrigada. Isto coloca a aplicação de vinhaça em segundo lugar no consumo de óleo Diesel por caminhões, com 11,2 milhões de litros por ano ou 21% do total, atrás apenas do transporte da cana (Ferreira, 1992).

O número de trabalhos sobre o efeito da vinhaça no solo que levam em conta os aspectos de fertilização é relativamente grande, com diversas experiências relatadas na literatura. Contudo, os efeitos nas águas subterrâneas são comumente desprezados.

Cruz (1991), Righetto (1991) e Gloeden (1991) realizaram experimentos nas águas subterrâneas na região de Botucatu-SP, região produtora de cana e onde há, também, um importante aquífero. Pelos resultados apresentados, não foi constatada contaminação das águas subterrâneas, embora tenha sido provado que há lixiviação de nutrientes da vinhaça, principalmente nitrogênio na forma de nitrato, em direção ao lençol freático. Os autores são unânimes ao afirmar a necessidade de mais pesquisas sobre o tema, com o objetivo de proporcionar maior segurança para a saúde humana com relação ao uso de vinhaça no solo.

Apesar da difusão da fertirrigação como a solução para o problema da vinhaça, segundo uma pesquisa realizada pela Copersucar em 1986 (citado por Ferreira, 1992), cerca de 40% da vinhaça produzida no Estado de São Paulo ainda não é aproveitada, sendo descartada em áreas



**Figura 11: Chegada da vinhaça no canavial**



**Figura 12: Canal de distribuição de vinhaça**

de despejo ou sacrifício<sup>22</sup>. A experiência tem demonstrado a necessidade de, em qualquer sistema integrado de aproveitamento da vinhaça, dispor de uma área de terra não muito longe da destilaria que deverá ser utilizada nos casos em que seja necessário jogar vinhaça. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Básico e Ambiental (CETESB) de São Paulo tem autorizado esta prática, desde que seja garantida a não contaminação das águas subterrâneas e superficiais (uso de manta impermeáveis de PVC para cobrir o solo); no entanto, muito trabalho ainda precisa ser feito para se assegurar que não existe risco.

#### **2.2.2.5- Considerações Finais**

Existem ainda outras idéias para a destinação da vinhaça que não foram mencionadas. Rolim & Freire (1996) estudaram a fabricação de tijolos utilizando vinhaça concentrada; contudo, o uso desta técnica ainda necessita de pesquisas adicionais já que, devido às características higroscópicas da vinhaça, os tijolos estariam sujeitos ao colapso nos dias mais úmidos. Visconti et alli (1980) propuseram lançar a vinhaça “in natura” não no solo, mas no mar, através de “vinhotodutos” que a descarregariam a alguns quilômetros da costa; tal prática, segundo os autores, seria adequada para as regiões canavieiras próximas da costa, se livrando da vinhaça e, ainda, aumentando a pesca nas áreas de descarga.

As alternativas de tratamento da vinhaça apresentadas aqui revelam um grande número de idéias. Esta riqueza é um sinal de que o problema é um grande mobilizador de esforços no sentido da sua solução e, ao mesmo tempo, complexo, por se inserir num contexto de relações complexas que envolve o uso pela sociedade de diferentes opções no aproveitamento de matéria e energia, a tecnologia necessária para tanto e seus impactos na própria sociedade e no meio ambiente.

A disposição da vinhaça “in natura” na lavoura através da fertirrigação representou, sem dúvida, um grande avanço na destinação dada à enorme quantidade deste resíduo produzida no Brasil, contribuindo para livrar os rios e riachos de um perigoso poluente. Atualmente, são raras as ocorrências de contaminação de cursos d’água superficiais por vinhaça; além disso, a

---

<sup>22</sup> Apesar da não disponibilidade de dados atualizados sobre o total de vinhaça descartada em áreas de despejo, é provável que, atualmente, esta quantidade seja menor que a de 1986.

fertirrigação é uma prática de baixo custo que utiliza o seu potencial fertilizante, economizando a energia contida nos adubos químicos e diminuindo os gastos financeiros.

Contudo, esta alternativa não pode ser aplicada em todas as situações. Existem limitações geográficas, o que faz com que boa parte da vinhaça seja ainda descarregada em áreas de sacrifício; além de riscos de contaminação dos lençóis freáticos e de salinização do solo, embora mais pesquisas sejam necessárias para esclarecer estes pontos. Não obstante, considerar que se faz adubação sempre que se puser alguma coisa no solo é um erro que pode trazer sérias conseqüências; é importante conhecer as relações do resíduo com o solo e com o clima. Doses excessivas de vinhaça poupam gastos importantes com transporte, mas podem trazer os problemas do excesso: muita matéria orgânica com acidificação e desestruturação do solo, proliferação de microorganismos que competem com as plantas pelo nitrogênio mineral e outros nutrientes. A aplicação de vinhaça no solo é possível e desejável, mas critérios precisam ser respeitados.

Vê-se que a fertirrigação, apesar das vantagens já apresentadas, é, antes de tudo, um paliativo para o problema da disposição da vinhaça, uma fuga inevitável frente à sua dimensão. É uma solução que, da maneira como está, pode não se sustentar no longo prazo. Como no caso dos lixões nas periferias das grandes cidades que, por causa dos graves problemas que vêm causando, estão sendo substituídos pelos aterros sanitários controlados e estes, por sua vez, se constituem, igualmente, na solução imediata possível, mas sem resolver de forma satisfatória o problema do lixo. Portanto, é importante procurar aperfeiçoar as alternativas já existentes para a disposição da vinhaça, inclusive a própria fertirrigação, e, também, procurar novas alternativas, que podem ser inéditas ou até uma combinação racional de outras já conhecidas; sempre no sentido encontrar a melhor forma possível de suprir as necessidades que a sociedade tem dos produtos da cana, mas respeitando a natureza porque também precisamos dela.

## Capítulo 3

### Tecnologia da Digestão Anaeróbia

Neste capítulo aborda-se com detalhes a digestão anaeróbia da vinhaça, os equipamentos nos quais ela é realizada, os biodigestores, e o uso do biogás, apresentando as experiências mais significativas no uso desta forma de tratamento da vinhaça no Brasil.

#### **3.1- Digestão Anaeróbia**

Os processos bacteriológicos de fermentação da matéria orgânica são anteriores à existência do homem na Terra, sendo que a quantidade de bactérias e a intensidade de sua ação no ambiente primitivo colaborou na determinação da composição da atmosfera, propiciando as condições de desenvolvimento da vida. A literatura registra a descoberta do metano pelo químico italiano Alessandro Volta (1745-1827), em 1776; entretanto, é de se supor que este gás combustível já fosse reconhecido e até mesmo utilizado de alguma maneira desde antes desta data. Volta identificou o metano no gás dos pântanos, resultante da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados, verificando que o mesmo conferia ao gás suas características combustíveis. Em 1806, na Inglaterra, Humphrey Davy (1778-1829) identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos, fazendo uma ligação da sua pesquisa com o gás dos pântanos, mencionado por Volta. Somente em 1844, Ulysse Gayon, aluno de Pasteur (1822-1895), mostra de maneira definitiva

que o gás metano pode ser produzido a partir da fermentação de uma mistura de excrementos, palha de estábulo e água, e discute suas propriedades combustíveis (Motta, 1986) (Nogueira, 1986).

A biodigestão anaeróbia, processo pelo qual o metano é produzido, é uma das formas naturais de se obter esse hidrocarboneto, além das jazidas subterrâneas, onde se encontra às vezes associado ao petróleo. Nessa última forma, o gás natural constitui-se importante combustível fóssil e é bastante explorado. Em anos recentes, estudos da atmosfera mostraram que aproximadamente 0,5% da produção total anual de matéria seca, por fotossíntese, é transformada em metano. Isto produz a fabulosa quantidade de 800 milhões de toneladas deste gás, que é descarregada anualmente em nossa biosfera, contribuindo para o chamado “efeito estufa”. De fato, o metano é considerado o segundo principal responsável pelo aquecimento global do planeta, atrás, é claro, do dióxido de carbono (Nogueira, 1986).

Na literatura consta que a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível foi construída em 1857, em Bombaim, na Índia, para atender um hospital de hansenianos (Nogueira, 1986). Nessa época, pesquisadores como Fisher e Schrader, na Alemanha e Gayon, na França, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia. Em 1890, Donald Cameron projetou um tanque séptico para a cidade de Exeter, Inglaterra, e o gás foi coletado e usado na iluminação pública de rua. Na Alemanha, Karl Imhoff desenvolveu um tanque biodigestor para o tratamento anaeróbio de esgotos residenciais, o tanque Imhoff, bastante difundido na época. Durante a Segunda Guerra Mundial, na França, Algéria e Alemanha, devido à escassez de combustível, o metano de biodigestores foi usado para mover automóveis (Campos, 1981).

Em países limitados pela falta ou distribuição inadequada de energia, os biodigestores têm sido adaptados para atender as necessidades rurais. Na Índia, devido à perda do esterco de gado para fertilizante, dado o seu uso tradicional como combustível, criaram-se, então, as primeiras experiências para desenvolver um sistema que fornecesse combustível sem destruir o esterco para adubo. A partir de 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. O sucesso da experiência levou a uma grande popularização do processo na Índia e, em 1950, formou-se o Gobar Gas Institute, onde as pesquisas conduziram a uma enorme difusão do biodigestor como forma de tratar o esterco e obter

combustível sem perder o efeito fertilizante. Jackson (1992) relata uma importante experiência numa pequena aldeia de 480 habitantes, localizada na região rural de Bangalore, onde a produção e uso de biogás se deram com intensa participação popular, assessorada por técnico do Centro de Aplicação de Ciência e Tecnologia para Áreas Rurais.

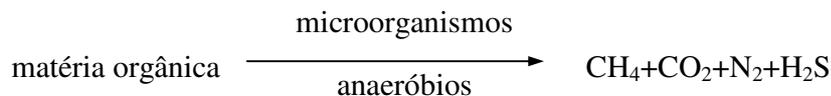
Outra utilização intensa das possibilidades da biodigestão deu-se na China, a partir de 1958, ampliando-se em 1980, com a instalação de 5 milhões de biodigestores de uma nova concepção, o modelo chinês, todos eles localizados ao sul do Rio Amarelo, onde as condições climáticas eram mais favoráveis à produção do biogás. Atualmente, cerca de 25 milhões de chineses usam biogás, principalmente para iluminação e cocção. Aproximadamente 10000 digestores de médio e grande porte se encontram em funcionamento em fábricas de alimentos, destilarias, fazendas de gado, entre outros. O biogás produzido em grandes unidades é transferido para estações centralizadas, onde é aproveitado na geração de potência mecânica (existem cerca de 422 estações com capacidade instalada de 5849 HP) e potência elétrica (822 estações responsáveis pela produção total de 7836 kW). Análises mostram que a taxa de retorno de investimento em biogás na China é elevada, com o período de retorno variando de um a quatro anos (Jackson, 1992: p.49).

Nas décadas recentes, a digestão anaeróbia de resíduos poluentes vem despertando grande interesse e sendo utilizada, com sucesso, para vários tipos de efluentes, tanto industriais quanto domésticos, em diversas partes do mundo. Comparado com o método convencional de tratamento aeróbio e do ponto de vista da implementação de tecnologias sustentáveis, o processo anaeróbio resolve o problema do rejeito de uma maneira mais abrangente, já que: a) ao invés de consumir, produz energia útil na forma de biogás; b) apenas uma pequena parte da DQO é convertida em nova biomassa, ou seja, o volume do excesso de lodo é significativamente menor; c) pode ser aplicado em praticamente qualquer lugar e em qualquer escala, pois altas taxas de conversão podem ser obtidas com os modernos sistemas de tratamento, requerendo relativamente pouco espaço; d) pode ser operado com baixo custo, pois os reatores são relativamente simples e utiliza pouco ou nenhum aditivo de alto conteúdo energético; e) pode ser combinado com métodos de pós-tratamento do efluente para a recuperação de produtos úteis, como amônia, enxofre, ou algum outro, dependendo da natureza do rejeito tratado (Verstraete, 1996).

### 3.1.1- Microbiologia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre, no qual diversas populações de bactérias convertem a matéria orgânica numa mistura de metano, dióxido de carbono e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. Esta mistura é conhecida como biogás e pode ser utilizada como combustível devido às elevadas concentrações de metano, usualmente na faixa de 55% a 70%. O efluente líquido final do processo integra a parcela da matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável. A digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também chamados digestores ou biodigestores.

A degradação microbiológica de matéria orgânica em um ambiente anaeróbio só pode ser obtida por microorganismos capazes de utilizar moléculas, ao invés de oxigênio, como receptores de hidrogênio. A reação completa pode ser simplificada como mostrado abaixo:



Na verdade, a degradação anaeróbia da matéria orgânica é, quimicamente, um processo bastante complicado, envolvendo centenas de possíveis compostos e reações intermediárias, cada uma catalisada por enzimas e catalisadores específicos. As bactérias atuam simbiótica e sinergeticamente, utilizando a matéria orgânica de forma assimilativa para o crescimento da população atuante no processo. As transformações podem ser obtidas por um dos vários caminhos metabólicos alternativos e os bioquímicos continuam tentando definir e descrever mais precisamente esses vários mecanismos (Price, 1981).

Quando as bactérias degradam moléculas complexas como celulose, proteína, amido e gordura, que compõem a matéria orgânica, a primeira etapa consiste em quebrar as ligações entre as unidades básicas. Isto é realizado pelas enzimas liberadas externamente pelas bactérias para fazer, especificamente, este desdobramento, transformando os polímeros orgânicos em suas sub-unidades constituintes, notadamente açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa, que podem ser incorporados no interior da célula. Dessa forma, para as bactérias alimentarem-se de moléculas complexas, estas são separadas em unidades mais simples e esta separação,

geralmente, conduz à produção de ácido acético, além de outros ácidos, e seus respectivos sais, como o acetato. Esta etapa, chamada de hidrólise, é, geralmente, lenta e pode ser acelerada pelo aumento da temperatura, utilização de material finamente dividido e pH levemente ácido.

A partir daí, a decomposição anaeróbia é geralmente dividida em duas fases: a fase acidogênica e a fase metanogênica. Na fase acidogênica, os compostos gerados na etapa anterior, uma vez incorporados ao interior da célula, são convertidos pelas bactérias formadoras de ácidos, em ácidos voláteis, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio molecular e amônia. É uma fase que tem cinética rápida, em que a assimilação da matéria em biomassa microbiana é grande. Na tabela 2 estão listadas algumas espécies de bactérias, isoladas em digestores anaeróbios, que participam da fase acidogênica.

**Tabela 2 : Bactérias não-metanogênicas isoladas em digestores anaeróbios**

|   | Celulose | Amido | Proteínas | Gorduras |
|---|----------|-------|-----------|----------|
| <i>Aerobacter aerogenes</i> (1)             |          |       |           |          |
| <i>Alcaligenes bookerii</i>                 |          |       |           | X        |
| <i>Alcaligenes fecalis</i>                  | X        |       |           |          |
| <i>Bacillus</i> sp (1)                      |          |       |           |          |
| <i>Bacillus cereus</i> var. <i>mycoides</i> | X        |       |           |          |
| <i>Bacillus cereus</i>                      |          | X     | X         |          |
| <i>Bacillus circulans</i>                   | X        | X     | X         |          |
| <i>Bacillus firmus</i>                      |          |       | X         |          |
| <i>Bacillus knelfelhampi</i> (1)            |          |       |           |          |
| <i>Bacillus megaterium</i>                  | X        | X     | X         | X        |
| <i>Bacillus pumilis</i>                     |          |       | X         |          |
| <i>Bacillus sphaericus</i>                  |          |       | X         | X        |
| <i>Bacillus subtilis</i>                    |          |       | X         | X        |
| <i>Clostridium carnofoetidum</i>            | X        |       |           |          |
| <i>Escherichia coli</i>                     |          | X     | X         |          |
| <i>Escherichia intermedia</i> (1)           |          |       |           |          |
| <i>Micrococcus candidus</i>                 |          | X     |           |          |
| <i>Micrococcus luteus</i>                   |          |       |           | X        |
| <i>Micrococcus varians</i>                  |          | X     | X         |          |
| <i>Micrococcus ureae</i>                    |          | X     |           |          |
| <i>Paracolobacterium intermedium</i>        |          |       | X         |          |
| <i>Paracolobacterium coliforme</i>          |          |       | X         |          |
| <i>Proteus vulgaris</i>                     | X        |       |           |          |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i>               | X        |       |           |          |
| <i>Pseudomonas ambigua</i> (1)              |          |       |           |          |

|                              |   |   |   |  |   |
|------------------------------|---|---|---|--|---|
| Pseudomonas oleovorans       |   |   |   |  | X |
| Pseudomonas perolens         |   |   |   |  | X |
| Pseudomonas pseudomallei (1) |   |   |   |  |   |
| Pseudomonas reptilivora      | X |   |   |  |   |
| Pseudomonas riboflavina      | X |   |   |  |   |
| Pseudomonas spp.             | X | X | X |  | X |
| Sarcina cooksonii (1)        |   |   |   |  |   |
| Streptomyces bikiniensis     |   |   |   |  | X |

(1) Incerteza quanto ao elemento de degradação.

Fonte: Price, 1981.

As bactérias que realizam esta fase podem ser anaeróbias ou facultativas, isto é, vivem com ou sem oxigênio. As facultativas são importantes não apenas por produzirem alimento para as bactérias anaeróbias, como, também, por eliminarem qualquer traço de oxigênio dissolvido, fatal para estas bactérias, que tenha permanecido no material orgânico.

Na fase metanogênica, compostos simples como o dióxido de carbono, hidrogênio molecular, ácido acético e metanol, gerados na etapa anterior, são metabolizados pelas bactérias metanogênicas, havendo desassimilação de metano e dióxido de carbono. A tabela 3 mostra algumas espécies de bactérias metanogênicas que já foram identificadas em biodigestores anaeróbios.

**Tabela 3: Algumas espécies de bactérias metanogênicas e compostos orgânicos usados por elas**

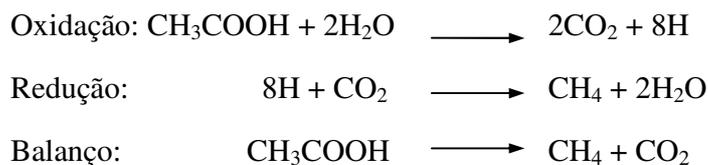
|                             |  |                                   |
|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| Metanobacterium formicum    | CO; H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> ; Fórmico     | CH <sub>4</sub>                   |
| Metanobacterium mobilis     | H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ; Fórmico          | CH <sub>4</sub>                   |
| Metanobacterium propionicum | Propiônico   | CO <sub>2</sub> + Acetato         |
| Metanobacterium ruminantium | Fórmico; H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>           | CH <sub>4</sub>                   |
| Metanobacterium sohngenii   | Acetato; Búrico                                    | CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> |
| Metanobacterium suboxydans  | Caproato; Búrico                                   | Propiônico; Acetato               |
| Metanococcus mazei          | Acetato; Búrico                                    | CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> |
| Metanococcus vannielli      | H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ; Fórmico          | CH <sub>4</sub>                   |
| Metanosarcina barkeri       | H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ; Metanol; Acetato | CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> |
| Metanosarcina methanica     | Acetato; Búrico                                    | CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> |

Fonte: Price, 1981.

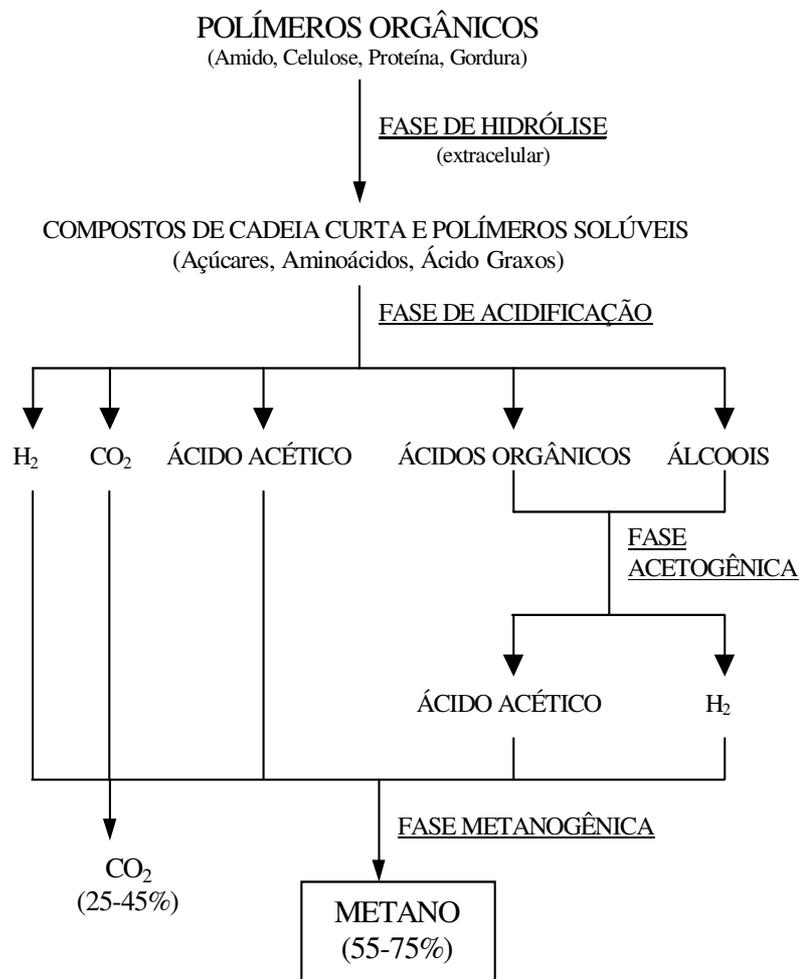
Existe dúvida sobre quais produtos finais da fase de formação de ácidos são utilizados pelas bactérias formadoras de metano, mas é quase certo que mais de 70% de todo o metano

formado provém do acetato, um sal do ácido acético, e o resto do dióxido de carbono e hidrogênio (Nogueira, 1986).

Sendo assim, considera-se que poderá ocorrer ainda uma etapa intermediária, chamada acetogênica, na qual os ácidos orgânicos mais pesados e álcoois são fermentados em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio molecular, substratos efetivamente utilizados pelas bactérias metanogênicas. Participam desta etapa as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio que trabalham em estreita associação com as bactérias metanogênicas, uma vez que as últimas são responsáveis pela remoção do hidrogênio produzido, que, quando presente acima de determinadas concentrações no meio de fermentação, torna-se inibidor ao metabolismo das bactérias acetogênicas que o produziram (Campos, 1981). A figura 13 mostra as etapas da fermentação anaeróbia para a produção de metano. Um resumo das reações envolvendo o acetato na fase acetogênica é mostrado abaixo:



Os grupos bacterianos envolvidos nos processos estão misturados e esta diversidade depende basicamente do tipo de matéria orgânica adicionada ao digestor. As bactérias formadoras de ácidos são bastante resistentes e capazes de suportar súbitas mudanças das condições externas e de alimentação, ao contrário das bactérias metanogênicas, bastante suscetíveis a alterações nas condições. Um fato importante a se observar sobre a população de bactérias no biodigestor é que elas são interdependentes e simbióticas. As bactérias formadoras de ácido asseguram que o meio está livre de oxigênio e produzem o alimento básico para as bactérias metanogênicas, além de suas enzimas agirem sobre proteínas e aminoácidos, liberando sais de amônia, as únicas fontes de nitrogênio que as bactérias metanogênicas aceitam. Estas, por



**Figura 13: Etapas da fermentação anaeróbica para produção de metano**

Fonte: CNI, 1982

sua vez, embora não possam viver sem as formadoras de ácidos, removem os produtos finais do metabolismo das primeiras e os convertem em gases, que escapam do sistema. Caso esta conversão não se processasse, as condições no biodigestor se tornariam tão ácidas que matariam as bactérias formadoras de ácidos.

As relações entre as populações de bactérias são, como já foi mencionado, de interdependência e sinergia, sendo as bactérias metanogênicas mais sensíveis; de tal maneira que, em um digestor em operação, se ocorrer uma súbita alteração nas condições de operação, como variações rápidas na temperatura ou mudanças bruscas no teor de matéria orgânica, a primeira coisa que, normalmente, se dá, é uma redução na produção do metano, associada a um aumento de acidez, podendo comprometer a continuidade do processo. A influência da temperatura, da acidez e do tipo de reator será analisada a seguir.

### 3.1.2- Influências no Processo

#### 3.1.2.1- Temperatura

As várias experiências já realizadas indicam uma correlação entre a produtividade do processo de digestão anaeróbia e a faixa de temperatura de operação. Os microorganismos devem ser adaptados à faixa de temperatura de trabalho, o que permite classificá-los também com relação a este parâmetro. As bactérias operando numa faixa inferior a 20°C são chamadas psicrófilas; outras operando entre 20 a 45°C são chamadas mesófilas; acima de 45°C operam as bactérias termófilas. Abaixo de 10°C o processo é, em geral, interrompido, sendo que a produção de gás aumenta com a elevação da temperatura.

A faixa termófila, portanto, apresenta taxas de conversão maiores e, assim, um menor tempo de residência do resíduo no digestor, além do seu volume poder ser menor, reduzindo-se os custos iniciais. Na faixa de 55 a 70°C, foi constatado que a celulose e outros polímeros alcançam as maiores taxas de hidrólise. Apesar disso, a maior parte dos digestores trabalham na faixa mesófila, por estes serem mais confiáveis, não necessitando de controle de temperatura. Assim, a digestão termófila é descrita como mais crítica e mais sensível devido à vulnerabilidade das bactérias, principalmente as metanogênicas, às variações de temperatura. Um outro problema era o desenvolvimento do substrato de bactérias que iniciaria o processo. No

entanto, embora muita coisa ainda precise ser feita nesta área, controles mais finos foram desenvolvidos na década anterior, tratando o problema do início da operação com um melhor entendimento dos mecanismos de crescimento do substrato de biomassa e melhorando a confiabilidade do processo, abrindo, inclusive, como será visto adiante, novas possibilidades para o tratamento anaeróbio termofílico de alta eficiência do esgoto doméstico.

### **3.1.2.2- pH e Acidez do Meio**

Os microorganismos são seres vivos que necessitam de um meio propício ao seu desenvolvimento; por isso, a acidez e alcalinidade são fatores importantes no processo de digestão anaeróbia. O pH do processo deve ser mantido entre 6 e 8, podendo ser considerado ótimo de 7 a 7,2; seu controle é função do acúmulo de bicarbonato, da fração de CO<sub>2</sub> da parte gasosa, da concentração em ácidos voláteis ionizados e da concentração de nitrogênio sob a forma de amônia.

Inicialmente, as bactérias formadoras de ácidos fracionam a matéria orgânica e produzem ácidos voláteis. Daí resulta um aumento da acidez do meio e uma redução do pH. Quando as bactérias metanogênicas começam a agir, transformam os ácidos em metano, neutralizando o meio e elevando o pH. Outro fator que tende a elevar o pH é o teor de amônia, que aumenta quando as proteínas começam a ser digeridas. Um terceiro fator atuante sobre o pH do meio, agindo de modo a estabilizá-lo, é o bicarbonato. A concentração do íon bicarbonato é diretamente proporcional ao teor de dióxido de carbono e ao pH do meio. Assim, se as bactérias do primeiro grupo são muito rápidas e produzem mais alimentos do que as metanogênicas conseguem digerir, o dióxido de carbono liberado tornará maior a concentração de bicarbonato, o que impede a queda acentuada no pH. Com o correr da degradação do material orgânico em um sistema fechado, o pH tende a se elevar e a produção de metano tem o seu pico.

Se o conteúdo de um digestor em operação torna-se muito ácido, o método mais comum de restaurar o pH ideal é interromper sua alimentação por alguns dias. Isto dá um tempo para as bactérias metanogênicas reduzirem a concentração dos ácidos voláteis. Em digestores de grande porte, nos quais a interrupção da alimentação é complicada devido a problemas de estocagem do resíduo, o pH é usualmente elevado pela adição de hidróxido de cálcio, altamente alcalino.

### 3.1.2.3- Composição e Concentração do Resíduo

A composição do resíduo a ser tratado afeta diretamente a produção de biogás na proporção direta de quanto maior for o conteúdo de sólidos voláteis, os quais representam a quantidade de sólidos orgânicos presentes na amostra, e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos. Nota-se, também, que a produção de metano é diretamente proporcional à demanda química de oxigênio (DQO). A presença de nitrogênio sob a forma de proteína é favorável, pois a mineralização conduz à amônia, que é útil no estabelecimento da alcalinidade. Elementos nutrientes essenciais, como o ferro, e os micronutrientes, como o níquel e o cobalto, demonstram efeitos positivos na produtividade de metano. Já o enxofre em grande quantidade aumenta a produção de H<sub>2</sub>S (Cortez, 1997). Certos íons orgânicos, como o K<sup>+</sup>, o Na<sup>+</sup>, o Ca<sup>++</sup>, a amônia iônica NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, o Mg<sup>++</sup> e o S<sup>-</sup> apresentam, na fermentação, uma propriedade singular: quando em quantidade diminutas são excitantes do metabolismo celular, manifestando, porém, propriedades inibidoras do mesmo metabolismo quando em concentrações mais elevadas. Ainda não é completamente conhecido o fenômeno da inibição; acredita-se que, em maiores concentrações, os íons atravessem a delicada membrana celular, interferindo no mecanismo biológico da célula (Motta, 1986).

Alguns materiais orgânicos, especialmente os sintéticos, são também tóxicos para as bactérias. De um modo geral, os detergentes não biodegradáveis e aqueles à base de cloro são fortes inibidores do metabolismo bacteriano. O amoníaco (NH<sub>3</sub>), em concentrações da ordem de 150 mg/l, é, igualmente, um forte inibidor. Também deve-se cuidar para que não penetrem no digestor resíduos de animais que tenham sido tratados com antibióticos ou água de lavagem contendo pesticidas. Porém, apesar da susceptibilidade das bactérias acidogênicas e metanogênicas a componentes tóxicos na matéria orgânica, o potencial destas de se adaptarem e efetuarem a conversão de compostos químicos não propícios, foi demonstrado ser muito maior do que o percebido anteriormente (Verstraete, 1996)

Uma das vantagens da digestão anaeróbia reside justamente na diversidade de substratos passíveis de sofrer fermentação. As bactérias metanogênicas não exigem substâncias ou matérias específicas para sua operação; diversamente da obtenção do álcool, na qual as enzimas somente

se desenvolvem a partir de açúcares, as bactérias anaeróbias se nutrem de toda a matéria orgânica.

#### **3.1.2.4- Agitação**

A agitação leva a um maior contato do substrato com as bactérias, distribuindo melhor o calor na biomassa e dando maior uniformidade dos produtos intermediários e finais da biodigestão, além de evitar a produção de uma crosta que pode obstruir a parte superior do biodigestor. A obtenção de boas condições hidráulicas no digestor é um ponto fundamental para o sucesso da exploração a longo prazo; vários são os casos de entupimentos nas tubulações causados pela formação de crostas devido às condições hidráulicas insatisfatórias.

Para a agitação pode-se utilizar mecanismos de acionamento direto com um eixo e hélice em contato com a biomassa ou pelo borbulhamento do biogás. Como será visto mais adiante, nos digestores de fluxo ascendente, o problema de formação de crosta é muito menos grave, pois o movimento ascendente do resíduo e o seu menor teor de sólidos são suficientes para assegurar as condições ideais de mistura (Cortez, 1997).

Neste ponto, há um detalhe importante a ser mencionado. A formação de crosta é, dentro de certos limites, extremamente positiva e se dá devido ao fato de as bactérias anaeróbias possuírem propriedade aderente, que permite a obtenção de grandes densidades de biomassa ativa (20 a 100 kg/m<sup>3</sup> de reator) (Verstraete, 1996). A retenção da biomassa bacteriana é particularmente importante para o processo de digestão anaeróbia, pois a taxa de crescimento do substrato de bactérias é relativamente baixa, havendo, portanto, necessidade de sua concentração no interior do reator. Essa propriedade aderente pode levar a uma divisão grosseira de tipos de reatores: aqueles que utilizam, internamente, biofilmes ou matrizes para agregar a biomassa; ou aqueles que confiam na sua autoagregação. É claro que nos biodigestores a batelada não é necessária a preocupação com retenção da biomassa, mas, como será explicado a seguir, nos biodigestores contínuos, esta é uma questão crucial para o bom andamento do processo.

### **3.2- Digestores anaeróbios**

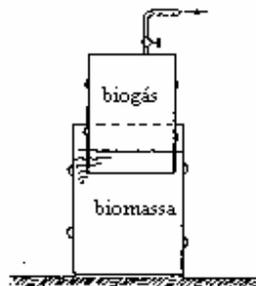
Os digestores consistem basicamente numa câmara de fermentação, onde é processada a biodigestão da matéria orgânica, numa campânula que armazena o gás produzido ou, simplesmente, numa saída para este gás, numa entrada do substrato a ser fermentado e numa saída para o efluente produzido pelo processo. É uma tecnologia simples, na qual a principal preocupação é a manutenção das propriedades fermentativas da biomassa bacteriana. São muitos os modelos de biodigestores, alguns com importantes detalhes construtivos, que dependem do tipo de aplicação a que são destinados e, também, do nível tecnológico disponível. Eles visam satisfazer determinadas demandas específicas para cada caso, como, por exemplo, o saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante. O biodigestor deve ser concebido com o objetivo de proporcionar essas vantagens citadas, embora seja reconhecidamente difícil atender as três de forma integrada e otimizada.

Os biodigestores podem ser classificados segundo o tipo de construção, modo de operação, a forma de armazenamento do gás, fluxo das substâncias em fermentação, temperatura de operação, com ou sem agitação e com ou sem dispositivos para agregar a biomassa bacteriana (ver tabela 4).

**Tabela 4: Classificação de biodigestores**

| <b>Tipo de operação</b> | <b>Forma de construção</b> | <b>Armazenamento de biogás</b> | <b>Faixa de temperatura</b> | <b>Fluxo do material</b> |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| batelada (fixa)         | enterrada                  | gasômetro                      | criofílico                  | vertical                 |
| semi-contínua           | semi-enterrada             | gasômetro externo              | mesofílico                  | horizontal               |
| contínua                | externa                    |                                | termofílico                 | ascendente               |

O biodigestor de carga fixa ou batelada é o mais simples, sendo o batelada em tambor metálico o tipo mais simples possível (ver figura 14); todos os outros tipos podem ser considerados uma variação desta concepção. O resíduo ou material a ser biodigerido é colocado, geralmente misturado com água, no tambor maior. O tambor menor é colocado sobre o material e quando a produção de gás começa, ele se eleva, indicando visualmente que o processo se desenvolve. É empregado basicamente como fonte de inóculos para outros biodigestores. De certa forma, a decomposição anaeróbia do lixo em aterros sanitários, pode ser comparada a um

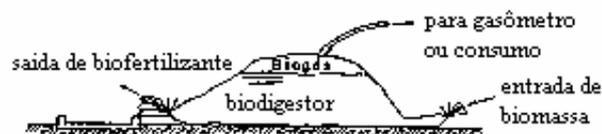


**Figura 14: Biodigestor batelada em tambor metálico**

Fonte: Nogueira, 1986.

grande biodigestor a batelada.

As alternativas de construção de biodigestores são muitas e se resumem, de maneira geral, numa combinação das diferentes características citadas na tabela 4. Por exemplo, um biodigestor pode ser contínuo, enterrado, mesofílico, de fluxo vertical, utilizar um gasômetro externo,



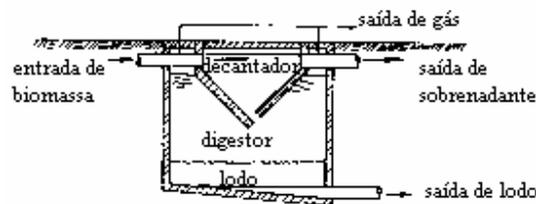
**Figura 15: Biodigestor em plástico flexível**

Fonte: Nogueira, 1986.

possuir um agitador e uma matriz interna para auxiliar na agregação das bactérias. Estas são, normalmente, as características dos reatores de grande porte, construídos nas décadas recentes, para o tratamento do esgoto doméstico (ver figura 17). A figura 15 mostra um biodigestor a batelada, externo, mesofílico, com gasômetro externo, sem agitação, construído em plástico flexível reforçado.

Não é o intuito desta dissertação, detalhar todos os aspectos referentes à concepção, dimensionamento, construção de biodigestores e as técnicas que podem ser usadas para proporcionar as características mais específicas para cada caso. Porém, devido à sua importância e ao largo uso a que foram submetidos desde o início do século, o tanque séptico de Imhoff, o biodigestor modelo indiano e o biodigestor modelo chinês merecem ser citados.

O tanque Imhoff, bastante difundido na sua época, foi desenvolvido pelo alemão Karl Imhoff, no fim do século passado. Sua finalidade básica não é a produção de gás, mas a redução quase total dos sólidos em efluentes domésticos. É um modelo de alimentação e retirada contínuas de material. Possui um decantador superposto sobre o digestor, para permitir a precipitação das frações sólidas ao interior deste, onde está a manta de lodo bacteriano que

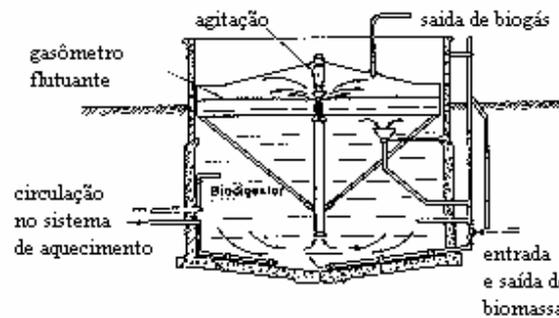


**Figura 16: Tanque séptico de Imhoff**

Fonte: Nogueira, 1986.

produz gás e reduz a quantidade de sólidos. É construído geralmente em concreto ou aço, com tempo médio de retenção no decantador de dois a quatro dias (ver figura 16).

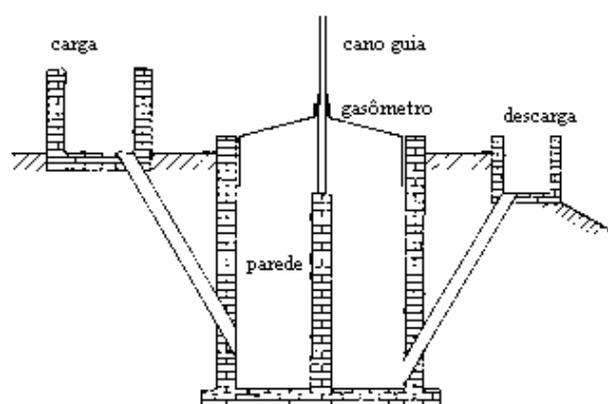
Os modelos indiano e chinês empregam um baixo nível tecnológico, sem a necessidade de dispositivos auxiliares ou complicados controles de operação, e são aplicados, principalmente, a



**Figura 17: Biodigestor empregado em tratamento de esgoto**

Fonte: Nogueira, 1986.

tratamento de resíduos de animais (estercos). Estes biodigestores são de alimentação semi-contínua e tem a câmara de biodigestão construída abaixo do nível do solo a fim de diminuir as variações de temperatura. O modelo indiano é o mais empregado no Brasil. Possui uma campânula (gasômetro) móvel na parte superior, mergulhada sobre o substrato ou em um selo d'água externo, e uma parede central que o divide em dois fermentadores, fazendo com que o substrato, proveniente de cargas diárias, tenha circulação bem determinada, com período de

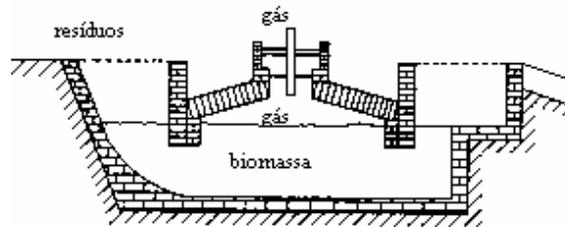


**Figura 18: Biodigestor modelo indiano**

Fonte: Nogueira, 1986

retenção sempre igual. É um biodigestor de fácil construção (ver figura 18).

O modelo chinês possui uma câmara cilíndrica para a fermentação, com o teto em forma de abóbada, destinada ao armazenamento do biogás. Este digestor funciona sob o princípio de prensa hidráulica, de forma que, com o aumento da pressão do gás no interior, ocorre um deslocamento do substrato da câmara de fermentação para a caixa de saída (ver figura 19)



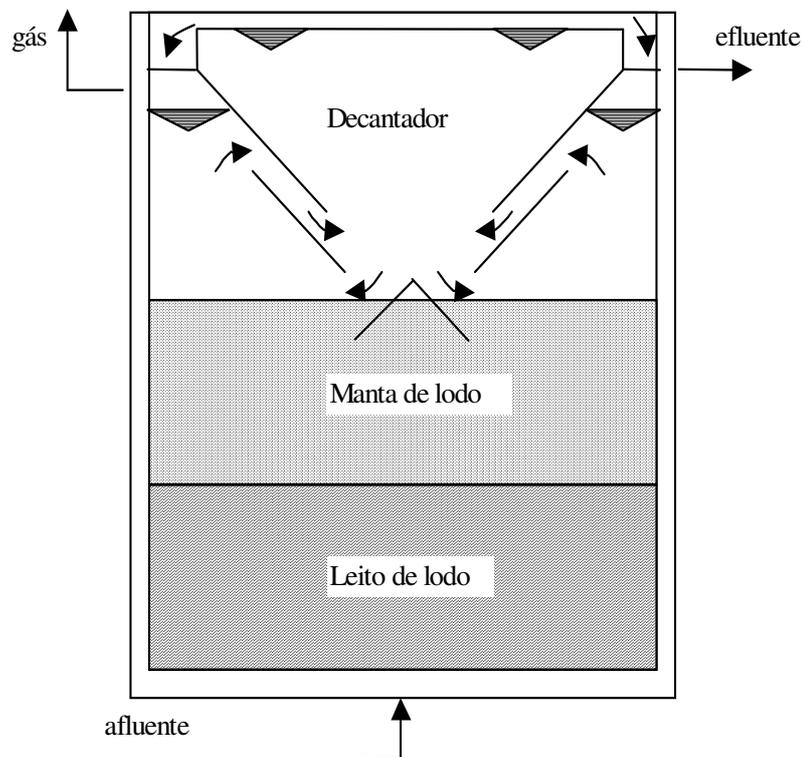
**Figura 19: Biodigestor modelo chinês.**

Fonte: Nogueira, 1986.

### 3.2.1- Digestores de Fluxo Ascendente

O processo de biodigestão, se conduzido em reatores convencionais, como os mostrados no item anterior, é relativamente lento, com tempos de retenção hidráulica do resíduo dentro do reator de vários dias, ou mesmo semanas, para se completar o processo. Este era, sem dúvida, o principal obstáculo técnico para uma eventual aplicação do processo de digestão anaeróbia para a vinhaça. No entanto, é sabido que a redução do tempo de retenção pode ser obtida mantendo-se uma elevada concentração de microorganismos no interior do reator, o que pode ser conseguido por recirculação externa ou retenção interna dos microorganismos. Os biodigestores de alta eficiência, geralmente, com fluxo ascendente, podem alcançar este objetivo.

Um dos mais importantes acontecimentos na área de tratamento de efluentes, nas décadas recentes, foi o desenvolvimento do reator de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB)<sup>23</sup>. É o biodigestor de elevada eficiência mais estudado e aplicado em todo mundo. Seu princípio é bem simples: o efluente é bombeado de baixo para cima, através do reator, que se encontra sob estritas condições anaeróbias, a uma velocidade de ascensão que varia de 0,5 a 1,5 m/h; dentro dele ocorre um processo de seleção que pode resultar no crescimento de microorganismos anaeróbios em conglomerados compactos (grânulos) de tamanho variando entre 0,5 e 5 mm. Estes grânulos são poderosos biocatalíticos que podem converter a matéria orgânica degradável em biogás, de maneira rápida e completa, com cargas de DQO variando de 10 a 25 kg DQO por



**Figura 20: Representação esquemática de um biodigestor de fluxo ascendente**

Fonte: IPT, 1990.

m<sup>3</sup> de reator por dia. Esses grânulos de biomassa também são, atualmente, valiosos

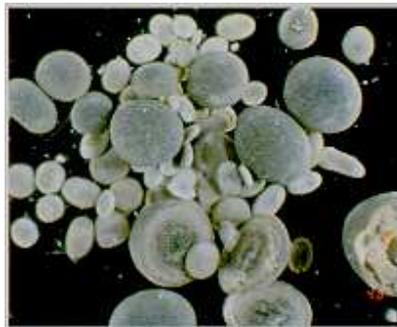
---

<sup>23</sup> Do inglês, Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor.

biocatalíticos, podendo alcançar altos preços de mercado, quando comercializados por quilo de matéria seca (Verstraete 1996).

O princípio da colônia interna de lodo bacteriano granular em suspensão foi inicialmente reportado na literatura, em 1962, por Hemens e seus colaboradores, num periódico destinado ao tratamento de efluentes (Water Waste Treatment Journal). Porém, o avanço tecnológico que permitisse utilizar este princípio só ocorreu no final dos anos 70, e foi publicado por Lettinga et alli. num periódico sobre biotecnologia (Biotechnology and Bioengineering). Desde então, algumas centenas de digestores UASB foram instalados por todo o mundo, para tratar diferentes tipos de efluentes. A representação esquemática de um reator do tipo UASB é mostrada na figura 20.

De fato, o sucesso da operação do reator depende da formação satisfatória dos grânulos no início do processo, pois ela permite à biomassa ativa ficar retida no interior do reator independentemente da velocidade do fluxo, mantendo-se uma boa eficiência de conversão a taxas de alimentação relativamente elevadas. Assim, o problema da formação dos grânulos em digestores de fluxo ascendente consiste em se conseguir uma ligação, entre as espécies bacterianas envolvidas, da ordem de nanômetros de proximidade. Verstraete et alli. (1996) e



**Figura 21: Lodo granulado**

Foto: PAQUES BV.

Schmidt et alli. (1995) citam diversos estudos sobre o tema, além de reportarem os seus próprios, fazendo um resumo do que já foi elucidado até o momento. A opinião geral é que o desenvolvimento de grânulos se dá através de uma combinação das bactérias metanogênicas no interior e das bactérias acidogênicas nos 200µm externos. Os mecanismos deste

desenvolvimento ainda não são bem conhecidos; contudo, com o aumento do emprego de digestores anaeróbios, cresce a disponibilidade de lodo granulado de alta qualidade para ser empregado em novas instalações, reduzindo significativamente o tempo de início da operação. Entretanto, embora este procedimento tenha dado bons resultados, mesmo com lodo de alta qualidade inoculado numa unidade nova, alguns problemas podem ocorrer, levando à deterioração do inóculo. Mais pesquisas, portanto, são necessárias para um melhor entendimento do comportamento das bactérias. A figura 21 mostra uma fotografia de lodo granulado.

As principais características do reator (UASB) são o sistema de distribuição do afluente e o chamado separador de três fases. No reator UASB, o substrato a ser tratado é distribuído ao longo da parte inferior, através de uma densa camada de lodo anaeróbio. O resíduo flui na direção da parte superior, passando pelo leito de lodo, no qual sua DQO é parcialmente convertida em biogás. No topo do reator, o separador de três fases atua sobre o efluente tratado, o lodo bacteriano granulado que foi arrastado e o biogás. Enquanto o biogás é retirado do sistema, o lodo granulado, mais pesado, volta a se depositar no fundo e o efluente sai pela parte mais alta do reator. Um bom contato entre o resíduo a ser tratado e o lodo anaeróbio é de fundamental importância para a performance do reator, por isso é necessário um sistema de distribuição que evite recirculação e espaços desperdiçados, e seja de fácil limpeza por causa de entupimentos. Em geral, os reatores UASB podem ser limpos durante a operação, não sendo preciso esvaziá-los para realizar a manutenção. A retenção da biomassa dentro do reator influi de maneira decisiva na capacidade de conversão da DQO em biogás, o que chama atenção, também, para a importância do separador. Este deve ser construído com um material de qualidade para minimizar os riscos de corrosão, causada quase sempre pelo  $H_2S$  presente em pequena quantidade no biogás, e permitir a inspeção e, quando necessário, a limpeza.

Várias modificações na configuração dos reatores UASB foram propostas para otimizar a performance do tratamento, o que tem proporcionado uma maior velocidade de ascensão do material em tratamento, em consequência, um menor tempo de retenção e, também, um crescimento na taxa de carga orgânica processada. A principal alteração vem acompanhando a tendência de um aumento na relação altura/diâmetro nos reatores UASB, com objetivo de melhoria do desempenho e economia de espaço, que consiste na expansão ou ampliação do leito de lodo e, portanto, maior contato do resíduo com a biomassa bacteriana. Esta idéia deu origem a

uma nova família de reatores chamados reatores de leito de lodo granular expandido (EGSB), dentre os quais está o reator de circulação interna (IC)<sup>24</sup>, mais moderno e com melhor desempenho (Driessen, 1996).

A tecnologia de circulação interna é um desenvolvimento da empresa holandesa PAQUES BV<sup>25</sup>, que possui sua patente, e utiliza o mesmo processo de separação realizado pelo separador de três fases para a retenção da biomassa. De fato, o reator IC consiste de dois reatores UASB superpostos um sobre o outro, um alimentado com alta carga orgânica e o outro com uma carga menor. Sua característica especial é a separação do biogás em dois estágios dentro do reator. O gás coletado no primeiro estágio, na metade da altura do reator, produz uma pressão ascendente que é usada para promover uma circulação interna do substrato. O sistema IC é um reator delgado com altura entre 16 e 24 m e superfície de área relativamente pequena (ver figura 22).

O afluente é bombeado para dentro do reator via sistema de distribuição, onde ocorre a mistura entre este, o lodo reciclado e o efluente. O primeiro compartimento contém o leito de lodo granular expandido e é onde a maior parte da DQO é convertida em biogás. O biogás produzido neste compartimento é coletado pelo primeiro conjunto de separadores e usado para gerar a pressão que permite que a mistura de resíduo em processamento e lodo bacteriano seja carregada pelo primeiro duto de fluxo ascendente, até um separador gás/líquido no topo, onde ocorre a separação. O biogás, livre da mistura, deixa o sistema, e esta é direcionada, pelo primeiro duto de fluxo descendente, de volta ao fundo do reator, onde é novamente misturada ao leito de lodo e ao afluente que entra no reator. O efluente do primeiro compartimento sofre um pós-tratamento no segundo (compartimento de polimento), onde a DQO restante é removida. O biogás produzido neste compartimento é coletado no separador superior, enquanto que o efluente transborda, deixando o reator (Driessen, 1996) (Verstraete, 1996).

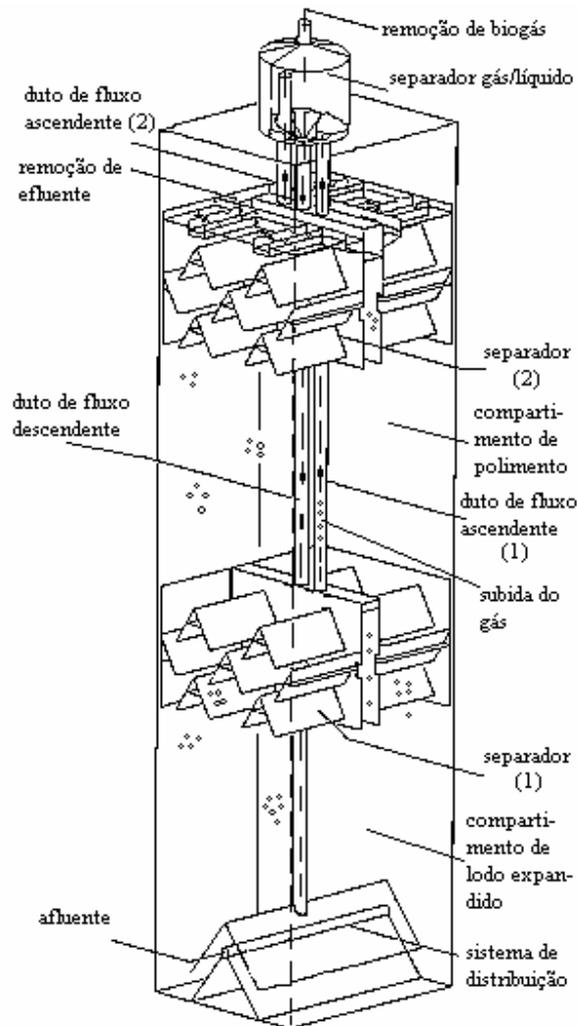
A taxa de recirculação dos reatores IC depende da DQO do afluente, pois é proporcionada, como já foi dito, pela produção de biogás, sendo, portanto, autoregulada; isto é, quanto maior a

---

<sup>24</sup> Do inglês, Expanded Granular Sludge Bed reactor e Internal Circulation reactor.

<sup>25</sup> A empresa detém a patente do sistema BIOPAC para reatores UASB e IC. No Brasil, esta tecnologia foi adquirida pela CODISTIL, com o nome de METHAX BIOPAQ, que a forneceu para diversas indústrias como a Antarctica Jaguariúna, Sucocítrico Curale, Destilaria São João, Fleischmann & Royal, entre outras.

concentração de DQO do afluente, maior a pressão do biogás produzido no primeiro compartimento e mais resíduo em processamento e lodo são recirculados pelo primeiro duto de fluxo ascendente; e, similarmente, quanto menor a concentração de DQO do afluente, menor



**Figura 22: Representação esquemática do reator IC**

Fonte: Driessen, 1996.

pressão do biogás e menor a taxa de recirculação interna do efluente.

A recirculação permite uma diluição e uma efetiva mistura do afluente adentrando no reator, ou seja, um melhor condicionamento do resíduo a ser processado. O leito concentrado de lodo anaeróbico no primeiro compartimento é expandido e fluidizado pelo fluxo elevado de

afluente, da recirculação e da produção de gás. O contato eficaz entre a biomassa e a matéria a ser processada resulta em grande atividade bacteriana, permitindo maior carga orgânica e maiores taxas de conversão. Testes comparativos mostraram que os grânulos de microorganismos nos sistemas IC chegam a apresentar até o dobro de atividade metanogênica em relação aos grânulos provenientes de reatores UASB simples (Driessen, 1996).

A retenção de biomassa bacteriana dentro do reator é realizada no compartimento superior, facilitada por uma menor taxa de alimentação deste compartimento e, portanto, um tempo de retenção relativamente maior, o que contribui, também, para a remoção quase completa da DQO. Note que, a pressão do biogás produzido no segundo compartimento, embora menor que a do primeiro, também contribui para o processo de recirculação através do segundo duto de fluxo ascendente. A turbulência produzida pelo biogás neste compartimento é relativamente baixa, assim como a velocidade superficial do líquido, já não recirculação interna nesta seção. Ambos fatores proporcionam boa retenção da biomassa, quando comparada com as condições nos reatores UASB, apesar de uma maior taxa de alimentação do afluente. Enquanto que os reatores UASB trabalham com taxa de alimentação e velocidade de ascensão de, no máximo, 15-20 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia e 1,5 m/h, espera-se que os reatores IC possam trabalhar com taxas de alimentação de até 40 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia e velocidade de ascensão de 8-10 m/h (Driessen, 1996) (Verstraete, 1996).

### **3.3- Utilização do Gás**

O biogás pode ser empregado nas aplicações termodinâmicas: geração de frio, calor e potência. Ele pode ser usado diretamente em equipamentos estacionários como fogões, lampiões, campânulas para aquecimento, conjuntos moto-bomba e conjuntos geradores, entre outros. Em motores estacionários, também pode-se utilizar o biogás produzido diretamente, porém em motores de unidades móveis é aconselhável utilizar o metano obtido a partir sua purificação e remoção do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. Isto porque o H<sub>2</sub>S pode danificar os componentes do motor e o CO<sub>2</sub> (gás inerte) ocupa um importante espaço de armazenamento. A tabela 5 mostra as características do biogás em relação a outros combustíveis.

**Tabela 5: Características do biogás e outros combustíveis**

| Combustível                         | Biogás*            | Metano           | Álcool    | Gasolina   | Diesel     |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|-----------|------------|------------|
| Quantidade                          | 1 m <sup>3</sup>   | 1 m <sup>3</sup> | 1 litro   | 1 litro    | 1 litro    |
| Poder Calorífico Inferior kJ        | 19500              | 36000            | 19812     | 32486      | 37492      |
| Peso específico kg/m <sup>3</sup>   | 1,2                | 0,72             | 809       | 739        | 876        |
| Poder Calorífico Superior           | 23400              | 50000            | 24490     | 43960      | 42800      |
| 1 m <sup>3</sup> de metano equivale | 1,5 m <sup>3</sup> | 1 m <sup>3</sup> | 1,8 litro | 1,1 litro  | 0,96 litro |
| 1 m <sup>3</sup> de biogás equivale | 1 m <sup>3</sup>   | 0,65             | 1,2 litro | 0,72 litro | 0,62 litro |

\* Biogás com 65% de metano.

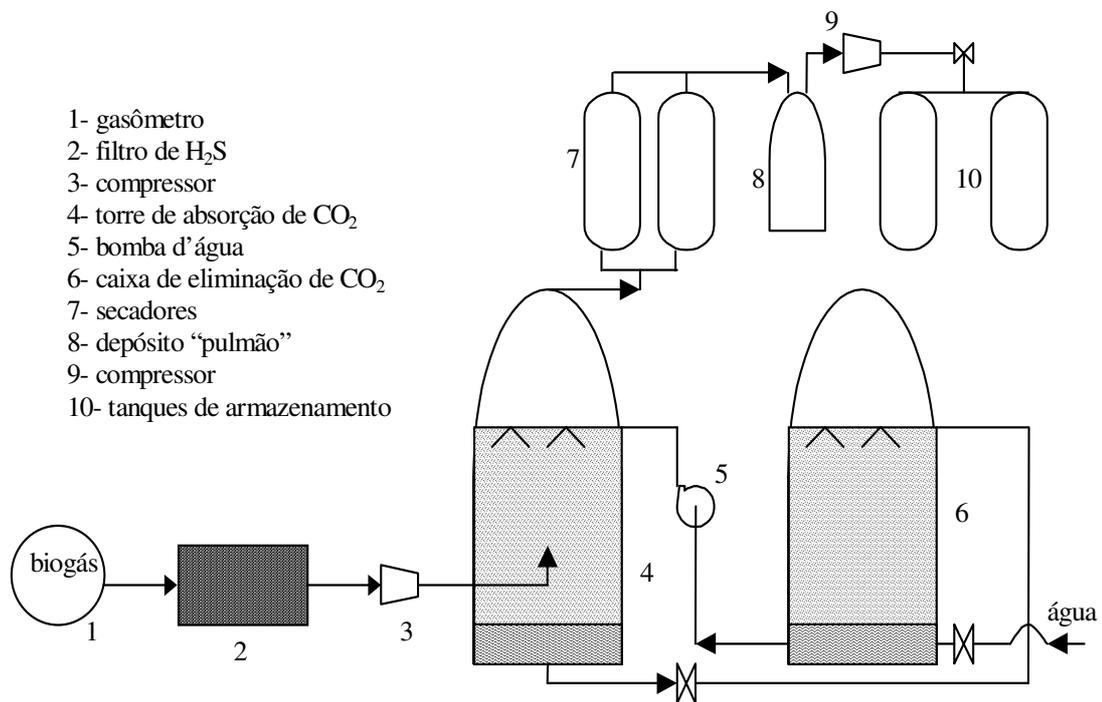
Fonte: Lucas, 1990.

Portanto, não é necessário purificar o biogás para as aplicações comuns; contudo quando o biogás deve ser comprimido a altas pressões, a purificação é recomendável, para que não se perca energia útil e nem se ocupe o reservatório inutilmente, com um gás não combustível como o CO<sub>2</sub>. O H<sub>2</sub>S não oferece muita dificuldade, dada a sua afinidade com o óxido de ferro. Assim, este gás pode ser removido de forma simples, fazendo o biogás atravessar uma esponja de ferro. Sob maior temperatura, a eficiência desta absorção é maior.

Como o CO<sub>2</sub> tem caráter ácido, pode ser absorvido por soluções alcalinas, como o hidróxido de cálcio ou sódio, ou carbonato de cálcio ou potássio. Nestas reações são formados carbonatos e bicarbonatos de diversas solubilidades, que devem ser removidos. Outro composto que pode ser usado na absorção do CO<sub>2</sub> é a monoetanolamina, cuja vantagem é permitir a regeneração. Os equipamentos que fazem a absorção do CO<sub>2</sub>, bem como os que comprimem o CH<sub>4</sub> purificado, são caros, chegando, algumas vezes, a representar mais que o dobro do custo do sistema de biodigestão (Barbeli, 1998: p.112). Mesmo com água pura é possível fazer-se a purificação do biogás, já que, como mostra a lei de Henry, a pressão de equilíbrio do CO<sub>2</sub> dissolvido na água é função direta da temperatura; ou seja, a água quente retém menor quantidade de CO<sub>2</sub>, comparativamente à água fria (Nogueira, 1986).

Através do fluxograma mostrado na figura 23, visualiza-se o encaminhamento do biogás no processo de purificação e remoção do CO<sub>2</sub>: inicialmente o biogás é armazenado em

gasômetro auxiliar (1) e, a seguir, passa por um filtro de óxido de ferro para a eliminação de  $H_2S$ ; um compressor de baixa capacidade (3) força o biogás a passar pela torre de absorção de  $CO_2$  (4); uma vez livre do  $CO_2$ , o biogás, já com 98 a 99% de metano, passa por secadores (7) a fim de reter a umidade nele contida, chegando num depósito tipo “pulmão”, que alimenta um compressor de média capacidade (9), o qual comprime o biogás já purificado nos cilindros (10). A água de lavagem proveniente da torre (4) tem sua regeneração na caixa de eliminação de  $CO_2$



**Figura 23: Estação para biogás automotivo**

Fonte: Lucas, 1990.

(6) e retorna, por intermédio de uma bomba hidráulica (5) para a torre de lavagem, fechando-se o ciclo.

O armazenamento do metano é necessário no caso de adaptação de motores de unidades automotivas. O grande entrave para ele armazenamento é que este não se liquefaz a baixa pressão e temperatura ambiente como o GLP (gás de cozinha), do que decorrem dois problemas: necessidade de grandes reservatórios para o armazenamento e pequena disponibilidade de gás junto a unidade automotiva, comprometendo a autonomia do veículo. São utilizadas,

tecnologicamente, três formas de armazenamento do metano, como mostra a tabela 6. A liquefação é conseguida pela criogenia, na qual o metano é armazenado no estado líquido em cilindros termicamente isolados à temperatura de  $-161^{\circ}\text{C}$ . O armazenamento a alta pressão mantém o metano comprimido no estado gasoso e a alternativa de adsorção armazena o metano também no estado gasoso, porém adsorvido em carvão ativado, sendo um processo relativamente simples e de custo mais baixo do que os outros anteriores.

**Tabela 6: Alternativas para o armazenamento do metano**

| Tipo de             | Características do armazenamento |                              |   |                |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---|----------------|
|                     | Pressão (atm)                    | Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Dens. do reserv. ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | Energia (kJ/l) |
| <b>Liquefação</b>   | 2                                | -161                         | 1,0   | 22300          |
| <b>Alta pressão</b> | 200                              | ambiente                     | 6,5   | 9800           |
| <b>Adsorção</b>     | 20                               | ambiente                     | 7,0   | 2640           |

Fonte: Lucas, 1990

O biogás produz uma chama limpa e transparente que serve para todas as finalidades domésticas usuais. São viáveis, como já foi dito, outras aplicações como em queimadores de fornos e caldeiras e motores de combustão interna, que podem ser do ciclo Otto ou Diesel. Nos primeiros, cuja ignição é feita por centelha, o biogás é admitido em mistura com o ar, carburado num dispositivo montado no local do filtro de ar. A pressão de fornecimento pode ser baixa e as potências são geralmente pequenas ou médias. Para que motores ciclo Diesel, de ignição por compressão, possam usar biogás, é preciso que, além da admissão da mistura de ar com biogás, seja feita, no momento correto, a injeção de uma quantidade de óleo Diesel para iniciar a queima. Estes motores são robustos e permitem maiores potências. Para teores de  $\text{CO}_2$  de até 45% não se observa dificuldade ou falha na operação dos motores, não sendo necessária, portanto, sua purificação. É importante notar que o consumo de biogás cresce inversamente ao teor de metano disponível (Nogueira, 1986).

No caso do uso do biogás em motores de veículos de transporte, é necessário de purificá-lo, obtendo um gás com 98 a 99% de metano, e armazená-lo em cilindros de aço, com uma pressão de trabalho de 200 a 220 atm. Este gás pode ser empregado sem problemas nos motores de ignição por centelha, que podem ser alimentados exclusivamente com metano ou na forma

bicombustível (gasolina ou álcool e gás metano). Para os veículos com motor de ignição por compressão, este deverá passar por um processo de mudança para ignição por centelha. Este procedimento caracteriza-se por uma grande intervenção nos motores, com modificações no conjunto de força, adequação da câmara de combustão e redução da taxa de compressão. O trabalho de Barbeli (1998) apresenta um estudo detalhado do uso de metano em veículos automotivos.

### **3.4- Digestão Anaeróbia da Vinhaça**

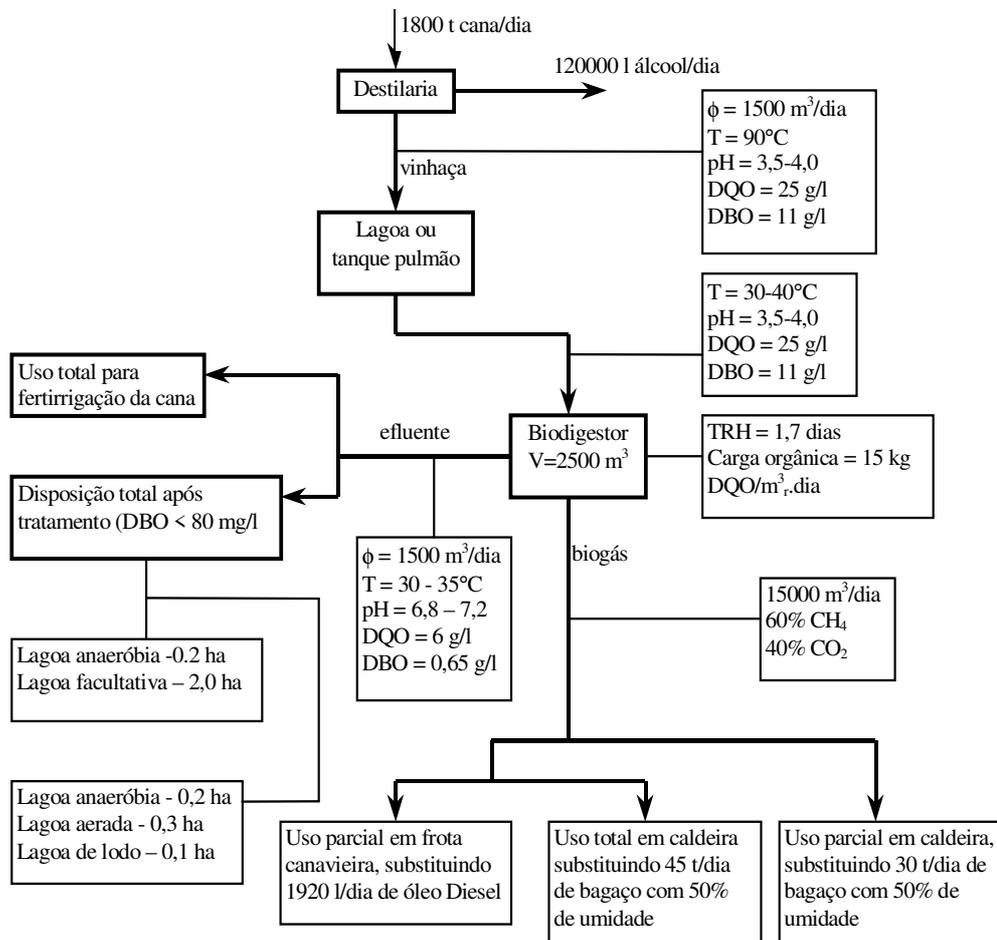
Desde o desenvolvimento do processo UASB (leito de lodo anaeróbio ascendente), este tem sido aplicado a uma grande variedade de efluentes industriais. A vinhaça, efluente produzido em grande quantidade pelas destilarias de álcool, é um resíduo apropriado para ser submetido ao tratamento anaeróbio de fluxo ascendente, devido ao seu baixo teor de sólidos totais (alta diluição) e alto potencial poluente. De fato, a possibilidade de tratar a vinhaça pelo processo de digestão anaeróbia tem sido provada por uma grande quantidade de experiências, protótipos e plantas operando em condições normais em diversas partes do mundo. Harada et alli. (1996) descrevem uma experiência, realizada na Universidade de Nagaoka, Japão, com um protótipo de reator UASB, de capacidade de 140 l, operando com vinhaça na faixa termofílica (55°C) por um período de 480 dias. Apesar das dificuldades para obtenção inicial do lodo, o processo se mostrou viável, mesmo com baixas remoções da DQO (entre 39 e 67% dependendo do período) do resíduo. Da mesma forma, Riera et alli. (1985), trabalhando com um reator UASB de 100 l para a biodigestão da vinhaça, na região açucareira da Argentina, demonstraram a viabilidade do processo, obtendo taxas de remoção da DQO acima de 75% e boa formação de lodo.

Driessen et alli. (1994), membros da empresa PAQUES (ver nota 20), realizaram um estudo sobre a digestão de vários tipos de vinhaça utilizando reatores UASB, com dados colhidos junto aos representantes da empresa no Brasil, Índia, Venezuela e Holanda. Eles mostraram a importância da escolha correta dos parâmetros para cada tipo de efluente tratado nos diferentes lugares; as taxas de remoção da DQO oscilaram entre 65 e 95%, com taxas de alimentação de até 22 kg/m<sup>3</sup>.dia. Borzacconi et alli (1995) publicaram um levantamento realizado para a América Latina sobre a situação do tratamento anaeróbio de rejeitos. Até a

metade do ano de 1994, 396 digestores, perfazendo um volume total de cerca de 400 mil m<sup>3</sup>, foram instalados e, destes, 170 destinados a resíduos da agroindústria. O Brasil possui 115 destes digestores, seguido pelo México (22) e Colômbia (10). Do total de digestores instalados, 82% são reatores UASB. Este estudo demonstra um grande potencial para o crescimento desta tecnologia no continente.

Entretanto, no Brasil, a primeira experiência de grande porte com a digestão anaeróbia da vinhaça não utilizou um reator UASB, mas um modelo tipo indiano modificado. Num convênio assinado entre a Eletrobrás e a Coperflu (Cooperativa Fluminense de Produtores de Açúcar e Álcool), instalou-se na Destilaria Central Jacques Richer, em Campos-RJ, que tinha uma produção de 180000 litros de álcool por dia, um biodigestor de 330 m<sup>3</sup>. Uma descrição cuidadosa do trabalho encontra-se em Campos (1981). Com o biodigestor em funcionamento até a desativação da destilaria em 1982, foi obtida, em média, uma eliminação de DQO de 62%, com 16,5 litros de gás, com 55% de CH<sub>4</sub>, por litro de vinhaça, com um tempo de retenção de 10 dias. O gás foi utilizado na caldeira sem nenhuma modificação nos queimadores, originalmente projetados para trabalhar com óleo combustível, no fogão a gás, no qual foram necessárias modificações na entrada de ar do queimador, e num motor Diesel estacionário. O biodigestor trabalhava na faixa mesofílica de 35°C e teve sua partida realizada por meio de inóculo de esterco de boi que, durante 60 dias, foi adaptado à vinhaça.

Em 1981, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo) iniciou uma experiência na Penedo Agroindustrial Destilaria (PAISA), em Penedo-AL, financiada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDE), em que se pesquisou a digestão anaeróbia da vinhaça a 32°C, utilizando-se dois biodigestores de fluxo ascendente com 11 e 24 m<sup>3</sup>. Os resultados foram considerados surpreendentes, com uma produção média de gás, com 65% de CH<sub>4</sub>, de 13,1 litros por litro de vinhaça, um tempo de retenção de 1,5 dias e remoção de 95% da DQO (CNI, 1982). O sucesso da experiência alimentou um grande número de trabalhos sobre as possibilidades do uso do gás, obtido da digestão anaeróbia da vinhaça, como fonte de energia alternativa aos combustíveis fósseis, menos poluente, com características descentralizadas, fortalecendo, portanto, a economia nacional, e dando, de certa forma, solução ao problema da disposição da vinhaça, agravado com a institucionalização do Proálcool. Além



**Figura 24: Exemplo de instalação industrial de biodigestão da vinhaça**

Fonte: IPT, 1990.

disso, na época, o mundo ainda estava sofrendo os impactos do segundo choque do petróleo em 1979.

De acordo com os dados operacionais da experiência na destilaria PAISA, elaborou-se o quadro mostrado na figura 24, considerando a operação de um processo de digestão na própria destilaria, que tem capacidade para a produção de 120000 litros de álcool diariamente.

Apesar da quantidade de estudos que foram realizados para a implantação de sistemas de digestão anaeróbia da vinhaça baseados na experiência na PAISA, os investimentos simplesmente não se concretizaram, tampouco o enorme potencial calculado. Não foi encontrada, na literatura especializada, nem uma linha sobre as razões que levaram a amainar

todos os ânimos levantados pela experiência descrita acima, mas é fato que, naquela época, os preços do petróleo voltaram a cair, o país adentrou-se na aventura da redemocratização e o setor privado não se mostrou disposto a arcar com o ônus do investimento numa tecnologia ainda em estado experimental, nem havia razões para tanto, sob seu ponto de vista.

Entretanto, em 1984, a CODISTIL, empresa fabricante de equipamentos para indústrias alimentícias e sucroalcooleiras, que havia comprado a tecnologia holandesa para digestores anaeróbios UASB, chamada METHAX BIOPAQ, instalou estes digestores na Usina São Luís e na Destilaria São João, ambas do mesmo grupo que o seu, o Dedini-Ometto. Na Usina São Luís, localizada em Pirassununga-SP, o projeto foi desativado pouco tempo depois; mas a Destilaria São João, cuja a capacidade é de 300 m<sup>3</sup> de álcool por dia, produzindo 300 milhões de litros de vinhaça, manteve em operação uma planta de biodigestão anaeróbia de vinhaça até o final de 1997. O projeto era parcialmente financiado pelo Governo Brasileiro e a idéia era criar uma vitrine do funcionamento da tecnologia, que servisse de incentivo para sua adoção por outras destilarias (Cortez, 1998b). Esta planta era equipada com um reator de fluxo ascendente (UASB), cuja capacidade nominal de processamento de vinhaça era de 1500 m<sup>3</sup>/dia, com carga efetiva de cerca de 1000 m<sup>3</sup>/dia e remoção de 85% da DQO, operando em temperatura mesofílica (35°C) e sendo efluente usado como fertilizante no canavial.

Foi construído um gasômetro de 600 Nm<sup>3</sup> e o biogás gerado, que tinha um teor de 70% de metano, era purificado a até 98% de metano, comprimido a 220 atm e armazenado em cilindros de 400 Nm<sup>3</sup> de capacidade. A produção média global, considerado todo o tempo de operação da planta, foi de 4274 Nm<sup>3</sup>/dia, com um pico de 7190 Nm<sup>3</sup> na safra 92/93 (ver tabela 7).

**Tabela 7: Evolução da produção total de biogás na Destilaria São João**

| Safra | Duração (dias) | Produção de biogás (60% CH <sub>4</sub> ) (Nm <sup>3</sup> ) | Produção de biogás (98% CH <sub>4</sub> ) (Nm <sup>3</sup> ) | Produção média de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> /dia) |
|-------|----------------|--|--|--|
| 86/87 | 197            | 319282   | 234704   | 1191   |
| 87/88 | 197            | 918514   | 593544   | 3012   |
| 88/89 | 169            | 1112453  | 687274   | 4067   |
| 89/90 | 176            | 1032683  | 656374   | 3729   |
| 90/91 | 213            | 1751904  | 1035200  | 4860   |

|       |     |         |         |      |
|-------|-----|---------|---------|------|
| 91/92 | 196 | 1848320 | 1126181 | 5743 |
| 92/93 | 207 | 2371946 | 1488396 | 7190 |
| 93/94 | 186 | 1778486 | 1085053 | 5834 |
| 94/95 | 204 | 1228496 | 804665  | 3944 |
| 95/96 | 147 | 514798  | 337502  | 2296 |

Fonte: Barbeli, 1998: elaborada a partir de dados obtidos junto à empresa.

O metano comprimido era utilizado para movimentar 41 veículos da destilaria que foram convertidos para o seu uso, sendo 50% da frota de caminhão e 40% da frota de veículos utilitários; a maioria era movida a álcool anteriormente. A tabela 8 mostra os dados da frota da empresa na safra de 93/94.

**Tabela 8: Dados da frota da Destilaria São João (safra 93/94)**

|   | Caminhões | Automóveis | Camionetas |
|---|-----------|------------|------------|
| Distância percorrida com álcool (km)        | 25856     | 5046       | 50242      |
| Distância percorrida com metano (km)        | 694626    | 24433      | 307510     |
| Consumo de álcool (litros)                  | 32078     | 664        | 16404      |
| Consumo de metano (Nm <sup>3</sup> )        | 480985    | 2141       | 50904      |
| Rendimento com álcool (km/l)                | 0,8       | 7,6        | 3,1        |
| Rendimento com metano (km/Nm <sup>3</sup> ) | 1,44      | 11,4       | 6,04       |

Fonte: Barbeli, 1998: elaborada a partir de dados obtidos junto à empresa.

A tabela 8 mostra que o rendimento dos veículos movidos a gás metano supera o dos outros movidos a álcool. Quanto aos caminhões a óleo Diesel, efetuada as mudanças necessárias à sua adaptação (ver item 3.3), o metano apresenta um rendimento, em muitos casos, superior (Barbeli, 1998). Entretanto, para os caminhões com motores de alta potência, os treminhões, utilizados atualmente pela indústria canavieira, não há substituto para o óleo Diesel, uma vez que ainda não foram desenvolvidos motores a gás para trabalhar nesta potência (cerca de 240 CV, contra os 130 CV dos caminhões comuns).



**Figura 25: Vista aérea da planta de digestão anaeróbia da vinhaça na Destilaria São João**

Foto: Codistil, 1995.

Embora tenha sido demonstrada a viabilidade técnica da digestão anaeróbia da vinhaça, os fatores econômicos continuam sendo um grande obstáculo a ser transposto. Assim, levando em conta a conjuntura, a Destilaria São João resolveu suspender o programa de uso do metano a partir da safra de 1996/1997. Isto porque, no caso dos motores movidos a álcool, não há interesse de substituir este combustível, pois ele é, obrigatoriamente, produzido pela destilaria, havendo, inclusive, um excedente de produção no mercado, o que faz com que seu preço se encontre a níveis baixos atualmente. Para os motores a Diesel, a empresa chegou a fazer testes com o gás metano nos treminhões, mas os resultados não foram satisfatórios, sendo constatada muita perda de potência e aumento da frequência de manutenção, principalmente dos bicos injetores. Estes problemas teriam que ser equacionados mudando a estrutura do motor, ou seja, desde a fabricação dos caminhões; porém isto exige uma mudança de estrutura que ultrapassa em muito a alçada de atuação da empresa. É importante mencionar que o atual preço do óleo Diesel não incentiva a tomada de qualquer iniciativa para a sua substituição, principalmente se foram considerados apenas os fatores de mercado. A figura 25 mostra uma fotografia aérea da planta de digestão anaeróbia da Destilaria São João.

Mas é na Usina São Martinho, em Pradópolis-SP, que a tecnologia de digestão anaeróbia da vinhaça encontrou sua implantação em bases mais sólidas no Brasil. Segunda maior usina de cana do mundo, com uma área cultivada de 100 mil hectares e moagem de mais de 6,5 milhões de toneladas por ano, a Usina São Martinho responde pela produção anual de 8 milhões de sacos

de açúcar (50kg), 300 milhões de litros de álcool e, em consequência, de, aproximadamente, 3 bilhões de litros de vinhaça.

Em 1987, iniciaram-se cuidadosos estudos para a implantação de um protótipo de reator UASB, de 75 m<sup>3</sup>, para a digestão anaeróbia da vinhaça, operando na faixa termofílica (55 a 75°C). Até então, a digestão anaeróbia termofílica havia sido provada apenas em laboratório. Existia um departamento de pesquisa e desenvolvimento na usina (atualmente desativado por razões de economia), no qual eram feitos diversos testes com os subprodutos da cana: fertilizante orgânico peletizado utilizando a torta de filtro, a vinhaça, nitrogênio e fósforo complementar; spray-drier para secagem de vinhaça; secagem de levedura com excedente de bagaço; e outros. Este departamento foi o responsável, juntamente com uma empresa de consultoria contratada externamente, pelo funcionamento do protótipo, que operou durante seis anos.

As primeiras tentativas de operação, na safra 1988/1989, não foram bem sucedidas. Contudo, no ano seguinte, após diversos problemas de funcionamento, que quase levaram novamente a sua deterioração, o processo conseguiu estabilizar-se nos últimos 50 dias da safra. Os principais problemas enfrentados estavam ligados ao domínio da técnica da biodigestão termofílica, que inclui a adaptação dos microorganismos e a granulação do lodo, muito importante para o processo. Além disso, o protótipo deveria operar na mesma condição da usina, que interrompe seu funcionamento quatro meses por ano, na entressafra. Nos 50 dias em que operou já de forma estável, a performance do protótipo foi considerada excelente, com uma carga orgânica de 26,5 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia, remoção de DQO de 71% produção de gás de 9,8 litros por litro de vinhaça, 60% de CH<sub>4</sub>, e tempo de retenção de 10, 8 horas (Souza, 1992).

Quanto aos estudos sobre o aproveitamento do biogás, consideraram-se diversas hipóteses, que se mostraram inviáveis economicamente:

- aproveitamento do biogás na frota, cujo maior obstáculo foi o baixo preço do óleo Diesel, que não incentivava qualquer investimento na sua substituição;
- uso do biogás na caldeira para substituir o bagaço, sendo necessário, então, arrumar outro destino para o bagaço. Chegou-se a cogitar a abertura, juntamente com outras usinas da

região, de uma fábrica de papel utilizando o bagaço; mas por problemas ligados à economia de escala, não havia como competir com as grandes empresas do setor papelheiro;

- gerar eletricidade; mas o baixo preço do kWh pago pela companhia de eletricidade, aumentava muito o tempo de retorno dos investimentos nos equipamentos necessários.

Contudo, existia o interesse, por parte da usina, de secar a levedura, produto pastoso proveniente das dornas de fermentação e de alto teor proteico, e comercializá-la no mercado, nacional ou internacional, no qual alcança bom preço como ração animal. Um estudo demonstrou que, para a secagem da levedura, o uso do biogás, obtido por meio da digestão anaeróbia da vinhaça, era a opção menos onerosa para a empresa, uma vez que não havia vapor excedente e o custo da sua geração implicaria em investimentos em caldeiras e outros equipamentos. Utilizando-se os resultados de testes pilotos com secagem de vinhaça, realizados anteriormente pelo departamento de pesquisa da usina, foi feita uma adaptação do queimador para secagem de levedura usando o biogás; verificou-se que não havia contaminação da levedura, obtendo-se, desta maneira, a comprovação necessária para se montar uma unidade grande de processamento da vinhaça.

Assim, devido ao sucesso da experiência com o protótipo e a uma necessidade concreta de aproveitamento do biogás, iniciou-se a montagem de um reator de 5200 m<sup>3</sup> (34 m de diâmetro e 6 m de altura, provavelmente o maior já construído no mundo), totalmente fabricado na usina; e em 1995, deu-se início à sua operação, que continua desde então.

O biogás é queimado diretamente no queimador, sem nenhum tratamento ou armazenamento. No projeto original previa-se a construção de quatro reatores para se tratar toda a vinhaça da usina. No entanto, com apenas um reator, já se obtém o biogás necessário para a secagem da produção de levedura da usina. Por esta mesma razão, ou seja, excesso de capacidade de produção de biogás em relação à quantidade de levedura a ser secada, o reator trabalha, atualmente, muito abaixo de seu potencial, com carga orgânica de 5 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia e vazão de 37 m<sup>3</sup>/h de vinhaça, secando 8 toneladas de levedura por dia; embora já tenha processado sem problemas 21 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia, com uma vazão de 170 m<sup>3</sup>/h e 40 toneladas por dia de leveduras secas.

O biodigestor processa, aproximadamente, 25% da vinhaça produzida pela usina. Foram feitos testes agronômicos com a vinhaça biodigerida na lavoura e constatada sua superioridade, como fertilizante, em relação à vinhaça “in natura”. Na vinhaça biodigerida, o nitrogênio já se encontra na forma mais disponível, sendo mais fácil a sua absorção pela planta; além disso, o pH fica na faixa de 6,5 a 7, com uma redução da matéria orgânica em 80%. Segundo técnicos da empresa, à medida que se piora a qualidade do solo, aumentam-se os ganhos com a vinhaça biodigerida, devido ao aumento da disponibilidade de nutrientes. No entanto, o efluente do biodigestor é misturado com a vinhaça não processada e segue junto com ela para a lavoura.

O relato da experiência da São Martinho com a digestão anaeróbia da vinhaça foi feito pelos próprios técnicos da usina, que se mostraram muito satisfeitos com seus resultados; são freqüentes as visitas à empresa de interessados, inclusive de autoridades internacionais, em conhecer o trabalho realizado por eles. Dados detalhados sobre o balanço financeiro do sistema não puderam ser repassados. No entanto, o montante total de investimento, incluindo as pesquisas e a instalação completa dos equipamentos foi, segundo o engenheiro responsável pelo projeto, por volta de 4,5 milhões de reais, que estão sendo pagos com a comercialização de levedura seca. Há, também, os custos de operação do biodigestor, que incluem, além da manutenção, insumos, como a soda (correção do pH), ácido fosfórico e uréia (nutrientes do lodo), destinados à manutenção dos grânulos de microorganismos, e que crescem com o aumento da carga orgânica. Na safra 1998/1999 foram produzidas 4600 mil toneladas de levedura seca, sendo uma parte destinada à exportação e a outra vendida no mercado interno, utilizando-se 5,5 milhões de Nm<sup>3</sup> de biogás (aproximadamente 25 mil Nm<sup>3</sup> por dia).

Com relação às perspectivas para o futuro da biodigestão da vinhaça na usina, sua viabilização está ligada, segundo a visão da empresa, à geração de eletricidade e sua venda para as concessionárias, dependendo, portanto, das condições do mercado de eletricidade para os produtores independentes.

Em Sopral (1986), encontram-se análises econômicas detalhadas da tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça, conduzidas por Silveira e Ribeiro, baseadas na experiência da Destilaria São João. Os autores são unânimes em afirmar que a biodigestão da vinhaça se constitui numa opção que pode se mostrar viável no curto prazo, visto que avanços tecnológico significativos vêm sendo feitos, como foi mostrado neste capítulo. Entretanto, mesmo se



**Figura 26: Reator para digestão da vinhaça na Usina São Martinho**

considerando a tecnologia de alguns anos atrás, a experiência da Usina São Martinho tem o mérito de mostrar que a digestão anaeróbia da vinhaça pode se constituir na melhor alternativa, dependendo da utilização que se fizer do biogás. Caso o sistema econômico ajuste sua estrutura de custos, incluindo efeitos externos ao mercado e os ganhos pelo melhor aproveitamento da fonte energética, uso de energia renovável, tratamento de resíduos, aumento da eficiência energética, conservação de fontes não renováveis e contribuição para a melhoria da sustentabilidade do sistema energético, o uso do biogás pode se tornar, como já foi dito no capítulo 1, um negócio rentável, superando as demais alternativas energéticas, mesmo os combustíveis derivados do petróleo, como o óleo Diesel, que estão, atualmente, com os preços mais baixos de todos os tempos.



**Figura 27: Vista do conjunto que compõe o sistema de digestão anaeróbia da vinhaça na Usina São Martinho**

No centro da fotografia está o reator, a direita, na torre, o queimador de biogás e, a esquerda, os equipamentos para o reciclo e armazenagem do efluente e estocagem do lodo.

As figuras 26, 27, 28, 29 e 30, abaixo, mostram fotografias do sistema em operação na São Martinho.



**Figura 28: Queimador para secagem de levedura utilizando o biogás na Usina São Martinho**

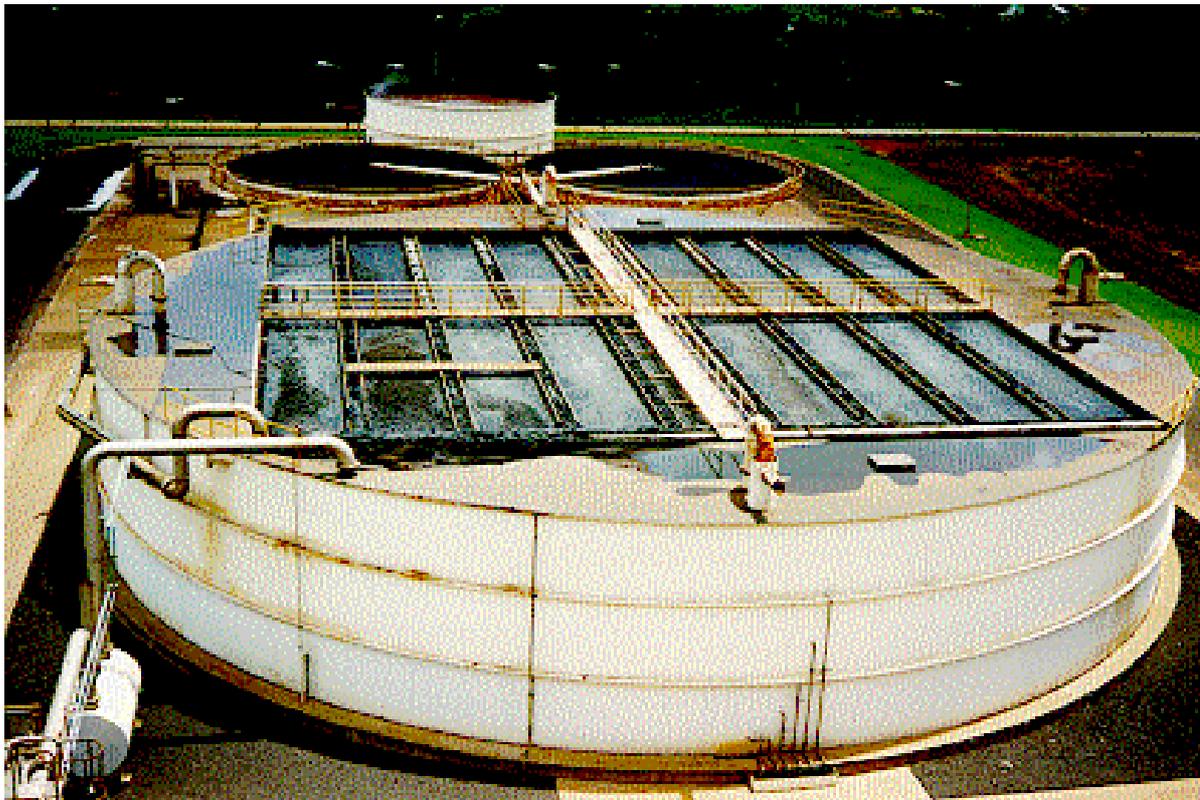
### 3.4.1- Considerações Finais

A discussão sobre o aproveitamento da vinhaça através a digestão anaeróbia, realizada neste trabalho, pode ser ampliada para incluir também a digestão de outros subprodutos da cana, como, por exemplo, o bagaço ou a própria cana inteira, abandonando o processo de fermentação do álcool e aplicando o processo de digestão anaeróbia diretamente na fonte de energia, a qual pode ser não só a cana, mas qualquer outra cultura de alto rendimento agrícola. Haandel e Catunda (1994) apresentam um artigo que analisa as diferentes possibilidades para um melhor aproveitamento da biomassa da cana, supondo um processo de digestão anaeróbia confiável e



**Figura 29: Centro de armazenagem da levedura ensacada para a venda na Usina São Martinho**

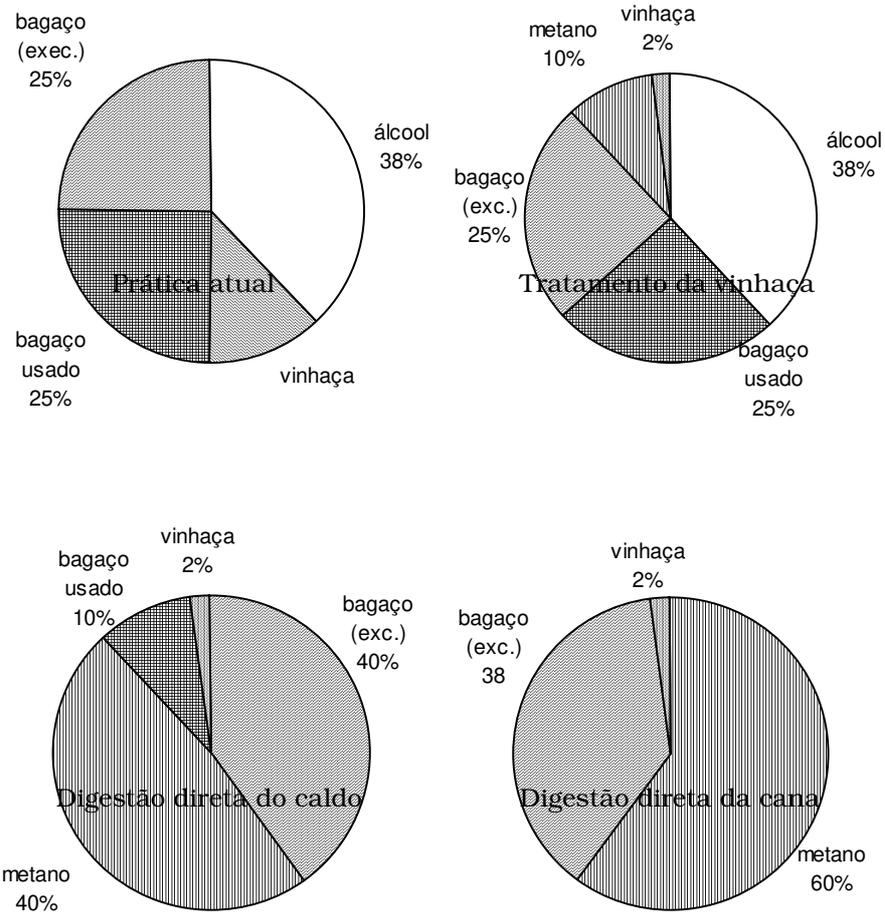
eficiente.



**Figura 30: Vista aérea do reator de digestão anaeróbia da vinhaça na Usina São Martinho**

Os autores argumentam que apenas uma pequena fração da energia da cana (38%) é aproveitada, atualmente, na forma de álcool, sendo que 12% são desperdiçadas na forma de vinhaça e 50% permanecem na forma de bagaço. Supondo que metade deste bagaço seja queimado nas caldeiras das usinas, tem-se, ainda, um desperdício de 25% da energia na forma de bagaço. Apesar de considerar que a utilização da vinhaça e do bagaço excedente como fertilizantes na lavoura ou em outras finalidades, como a alimentação de animais, representam, de alguma forma, economia de energia, Haandel e Catunda (1994) colocam que o uso da digestão anaeróbia na geração de energia seria muito mais vantajoso, produzindo, de qualquer maneira, resíduos que poderiam ser reaproveitados para estas finalidades citadas.

Sendo assim, são considerados quatro casos, incluindo a prática atual de fabrico do álcool, que são mostrados abaixo:



Sem dúvida, mais pesquisas têm que ser realizadas para avaliar o processo de digestão aplicado diretamente ao caldo e à cana; entretanto, ele implicaria, sem dúvida, a supressão da etapa de fermentação, centrifugação e destilação com todas as vantagens que isto traria em relação, principalmente, à compra de equipamentos e ao consumo de energia. Os autores citados afirmam que a energia produzida nestes casos seria igual à produzida com a prática atual de processamento da cana mais o tratamento da vinhaça; contudo, a economia de energia realizada (ela seria necessária somente na extração do caldo ou para picar a cana inteira) faria da digestão anaeróbia do caldo ou da cana um processo mais interessante do ponto de vista energético.

Pesquisas adicionais precisam ser feitas para esclarecer estes pontos, incluindo com testes de campo e de laboratório.

Não há necessidade de continuar as especulações, mas o domínio completo do processo de digestão anaeróbia e o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de utilizá-lo de forma efetiva na produção de gás, abre, certamente, novas e melhores possibilidades de obtenção de energia barata, provinda de fontes renováveis ou rejeitos de outros processos, facilitando, assim, a satisfação das necessidades da sociedade humana de uma maneira mais sustentável, isto é, aliada à preservação e conservação dos recursos para as gerações futuras.

## **Capítulo 4**

### **Digestão Anaeróbia e Exergia**

Neste capítulo é apresentada uma análise do comportamento dos custos exergéticos de uma usina de cana, na qual foi instalado um biodigestor para tratamento da vinhaça e aproveitamento do gás. São pontuadas as relações da exergia com o meio ambiente, bem como a teoria dos custos exergéticos.

#### **4.1- Exergia e Meio Ambiente**

As crescentes preocupações com a conservação de energia têm levado ao desenvolvimento de análises técnicas baseadas na segunda lei da termodinâmica, particularmente no conceito de exergia. O balanço de exergia de uma instalação industrial permite localizar e calcular as irreversibilidades no processo de produção e identificar quais equipamentos e processos afetam a eficiência global. Uma usina térmica de potência ou uma planta de processamento químico são exemplos de sistemas energéticos formados por um conjunto de subsistemas e equipamentos, os quais são interrelacionados através dos fluxos de energia e matéria processados. Estes sistemas interagem com o meio ambiente, consumindo recursos externos, que são transformados em certos produtos, e descartando resíduos. O propósito final destas transformações é aumentar o valor econômico dos produtos.

A segunda lei da termodinâmica sustenta que não há processo real reversível. Isto significa que todo processo implica irreversibilidades, ou seja, degradação de recursos energéticos. É

possível quantificar estas irreversibilidades através da exergia, uma função termodinâmica de estado. A exergia de um sistema termodinâmico é a mínima quantidade teórica de trabalho necessário para a produção deste sistema, em relação a um estado de referência, que representa os recursos que a natureza coloca à disposição, a um custo de extração considerado zero (Lozano, 1993).

As propriedades do meio ambiente que servem como estado de referência determinam a exergia de um fluxo ou sistema; assim, a exergia do meio ambiente de referência é zero; e a exergia de um fluxo ou sistema é, também, zero, quando eles estão em equilíbrio com o meio ambiente. (Lozano, 1993). Autores como Gaglioli e Petit (Gaglioli, 1980: p.15-39) e Rosen (1997) têm examinado as características teóricas do meio ambiente de referência, as quais incluem as seguintes: o ambiente de referência está em equilíbrio estável, com todas as suas partes em repouso em relação às outras; não há reações químicas ocorrendo entre os componentes do meio ambiente; este representa um sistema infinito, são uma fonte e um receptor inesgotáveis de calor e materiais; suas propriedades intensivas (temperatura, pressão, potencial químico de cada componente) permanecem constantes.

É importante notar que esta consideração é teórica, já que, de fato, o meio ambiente natural não possui as características do meio ambiente de referência. Aquele não está em equilíbrio, suas propriedades intensivas exibem variações espaciais e temporais e muitas reações químicas no meio ambiente são bloqueadas por causa da lentidão dos mecanismos de transporte necessários para se atingir o equilíbrio nas condições ambientais. Assim, a exergia do meio ambiente natural não é zero e o desenvolvimento de um modelo de meio ambiente de referência para uma análise exérgica implica em um compromisso entre as necessidades teóricas do estado de referência e o comportamento do meio ambiente natural. A tabela 9 mostra a comparação das principais características da energia e exergia.

**Tabela 9: Considerações comparando as principais características da energia e exergia**

| <b>Energia</b>  | <b>Exergia</b>  |
|---|---|
| 1. está sujeita à lei de conservação.                                     | 1. não está sujeita à lei da conservação.   |
| 2. é uma função do estado da matéria em consideração.                     | 2. é uma função do estado da matéria em consideração e da matéria em relação ao meio ambiente.  |
| 3. pode ser calculada com base em qualquer estado de referência assumido. | 3. o estado de referência é imposto pelo meio ambiente e pode variar.   |
| 4. cresce com aumento da temperatura.                                     | 4. para um processo isobárico, alcança um mínimo na temperatura do meio ambiente; a baixas temperaturas, cresce à medida que a temperatura cai. |
| 5. no caso do gás ideal, não depende da pressão.                          | 5. sempre depende da pressão.   |
| 6. para o vácuo ideal é igual a zero.                                     | 6. para o vácuo ideal é positiva.   |

Fonte: Szargut (1988).

Uma vez feita a consideração sobre o estado de referência, a exergia torna possível formular a taxa de equivalência entre os diferentes fluxos de matéria e energia de uma planta. Assim, dois fluxos ou sistemas serão termodinamicamente equivalentes, isto é, será teoricamente possível passar de um para outro sem o consumo de recursos escassos (fontes de energia) adicionais, se tiverem a mesma exergia.

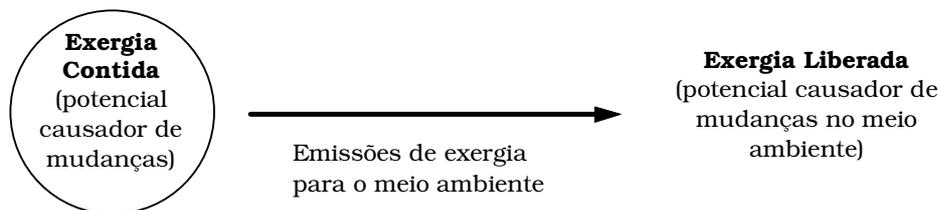
Considera-se “P” como a produção de um processo, ou produto, e “F” como os recursos consumidos, combustíveis ou insumos, para fazê-lo, ambos expressos em termos de suas exergias. Desta maneira, a seguinte equação deve ser satisfeita:  $F - P = I \geq 0$ , onde  $I = T_0 S_g$  será a quantificação, em termos da destruição de exergia, da irreversibilidade do processo, sendo  $T_0$  a temperatura de referência, em geral, do meio ambiente, e  $S_g$  a entropia de geração. Sua eficiência termodinâmica será dada por  $\eta_b = P/F \leq 1$ , um número adimensional. O inverso da eficiência definida dessa maneira representa o custo exergético unitário do produto, dado por  $k_p = F/P = 1/\eta_b \geq 1$ . Num senso estrito, a finalidade da otimização energética deve ser direcionada para minimizar o custo exergético unitário dos produtos funcionais do processo (Lozano, 1993).

Observa-se que um gerenciamento irresponsável da energia pode significar, em relação ao meio ambiente, um aumento de temperatura de algumas de suas partes, resultando em poluição térmica. Portanto, é de se supor que um aumento na eficiência energética pode reduzir o impacto

ambiental ao reduzir as perdas térmicas de energia. Diversos autores, como Szargut e Edgerton (citados por Rosen, 1997), têm sustentado que a melhor maneira de ligar segunda lei da termodinâmica e impacto ambiental é através da exergia, já que ela é uma medida do estado inicial do sistema em relação ao do meio ambiente. É provável que seja através de ações mais abrangentes, regionais ou nacionais, ao invés de projetos individuais, que a melhoria da eficiência exergética terá um maior impacto na proteção ambiental.

Portanto, um entendimento das relações entre exergia e meio ambiente pode revelar padrões e forças ainda desconhecidas afetando as mudanças ambientais causadas pelas ações humanas. Muito há para se conhecer; porém, considerando que o uso de recursos encontrados na natureza é, também, uma forma de degradação ambiental, pode-se concluir que a preservação da exergia através do aumento da eficiência, isto é, degradando-se o menos possível da exergia necessária a um determinado processo, reduzir-se-á, sem dúvida, o dano ambiental.

Em relação ao descarte de rejeitos, a exergia contida neles é um potencial causador de



**Tabela 10: Comparação entre exergia contida e exergia liberada no meio ambiente**

Fonte: Rosen (1997).

mudanças (transformações) e pode ser vista, também, como um potencial causador de impacto ambiental. Os rejeitos possuem exergia pelo fato de não estarem em equilíbrio estável com o meio ambiente, e sua emissão pode afetar o entorno tanto de forma benéfica para os seres humanos, quanto causando destruição da fauna e flora e poluição do ar, água e solo.

Neste ponto, é importante diferenciar, em relação ao meio ambiente, a exergia dos recursos da dos rejeitos. A exergia encontrada no meio ambiente na forma de recursos é de grande valor para a sociedade, podendo ser moldada, transformada ou processada de acordo com as necessidades. Já a exergia que se encontra no meio ambiente na forma de rejeitos representa um potencial causador de mudanças, muitas vezes, descontroladas e indesejadas, tendo, portanto,

um valor “negativo”. Tem-se, assim, os dois lados da questão (ver figura 31): as fontes de exergia contidas no meio ambiente são valiosas e representam a maioria dos recursos encontrados; e as emissões de exergia liberadas no meio ambiente são perigosas causadoras de danos.

Caso as emissões para o meio ambiente sejam contidas, separando-se os elementos danosos como, por exemplo, o enxofre dos gases de exaustão de uma caldeira ou a energia térmica destes mesmos gases, há dois benefícios potenciais: primeiro, o potencial causador de danos ambientais é impedido de entrar no meio ambiente; e, segundo, a emissão contida pode tornar-se uma fonte de exergia, um produto de valor econômico. Este parece ser o caso, também, do biogás obtido na digestão anaeróbia da vinhaça, na qual sua DQO e DBO (exergia química) são convertidas, por meio de microorganismos, em metano, principalmente, que é um gás combustível possuidor de diversas aplicações como energético. Da mesma forma, a elevada temperatura com que a vinhaça sai da destilaria (exergia térmica) aumenta a eficiência do processo, tornando possível a digestão termofílica sem necessidade de aquecimento do reator.

#### **4.2- Custos Exergéticos**

A forma tradicional de conduzir a avaliação de um sistema térmico é a de realizar duas análises independentes: uma termodinâmica e uma econômica. Entretanto, existem estudos que têm procurado unificar estas análises (para maiores detalhes ver Lozano e Valero, 1993). Quando se analisa o processo de formação de custo de fluxos internos e produtos de um sistema, levando em conta somente o processo físico, a variável relevante é o custo exergético ( $ex^*$ ), que é a multiplicação da exergia ( $ex$ ) pelo custo exergético unitário ( $k_p = F/P = 1/\eta_b \geq 1$ ) e que informa a quantidade de exergia necessária para produzi-los. A formação de custos depende da estrutura do sistema (relação funcional entre as unidades e fluxos) e da performance (eficiência exergética) das unidades. Uma melhoria na estrutura do sistema ou na eficiência de suas unidades implicará em menor consumo de recursos.

Quando o ambiente econômico é considerado, a avaliação aumenta pela introdução de dois fatores adicionais: preços de mercado, os quais não são necessariamente ligados à exergia dos recursos processados; e o custo de manutenção e depreciação das instalações e equipamentos

que se precisa para realizar o processo produtivo. Sob esta visão, a otimização econômica é muito mais complexa do que a puramente termodinâmica, já que inclui diversos outros fatores.

Assim, considerando-se apenas o processo físico, será analisada aqui a formação dos custos exergéticos de uma destilaria autônoma de álcool, na qual foi, hipoteticamente, instalado um equipamento para aproveitamento energético da vinhaça através do processo de digestão anaeróbica. Esse aproveitamento consiste ou na queima direta na caldeira do biogás produzido ou na purificação e compressão do metano presente neste biogás, para uso em motores a combustão interna de veículos da própria planta.

A destilaria escolhida foi a Destilaria Água Limpa, localizada no município de Monte Aprazível, Estado de São Paulo, típica região produtora de cana de açúcar. Considerada uma destilaria de porte médio, com 90000 litros de álcool por dia, como a maioria das que surgiram com a implantação do Proálcool, sua instrumentação era melhor que a encontrada normalmente nas outras destilarias ou usinas, o que permitiu uma avaliação exergética detalhada de seu funcionamento realizada por Habert (1984).

Partindo desta avaliação e acatando a consistência de seus dados experimentais, supõe-se a instalação de um biodigestor do tipo UASB para a digestão anaeróbia mesofílica de toda a vinhaça produzida na destilaria. Os dados de operação desse tipo de biodigestor correspondem ao testado pelo IPT na PAISA (ver item 3.4, figura 24), obtendo desempenho satisfatório para condições reais, conforme mostrado no capítulo 3.

Serão considerados três sistemas, comparando-se entre eles os custos exergéticos dos fluxos internos: o primeiro consiste na destilaria tal como foi vista originalmente, com a vinhaça sendo simplesmente descartada do sistema energético considerado; no segundo sistema supõe-se a instalação do biodigestor para realizar digestão anaeróbica da vinhaça e o biogás produzido é aproveitado diretamente na caldeira da usina em substituição ao bagaço; no terceiro sistema supõe-se que o metano presente no biogás seja separado do CO<sub>2</sub>, comprimido a 220 atm e utilizado na frota de veículos da destilaria em substituição ao óleo Diesel.

Como já foi mencionado, o custo exergético ( $ex^*$ ) de um fluxo, um produto ou insumo é a quantidade de exergia necessária para produzi-lo, sendo portanto uma propriedade conservativa, o que permite formular tantas equações quanto forem o número de unidades do sistema. A idéia

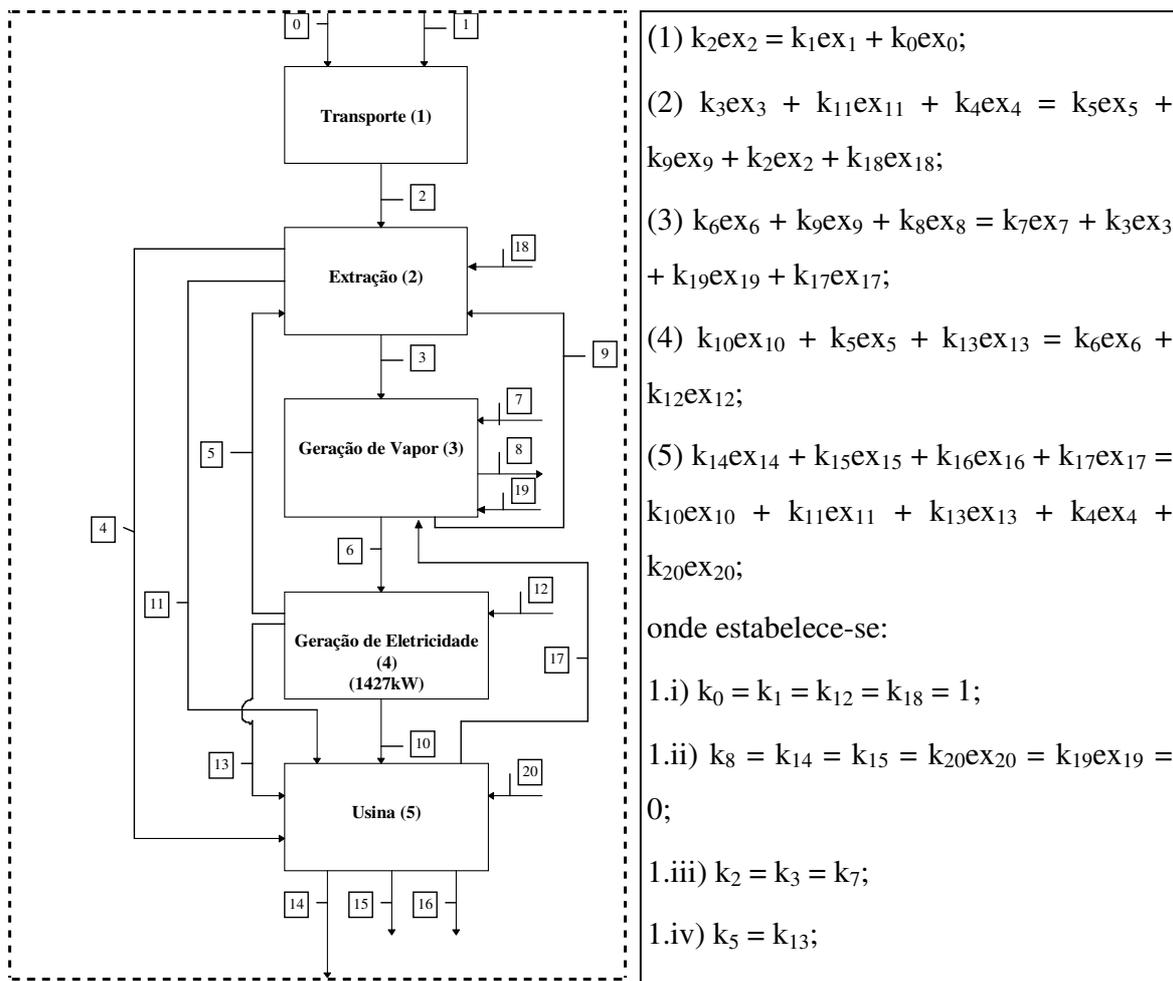


Figura 31: Sistema 1 - usina sem biodigestão

básica de uma avaliação de custos é da realização de um balanço para cada unidade, de acordo com os critérios de partição listados abaixo:

1) o custo exergético dos produtos será igual à soma das exergias dos insumos utilizados na sua produção. Isto será aplicado a cada volume de controle considerado, na forma:

$$\sum \text{custos exergéticos dos fluxos que saem} = \sum \text{custos exergéticos dos fluxos que entram.}$$

2) na ausência de uma avaliação externa, o custo exergético dos fluxos que entram no sistema (insumos) são iguais à sua exergia ( $k=1$ ).

3) na ausência de uma avaliação externa, o custo exergético dos fluxos de saída do sistema sem utilidade posterior é nulo ( $k=0$ ).

4) dependendo do número de equações que forem obtidas por meio da aplicação dos pressupostos acima, será necessário arbitrar critérios de divisão de custos para completar o número de equações, possibilitando a resolução do sistema. A maneira de realizar a repartição dos custos para cada sistema será explicada mais adiante. Contudo procurar-se-á seguir duas proposições: 4.1) se um fluxo que sai de uma unidade é parte do combustível utilizado nesta mesma unidade, então, é entendido que o seu custo exergético unitário é o mesmo que aquele fluxo de entrada que chega; 4.2) se uma unidade tem o produto composto de vários fluxos, então, o mesmo custo exergético unitário será atribuído a todos eles.

#### 4.2.1- Sistema 1

O primeiro sistema analisado é a usina sem a presença do biodigestor, com a vinhaça sendo descartada do sistema, como mostrado (figura 32). Os fluxos são mostrados, tabela 10.

O cálculo do fluxo de óleo Diesel utilizado (fluxo 1) foi feito considerando-se um total de 14,6 l álcool/l Diesel, média de consumo de Diesel nas destilarias brasileiras levantado por Ferreira (1990) (ver capítulo 2, item 2.1.4). A exergia do Diesel foi calculada com a seguinte equação retirada de Kotas (Kotas, 1978):

$$\frac{\xi_{ch}}{LHV} = 1,04224 + 0,011925 \frac{\beta}{\alpha} - \frac{0,042}{\alpha} (C_{\alpha}H_{\beta}),$$

sendo  $\xi_{ch}$  a exergia química do Diesel, LHV seu poder calorífico inferior (44109 kJ/kg), sua composição, aproximadamente,  $C_{12}H_{26}$  e sua massa específica 852 kg/m<sup>3</sup>. Para o álcool hidratado temos massa específica de 806 kg/m<sup>3</sup>.

Os valores referentes aos outros fluxos foram todos computados a partir da análise conduzida por Habert (1984). A equação (1.i) refere-se ao primeiro critério de partição de custos; (1.ii) refere-se ao segundo critério; (1.iii) e (1.v) referem-se ao critério 4.1) de partição dos custos; e, finalmente, (1.iv) refere-se ao 4.2). Isto significa que os custos do vapor de alta na saída da caldeira, do vapor de baixa na saída da turbina (geração de eletricidade) e da água de retorno que sai da usina foram considerados são iguais, pois o vapor comporta-se como um fluido de trabalho que “ganha” exergia na geração de vapor e a vai cedendo a medida que percorre o sistema. A mesma consideração foi feita em relação à cana e bagaço (fluxo 2 e 3), já que o produto da extração é caldo. Como a vinhaça é descartada (fluxo 14), seu custo exergético é nulo, assim como o das outras perdas. É importante notar que para a eletricidade comprada

(fluxo 12), atribuiu-se custo unitário exerético igual a 1 (primeiro critério de partição de custos); enquanto que para a eletricidade produzida pela usina (fluxos 5 e 13), os custos unitários são calculados normalmente, através da resolução do sistema de cinco equações, sendo buscados os valores de  $k_2$ ,  $k_4$ ,  $k_5$ ,  $k_6$  e  $k_{16}$ . A tabela 10 mostra os valores dos fluxos e resultado dos cálculos do custo unitário.

**Tabela 11: Valores numéricos referentes aos fluxos do sistema 1**

| Número | Elemento               | Fluxo (kg/h) | T (°C) | P (atm) | Exergia Específica (kJ/kg) | Exergia Total (kW) | k       |
|--------|------------------------|--------------|--------|---------|----------------------------|--------------------|---------|
| 0      | Cana                   | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,00000 |
| 1      | Diesel                 | 689          | 25     | 1       | 46975,45                   | 8990,579           | 1,00000 |
| 2      | Cana                   | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,04164 |
| 3      | Bagaço                 | 32518        | 25     | 1       | 8526,35                    | 77016,600          | 1,04164 |
| 4      | Caldo                  | 143956       | 33     | 1       | 3472,61                    | 138862,100         | 1,26325 |
| 5      | Eletricidade           |              |        |         |                            | 1411,100           | 9,78121 |
| 6      | Vapor de alta          | 32725        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 8823,000           | 5,36370 |
| 7      | Bagaço (estoque)       | 5551         | 25     | 1       | 9437,18                    | 14551,600          | 1,04164 |
| 8      | Gases de Combustão     | 178292       | 265    | 1       | 162,65                     | 8055,200           | 0,00000 |
|        | Cinzas                 | 436          | 25     | 1       | 0                          | 0                  | 0,00000 |
| 9      | Vapor de alta          | 33663        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 9076,100           | 5,36370 |
| 10     | Vapor de baixa         | 32725        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5765,418           | 5,36370 |
| 11     | Vapor de baixa         | 33663        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5930,700           | 5,36370 |
| 12     | Eletricidade           |              |        |         |                            | 278,000            | 1,00000 |
| 13     | Eletricidade           |              |        |         |                            | 294,000            | 9,78121 |
| 14     | Vinhaça (l/h)          | 137143       | 86     | 1       | -                          | -                  | 0,00000 |
| 15     | Flegmaça (l/h)         | 40806        | 100    | 1,6     | 383,27                     | 4344,408           | 0,00000 |
|        | CO <sub>2</sub>        | 10279        | 33     | 1       | 457,08                     | 1305,100           | 0,00000 |
|        | Etanol perdido         | 1915         | 25     | 1       | 33420,97                   | 17778,100          | 0,00000 |
|        | Condensados            | 27605        | 86     | 1       | 9,60                       | 73,61              | 0,00000 |
| 16     | Álcool hidratado (l/h) | 11813        | 28     | 1       | 31025,42                   | 82004,166          | 3,06532 |
| 17     | Água de retorno        | 66380        | 56     | 1       | 6,31                       | 116,319            | 5,36370 |
| 18     | Água de embebição      | 51474        | 61,5   | 1       | 8,64                       | 123,600            | 1,00000 |
| 19     | Ar                     | 140659       | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 20     | Água                   | 30395        | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |

Pode-se observar que a eletricidade traz consigo todas as irreversibilidades da geração de

vapor, por isso o seu custo exerético unitário é o mais alto. O custo do álcool, produto do sistema, foi calculado em 3,065. É importante notar que, de acordo com os dados do funcionamento da usina, obtidos, como já foi dito, de Habert (1994), a usina compra uma pequena parte da eletricidade que consome e utiliza bagaço estocado para o funcionamento da caldeira. O balanço de massa do sistema foi verificado e confere.

#### 4.2.2- Sistema 2

O próximo sistema inclui o biodigestor para o processamento da vinhaça, como mostrado na figura 33. Os fluxos são mostrados na tabela 11.

Além do que foi mencionado no sistema 1 para o caso do Diesel, tem-se que o biogás produzido pelo biodigestor é uma mistura de 60% de metano e 40% de CO<sub>2</sub> em volume. Assim, como os valores da exergia deste dois gases obtidos de Kotas (Kotas, 1978) (836510 kJ/kmol para CH<sub>4</sub> e 20140 kJ/kmol para CO<sub>2</sub>), calcula-se a exergia do biogás (509962 kJ/kmol). A partir do seu peso molecular (27,224 kg/kmol) e do seu volume específico (0,8967 m<sup>3</sup>/kg), obtém-se a exergia do biogás: 18732,080 kJ/kg.

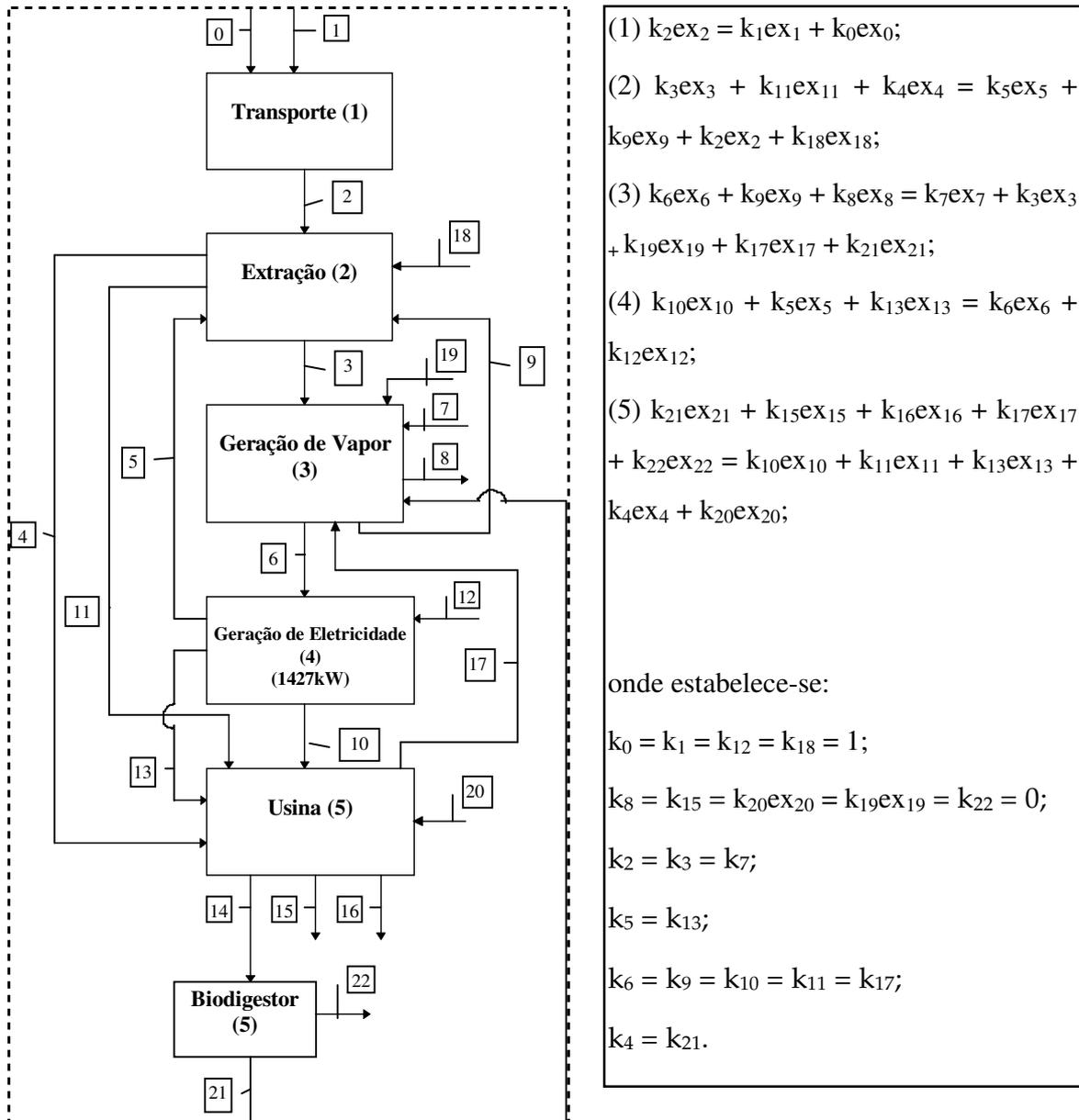
Este biogás (fluxo 19) é queimado na caldeira, substituindo aproximadamente 65% do bagaço vindo do estoque (fluxo 7), que tem, portanto, seu valor corrigido.

O cálculo do valor da exergia da vinhaça foi o maior problema enfrentado para a elaboração deste trabalho, necessitando ainda de pesquisas adicionais para se chegar a uma metodologia considerada adequada. O valor utilizado por Habert (Habert, 1984) a considera nos cálculos como sendo composta por 0,05% v/v de etanol, o que resulta num valor irreal e inadequado para sua exergia. Para contornar o problema, considerou-se o biodigestor como parte da usina (5) e o fluxo de biogás para a caldeira partindo desta. Assim, a vinhaça (fluxo 14) não participa dos cálculos. Os parâmetros para a produção de gás foram obtidos a partir do desempenho do digestor da PAISA (figura 24).

Quanto à repartição de custos, utilizou-se os mesmo critérios já mencionados, considerando ainda o custo unitário do caldo (fluxo 4) igual ao do biogás (fluxo 21).

O resultado do cálculo dos custos é apresentado na tabela 11. O custo do álcool foi calculado em 2,813, o que mostra uma melhora em virtude da realimentação do biogás, do final

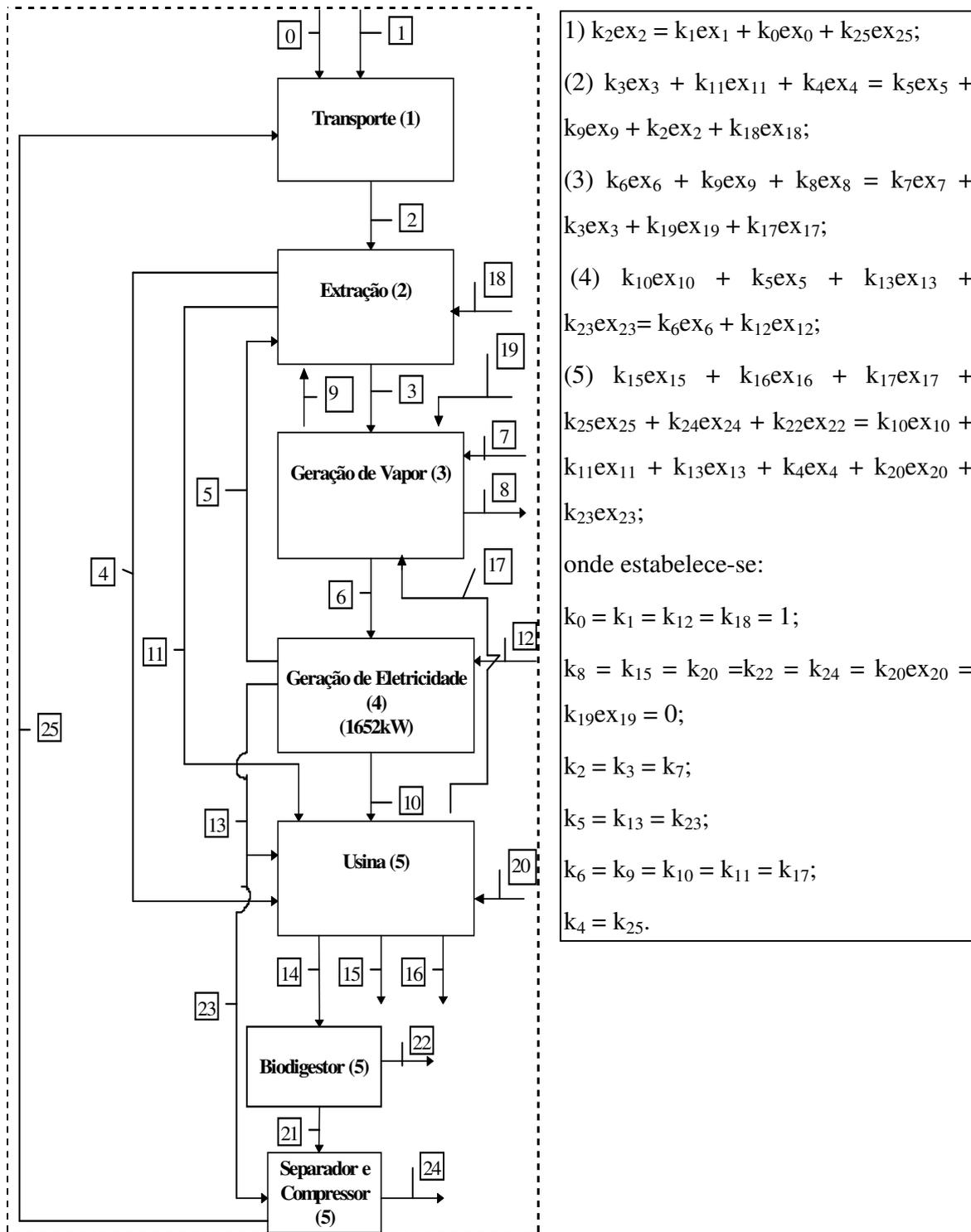
da linha, para a metade do processo, retirando parte das irreversibilidades que ficariam com o álcool. Uma análise comparativa dos três sistemas é apresentada mais adiante, após a descrição do sistema 3.



**Figura 32: Sistema 2 - usina com biodigestão da vinhaça e queima do biogás na caldeira**

**Tabela 12: Valores numéricos referentes aos fluxos do sistema 2**

| Número | Elemento                    | Fluxo (kg/h) | T (°C) | P (atm) | Exergia Específica (kJ/kg) | Exergia Total (kW) | k       |
|--------|-----------------------------|--------------|--------|---------|----------------------------|--------------------|---------|
| 0      | Cana                        | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,00000 |
| 1      | Diesel                      | 689          | 25     | 1       | 46975,45                   | 8990,579           | 1,00000 |
| 2      | Cana                        | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,04164 |
| 3      | Bagaço                      | 32518        | 25     | 1       | 8526,35                    | 77016,600          | 1,04164 |
| 4      | Caldo                       | 143956       | 33     | 1       | 3472,61                    | 138862,100         | 1,26425 |
| 5      | Eletricidade                |              |        |         |                            | 1411,100           | 9,81313 |
| 6      | Vapor de alta               | 32725        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 8823,000           | 5,38150 |
| 7      | Bagaço (estoque)            | 1981         | 25     | 1       | 9437,18                    | 5192,063           | 1,04164 |
| 8      | Gases de Combustão          | 178292       | 265    | 1       | 162,65                     | 8055,200           | 0,00000 |
|        | Cinzas                      | 436          | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 9      | Vapor de alta               | 33663        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 9076,100           | 5,38150 |
| 10     | Vapor de baixa              | 32725        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5765,418           | 5,38150 |
| 11     | Vapor de baixa              | 33663        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5930,700           | 5,38150 |
| 12     | Eletricidade                |              |        |         |                            | 278,000            | 1,00000 |
| 13     | Eletricidade                |              |        |         |                            | 294,000            | 9,81313 |
| 14     | Vinhaça (l/h)               | 137143       | 86     | 1       | -                          | -                  | -       |
| 15     | Flegmaça (l/h)              | 40806        | 100    | 1,6     | 383,27                     | 4344,408           | 0,00000 |
|        | CO <sub>2</sub>             | 10279        | 33     | 1       | 457,08                     | 1305,100           | 0,00000 |
|        | Etanol perdido              | 1915         | 25     | 1       | 33420,97                   | 17778,100          | 0,00000 |
|        | Condensados                 | 27605        | 86     | 1       | 9,60                       | 73,610             | 0,00000 |
| 16     | Álcool hidratado (l/h)      | 11813        | 28     | 1       | 31025,42                   | 82004,166          | 2,81318 |
| 17     | Água de retorno             | 66380        | 56     | 1       | 6,31                       | 116,319            | 5,38150 |
| 18     | Água de embebição           | 51474        | 61,5   | 1       | 8,64                       | 123,600            | 1,00000 |
| 19     | Ar                          | 140659       | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 20     | Água                        | 30395        | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 21     | Biogás (Nm <sup>3</sup> /h) | 1372         | 25     | 1       | 18732,08                   | 7962,129           | 1,26425 |
| 22     | Efluente (l/h)              | 137143       | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |



**Figura 33: Sistema 3 - usina com biodigestão da vinhaça, purificação do biogás e uso do metano na frota**

**Tabela 13: Valores numéricos referentes aos fluxos do sistema 3**

| Número | Elemento                             | Fluxo (kg/h) | T (°C) | P (atm) | Exergia Específica (kJ/kg) | Exergia Total (kW) | k       |
|--------|--------------------------------------|--------------|--------|---------|----------------------------|--------------------|---------|
| 0      | Cana                                 | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,00000 |
| 1      | Diesel                               | 575          | 25     | 1       | 46975,45                   | 7503,023           | 1,00000 |
| 2      | Cana                                 | 125000       | 25     | 1       | 6217,71                    | 215892,700         | 1,04339 |
| 3      | Bagaço                               | 32518        | 25     | 1       | 8526,35                    | 77016,600          | 1,04339 |
| 4      | Caldo                                | 143956       | 33     | 1       | 3472,61                    | 138862,100         | 1,25414 |
| 5      | Eletricidade                         |              |        |         |                            | 1411,100           | 8,66461 |
| 6      | Vapor de alta                        | 32725        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 8823,000           | 5,37271 |
| 7      | Bagaço (estoque)                     | 5551         | 25     | 1       | 9437,18                    | 14551,600          | 1,04339 |
| 8      | Gases de Combustão                   | 178292       | 265    | 1       | 162,65                     | 8055,200           | 0,00000 |
|        | Cinzas                               | 436          | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 9      | Vapor de alta                        | 33663        | 270    | 18,4    | 970,62                     | 9076,100           | 5,37271 |
| 10     | Vapor de baixa                       | 32725        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5765,418           | 5,37271 |
| 11     | Vapor de baixa                       | 33663        | 166,4  | 2,3     | 634,24                     | 5930,700           | 5,37271 |
| 12     | Eletricidade                         |              |        |         |                            | 278,000            | 1,00000 |
| 13     | Eletricidade                         |              |        |         |                            | 294,000            | 8,66461 |
| 14     | Vinhaça (l/h)                        | 137143       | 86     | 1       | -                          | -                  | -       |
| 15     | Flegmaça (l/h)                       | 40806        | 100    | 1,6     | 383,27                     | 4344,408           | 0,00000 |
|        | CO <sub>2</sub>                      | 10279        | 33     | 1       | 457,08                     | 1305,100           | 0,00000 |
|        | Etanol perdido                       | 1915         | 25     | 1       | 33420,97                   | 17778,100          | 0,00000 |
|        | Condensados                          | 27605        | 86     | 1       | 9,60                       | 73,61              | 0,00000 |
| 16     | Álcool hidratado (l/h)               | 11813        | 28     | 1       | 31025,42                   | 82004,166          | 2,91732 |
| 17     | Água de retorno                      | 66380        | 56     | 1       | 6,31                       | 116,319            | 5,37271 |
| 18     | Água de embebição                    | 51474        | 61,5   | 1       | 8,64                       | 123,600            | 1,00000 |
| 19     | Ar                                   | 140659       | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 20     | Água                                 | 30395        | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 21     | Biogás (Nm <sup>3</sup> /h)          | 1372         | 25     | 1       | 18732,08                   | 7962,129           | -       |
| 22     | Efluente (l/h)                       | 137143       | 25     | 1       | 0,00                       | 0,000              | 0,00000 |
| 23     | Eletricidade                         |              |        |         |                            | 252                | 1,00000 |
| 24     | CO <sub>2</sub> (Nm <sup>3</sup> /h) | 549          | 25     | 1       | 457,08                     | 45,440             | 0,00000 |
| 25     | Metano(Nm <sup>3</sup> /h)           | 823          | 25     | 220     | 46975,45                   | 1951,537           | 1,25414 |

#### 4.2.3- Sistema 3

No sistema 3, o metano produzido no biodigestor é purificado, separado do CO<sub>2</sub> e comprimido até 220 atm para ser utilizados pelos veículos da destilaria, substituindo 3200 l/d de Diesel (ver figura 24, considerando a moagem de 3000 t cana/dia), conforme figura 34. Utilizando os valores já citados, tem-se 149 kg/h de óleo Diesel substituído. Faz-se, então, necessário corrigir o fluxo 1. O sistema de purificação e compressão consome cerca de 252 kW, que serão inseridos através do fluxo 23, aumentando, portanto, a compra de eletricidade para 530 kW (fluxo 12). Os resultados são apresentados na tabela 12. O custo do álcool foi, desta vez, calculado em 2,917.

**Tabela 14: Custos exergeticos para os três sistemas**

| Número | Elemento                    | k - sistema 1 | k - sistema 2 | k - sistema 3 |
|--------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 0      | Cana                        | 1,00000       | 1,00000       | 1,00000       |
| 1      | Diesel                      | 1,00000       | 1,00000       | 1,00000       |
| 2      | Cana                        | 1,04164       | 1,04164       | 1,04339       |
| 3      | Bagaço                      | 1,04164       | 1,04164       | 1,04339       |
| 4      | Caldo                       | 1,26325       | 1,26425       | 1,25414       |
| 5      | Eletricidade                | 9,78121       | 9,81313       | 8,66461       |
| 6      | Vapor de alta               | 5,36370       | 5,38150       | 5,37271       |
| 7      | Bagaço (estoque)            | 1,04164       | 1,04164       | 1,04339       |
| 9      | Vapor de alta               | 5,36370       | 5,38150       | 5,37271       |
| 10     | Vapor de baixa              | 5,36370       | 5,38150       | 5,37271       |
| 11     | Vapor de baixa              | 5,36370       | 5,38150       | 5,37271       |
| 12     | Eletricidade                | 1,00000       | 1,00000       | 1,00000       |
| 13     | Eletricidade                | 9,78121       | 9,81313       | 8,66461       |
| 14     | Vinhaça (l/h)               | 0,00000       | -             | -             |
| 16     | Álcool hidratado (l/h)      | 3,06532       | 2,81318       | 2,91732       |
| 17     | Água de retorno             | 5,36370       | 5,38150       | 5,37271       |
| 18     | Água de embebição           | 1,00000       | 1,00000       | 1,00000       |
| 21     | Biogás (Nm <sup>3</sup> /h) |               | 1,26425       | -             |
| 22     | Efluente (l/h)              |               | 0,00000       | 0,00000       |
| 23     | Eletricidade                |               |               | 8,66461       |
| 25     | Metano(Nm <sup>3</sup> /h)  |               |               | 1,25414       |

Os critérios de partição de custo foram os mesmos dos sistemas 1 e 2, considerando desta vez o custo do caldo (fluxo 4) igual ao do metano (fluxo 25). Faz-se aqui, da mesma forma que

no sistema 2, a agregação do biodigestor e do tratamento do biogás na usina (5), desconsiderando novamente a vinhaça (fluxo 14), bem como o biogás (fluxo 21).

Um resumo do resultado dos cálculos dos custos exergéticos para os três sistemas é mostrado na tabela 13. Algumas observações são necessárias para melhor compreensão dos números apresentados na análise:

- A cana e o óleo Diesel (fluxos 0 e 1) adentram o sistema provindos do exterior, por isso, segundo o critério 2) de partição dos custos, o valor de  $k$  é fixado em 1. A mesma observação vale para o fluxo 12, que representa a eletricidade comprada pela usina. Entretanto, ao se estabelecer  $k \neq 1$  para o fluxo 12, o valor de  $k$  calculado para os fluxos 5, 13 e 23 sobe significativamente, principalmente para o sistema 3, no qual pula de 8,66461 (para  $k_{12}=1$ ) para 11,513, caso  $k_{12}$  seja incluído normalmente no cálculo. Isto ocorre porque a consideração  $k_{12}=1$ , reduz o custo total da eletricidade que, por “carregar” as irreversibilidades da produção de vapor, possui o maior custo unitário exergético do sistema;
- O custo unitário da eletricidade no sistema 1 é menor que no sistema 2 porque a realimentação do biogás saído da usina para a queima na caldeira transfere parte das irreversibilidades que ficariam com o álcool, que é o produto do final do processo, para a produção de vapor, alterando positivamente o equilíbrio do sistema;
- A queda no custo da eletricidade para o sistema 3 é atribuída ao maior volume de eletricidade comprada ( $k=1$ ), além do fato de que o metano obtido é recolocado no processo em seu início (Transporte), influenciando pouco no custo unitário da eletricidade, mas fazendo cair o custo unitário do caldo;
- Vê-se claramente uma queda nos custos unitários do álcool do sistema 1 para o sistema 2 e 3, refletindo o efeito do melhor uso da exergia da cana representado pelo aproveitamento da vinhaça através da digestão anaeróbia.

### **4.3- Considerações Finais**

O exercício apresentado neste capítulo pretendeu-se apenas ilustrativo. Por meio de uma moderna metodologia que visa considerar a segunda lei da termodinâmica na análise de sistemas

térmicos, foi demonstrado que o tratamento de vinhaça contribui para um melhor aproveitamento da biomassa da cana, como já era de se esperar.

Para uma minuciosa análise exérgica da participação da produção de biogás numa usina de cana, muitas das considerações realizadas aqui teriam que ser abandonadas e seria necessário buscar dados mais atuais do processo, do que os oferecidos por Habert (1994). A agregação feita para se contornar o problema do cálculo da exérgia da vinhaça, também, prejudica uma avaliação mais fina e, certamente, teria que ser reconsiderada. Além disso, a vinhaça ou o efluente do biodigestor são usados como fertilizantes e, portanto, seus custos exérgicos unitários teriam que ser diferentes de zero. Da mesma forma, o óleo Diesel e a eletricidade comprada da rede elétrica, antes de chegarem à usina, passam por vários processos, o que, com certeza, tornaria o seus custos exérgicos unitários maiores do que 1.

Estas são algumas considerações que aparecem à primeira vista, mas podem haver outras. Contudo, espera-se que o objetivo de enfatizar as vantagens que uma tecnologia relativamente simples, como a da digestão anaeróbia da vinhaça, pode trazer, tenha sido alcançado. Não seria leviano afirmar que um refinamento da análise exérgica feita neste capítulo, poderia revelar mais claramente o montante dos ganhos energéticos obtidos com o tratamento da vinhaça.

## Conclusões

As conclusões relacionadas à cada capítulo deste trabalho já foram sendo colocadas no decorrer dos mesmos. Vale enfatizar, porém, alguns pontos: a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça colabora diretamente para o desenvolvimento sustentável porque explora ao máximo uma fonte renovável de energia, melhorando seu rendimento energético, sem atentar contra o meio ambiente, e mesmo contribuindo para a melhoria deste, além de poder ser lucrativa, dependendo da utilização do gás e/ou da estrutura de custos considerada (item 1.4); existem diversas alternativas de tratamento da vinhaça e a escolha de uma delas envolve relações complexas entre uso pela sociedade de diferentes opções no aproveitamento de matéria e energia, a tecnologia e seus impactos na própria sociedade e no meio ambiente; (item 2.2.2.5) a fertirrigação representou um grande avanço, mas se constitui, em grande medida, num paliativo problema da disposição da vinhaça (item 2.2.2.5); a tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça, embora ainda não totalmente dominada, principalmente, na sua teoria, já encontra-se pronta para ser utilizada na prática e abre novas e melhores possibilidades de obtenção de energia (item 3.4.1); o tratamento de vinhaça e o uso do biogás contribui para diminuir os custos exergéticos de uma usina (item 4.3).

Diversos outros estudos podem ser conduzidos a partir do que foi mostrado neste trabalho. Apesar de todos os avanços tecnológicos atuais, entre eles os reatores UASB e IC, há algumas áreas relacionadas à tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça, cujo conhecimento se encontra ainda atrasado: definição e aplicação prática do conceito de sustentabilidade; implementação de políticas sustentáveis como um todo; relações entre uso da energia, sociedade e meio ambiente; estabelecimento de objetivos comuns a todos e/ou a um grupo localizado de pessoas; união de esforços para o alcance de objetivos comuns; microbiologia e comportamento do solo;

microbiologia e comportamento do solo submetidos à queimada; microbiologia e comportamento do solo submetidos à resíduos com alto DQO/DBO; microbiologia e mecanismos da digestão anaeróbia; mecanismos da formação dos grânulos de lodo; comportamento do lodo sob diferentes condições; partida de um reator para processamento de vinhaça; relação entre exergia e impacto ambiental; e, finalmente, relação entre exergia e economia.

Muito há, sem dúvida, a se fazer em todos os campos do conhecimento humano e as soluções para a maioria dos problemas que enfrentamos hoje podem ser mais simples e estarem mais próximas do que muitos imaginam.

## Bibliografia

1. Adams, W. M. *Green Development and Sustainability in Third World*. London, Routledge, 1990. p. 14-76.
2. Almeida, J. R. *O Problema da Vinhaça*. Instituto do Açúcar e do Alcool, Rio de Janeiro, 1955.
3. Almeida, J. R. Ranzani, G. Valsecchi, O. *O Emprego da Vinhaça na Agricultura*. Instituto Zimotécnico, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1950.
4. Araújo, N.Q. Visconti, A.S. Castro, H.F. Silva, H.G.B. Ferraz, M.H.A. Filho, M.S. Produção de Biomassa Fúngica de Vinhoto. *Brasil Açucareiro*, vol.88, nº6, dez/1976.
5. Bajay, S.V., *Planejamento Energético: Necessidade, Objetivo e Metodologia*. Revista Brasileira de Energia. Vol.1, nº1, 1989.
6. Barbeli, M. C. *Análise do Uso e das Possibilidades do Gás Metano Fóssil e de Biodigestão nas Frotas de Veículos em São Paulo e Outras Regiões, nos Anos 90*. Dissertação de Mestrado, orientador: Arsênio Oswaldo Sevá Filho, Unicamp, Campinas, 1998.
7. Becker, B. K. Miranda, M. *A Geografia Política do Desenvolvimento Sustentável*. Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
8. Beder, S. *The Nature of Sustainable Development*. Newham: Scribe Publications, 1993, p 3-22,
9. Benjamin, C. *Diálogo sobre Ecologia, Ciência e Política*. Editora Nova Fronteira, Unesco, 1993.

10. Bermann, C. *Energia, Meio Ambiente e Miséria: os Paradigmas da Nova Ordem*. São Paulo em Perspectiva, v.6, n. 1 e 2, p.43-51, jan/jun 1992.
11. Bittencourt, V.C. Castro, L.J.B. Figueiredo, A.A.M. Paixão, A.C.S. Polli, D.M. *Composição da Vinhaça*. Brasil Açucareiro, vol. 92, nº4, p.25-35, out/1978.
12. Boff, L. *O Despertar da Águia: o Dia-bólico e o Sim-bólico na Construção da Realidade*. Petrópolis-RJ, Vozes, 1998.
13. Bolsanello, J. Vieira, J.R. *Caracterização da Composição Química dos Diferentes Tipos de Vinhaça da Região de Campos/RJ*. Brasil Açucareiro, vol. 96, nº5, p.45-58, nov/1980.
14. Borzacconi, L. López, I. Vinas, M. *Application of Anaerobic Digestion to the Treatment of Agroindustrial Effluents in Latin America*. Water Science Technology, Vol. 32, nº 12, pp. 105-111, 1995.
15. Brasil Açucareiro, *Notas*. vol. 28 p.34, fev/1947; vol.48, p. 68, dez/1956; e vol. 49, p.4 e 101, mar/1957.
16. Brieger, F. *Observações sobre a Distribuição de Vinhaça ou Caldo de Destilaria no Estado de São Paulo*. Brasil Açucareiro, vol. 90, nº5, p.23-30, nov/1977.
17. Brundtland, Relatório Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. *Nosso Futuro Comum*. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991. p. XI-12; 29-100; 186-229.
18. Camhi, J.D. *Tratamento do Vinhoto, Subproduto da Destilação de Álcool*. Brasil Açucareiro, vol. 94, nº1, p.18-23, jul/1979.
19. Campbell, C. J. Laherrere, J. H. *The End of Cheap Oil*. Scientific American, mar/1998, p.60-66.
20. Campos, M.P. *Produção de Biogás por Digestão Anaeróbia do Vinhoto, 1ª Parte*. Brasil Açucareiro, vol. 98, nº1, p.47-53, jul/1981 (a).
21. Campos, M.P. *Produção de Biogás por Digestão Anaeróbia do Vinhoto, 2ª Parte*. Brasil Açucareiro, vol. 98, nº2, p.15-29, ago/1981 (b).
22. Canadá, Ministério da Meio Ambiente. *Economic Instruments for Environmental Protection*. Canada's Green Plan (discussion paper), 1992, p.1-10.

23. Castoriádis, C. *As Encruzilhadas do Labirinto II - Os Domínios do Homem*. Editora Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1987.
24. Castro, J. A. *The Internalization of External Environmental Costs and Sustainable Development*. Geneva: United Conference on Trade and Development (discussion papers 81), 1994.
25. Cavalcanti, C. *Desenvolvimento e Natureza: estudo para uma sociedade sustentável*. Clóvis Cavalcanti (org.), Recife, Fundação Joaquim Nabuco, 1995.
26. Cavalcanti, G. A. *A Dinâmica Econômica do Proálcool: Acumulação e Crise 1975-1989*. Revista Brasileira de Energia, Vol.2, nº1, 1992.
27. César, M.A.A. Delgado, A.A. Gaban, L.C. *Aumento do Nível de Potássio no Caldo da Cana Decorrente da Aplicação Sistemática de Vinhaça ao Solo*. Brasil Açucareiro, vol. 92, nº1, p.24-28.
28. CNI – Confederação Nacional da Indústria *Tratamento do Vinhoto*. Anais do 2º Encontro Nacional. CNI, Rio de Janeiro, 1982.
29. Coelho, S. T. Zylbersztajn, D. *Aspectos Técnicos e Econômicos da Inserção da Cogeração de Eletricidade na Matriz Energética Brasileira*. II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Unicamp, 12-14/dez/1994.
30. Coelho, S. T. Zylbersztajn, D., *Thermoeconomic Analysis of Electricity Cogeneration from Sugarcane Origin*. Third Biomass Conference of the Americas, Montreal, aug 24-29, 1997.
31. Colby, M. E. *Environmental Management in Development: The Evolution of Paradigms*. World Bank Discussion Papers. n. 80, 1990.
32. Commoner, B. *Energias Alternativas; Novas Energias para um Mundo Novo*. RJ, Record, 1986
33. Copersucar. *Aproveitamento da Vinhaça Viabilidade Técnico-Econômica*. Centro de Tecnologia da Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, Piracicaba, 1979.
34. Copersucar. *Proálcool: Fundamentos e Perspectivas*. Cooperativa dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, São Paulo, 1989.

35. Cortez, L. A. B. Braunbeck, O. Rosillo-Calle, F. Bauen, A. Larson, D. *Environmental Aspects of the Alcohol Program in Brazil*. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Florida, jul/1998 (a).
36. Cortez, L.A.B. Freire, W.J. Rosillo-Calle, F. *Biodigestion of Vinasse in Brazil*. International Sugar Journal, vol.100, n°1196, 1998 (b).
37. Cortez, L.A.B. Lora, E.S. (coord.) *Tecnologia de Conversão Energética da Biomassa*. Série Sistemas Energéticos II, Cap. X, Biodigestão, EDUA/EFEI Manaus, p.401-459, 1997.
38. Cortez, L.A.B. Lora, E.S. *Possibilidades de Incremento da Geração de Eletricidade pelo Setor Sucro-Alcooleiro no Estado de São Paulo* II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Unicamp, 12-14/dez/1994.
39. Coutinho, N. *Economia e Política Alcooleira*. Brasil Açucareiro, Vol. 87, n° 1, p.19-41, jan/1976.
40. Cruz, R.L. *Efeito da Aplicação de Vinhaça sobre o Solo e Água Subterrânea*. Dissertação de Mestrado. Orientador: Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto. USP/EESC, nov/1991.
41. Daly, H. E. *Políticas para o Desenvolvimento Sustentável*. In: Cavalcanti, C. Meio Ambiente, Desenvolvimento Sustentável e Políticas Públicas. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 1997, p. 179-192.
42. Dell Valle, A. *Planification Energetica: Desafios para su Renovacion*. Anais do Seminário Latino-Americano de Modelagem para Planejamento Energético. São Paulo. Set/1984.
43. Driessen, W. Habets, L. Schouten, T. Groeneveld, N. *New Development in Anaerobic Reactor Design for the Treatment of Industrial Effluents*. WISA Conference at Porth Elisabeth, South Africa, 20-23 May 1996.
44. Driessen, W. Tielbaard, M. Vereijken, T. *Experience on Anaerobic Treatment of Distillery Effluent with the UASB Process*. Water Science Technology, Vol. 30, n° 12, pp. 193-201, 1994.
45. Fernandes, E. S. L. Coelho, S. T. (org.) *Perspectivas do Álcool Combustível no Brasil*. IEE/USP, São Paulo, 1995.
46. Ferreira, A. L. *Demanda e Conservação de Óleo Diesel na Fase Agrícola do Proálcool*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Dissertação de Mestrado, 1992

47. Ferreira, L.L. Gonzaga, M.C. Donatelli, S. *Análise Coletiva do Trabalho dos Cortadores de Cana da Região de Araraquara, São Paulo*. FUNDACENTRO, Ministério do Trabalho, São Paulo, junho/1996.
48. Furtado, A. *A Crise Energética Mundial e o Brasil*. Novos Estudos n.11, jan/1985.
49. Gaggioli, R.A. (ed.) *Thermodynamics: Second Law Analysis*. American Chemical Society, Washington, 1980.
50. Gloeden, E. Cunha, R.C.A. Fraccaroli, M.J.B. Cleary, R.W. *The Behaviour of Vinasse Constituents in the Unsaturated and Saturated Zones in the Botucatu Aquifer Recharge Area*. Water Science Technology, vol.24, n°11, p.147-157, 1991.
51. Glória, N. A. *Emprego da vinhaça para a fertilização*. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.
52. Goodland, R. Daly, H. E. Serafy, S. *Population, Technology and Lifestyle: the Transition to Sustainability*. Island Press, Washington, D. C., 1994.
53. Goodland, R. *Environmental Sustainability and the Power Sector*. Impact Assessment. v.12, n.3, Fall/Winter 1994.
54. Goodland, R. The Case That the World has Reached Limits. In: Population, Technology and Lifestyle, Goodland, R. Daly, H. El Serafy, S. (ed.), Island Press, Washington, D. C., 1996.
55. Guarnieri, L. C. Jannuzzi, G. M. *Proálcool: Impactos Ambientais*. Revista Brasileira de Energia, Vol.2, n°2, 1992.
56. Guimarães, R. P. *Desenvolvimento Sustentável: da retórica à formulação de políticas públicas*. In: A Geografia Política do Desenvolvimento Sustentável. Becker, B. K. Miranda, M. (org.), Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.
57. Haaendel, A.C. Catunda, P.F.C. *Profitability Increase of Alcohol Distilleries by the Rational Use of Byproducts*. Water Science Technology, Vol. 29, n°8, pp. 117-124, 1994.
58. Habert, A. C. (coord.) *Thermodynamics Energetic Analysis of Alcohol Distillery: Final Report*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1984.

59. Harada, H. Uemura, S. Chen, A. C. Jayadevan, J. *Anaerobic Treatment of a Recalcitrant Distillery Wastewater by a Thermophilic UASB Reator*. *Bioresource Technology*, 55, pp. 215-221, 1996).
60. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas Encontro Estadual de Especialistas em Digestão Anaeróbia. IPT, São Paulo, 1987.
61. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990.
62. Jackson, T. *Renewable Energy: Prospects for Implementation*. Tim Jackson (ed.), Stockholm Environmental Institute, 1992.
63. Keoleian, G.A., Menerey, D. *Life Cycle Design Guidance Manual*. National Pollution Prevent Center, University of Michigan, US EPA, janeiro/1993.
64. Kitamura, P. C. *A Amazônia e o Desenvolvimento Sustentável.*, EMBRAPA, Brasília, 1994, p 11-17.
65. Kotas, T.J. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Press Inc., New york, 1978.
66. Kula, E. *Economics of Natural Resources and Environment*. Charpman & Hall, 1992.
67. Kuhn, T. *A Estrutura das Revoluções Científicas*. São Paulo : Perspectiva, 1975.
68. Larson, D.L.; Cortez, L.A.B. *Exergy analysis. Essential to effective energy management*. *Transactions of the ASAE* v 38 n 4 Jul-Aug 1995. p 1173-1178. 1995.
69. Lozano, M.A Valero, A. *Theory of the Exergetic Cost*. *Energy*, Vol. 18, nº 9, pp. 939-960, 1993.
70. Lucas, J.Jr. Silva, F.M. *Biogás: Produção e Utilização*. FCAV-UNESP, Jaboticabal, 1990.
71. Macedo, I., *Greenhouse Gas Emissions and Bio-Ethanol Production/Utilization in Brazil*. Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba, janeiro/1997.
72. Magalhães, G. *Energia e Tecnologia*. São Paulo em Perspectiva, v.6 n. 1 e 2, p.43-51, jan/jun. 1992.
73. Meadows, D. H. *Limites do Crescimento*. São Paulo, Perspectiva, 1978.
74. Moran, M. J. and Shapiro, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley Inc., 1993.

75. Moreira, I. V. *Avaliação de Impacto Ambiental – Instrumento de Gestão*. Cadernos Fundap, ano 9, n. 16, 1989, p. 54-63.
76. Morin, Edgar. *Ciência com Consciência*, Publicações Europa-América Ltda, 1982.
77. Motta, F.S. *Produza Sua Energia: Biodigestores Anaeróbios*. Recife Gráfica Editora, Recife, 1986.
78. Nogueira, L. A. H.. *Análise da Utilização de Energia na Produção de Alcool de Cana de Açúcar*, Tese de Doutorado, Orientador Isaías Macedo, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1987.
79. Nogueira, L.A.H. *Biodigestão: a Alternativa Energética*. Editora Nobel, São Paulo, 1986.
80. Norgaard, R. B. *Development Betrayed*. New York: Routledge, 1994.
81. OECD, Organization for Economic and Cooperation and Development. *Technologies for cleaner production and products. Towards technological transformation for sustainable development*. p.13-36, Paris, 1995.
82. OECD. *Technologies for Cleaner Production and Products. Towards Technological Transformation for Sustainable Development.*, Paris, 1995 p. 13-36.
83. OECD/IEA. *Expert Workshop on Life-Cycle Analysis of Energy Systems, Methods and Experience*. Paris, França, 21,22/mai/1992.
84. Pérez, L.E.B. Cortez, L.A.B. *Experiments on Vinasse Disposal Part I: Emulsification with Fuel Oils*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 13, nº04, p. 200-208, dec/1996.
85. Pérez, L.E.B. Cortez, L.A.B. *Experiments on Vinasse Disposal Part II: Rheology of Fuel Oil-Vinasse Emulsions.*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 13, nº04, p. 260-266, dec/1996.
86. Pérez, L.E.B. Cortez, L.A.B. *Experiments on Vinasse Disposal Part III: Combustion of Vinasse-#6 Fuel Oil Emulsion*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 14, nº01, p. 09-18, mar/1997.
87. Pinto, C. P. *Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Planejamento Energético*. Anais do III Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. São Paulo, jul/1998.
88. Popper, K. *The Logic of Scientific Discovery*. London : Hutchinson, 1972

89. Price, E.C. Cheremisinoff, P.N. *Biogas: Production and Utilization*. Ann Arbor Science, Michigan, 1981.
90. Rattner, H. *Tecnologia e Desenvolvimento Sustentável*. In: Hoyos, J. L. (org.) *Desenvolvimento Sustentável: um Novo Caminho?* UFPA/NUMA, , Belém, 1992, p.13-40.
91. Rezende, J.O. *Vinhaça: outra grande ameaça ao meio ambiente*. Revista Magistra, Vol. 1, Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, jun/1984.
92. Riera, F.S. Córdoba, P. Sineriz, F. *Use of the UASB Reactor for the Anaerobic Treatment of Stillage from SugarCane Molasses*. Biotechnology and Bioengineering, Vol. XXVII, pp.1710-1716, 1985.
93. Righetto, A.M. Cruz, R.L. Nogueira, M.A. *Experimental Investigation of Soil and Groundwater Impacts Caused by Vinasse Disposal*. Water Science Technology, vol.24, nº11, p.77-85, 1991.
94. Robaina, A.A. Vieira, A.R. Azeredo, D.F. Bolsanello, J. Manhães, Y.S. *Doses e Complementação Mineral da Vinhaça em Socas de Cana-de-Açúcar*. Brasil Açucareiro, vol 102, nº 1, jan/fev/1984.
95. Robinson, T. *The real value of dairy waste*. Dairy-Industries-International. 1997, 62: 3, 21, 23, 1997.
96. Rolim, M. Freire, W.J. *Solo- Vinhaça Concentrada: Aplicação na Fabricação de Tijolos*. In *Workshop Reciclagem e Re-utilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia de Ambiente Construído, Anais, p.118-123, 1996.
97. Rosen, M.A. Dincer, I. *On Exergy and Environmental Impact*. International Journal of Energy Research, Vol. 21, 643-654, 1997.
98. Rosillo-Calle, F. Cortez, L. A. B. *Towards Proalcool II – A Review of the Brazilian Bioethanol Programme*. Boimass and Bioenergy, Vol.14, nº2, p. 115-124, 1998.
99. Sachs, I. *Espaços, Tempos e Estratégias do Desenvolvimento*. SP, Vértice, 1986.
100. Sachs, I. *Ecodesenvolvimento - Crescer sem Destruir*. Edições Vértice, São Paulo, 1986

101. Sachs, R. C. *Eliminação das Queimadas e Valorização da Biomassa da Cana-de-Açúcar*. Trabalho Final Apresentado ao Curso de Extensão em Gestão Ambiental, Orientador Prof. A. C. S. Walter, UnicampCetesb, dez/1996.
102. Schmidt, J.E. Ahring, B.K. *Granulation in Thermophilic Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors*. Antonie van Leeuwenhoek, 68: 339-344, 1995.
103. Sciubba, E. *Modeling the energetic and exergetic self-sustainability of societies with different structures*. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME v 117 n 2 Jun 1995. p 75-86, 1995.
104. Scopinho, R. A. Valarelli, L. (org.) *Modernização e Impactos Sociais: O Caso da Agroindústria Sucro-alcooleira na Região de Ribeirão Preto (SP)*. FASE: Rio de Janeiro, 1995.
105. Serageldin, I. *Making Development Sustainable*. Finance & Development, v.30, n.4, p. 6-19, dec. 1993.
106. SOPRAL. *Avaliação do Vinhoto como Substituto do Óleo Diesel e Outros Usos*. Coleção SOPRAL, nº 10. Sociedade de Produtores de Açúcar e Álcool – SOPRAL, São Paulo, 1986.
107. Souza, M.E. Fuzaro, G. Polegato, A.R. *Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor*. Water Science and Technology, vol. 25, nº 7, pp. 213-222, 1992.
108. Sunkel, O. *Environment, Crisis and Development Planning*. The Environmental Dimension in Development Planning I. ECLAC/ILPES/UNEP, pp. 17-30, Santiago, 1990.
109. Szargut, J. Morris, D. R. Steward, F. R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. Hemisphere Publishing Corporation. New York, 1988.
110. Verstraete, W. de Beer, D. Pena, M. Lettinga, G. Lens, P. *Anaerobic bioprocessing of organic wastes*. World Journal of Microbiology & Biotechnology, vol.12, p.221-238, 1996.
111. Visconti, A.E.S. Ostrovski, C.M. Gimenez, P.C. Filho, M.S. *Visão Atual da Problemática do Vinhoto e Como Superá-la*. Brasil Açucareiro, vol.81, nº6, 1980.
112. Walter, A.C.S. Bajay, S.V. Nogueira, L.A.H. *Avaliação do Potencial de Cogeração do Setor Sucro-Alcooleiro no Estado de São Paulo*. II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Unicamp, 12-14/dez/1994.

113. Xavier, S. *Álcool como Carburante, Razões da sua Utilização*. Brasil Açucareiro, Vol. 76, nº 5, p.16-20, nov/1970.