

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

**BALANÇO, ANÁLISE DE EMISSÃO E  
SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub> NA GERAÇÃO DE  
ELETRICIDADE EXCEDENTE NO  
SETOR SUCRO-ALCOOLEIRO**

**FELIPE MORETON CHOHI**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia, Área de Concentração em Planejamento Energético.

**Orientador: Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO DUPAS**

**Co-orientador: Prof. Dr. ELECTO EDUARDO SILVA LORA**

Itajubá- MG  
Junho, 2004

## **Agradecimentos**

- Agradeço a Deus em primeiro lugar, por ter me dado força e conforto.
- Ao meu orientador professor Dupas pela ajuda na elaboração da dissertação e orientação. Obrigado por acreditar neste tópico tão diferente e me dar forças para continuar.
- Ao meu co-orientador professor Electo pela participação na visita a usina Barra Grande e as valiosas referências tanto na usina como no Centro Tecnológico Copersucar. Por me ensinar mais a respeito do setor sucro-alcooleiro e pelos valiosos comentários feitos na minha dissertação.
- Aos professores Bortoni e Roberto Alves pelas valiosas dicas nos seminários.
- Ao Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos, NEST pelo apoio, em especial de alguns de seus membros como a Vanisa, a Karina, o Joaquim e o Vladimir.
- Aos engenheiros das usinas Equipav S.A. Açúcar e Álcool e Barra Grande pela recepção calorosa.
- Aos meus pais e minha irmã por sempre estarem preocupados.
- À minha namorada Evana por me ajudar nas horas difíceis e a toda sua família,
- A todos os amigos e colegas do programa.
- Obrigado.

Dedico a Evana, o amor da minha vida,  
por toda presença, apoio e paciência, que  
foram fundamentais ao escrever esta  
dissertação, te amo muito.

## SUMÁRIO

	Página
Lista de Tabelas.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos.....	vii
Lista de Equações.....	ix
Resumo.....	x
<i>Abstract</i> .....	xi
<b>Capítulo 1- Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 2- Objetivos</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 3- Revisão bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
3.1- Panorama energético no Brasil e no mundo e impactos ambientais.....	4
3.1.1- Tendências e problemas de demanda e oferta de energia no Brasil e no mundo.....	4
3.1.2- A energia renovável no Brasil e no mundo e a Geração Distribuída.....	6
3.1.3- A produção de eletricidade e impactos ambientais.....	8
3.2- A cogeração a partir de biomassa do setor sucro-alcooleiro.....	10
3.2.1- A cogeração, conceitos e definições.....	10
3.2.2- Capacidade instalada e potencial no setor sucro-alcooleiro no Brasil e no mundo.....	11
3.2.3- A cogeração como opção de diversificação para o setor sucro-alcooleiro.....	16
3.2.4- Incentivos e barreiras à implementação.....	18
3.2.5- Tecnologias, operação e aproveitamento máximo da biomassa para aumento da produção de eletricidade excedente.....	20
3.3- Oportunidades através do Protocolo de Kyoto.....	23
3.3.1- Definições e conteúdo da convenção do clima e do Protocolo de Kyoto.....	24
3.3.2- Os mecanismos de flexibilidade .....	25
3.3.3- Situação atual do Protocolo de Kyoto e perspectivas para o futuro.....	27
3.3.4- A convenção do clima e o Protocolo no cenário nacional.....	29
3.4- Estudo sobre a metodologia de cálculo do seqüestro e emissão de CO <sub>2</sub> .....	30
3.4.1- Avaliação de ciclo de vida.....	30
3.4.2- Metodologia de cálculo do seqüestro de CO <sub>2</sub> .....	31
3.4.3- Metodologia de cálculo da emissão de CO <sub>2</sub> .....	32
<b>Capítulo 4- Metodologia</b> .....	<b>34</b>
4.1- Materiais.....	34
4.2- Métodos.....	34
4.2.1- Estudo de casos.....	36
4.2.2- Fronteiras de estudo e suas características.....	37
4.2.3- Biomassa da cana-de-açúcar e o seqüestro de CO <sub>2</sub> atmosférico.....	42
4.2.4- Emissões diretas e indiretas de CO <sub>2</sub> no ciclo de vida.....	47
4.2.5- Investimentos previstos através do mercado de créditos de carbono para diferentes formas de geração de eletricidade.....	50

<b>Capítulo 5- Resultados e análise</b> .....	52
5.1- Fração de bagaço utilizado.....	52
5.2- O seqüestro de CO <sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar.....	55
5.3- A emissão de CO <sub>2</sub> na produção de eletricidade.....	60
5.3.1- Emissão de CO <sub>2</sub> através do uso da biomassa da cana-de-açúcar.....	60
5.3.2- Emissão de CO <sub>2</sub> por fontes indiretas.....	61
5.4- Balanço de massa dos fluxos entre emissão e seqüestro de CO <sub>2</sub> .....	66
5.5- Análise comparativa da emissão de CO <sub>2</sub> por diferentes fontes de produção de eletricidade .....	67
<b>Capítulo 6- Conclusão</b> .....	71
Referências bibliográficas.....	74
Glossário.....	79
ANEXO I- Questionário aplicado nas visitas às usinas.....	81

**Lista de Tabelas**

	Página
Tabela 3.1- Consumo de energia por fonte no Brasil em 1979 e 2000 (PJ). Fonte: ESD (2002).....	5
Tabela 3.2- Fatores de emissão de CO <sub>2</sub> para alguns combustíveis e fontes de emissão (KgCO <sub>2</sub> por GJ ou unidade específica).....	9
Tabela 3.3- Potência instalada e potencial técnico para geração de energia no setor sucro-alcooleiro (MW). Fonte: ANEEL (2003).....	12
Tabela 3.4- Demanda e consumo comercializados pelo setor sucro-alcooleiro junto ao sistema elétrico do Estado de São Paulo, 1988- 1995 (MW e MWh). Fonte: SOUZA e BURNQUIST (2000).....	15
Tabela 3.5- Potencial de cogeração considerando aproveitamento de 30% da palha. Fonte: LORA (2003).....	22
Tabela 3.6- Proposta de redução de emissões para Kyoto (mtCarbono). Fonte: CEBDS (2003).....	25
Tabela 3.7- Emissões per capita e emissões totais de CO <sub>2</sub> para alguns países (toneladas métricas de CO <sub>2</sub> ). Fonte: EARTHTRENDS (2003).....	28
Tabela 3.8- Potencial comercial (longo prazo) de energia renovável no Brasil e redução de emissões de carbono atmosférico. Fonte: CENBIO (2000).....	30
Tabela 5.1- Condições de referência do ambiente.....	52
Tabela 5.2- Dados de exergia dos fluxos de água e vapor.....	52
Tabela 5.3- Dados dos turbogeradores.....	53
Tabela 5.4- Dados dos turboacionadores.....	54
Tabela 5.5- Detalhes do processo.....	54
Tabela 5.6- Alocação final do combustível através da exergia.....	54
Tabela 5.7- Energia exportada em três usinas brasileiras.....	55
Tabela 5.8- Produção total de biomassa seca (Kg) para produção de eletricidade excedente no primeiro corte, cana-planta (33,5 tC/ha/cana planta).....	56
Tabela 5.9- Produção total de biomassa seca (Kg) para produção de eletricidade excedente em um corte típico, ciclo 5 cortes (29,5 tC/ha/soqueira).....	57
Tabela 5.10- Seqüestro equivalente de CO <sub>2</sub> no primeiro corte da biomassa da cana-de-açúcar para produção de eletricidade excedente (33,5 tC/ha/cana planta) .....	58
Tabela 5.11- Seqüestro equivalente de CO <sub>2</sub> da biomassa da cana-de-açúcar para um corte típico do ciclo de 5 cortes (29,5 tC/ha/soqueira).....	59
Tabela 5.12- Emissão de CO <sub>2</sub> total da biomassa incluída dentro das fronteiras da produção de eletricidade excedente (Kg CO <sub>2</sub> /ha/ciclo de vida).....	61
Tabela 5.13- Emissões indiretas de CO <sub>2</sub> em um ciclo de vida da produção de eletricidade excedente do setor sucro-alcooleiro (Kg CO <sub>2</sub> /ha/ciclo de vida).....	62

---

Tabela 5.14- Balanço de CO <sub>2</sub> no uso da biomassa do <i>Miscanthus</i> como combustível.....	70
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## Lista de Figuras

	Página
Figura 3.1- Aumento no consumo de energia para algumas fontes de energia renovável no Brasil, entre 1979 e 2000 (PJ). Fonte: ESD (2002).....	6
Figura 3.2- Consumo para cada fonte de energia como uma porcentagem da demanda total no Brasil, em países industrializados e em países em desenvolvimento. Fonte: ESD (2002), CENBIO (2003).....	7
Figura 3.3- Produção de energia elétrica e mecânica dos sistemas de cogeração no Brasil entre 1980 e 1995 (GWh). Fonte: HORTA (1997).....	11
Figura 3.4- Potencia instalada e potencial de geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro (MW). Fonte: CENBIO (2001).....	13
Figura 3.5- Porcentagem da participação de cada região do país no potencial de geração de excedentes na indústria sucro-alcooleira. Fonte: CENBIO (2000).....	14
Figura 3.6- Potencial para geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro nas mesorregiões da região Centro-Oeste (MW). Fonte: ANEEL (2003).....	14
Figura 3.7- Potencial de geração de eletricidade excedente nas mesorregiões da região Norte do Brasil (MW). Fonte: ANEEL (2003).....	15
Figura 3.8- Fotografia dos topos e folhas da cana-de-açúcar deixados no campo após a colheita.....	17
Figura 3.9- Fotografia da palha seca da cana-de-açúcar deixada no campo após a colheita.....	18
Figura 3.10- Contribuição dos gases do efeito estufa para o aquecimento global. Fonte: GOLDEMBERG (1998).....	24
Figura 3.11- Contribuições para o efeito estufa. Fonte: GOLDEMBERG (1998).....	29
Figura 4.1- Fluxograma da metodologia utilizada.....	35
Figura 4.2- Mapa de localização das usinas.....	36
Figura 4.3- Em negrito são mostradas as fronteiras de estudo- fases de 1) a 6) envolvidas na produção de eletricidade excedente em usinas sucro-alcooleiras.....	37
Figura 4.4- Fotografia mostrando a vinhaça (ou vinhoto) resíduo do processo industrial utilizado como fertilizante. Fonte (CHOHFI (2003).....	39
Figura 4.5- Fotografia das soqueiras da cana-de-açúcar com 3 semanas no período de crescimento após a colheita. Fonte CHOHFI (2003).....	39
Figura 4.6- Fotografia da máquina colhedeira e o caminhão agrícola. Fonte CHOHFI (2003).....	40
Figura 4.7- Fotografia mostrando a operação de transporte dos colmos da lavoura até a Usina. Fonte CHOHFI (2003).....	41
Figura 4.8- Sistema de cogeração no setor sucro-alcooleiro.....	41
Figura 4.9- Fotografia mostrando um depósito de bagaço, o combustível usado para produção de energia. Fonte CHOHFI (2003).....	41



Figura 4.10- Fotografia mostrando as raízes da biomassa. Fonte CHOHFI (2003).....	43
Figura 4.11- Fotografia da torta de filtro após a moagem. Fonte CHOHFI (2003).....	44
Figura 4.12- Fotografia do melão sendo retirado durante o processo de produção do açúcar. Fonte CHOHFI (2003).....	44
Figura 4.13- Biomassa da cana-de-açúcar em suas várias formas. Fonte: dados adaptados de ALEXANDER (1973) e BEEHARRY (2001).....	45
Figura 4.14- Emissões indiretas no ciclo de vida de geração de eletricidade excedente. Fonte: dados adaptados HORTA (1987), MACEDO (2003) e LEWANDOWSKI (1995).....	49
Figura 4.15- Cenário <i>baseline</i> de emissão de carbono (KgC/MWh). Fonte: LORA (2003).....	51
Figura 5.1- Diagrama simplificado da planta de cogeração em estudo.....	53
Figura 5.2- Fração de bagaço utilizado na produção de eletricidade excedente.....	55
Figura 5.3- Equivalente seqüestro total para cada componente de uma produção de de cana-de-açúcar que irá gerar eletricidade excedente (KgCO <sub>2</sub> /ha/ciclo de vida).....	60
Figura 5.4- O balanço de CO <sub>2</sub> na produção de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro.....	67
Figura 5.5- Comparação do cenário de CO <sub>2</sub> de algumas diferentes formas de geração de eletricidade (KgCO <sub>2</sub> /GJ).....	68

**Lista de abreviaturas, siglas e símbolos**

- ANEEL- Agencia Nacional de Energia Elétrica
- Bar- Medida de pressão =  $0,019716\text{Kgf/cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$
- BEC- Balanço Energético Consolidado
- BEN- Balanço Energético Nacional
- BIG/GT- *Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine*
- BNDES- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CEBDS- Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
- CENBIO- Centro Nacional de Referência em Biomassa
- CHESF- Companhia Hidroelétrica do São Francisco
- COPERSUCAR- Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
- CPFL- Companhia Paulista de Força e Luz
- COP- Conferência das Partes
- COVs- Compostos Orgânicos Voláteis
- CTC- Centro Tecnológico Copersucar
- CO- Monóxido de carbono
- CO<sub>2</sub>- Dióxido de carbono
- CH<sub>4</sub>. Metano
- EFEI- Escola Federal de Engenharia de Itajubá
- ESALQ- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz
- EUA- Estados Unidos da América
- FINEP- Financiadora de Estudos e Projetos
- GCE- Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica
- GD- Geração Distribuída
- GEE- Gases de Efeito Estufa
- GIEDS- Grupo de Investigação em Energia e Desenvolvimento Sustentável, Portugal
- GJ- Gigajoule, energia=  $10^9 \text{ J}$
- GWh- Gigawatt-hora, energia.
- ha- Hectare ( $10.000\text{m}^2$ )
- ICINAZ- Instituto Cubano de Investigaciones Cana de Azúcar
- kJ- Quilojoule, energia=  $10^3 \text{ J}$
- Kgf/cm<sup>2</sup>- Medida de pressão
- kWh- Quilowatt-hora, energia.
- Kcal= 4,187kJ
- kW- Quilowatt, potencia=  $10^3 \text{ W}$
- MCT- Ministério de Ciência e Tecnologia
- MDL- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- MMA- Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazonia Legal

MME- Ministério de Minas e Energia  
MtCarbono- Milhões de toneladas de carbono equivalentes  
MW- Megawatt, potencia=  $10^6$ W  
NO<sub>x</sub>- Óxidos de nitrogênio  
NREL- *National Renewable Energy Laboratory, EUA*  
OCED- Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento  
PCH- Pequena Central Hidrelétrica  
PCI- Poder Calorífico Inferior  
PJ- Perajoule=  $10^{15}$ J (ver).  
PROINFA- Programa Nacional de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia  
SETAC- Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental  
SO<sub>2</sub>- Óxidos de enxofre  
tb- Toneladas de bagaço  
tC- Toneladas de cana  
tCarbono- Toneladas de carbono  
tEP- Tonelada equivalente de petróleo  
TG- Terajoule=  $10^{12}$ J  
UFRJ- Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UNEP- *Collaborating Center on Energy and Environment*  
UNIDO- *United Nations Industrial Development Organization*  
UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá  
USP- Universidade de São Paulo  
%- Por cento

**Lista de Equações**

Página

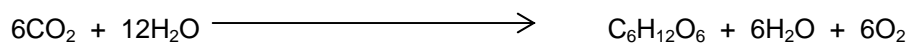
(1) Equação para a produção de biomassa seca na cana-de-açúcar, ( $\gamma_{bs}$ ).....46

$$\gamma_{bs} = \gamma_{total} \times (1 - \%u), \quad \gamma = \text{produção}$$

(2) Equação para cálculo do total de carbono contido em cada componente (base seca) da cana-de-açúcar, (C bs).....46

$$C_{bs} = (\gamma_{bs}) \times (\%c)$$

(3) Equação química da fotossíntese.....46

(4) Equação para cálculo do seqüestro de CO<sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar.....47

$$CO_{2abs} = (C_{bs}) \times \left( \frac{44}{12} \right)$$

(5) Equação para cálculo da emissão de O<sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar.....47

$$O_{2em} = CO_{2abs} \times \left( \frac{192}{264} \right)$$

(6) Equação da exergia do vapor, (eV).....52

$$e_v = \dot{m} \times (h - h_0) - T_0 \times (S - S_0)$$

## Resumo

Ao longo dos últimos anos, as atividades de pesquisa acerca dos problemas ambientais globais causados pelas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm sido intensificadas. O mercado de créditos de carbono é um grande esforço na busca pela minimização dos efeitos do gás, pois possibilita incentivos para que os países desenvolvidos e em desenvolvimento tenham estímulo a não incorporarem em suas matrizes energéticas, fontes de energia mais propícias à emissão de CO<sub>2</sub>.

O presente trabalho estuda o balanço de emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> no setor sucro-alcooleiro. Utilizando metodologia de avaliação de ciclo de vida da produção de eletricidade excedente, é calculado o balanço de CO<sub>2</sub>. Os resultados obtidos mostram que 145,3 toneladas de CO<sub>2</sub>/hectare/ciclo são seqüestradas no cultivo da cana e 111,5 toneladas de CO<sub>2</sub>/hectare/ciclo são emitidas na cogeração de eletricidade, resultando num saldo favorável de seqüestro de CO<sub>2</sub> de 33,8 toneladas de CO<sub>2</sub>/hectare por ciclo de vida de geração de eletricidade excedente, quantia que é fornecida às empresas de distribuição.

Conclui-se que o cultivo da biomassa da cana-de-açúcar proporcionou um saldo positivo no seqüestro de CO<sub>2</sub> durante o processo em estudo. Ao se comparar com outras formas de geração de eletricidade, a energia produzida em usinas de álcool e açúcar apresenta os mais baixos valores de emissão de CO<sub>2</sub>, não considerando o bagaço, que é queimado para a geração de calor e eletricidade destinados ao processo de fabricação do açúcar e do álcool.

**Palavras chave:** Emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub>; Desenvolvimento Sustentável; Efeito Estufa; Produção de Eletricidade; Mecanismo de Desenvolvimento Limpo; Termoeletricidade.



## **Abstract**

Throughout recent years, greater interest has been observed in developing activities of research on environmental problems related to CO<sub>2</sub> emissions. The Kyoto Protocol, carbon market aims to minimize the effects of the increased emissions of this gas as it allows incentives for developing countries not to adjust to a high CO<sub>2</sub> energy matrix.

This work studies the carbon dioxide emission and capture balance in the sugar and alcohol sector. Through a life cycle analysis methodology of surplus electricity production the CO<sub>2</sub> balance is calculated. The results obtained show that 145.3 tons CO<sub>2</sub>/hectare are sequestered during sugarcane cultivation and 111.5 tons CO<sub>2</sub>/hectare emitted for electricity production, resulting in a viable capture balance scenario of 33.8 tons of CO<sub>2</sub> per hectare of plantation in one life cycle of surplus electricity production. This CO<sub>2</sub> cenário is even more attractive if the electricity can be generated in substitution for fossil fuels.

It can be seen that the cultivation of sugarcane biomass allowed a positive value to be obtained for the CO<sub>2</sub> absorption during the process studied. In comparison with other forms of electricity generation, the energy produced in sugar mills presents the lowest values of CO<sub>2</sub> emission, not considering bagasse that is combusted for production of heat and electricity for the sugar and alcohol production process.

**Key words:** Emission and Sequestering of CO<sub>2</sub>; Sustainable Development; Global Warming; Electricity Production; Clean Development Mechanism; Thermoelectricity.

## Capítulo 1- Introdução

O planeta Terra manteve o seu processo de equilíbrio entre o seqüestro e a emissão de dióxido de carbono na atmosfera até que as emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram a uma taxa superior à capacidade de armazenamento dos fluxos naturais do planeta. O desenvolvimento industrial e tecnológico ocorridos nas últimas décadas, sobretudo o crescimento do setor energético, favoreceu o surgimento de problemas ambientais como o efeito estufa, o buraco na camada de ozônio e a chuva ácida.

No mundo, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> está fortemente ligado à exploração e ao uso de combustíveis fósseis para a produção de energia, dado o alto teor de carbono presente em suas composições. Por causa disto, intervenções no sentido de encontrar novas saídas para adequar a área energética global às fontes alternativas têm sido buscadas. O objetivo é assegurar uma redução dos prejuízos ambientais e sociais causados pelo aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera. O Protocolo de Kyoto, acordo internacional adotado em 1997 pelos países participantes da Terceira Conferência das Partes, é um importante passo nesta empreitada. Ele compromete os países industrializados a reduzirem suas emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera.

O Brasil é rico em clima, água, solo, recursos naturais e biodiversidade, o que favorece a sua participação no mercado de créditos de carbono, posto que tem grandes possibilidades de ajustar o seu sistema energético a um modelo sustentável baseado na geração de energia através de fontes renováveis, em especial a biomassa.

A matriz energética brasileira já tem a característica de se diferenciar do contexto médio global em termos da dependência de combustíveis fósseis, já que se baseia na energia hidráulica. Além disso, nos últimos anos, pesquisas têm remetido ao manejo da cana não somente para a produção de açúcar e álcool. A cogeração de eletricidade excedente apresenta-se como uma excelente alternativa para alcançar a sustentabilidade da matriz energética brasileira. Se por um lado, a exploração do seu potencial de geração de eletricidade excedente vai favorecer o sucro-alcooleiro, por outro,



poderá garantir vantagens estratégicas, econômicas, sociais e ambientais ao setor elétrico do país.

Assim, o estudo e análise do impacto ambiental no meio atmosférico de projetos de comercialização de eletricidade por usinas sucro-alcooleiras torna-se de grande importância especialmente ao se considerar o surgimento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto.

Considerando-se a preocupação do país em desenvolver programas que privilegiam o desenvolvimento das energias renováveis, o estudo mostra-se pertinente, sobretudo ao se considerar os incentivos que poderão advir com o vigoramento do Protocolo de Kyoto.

## Capítulo 2- Objetivos

### 2.1- Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é estudar os fluxos de emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> incluídos no ciclo de vida de produção de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro.

### 2.2- Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa, que utiliza estudo de caso de produção de eletricidade excedente nas usinas Barra Grande e Equipav S.A. Açúcar e Álcool no Estado de São Paulo, são:

- 1) Estudar a emissão total de CO<sub>2</sub> incluindo as emissões diretas e indiretas.
- 2) Estudar o seqüestro total de CO<sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar.
- 3) Elaborar o balanço de CO<sub>2</sub> através dos resultados da emissão e seqüestro total analisando-o em termos de débito ou crédito.
- 4) Analisar o balanço de massa e avaliar sua competitividade no mercado internacional de carbono do Protocolo de Kyoto.

## Capítulo 3- Revisão bibliográfica

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica pertinente ao tema em estudo.

### 3.1- Panorama energético no Brasil e no mundo e impactos ambientais

Os países desenvolvidos são os maiores consumidores de energia e suas matrizes energéticas completamente dependentes dos combustíveis de natureza não-renovável cujo uso indiscriminado pode levar a um esgotamento e a graves consequências ambientais como a emissão de CO<sub>2</sub>. Por isto, muitos países têm empreendido esforços para aumentar a participação de fontes renováveis em seus modelos energéticos. O Brasil é dotado de recursos naturais para a produção de eletricidade renovável que pode se tornar mais competitiva. A grande participação hidrelétrica no setor elétrico brasileiro já garante uma baixa emissão de CO<sub>2</sub>, no entanto, o potencial total de geração de energia alternativa está longe de ser atingido.

#### 3.1.1- Tendências e problemas de demanda e oferta de energia no Brasil e no mundo

O continuado crescimento da população e da economia brasileira, acompanhado de melhorias no padrão de vida da população vem causando um aumento na demanda de energia no Brasil. Este crescimento também pode ser notado em outros países em desenvolvimento como a China.

Em 1989, o consumo brasileiro foi de 86,27 milhões de tEP, cerca de 3% da energia consumida nos países membros da OCED. O consumo per capita em 1989 foi de 0,59 tEP por habitante, que se comparado à média dos países membros da OCED - 3,44 tEP por habitante - é pequeno. Porém, há de se ressaltar que nos últimos 10 anos cresceu 15,6% enquanto que nos países membros da OCED no mesmo período, permaneceu estável (UHLIG, 1995).

O mercado de energia elétrica experimenta um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar a casa dos 100 mil MW em 2008. O planejamento governamental de médio prazo prevê a necessidade de investimentos da ordem de R\$ 6 a 7 bilhões/ano para a expansão da matriz energética brasileira, em atendimento à demanda do mercado consumidor (ANEEL, 23/01/2004).

Conforme uma publicação do BANCO MUNDIAL (2003), os países ricos são consumidores de uma quantidade desproporcional de energia e de recursos naturais. Este relatório contém vários indicadores ambientais para países, regiões e grupos de renda. Segundo o relatório, cerca de 15% da população mundial que vive em países desenvolvidos são responsáveis por metade da emissão de dióxido de carbono (o principal gás responsável pelo efeito estufa emitido por fontes antrópicas). Isto ocorre, em parte, devido ao fato de que os países desenvolvidos também produzem boa parte da atividade econômica do mundo. Os EUA, por exemplo, consomem 16 vezes mais energia por pessoa que a Índia.

Na TABELA 3.1 é mostrada a evolução do consumo total de energia por fonte no Brasil em PJ ( $10^{15}$ J) ao longo de 21 anos - de 1979 a 2000. Também é mostrada a porcentagem do consumo total de energia por fonte.

TABELA 3.1- Consumo de energia por fonte no Brasil em 1979 e 2000 (PJ).

Fonte de energia	Quantidade, 1979 (PJ)	(%)	Quantidade, 2000 (PJ)	(%)
Petróleo	2150	40,7	3631	37,5
Gás natural	22	0,4	318	3,28
Álcool	84	1,6	233	2,41
Hidreletricidade	1514	28,3	3997	41,28
Carvão	230	4,3	114	1,18
Bagaço-de-cana	246	4,7	598	6,18
Carvão de lenha	133	2,6	179	1,85
Lenha	917	17,4	612	6,32
Total	5277	100	10257	100

Fonte: ESD (2002).

Além de consumirem mais, os países desenvolvidos são bastante dependentes em combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural. O uso destes recursos energéticos traz graves consequências

ambientais como a alta emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, além de serem o alvo de grandes conflitos mundiais da atualidade.

Ao mesmo tempo em que a humanidade está tomando conhecimento dos perigos da dependência de combustíveis fósseis, o Brasil, por ser muito rico em recursos naturais, tem a oportunidade de aumentar, ainda mais a participação das fontes alternativas de geração de energia em seu setor elétrico. Assim, se o país souber utilizar bem os seus recursos renováveis, pode sair em grande vantagem frente a outros países. As fontes renováveis têm sido alvo de pesquisa em vários países e demonstram cada vez mais competitividade.

Pode-se ver na FIGURA 3.1 a evolução do consumo de energia a partir de diferentes fontes renováveis no Brasil entre 1979 e 2000. Os valores estão se referindo aos dados da TABELA 3.1. Outras fontes de energia alternativa comuns no Brasil e no mundo são a energia eólica, solar, de ondas e marés e até a energia geotérmica que não estão incluídas na FIGURA 3.1.

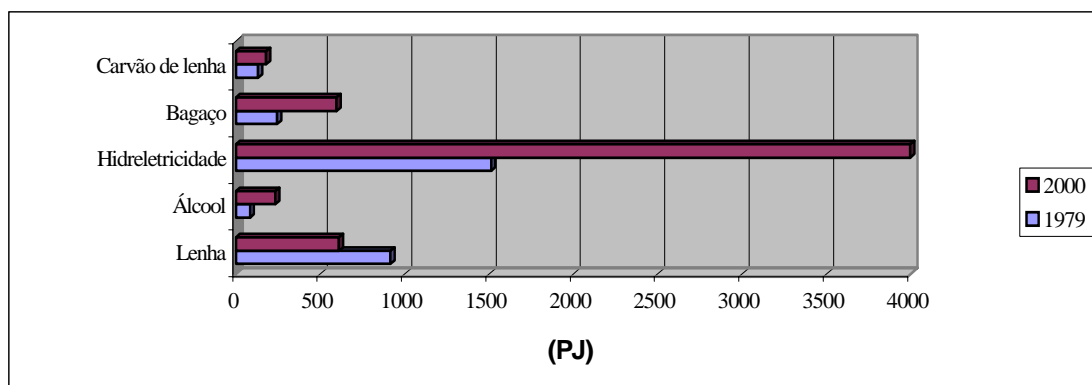


FIGURA 3.1- Aumento no consumo de energia para algumas fontes de energia renovável no Brasil entre 1979 e 2000 (PJ). Fonte: ESD (2002).

### 3.1.2- A energia renovável no Brasil e no mundo e a Geração Distribuída

Segundo o BEN (1999), o Brasil é dependente de importações de petróleo, gás natural e carvão, combustíveis fósseis que constituem 34% do consumo total de energia primária. Entre as energias alternativas, a energia hidrelétrica predomina com 42% da demanda total da energia primária.

A participação de biomassa na produção de energia elétrica é resumida em cerca de 3%, dividida em bagaço-de-cana (1,2%), resíduos madeireiros na indústria de papel e celulose (0,8%), resíduos agrícolas e silvícolas diversos (0,6%) e lenha (0,2%) (MME, 1999).

Na FIGURA 3.2 é mostrada uma comparação entre a demanda de energia por fonte no Brasil em 2002 e a demanda média em países industrializados e países em desenvolvimento (1993). Observa-se que as fontes fósseis predominam em países industrializados e a biomassa em países em desenvolvimento. No Brasil, as fontes renováveis são responsáveis por mais da metade do consumo total de energia. O consumo de energia nuclear na demanda total do Brasil em 2002 foi muito pequeno e, por isto, não deve ser considerado.

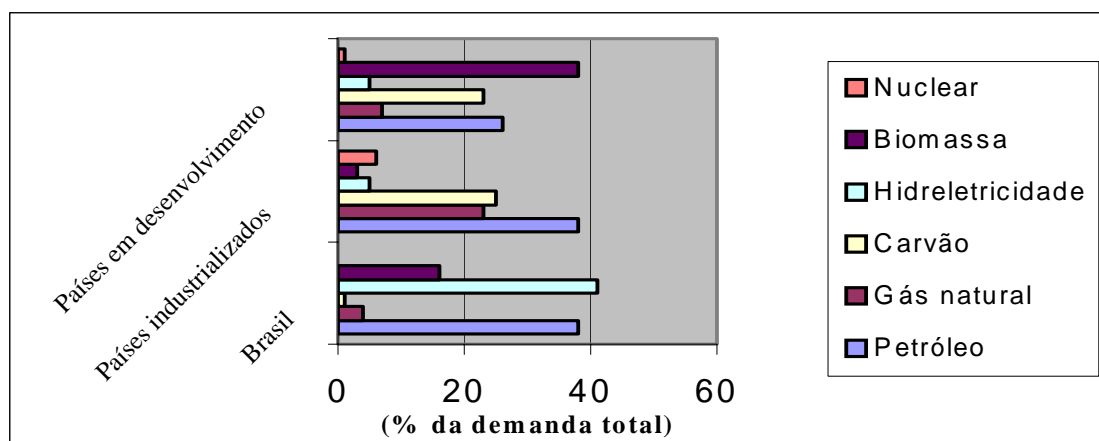


FIGURA 3.2- Consumo para cada fonte de energia como uma porcentagem da demanda total no Brasil, em países industrializados e em países em desenvolvimento. Fonte: ESD (2002), CENBIO (2000).

A Geração Distribuída (GD) é uma unidade de geração de eletricidade de pequena ou média escala localizada perto dos consumidores. A GD não necessita de grandes investimentos em transmissão e por isto permite uma redução nos custos pela eliminação das perdas que normalmente ocorrem na distribuição de energia elétrica.

De acordo com COBAS (2000), nas tecnologias usadas na GD se incluem as que trabalham com fontes renováveis de produção de eletricidade. A GD ajusta-se bem ao setor elétrico brasileiro por sua

capacidade de alcançar a demanda de comunidades isoladas da rede localizadas em locais de difícil acesso para transporte e distribuição de energia. Estas localidades são providas de diversos recursos de fontes renováveis capazes de gerar energia elétrica e, por isto, parte da demanda de eletricidade por fontes renováveis no Brasil pode ser encontrada através da GD.

### 3.1.3- A produção de eletricidade e impactos ambientais

A exploração e o uso dos recursos energéticos estão fortemente ligados aos problemas ambientais. Na geração de eletricidade através de termelétricas que utilizam, por sua vez, combustíveis não-renováveis, nota-se altas emissões de dióxido de carbono atmosférico, dado que os combustíveis fósseis são predominantemente compostos de hidrogênio e carbono e, conseqüentemente, geram CO<sub>2</sub> durante a sua combustão.

Dentro das possibilidades de redução das emissões de gases do efeito estufa na geração termelétrica que utiliza combustíveis fósseis, propõe-se a substituição dos combustíveis óleo diesel, óleo combustível e carvão pelo gás natural, já que este caracteriza-se por menores emissões de CO<sub>2</sub> por possuir menos carbono em sua composição (CENBIO, 2000).

O impacto ambiental para o meio atmosférico em emissão de dióxido de carbono pode ser bem entendido através de fatores de emissão. O fator de emissão de CO<sub>2</sub> define a quantidade de CO<sub>2</sub> em quilos (kg) de emissão total emitida através da combustão de um certo tipo de combustível numa dada operação ou processo. De acordo com LORA (2000), os fatores de emissão podem ser utilizados para uma avaliação preliminar das quantidades emitidas de outros poluentes, tais como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulados, COVs etc. As unidades dos fatores de emissão são kg ou g de poluente por tonelada, m<sup>3</sup> ou litro de combustível. No caso de uma indústria, o fator de emissão geralmente refere-se à unidade de massa de produto ou de matéria-prima LORA (2000).

Na TABELA 3.2 são apresentados os resultados de uma revisão bibliográfica sobre alguns fatores de emissão de vários combustíveis e fontes

de emissão. Os valores estão expressos em kg de CO<sub>2</sub> para cada GJ de energia gerada por um certo combustível, ou em kg de CO<sub>2</sub> emitido na combustão de uma unidade específica do combustível usado como quilos de carvão, litros de diesel ou até hectares de plantação. Estes fatores de emissão são utilizados nos cálculos da emissão de CO<sub>2</sub> na provisão do bagaço para a produção de eletricidade excedente do setor sucro-alcooleiro (item 5.3.2) e na análise comparativa da emissão de CO<sub>2</sub> por diferentes formas de geração de eletricidade (item 5.5).

TABELA 3.2- Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> (KCO<sub>2</sub>) para alguns combustíveis e fontes de emissão (kgCO<sub>2</sub> por GJ ou unidade específica)

Combustíveis e fontes de emissão de CO <sub>2</sub>	Fatores de emissão de CO <sub>2</sub> (KCO <sub>2</sub> )	
	(kgCO <sub>2</sub> /GJ)	(kgCO <sub>2</sub> /unidade específica)
Diesel	80,90 (I1)	2,91 kg/L (I2)
Carvão	96,10 (II1)	2,85 kg/kg (II2) e 3,16 kg/kg (II3)
Gás natural	56,71 (III1)	2,11 kg/m <sup>3</sup> (III2) e 2,68 kg/kg (III3)
Óleo combustível		3,16 kg/kg (IV1)
Emissões do solo		450,00 kgCO <sub>2</sub> /ha (V1)
<i>Baseline</i> Brasil	16,30 (VI1)	
Produção dos insumos agrícolas	74,90 (VII1)	
Biomassa do setor sucro-alcooleiro	-39,00	
I1- LEWANDOWSKI (1995)	III1- HORTA (1987)	VII1- LORA (2003)
I2- BEEHARRY (2001)	III2- BEEHARRY (2001)	VIII1- LEWANDOWSKI (1995)
II1- LEWANDOWSKI (1995)	III3- HORTA (1997)	
II2- BEEHARRY (2001)	IV1- HORTA (1997)	
II3- HORTA (1997)	V1- LEWANDOWSKI (1995)	

No caso da energia nuclear, várias medidas passivas e ativas são necessárias para prevenir que materiais nucleares escapem à atmosfera causando impactos ambientais globais.

A geração de energia por fontes renováveis também provoca impactos ambientais, mas de caráter local ou regional, como a perda de biodiversidade e a destruição de ecossistemas em instalações ativas ou passivas solares e de marés. No caso da energia eólica, também deve-se considerar o impacto visual e sonoro de seus equipamentos. No caso da energia hidrelétrica, o alagamento de grandes áreas traz problemas de emissões devido à decomposição de vegetação inundada e diminui o valor do corpo d'água do



ponto de vista da navegação. No caso da biomassa, a sobra de resíduos causa impacto para o meio atmosférico, terrestre e até aquático.

Na área de transportes, o uso de combustíveis fósseis provoca sérios problemas à saúde humana devido à poluição atmosférica nas cidades como por exemplo, o CO<sub>2</sub> e o NO<sub>x</sub>. Combustíveis como o diesel e a gasolina devem ser evitados e substituídos pelo uso do etanol e do biodiesel.

### 3.2- A cogeração a partir da biomassa do setor sucro-alcooleiro

A produção conjunta de eletricidade e energia térmica útil tem sido um dos principais focos da atualidade. No Brasil, destaca-se o potencial de cogeração no setor sucro-alcooleiro.

As usinas sucro-alcooleiras podem beneficiar-se com a diversificação através da comercialização de eletricidade excedente, possibilitando maior fonte de renda e competitividade do açúcar e do álcool brasileiro.

#### 3.2.1- A cogeração e sua evolução no Brasil

A cogeração ou a produção combinada de eletricidade e energia térmica útil a partir de um só combustível representa uma tecnologia de conversão energética com alto desempenho e reduzidas perdas, podendo empregar ciclos com turbinas a vapor, a gás e motores alternativos, atendendo às necessidades de consumidores industriais e comerciais.

A cogeração é praticada fundamentalmente em ciclos térmicos que produzem energia elétrica e utilizam o calor necessariamente rejeitado. Dependendo do porte do sistema e da prioridade atribuída à geração, tem-se a geração industrial e a cogeração com aquecimento distrital.

É razoável atribuir uma potência instalada de 2.691 MW para a situação atual dos sistemas de cogeração no Brasil, gerando anualmente cerca de 11.126 GWh, o que corresponde a 8,7% do consumo industrial de energia elétrica no Brasil em 1995. Os setores que majoritariamente contribuem para esta capacidade são os setores sucro-alcooleiro (47%), de papel e celulose (26%), petroquímico (17%) e siderúrgico (10%) (HORTA,

1997). Pode ser visto na FIGURA 3.3 a produção total de energia em sistemas de cogeração no Brasil entre 1980 e 1995. Observa-se que todos os setores mostram um aumento considerável sobretudo entre 1990 e 1995.

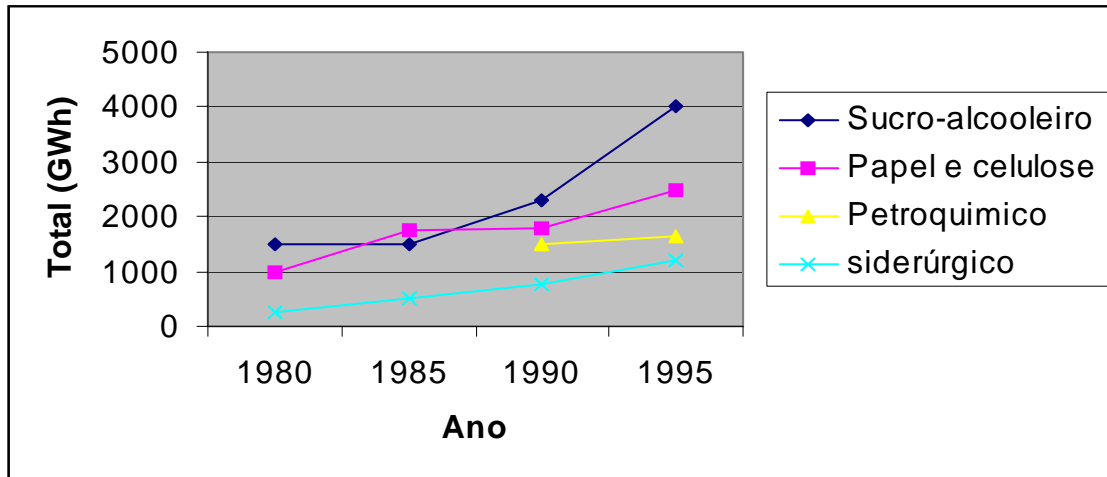


FIGURA 3.3- Produção de energia elétrica e mecânica dos sistemas de cogeração no Brasil entre 1980 e 1995 (GWh). Fonte: HORTA (1997).

### 3.2.2- Capacidade instalada e potencial do setor sucro-alcooleiro no Brasil e no mundo

O potencial técnico de geração de eletricidade calculado para o setor sucro-alcooleiro atinge 3.852 MW podendo ser gerado o ano todo (energia firme) e pode ser efetivamente obtido com a introdução de tecnologias mais eficientes, que já são comercializadas no país. Este potencial, correspondendo à geração também na entressafra, depende da introdução da colheita de cana crua, de forma a garantir a oferta de biomassa (40% de palha, com 15% de umidade) (CENBIO, 2001).

Entretanto, apesar deste potencial existente, os dados levantados mostram que a efetiva disponibilização de energia excedente pelas usinas de cana-de-açúcar encontrava-se, em 2001, ainda em patamares muito inferiores ao potencial técnico mencionado. Neste ano, há 132 MW sendo disponibilizados por 28 usinas do país (CENBIO, 2001).

Na TABELA 3.3 é mostrada a potência instalada e o potencial técnico de geração de energia nas usinas de açúcar e álcool do Brasil de acordo com ANEEL (2003). É importante notar que este estudo refere-se apenas a 51%

das usinas do país e que apenas quatro dos 19 Estados listados na TABELA 3.3 estavam comercializando eletricidade excedente em 2000/2001.

TABELA 3.3- Potência instalada e potencial técnico para geração de energia no setor sucro-alcooleiro (MW).

Unidade da Federação	Potência instalada (MW)	Potencial de geração (MW)
São Paulo	851	2244
Alagoas	173	369
Pernambuco	102	203
Paraná	95	283
Mato Grosso	61	125
Goiás	50	109
Minas Gerais	50	162
Mato Grosso do Sul	37	95
Rio de Janeiro	30	60
Paraíba	26	52
Rio Grande do Norte	16	29
Espirito Santo	13	33
Bahia	13	33
Sergipe	7	21
Piauí	6	9
Maranhão	5	12
Pará	3	7
Amazonas	1	3
Ceará	1	2
Total	1540	3851

Fonte: ANEEL (2003).

Nos cálculos do BNDES, a safra nacional de cana em 2002 foi de 335 milhões de toneladas. Valor que permitiria um aproveitamento, através da cogeração, de 3 mil megawatts equivalente a 25% de Itaipú binacional (FINEP, 12/03/2003).

Em Janeiro de 2002, havia registro de 159 termelétricas a biomassa em operação no Brasil, perfazendo uma capacidade instalada de 992 MW, o que corresponde a 8% do parque térmico de geração e a 1,4% de toda a capacidade instalada no país (ANEEL, 2002).

Observa-se na FIGURA 3.4 a potência instalada e o potencial de produção de eletricidade excedente em alguns Estados através de dados da produção de energia no setor sucro-alcooleiro. Pode-se notar que o Estado de São Paulo apresenta o maior potencial de geração de excedentes de eletricidade.

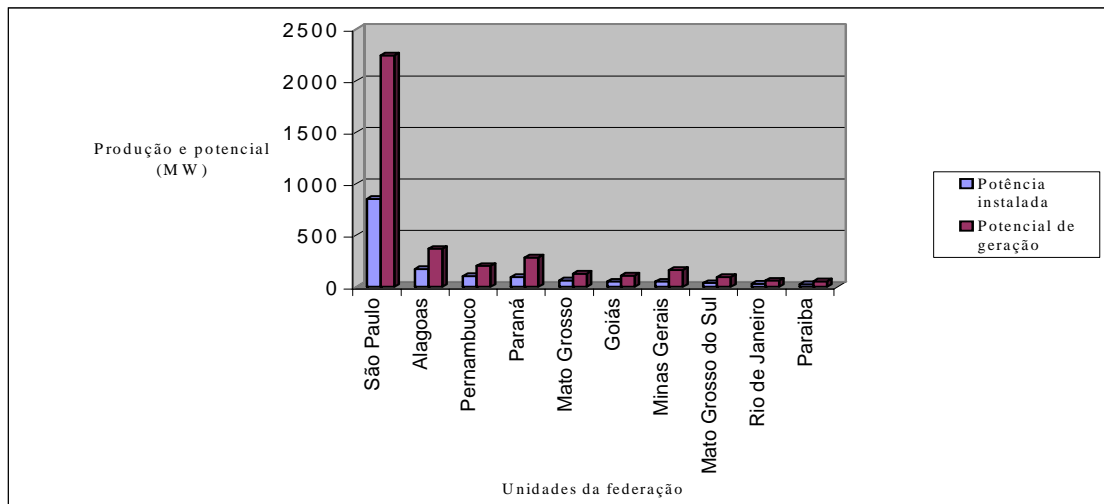


FIGURA 3.4- Potência instalada e potencial de geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro (MW). Fonte: CENBIO (2001).

Nas regiões Centro-Sul, 125 MW foram comercializados em 2001 e havia previsão de mais 1.302 MW em projetos viabilizados pelas usinas, mas são ainda valores reduzidos (42%), se forem comparados ao potencial de até 3.117 MW. Na região Norte-Nordeste há um excedente sendo vendido nesta safra de 7,4 MW e projetos previstos para 275 MW, para um potencial técnico de 735 MW, 37% do potencial (CENBIO, 2001).

No Nordeste, a compra de energia excedente das usinas de açúcar e álcool começou em 1987 e, em 1989, após um período hidrológico desfavorável, a CHESF implementou uma política de compra de eletricidade excedente que levou à formalização de 10 contratos de suprimento, correspondente a 14,9 MW. Cinco usinas de Alagoas tinham, naquela época, contratos para suprimento de 9,4 MW. A oferta era completada através de dois contratos de Pernambuco, correspondente a 3 MW, dois no Rio Grande do Norte equivalente a 1,5 MW e um único contrato na Paraíba representando 1 MW (WALTER, 1994).

Na FIGURA 3.5, é mostrado o potencial para a produção de energia elétrica em MW no Brasil por regiões do país. Na FIGURA 3.6 é mostrado o potencial no setor sucro-alcooleiro para cada uma das mesorregiões da região Centro-Oeste do país.

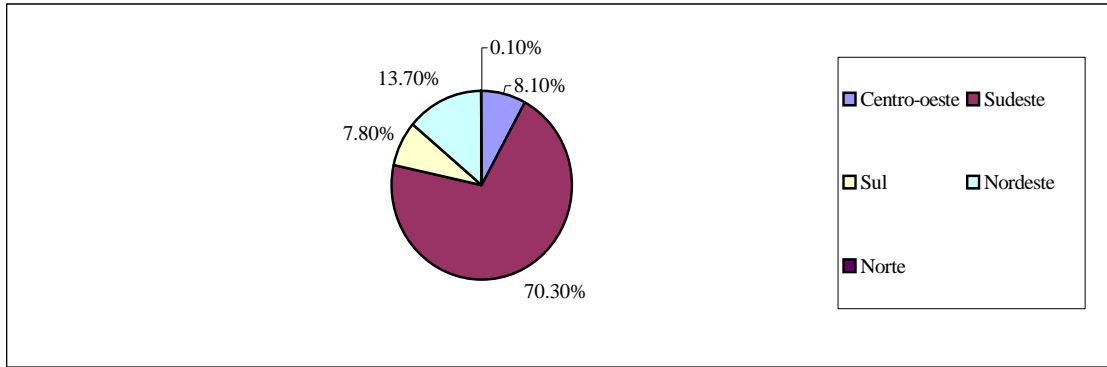


FIGURA 3.5- Porcentagem da participação de cada região do país no potencial de excedentes na indústria sucro-alcooleira. Fonte: CENBIO (2000).

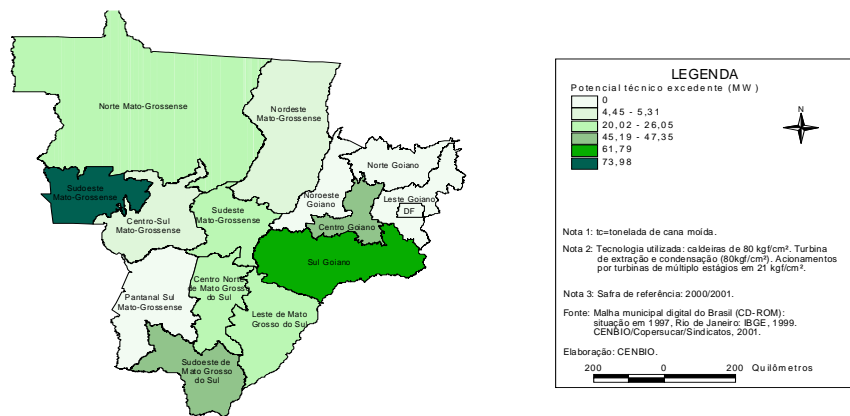


FIGURA 3.6- Potencial para geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro nas mesorregiões da região Centro-Oeste (MW). Fonte: ANEEL (2003).

As distribuidoras do Estado de São Paulo vêm adquirindo, desde 1987, energia co-gerada pelo setor sucro-alcooleiro. Naquele ano, foram adquiridos 4,9 MW de demanda e 2,7 GWh de consumo (SOUZA; BURNQUIST, 2000).

A evolução da demanda (MW) e do consumo (MWh) co-gerados pelo setor sucro-alcooleiro, fornecidos às distribuidoras paulistas no período de 1988 a 1995, pode ser vista na TABELA 3.4 mostrada a seguir (SOUZA; BURNQUIST, 2000).

TABELA 3.4- Demanda e consumo comercializados pelo setor no sistema elétrico do Estado de São Paulo, 1988- 1995 (MW e MWh)

Ano	MW	MWh
1988	4,3	10.400
1989	3,1	7.400
1990	4,5	16.800
1991	8,7	26.100
1992	10,2	27.200
1993	12,1	49.300
1994	17,4	52.100
1995	14,2	57.130

Fonte: SOUZA; BURNQUIST, (2000).

Deve-se também notar o potencial de geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro da região Norte, conforme a FIGURA 3.7.

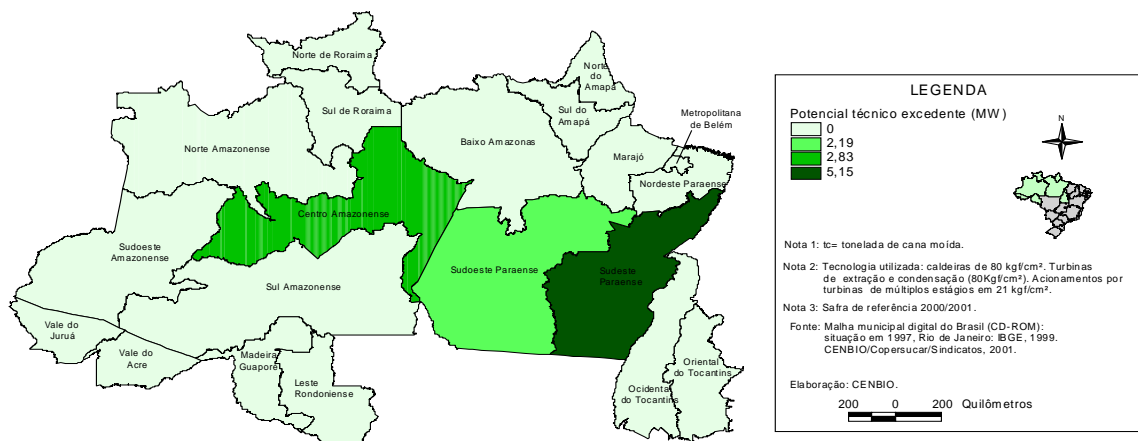


FIGURA 3.7- Potencial de geração de eletricidade excedente nas mesorregiões do região Norte do Brasil (MW). Fonte: ANEEL (2003).

Num contexto mundial, a geração elétrica em larga escala a partir do bagaço-de-cana tem se destacado apenas no Havaí e nas Ilhas Maurício e Reunião. Além desses casos, também são merecedores de referência as iniciativas recentemente adotadas na Costa Rica e na Tailândia. Também é digno de nota o caso cubano, com poucas perspectivas de transformações radicais no curto prazo (WALTER, 1994).

CHOHFI, F. M. *Balanço, análise de emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro*, Itajubá, 2004, Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, 81p

Ainda segundo WALTER (1994), as experiências no Havaí e nas ilhas Maurício e Reunião estão associadas a um quadro de enormes restrições e quase absoluta falta de outras opções de suprimento energético e, em determinados momentos, a necessidade de redução das importações de combustíveis fósseis.

### 3.2.3- A cogeração como opção de diversificação no setor sucro-alcooleiro

No contexto apresentado, tornam-se importantes os benefícios estratégicos para o setor sucro-alcooleiro, que podem ser obtidos com a venda de excedentes de eletricidade cogerados a partir dos subprodutos do processo de fabricação de açúcar e álcool (COELHO, 1996; WALTER, 1994).

No caso do segmento sucro-canavieiro, em nível internacional, dois aspectos devem ser considerados na análise da conveniência da diversificação da produção: a necessidade de redução dos custos do açúcar para melhoria de sua competitividade em relação a outros países e outros produtos concorrentes e o papel central exercido por essa atividade econômica em vários países produtores (WALTER, 1994).

A alternativa de diversificação que será discutida é o caso específico do emprego de subprodutos da cana-de-açúcar com propósitos energéticos. Uma breve nota será feita sobre os outros usos para estes subprodutos.

Uma análise é executada com base nos estudos de BEEHARRY (1996), WALTER (1994), CAMARGO (1990) e KADAM (2002) que identificam na biomassa da cana-de-açúcar os seguintes subprodutos:

#### O bagaço-de-cana:

Sobras de bagaço no Brasil são comercializadas como combustível industrial ou como complemento para ração de gado bovino. Na Índia, estudos foram feitos sobre o processo de bioconversão do bagaço para etanol (KADAM, 2002). O bagaço tem valor energético maior do que o próprio etanol (ANEEL, 24/02/2003) e, por isto, tem ótimo potencial para ser utilizado na geração de energia nas usinas, bem como para ser utilizado na geração de eletricidade excedente para comercialização. De acordo com CAMARGO

(1990) tem-se usado também como alternativa o método Indore de compostagem do bagaço residual em mistura com torta de filtro, utilizando-se como inoculante o esterco de curral. Este método de compostagem proporciona a formação de um produto semelhante à torta de filtro, após cerca de 95 dias de maturação do material.

Os topos e folhas:

As folhas e os topos ou pontas representam 20% da massa da cana-de-açúcar e, energeticamente são equiparáveis ao aporte energético do bagaço-de-cana. Por isto, representam um potencial energético muito importante em mistura com o bagaço-de-cana e a palha. A possibilidade de comercialização dos topos e folhas para outros usos é muito limitada e, mesmo na geração de eletricidade, é uma prática pouco adotada. Na FIGURA 3.8 são mostrados os topos e folhas da biomassa da cana-de-açúcar.



FIGURA 3.8- A fotografia mostra os topos e folhas da cana-de-açúcar deixados no campo. Fonte: (CHOHFI, 2003).

A palha da cana:

A palha seca deixada no campo após a colheita pode ser utilizada junto com o bagaço, os topos e as folhas na geração de energia. Este é o único uso deste subproduto da colheita em todos os países produtores de cana-de-açúcar. Na FIGURA 3.9 é mostrada a biomassa seca da palha da cana como é encontrada no campo após a colheita.





FIGURA 3.9- A fotografia mostra a palha seca da cana-de-açúcar, deixada no campo após a colheita. Fonte: (CHOHFI, 2003).

Em 1998, foram produzidos cerca de 84,3 milhões de toneladas de bagaço. Desse montante, somente 3,8 milhões de toneladas (4,5%) foram utilizados na produção de energia elétrica, o restante foi utilizado para a geração de vapor de processo em caldeiras de baixa eficiência - indústrias de produção de álcool etílico – (43%), de alimentos e bebidas, açúcar e aguardente (53,3%) e, em menor escala, nas indústrias de papel e celulose (0,1%) (ANEEL, 24/02/2003).

Considerando os conhecidos benefícios sociais, ambientais e estratégicos do Programa Nacional do Álcool, a cogeração de eletricidade no setor sucro-alcooleiro poderia ser um mecanismo para, em conjunto com as outras medidas em estudo pelo Governo Federal, colaborar para evitar a extinção do Programa Nacional do Álcool (COELHO, 1999).

#### 3.2.4- Incentivos e barreiras à implementação

Vários fatores influenciam positiva e negativamente na compra e na comercialização pelas concessionárias da eletricidade gerada nas usinas. Estes incentivos e barreiras foram analisados em CENBIO (2001).

##### Vantagens estratégicas

Um dos incentivos estratégicos à geração de eletricidade no setor sucro-alcooleiro é a geração descentralizada e distribuída próxima aos

pontos de carga que não necessitam de maiores investimentos em transmissão. Ótimo no suprimento de energia elétrica para as comunidades isoladas da rede elétrica.

Outra vantagem estratégica consiste no fato de que o período de colheita da cana nas regiões Sudeste e Centro-Oeste ocorre durante a estiagem, quando o sistema elétrico nestas regiões apresenta maiores dificuldades, devido à baixa hidreletricidade. Se um sistema de produção de eletricidade do setor sucro-alcooleiro for implantado em conjunto com a geração hidrelétrica, será possível evitar com facilidade futuros apagões. Esta estratégia seria ideal para o Estado de São Paulo, por exemplo.

#### Vantagens econômicas:

Os incentivos também podem ser econômicos. A produção de eletricidade nas usinas de açúcar e álcool utiliza combustível, equipamentos e tecnologias eficientes nacionais comercialmente disponíveis. Colaborando para a dinamização do setor de máquinas e equipamentos e, como consequência, para o aumento no recolhimento de impostos.

Também é uma vantagem econômica a possibilidade de o Brasil passar de importador a exportador de petróleo. Se souber usar bem os seus combustíveis renováveis nacionais como a biomassa da cana-de-açúcar poderá, no mínimo, reduzir a dependência externa deste combustível fóssil. Além disso, a diversificação do setor através da venda de eletricidade representa uma chance de aumentar a receita do setor, possibilitando uma redução no custo do açúcar e do álcool, além do fortalecimento do Programa Nacional do Álcool e do setor elétrico, sobretudo no Nordeste e no Sudeste.

#### Vantagem social:

Para a sociedade, há o benefício da garantia da oferta de empregos e mão-de-obra do setor, aumentando os índices de emprego, especialmente na zona rural.

#### Vantagem ambiental:

O incentivo ambiental para a produção de eletricidade do setor sucro-alcooleiro é a diminuição da poluição atmosférica especialmente nas proximidades das cidades.

Barreiras econômicas:

Um dos fatores que afetam negativamente a compra de eletricidade do setor sucro-alcooleiro é a falta de implementação efetiva de incentivos fiscais e financeiros para a geração de energia independente, distribuída e renovável, além da carência de políticas energéticas que estimulem a geração descentralizada de excedentes elétricos. Soma-se a isto, o preço não competitivo oferecido pelas concessionárias. Para contratos de curto ou longo prazo, o preço oferecido não viabiliza a venda de excedentes e, por isto, são insatisfatórios. As taxas de juros utilizadas também não viabilizam as opções tecnológicas mais eficientes de produção de eletricidade no setor.

Barreira estratégica:

A barreira estratégica é a necessidade de haver geração de eletricidade firme todo o ano, já que a maioria dos projetos existentes corresponde à geração de eletricidade apenas no período de safra. Isto acontece porque o fornecimento de bagaço-de-cana para fins energéticos e industriais tem que se adaptar ao ritmo da agricultura, não podendo estar disponível o ano inteiro. Apenas haverá produção direta de bagaço durante a época de colheita da cana-de-açúcar que ocorre em média 8 meses por ano, ou seja, de maio a dezembro.

### 3.2.5- Tecnologias, operação e aproveitamento máximo da biomassa para aumento da produção de eletricidade excedente

Dois fatores influenciam o potencial de produção de eletricidade através do aproveitamento de biomassa do setor sucro-alcooleiro: a produtividade e o estado da biomassa usada e, a tecnologia e sua operação.

O estado da biomassa tem um impacto direto no potencial de produção de eletricidade. Em CAMARGO (1990) podemos ver que na

utilização do bagaço-de-cana como insumo energético, uma das características fundamentais é o poder calorífico, decorrência sobretudo do grau de umidade e do teor de açúcar residual contido no bagaço. Como o teor de açúcar é normalmente baixo, tem-se a umidade como o principal fator limitante do poder calorífico. Por isto, o bagaço-de-cana deve sofrer um beneficiamento com o intuito de viabilizar seu aproveitamento como um insumo energético.

Segundo CAMARGO (1990), o processo de enfardamento com secagem e peletização também aumenta o poder calorífico do bagaço. O resíduo é compactado em fardos de dimensões apropriadas através de prensas hidráulicas. Depois, o fardo é submetido a um período de secagem, no qual o uso racional e controlado da fermentação natural e aeração permitem reduzir seu teor de umidade 50% para 20% em apenas 20 dias. A densidade do fardo permanece em torno de 375 kg/m<sup>3</sup>. O processo de peletização consiste de uma mini-extrusão a alta-pressão, a partir do bagaço com teor de umidade abaixo de 20%. Em virtude da maior superfície que apresenta por unidade de peso, o *pellet* é um bom combustível para ser empregado diretamente em caldeiras ou, possivelmente, em gaseificadores.

Conforme (CENBIO, 2000), o poder calorífico do bagaço como um insumo de valor energético aumenta em cerca de 10 MJ/kg após passar pelos processos de enfardamento, secagem e peletização.

A produtividade de biomassa do setor sucro-alcooleiro tem um impacto no potencial de produção de eletricidade. De acordo com BEEHARRY (2000), resíduos fibrosos da cana-de-açúcar como os topos, folhas e a palha contém mais de 50% da energia produzida fotossinteticamente e armazenada em fibras celulósicas na biomassa da cana-de-açúcar. Por isto, apesar de o bagaço ser a matéria-prima principal, os topos, folhas e palha podem ser incluídos juntamente em sistemas de cogeração para o setor sucro-alcooleiro. Isso irá maximizar a produtividade de insumo energético disponível da mesma área de plantio e, conseqüentemente, aumentar a geração de eletricidade para exportação nas usinas. Na TABELA 3.4 é mostrado este aumento, considerando o aproveitamento de 30% da palha.

TABELA 3.5- Potencial de cogeração com aproveitamento de 30% da palha

	Cana (tC)	Potencial geração para exportação (MW)
EQUIPAV (2003/2004)	2.800.000	33
Região Araçatuba	17.000.000	210
São Paulo	195.000.000	2.350
Centro-Sul	264.000.000	3.190
Brasil	307.000.000	3.700
Considerando o aproveitamento de 30% da palha		
EQUIPAV	2.800.000	50
Brasil	307.000.000	5.550

Fonte: LORA (2003)

BEEHARRY (2001) compara o rendimento em eletricidade (kWh/tC) de quatro diferentes cenários de conversão de biomassa do setor sucro-alcooleiro. O primeiro utiliza apenas o bagaço como sai da moagem, o segundo utiliza um bagaço que é cultivado após a compostagem, o terceiro utiliza os topos, folhas e o bagaço e o quarto inclui todos os insumos energéticos, que são o bagaço, os topos e folhas e a palha da cana. O resultado de produção de eletricidade para a quarta opção foi de 276 kWh/tC, quase sete vezes mais do que a produção de 41 kWh/tC para a primeira opção.

Atualmente a maioria das usinas brasileiras utiliza apenas o bagaço devido à complexidade e o custo da recuperação e armazenamento da palha e pontas e folhas e do processo de peletização.

A tecnologia utilizada em usinas de açúcar e álcool e sua operação é de extrema importância para se aumentar a eficiência dos processos na indústria e a produção de eletricidade excedente para comercialização. Serão discutidas duas tecnologias que podem ser utilizadas para a cogeração no setor sucro-alcooleiro, a convencional e a BIG/GT que é de alta eficiência e economia nos processos e são comercialmente disponíveis no Brasil podendo empregar ciclos de bagaço com gás natural.

A grande maioria das usinas de açúcar e álcool produtoras de eletricidade excedente no Brasil opta por uma tecnologia convencional com turbina de vapor de contrapressão e de condensação com extrações (ver

item 5.1- Resultados e análise). A principal desvantagem do sistema de contrapressão é a pouca flexibilidade de variação de carga, tendo em vista que a potência gerada é determinada pelo consumo de vapor no processo.

A tecnologia integrada de gaseificação e turbina a gás (BIG/GT) de biomassa contém um gaseificador de bagaço, equipamento que transforma o bagaço num gás de baixo poder calorífico a partir de processos de conversão a alta temperatura (MELLO, 2001).

Um sistema BIG/GT permitiria disponibilizar maior quantidade de eletricidade à rede a partir da biomassa canavieira (MELLO, 2001).

Estudos realizados pelo Ministério de Ciência e Tecnologia mostram que a quantidade de energia produzida com a tecnologia convencional é de 100 kWh/tC. Por meio do novo modelo proposto pelo projeto de gaseificação da biomassa, a produtividade poderia saltar para 152 kWh/tC (FINEP, 04/03/2003).

### 3.3- Oportunidades através do Protocolo de Kyoto

Nas últimas décadas, cientistas têm alertado para a possibilidade de mudanças climáticas ligadas às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), provenientes de atividades como a geração de energia. Em 1997, foi elaborado o Protocolo de Kyoto, um acordo internacional que visa estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera a fim de conter os efeitos danosos ao planeta.

Este acordo compromete países desenvolvidos a reduzirem suas emissões de GEE. Além disso, as normas do Protocolo permitem criar um mercado de carbono onde projetos de energia alternativa no Brasil deverão gerar créditos que poderão ser comprados pelos países desenvolvidos como parte do cumprimento de suas metas. No entanto, para que o mercado entre em vigor, é necessário que um determinado número de países desenvolvidos assine o Protocolo, fato que ainda não ocorreu.

Pode-se ver na FIGURA 3.6 que o dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> é o principal gás do efeito estufa que contribui para o aquecimento global, mas o fato de o CH<sub>4</sub> ter um Potencial de Aquecimento Global (GWP) 23 vezes maior

do que o CO<sub>2</sub> explica porque o metano, que é muito menos abundante do que o CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribui significativamente para o aquecimento global como é indicado na FIGURA 3.10

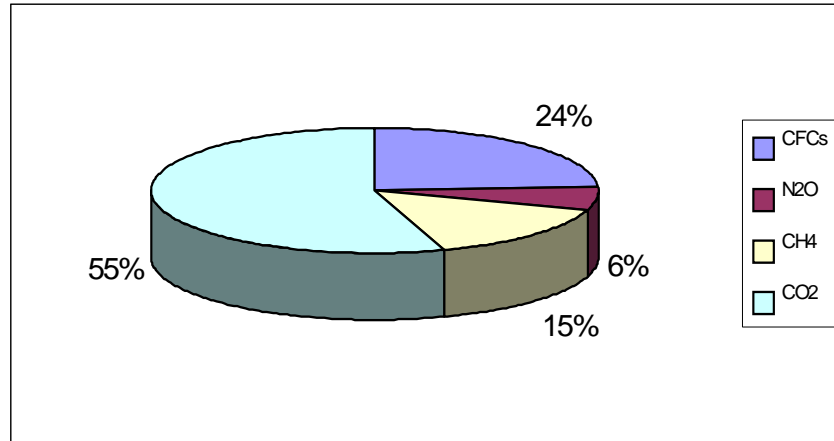


FIGURA 3.10- Contribuição dos gases do efeito estufa para o aquecimento global. Fonte: (GOLDEMBERG, 1998).

### 3.3.1- Definições e conteúdo da convenção do clima e do Protocolo de Kyoto

A convenção quadro das nações unidas sobre mudança do clima esta em vigor desde 21 de Março de 1994 e tem como objetivo de acordo com o artigo 2 da convenção: alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável.

Esta convenção, também conhecida como convenção do clima deverá ser assinada por qualquer país que queira fazer parte do Protocolo de Kyoto. Além de conter informações essenciais ao Protocolo contém metas voluntárias que vão de encontro aos mesmos objetivos do mesmo.

O Protocolo, assinado em 11 de Dezembro de 1997 em Kyoto no Japão, contém obrigações impostas a países do anexo 1 (países

industrializados) para não ultrapassarem seus limites estabelecidos de emissões antrópicas de gases do efeito estufa expressas em equivalentes de dióxido de carbono. O objetivo final é reduzir a emissão global destes gases por pelo menos 5% menos que os níveis de 1990 para cada país, durante o período de 2008 até 2012. Cada país deverá demonstrar progresso evidente no cumprimento das metas até 2005. De acordo com os artigos 4 e 5 do Protocolo, os países de Anexo 1 são considerados como tendo cumprido suas metas com tanto que suas emissões antrópicas totais incluídas no anexo A não ultrapassem suas emissões permitidas pelos seus comprometerimentos listadas no Anexo B do Protocolo.

De acordo com o artigo 25, o Protocolo de Kyoto irá entrar em vigor após 90 dias da data na qual não menos de 55 países do anexo 1 constituindo em total no mínimo 55% das emissões de dióxido de carbono em 1990 dos países de anexo 1, terem depositado seus instrumentos de ratificação, aceitação e aprovação.

Na TABELA 3.6 são mostradas as metas de redução de emissões de carbono atmosférico para alguns países e grupos de países para o primeiro período de comprometimento do Protocolo. Os valores são dados em milhões de toneladas de carbono equivalentes (mtCarbono).

TABELA 3.6- Proposta de redução de emissões para Kyoto (mtCarbono).

	Emissões em 1990	Meta de Kyoto	Emissões permitidas diante da meta (em mtCarbono)	Emissões Projetadas para 2010 em Situação <i>Business as usual</i>	Redução necessária para cumprir a meta de Kyoto	%
EUA	1.362	93%	1.267	1.838	571	32%
Japão	298	94%	289	424	144	33%
União Européia	822	92%	756	1.064	308	28%
Outros países OECD	318	95%	300	472	171	36%
Europa Oriental	266	104%	277	395	118	42%
Ex-URSS	891	98%	873	763	0	0%
TOTAL	3.957		3.753	4.956	1.312	26%

Fonte: CEBDS (2003).

### 3.3.2- Os mecanismos de flexibilidade



O Protocolo de Kyoto estabelece três mecanismos desenhados para assegurar uma redução de emissões economicamente viável para os países desenvolvidos cumprirem suas metas.

Os mecanismos incluem:

Implementação conjunta: de acordo o artigo 6 de Protocolo de Kyoto, cada país industrializado, no cumprimento de suas exigências de redução de emissões, poderá transferir para, ou comprar de outros países reduções certificadas de emissões resultando de projetos que visam redução de emissões antrópicas ou maior seqüestro de gases de efeito estufa com tanto que: estes projetos tenham a aprovação dos países, qualquer destes causem uma redução de emissões ou maior seqüestro adicionais a qualquer que iria acontecer em seu lugar.

Comércio de emissões: a conferência das partes para o Protocolo de Kyoto defini regras para o comércio de emissões. Todos os países com metas de redução de emissões antrópicas podem participar em um comércio de emissões para fins de cumprimento dos seus comprometerimentos (artigo 3) de acordo com o artigo 17 do Protocolo de Kyoto.

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: o objetivo do MDL é o de cooperação mundial para atingir o desenvolvimento sustentável de países em desenvolvimento e auxiliar os esforços dos países industrializados no cumprimento dos seus comprometerimentos de reduzir emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com o parágrafo 3 do artigo 12 do Protocolo de Kyoto, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, MDL: 1) países em desenvolvimento irão beneficiar de projetos que resultam em reduções certificadas de emissões (RCEs) e 2) países industrializados podem utilizar estas reduções certificadas de emissões adquiridas resultantes de tais projetos para contribuir no cumprimento de parte de seus comprometerimentos de redução de emissões. Assim em princípio é possível permitir a países desenvolvidos investir em projetos de "redução de emissão" em países em desenvolvimento e utilizar os créditos para reduzir as suas obrigações.

Ainda de acordo com o artigo 12, parágrafo 10 do Protocolo de Kyoto as RCEs resultantes de vários tipos de projetos sustentáveis deverão ser aprovadas por entidades operacionais designadas. Reduções certificadas de emissões adquiridas durante o período do ano 2000 até o início do primeiro período de comprometimentos podem ser usados para cumprimento das metas durante o primeiro período de comprometimentos após a ratificação do Protocolo.

Projetos de MDL podem gerar RCEs nos seguintes setores através de projetos sustentáveis como por exemplo a oferta de energia com fontes alternativas, mudança de combustíveis, produção de energia mais eficiente, meios de transporte utilizando combustíveis alternativos como o etanol e até a gestão de resíduos como a captura de metano derivado de aterros sanitários e águas residuais.

### 3.3.3- Situação atual do Protocolo de Kyoto e perspectivas para o futuro

Conforme o MCT (2004), em 26 de novembro de 2003, o status de ratificação do Protocolo de Kyoto contava com 134 países, sendo 41 do anexo 1 (países industrializados), incluindo todos da União Européia, e 93 do não-anexo 1. Estas partes correspondem a emissões equivalentes a 44,2% das emissões totais de GEE.

Existe uma liderança política pró-Kyoto por parte da União Européia, no entanto, os EUA, o maior contribuinte para o efeito estufa, abandonaram politicamente o processo de Kyoto. Na última cimeira de Joahanesburgo (África do Sul), a Rússia e a Polônia demonstraram interesse político na ratificação do Protocolo.

Na TABELA 3.7 são mostrados os resultados de uma pesquisa sobre as emissões per capita e emissões totais de dióxido de carbono para países industrializados selecionados, como a Alemanha, Estados Unidos e Japão e alguns países que ainda estão em fase de desenvolvimento como o Brasil, o Chile e a Índia.

TABELA 3.7- Emissões per capita e emissões totais de CO<sub>2</sub> para alguns países (Toneladas métricas de CO<sub>2</sub>)

	Emissões per capita (Toneladas métricas de CO <sub>2</sub> )	Emissões totais (Mil toneladas métricas de CO <sub>2</sub> )
Japão	9,0	1.133.467,9
Estados Unidos	19,9	5.447.639,6
Alemanha	10,1	825.162,1
Brasil	1,8	299.556,2
Chile	4,1	60.174,6
China	2,5	3.316.759,8

Fonte: EARTHTRENDS (2003)

Em entrevista pessoal realizada na UFRJ em novembro de 2002, EMILIO LA ROVERE afirmou que grande parte do mercado de investimentos seria direcionado ao Brasil, já que os países desenvolvidos já tem o hábito de investir no país, que possui ótimos projetos. O pesquisador garante que o Protocolo não é modismo. Segundo ele, o acordo veio para ficar e, ao longo do tempo, haverão metas cada vez rigorosas para os países industrializados. A previsão é a de que o mercado seja favorável ao Brasil em 2020.

Dois fatores mostram a verdadeira importância da entrada em vigor deste Protocolo:

- Em 10 anos, a China, um país de baixa renda que já ultrapassou 1 bilhão de habitantes, poluirá tanto quanto os Estados Unidos (CENBIO, 2000).
- Os EUA já apresentam um nível de emissão 10% superior ao de 1990, se esta tendência for seguida nos anos do cumprimento do protocolo (2008-2012) estas emissões terão crescido 23% em relação as de 1990 (CEBDS, 2003).

De acordo com GIEDS (2003) só será possível atingir os objetivos de Kyoto com um grande esforço concentrado no setor energético. Na FIGURA 3.11 é mostrada a verdadeira contribuição que o setor energético para as mudanças climáticas comparando-se a emissão do dióxido de carbono na produção de energia e seu uso com outras fontes de poluição do ar. A geração de energia contribui com mais de metade, ou 57% das emissões de dióxido de carbono totais.

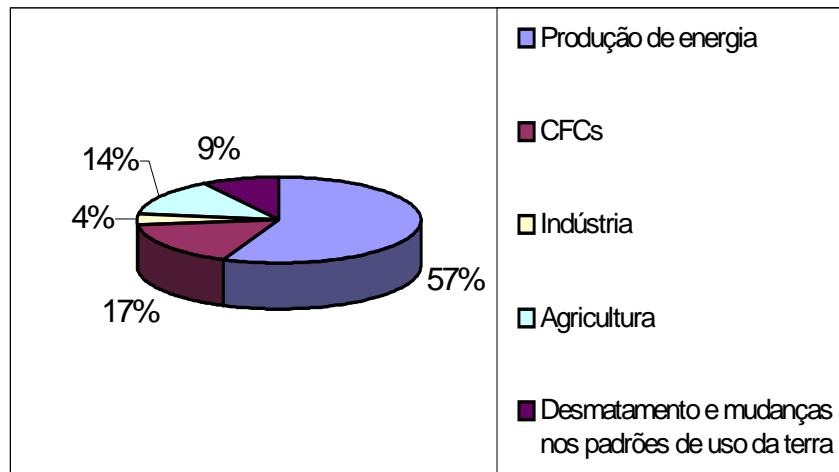


FIGURA 3.11- Contribuições para o efeito estufa. Fonte: (GOLDEMBERG, 1998).

#### 3.3.4- A convenção do clima e o Protocolo no cenário nacional

A Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima criada pelo decreto de 7 de Julho de 1999 é responsável por realizar articulação e promover várias ações dos órgãos governamentais e privados em cumprimento aos compromissos assumidos pelo Brasil perante a convenção do clima. Os ministros de Estado da ciência e tecnologia e do meio ambiente são, respectivamente, o presidente e o vice-presidente da comissão.

O Protocolo foi assinado pelo Senado Federal em 19 de Junho de 2002. Posteriormente foi promulgado pelo decreto legislativo 144 e teve publicação no Diário Oficial de 21 de junho de 2002. Em 26 de Julho de 2002 o documento foi sancionado, sendo assinado pelo presidente Fernando Henrique Cardoso em cerimônia realizada em Brasília (FINEP, 04/03/2003).

O Brasil tem o privilégio de poder ajustar seu setor elétrico a fontes renováveis devido à abundância de recursos naturais, gerando, assim, créditos de carbono. Entretanto, apesar de estar em destaque mundialmente na busca por alternativas ao petróleo e ao carvão, mostra-se contraditório em alguns de seus posicionamentos como a falta de proteção às florestas que têm grande capacidade de seqüestro, mas, se forem queimadas contribuirão

para a emissão e, ao mesmo tempo, perdem sua capacidade de seqüestrar CO<sub>2</sub>.

O Brasil, tendo assinado o Protocolo, não terá metas específicas de redução de emissões para cumprir mas terá que, por exemplo promover educação, treinamento e entendimento público sobre mudanças climáticas assegurando máxima participação neste processo além de outros comprometimentos contidos nos artigos do Protocolo.

Na TABELA 3.8 é mostrada a redução nas emissões de carbono (em toneladas de carbono/ano) ao se implementar projetos de energia renovável, tendo como linha de base para o cálculo a geração de energia elétrica utilizando gás natural. Todas as fontes renováveis listadas irão receber investimentos no mercado de créditos de carbono.

TABELA 3.8- Potencial comercial (longo prazo) de energia renovável no Brasil e redução de emissões de carbono atmosférico.

Fonte	Potência (MW)	Energia (MWh/ano)	Redução de emissões (tCarbono/ano)
Bagaçõ	3.500	21.462.000	2.940.294
Casca de arroz	229	1.404.228	192.379
Cavaco de madeira	860	5.273.520	722.472
Solar	50	306.600	42.044
Eólica	364	2.232.048	305.791
Outros resíduos agrícolas	9.000	55.188.000	7.560.756
Papel e celulose	1.600	9.811.200	1.344.134
PCH	1.185	7.266.420	955.500
Total	16788	102.944.016	14.103.330

Fonte CENBIO (2000).

### 3.4- Estudo sobre a metodologia de cálculo do seqüestro e emissão de CO<sub>2</sub>

#### 3.4.1- Avaliação de Ciclo de Vida

O impacto ambiental em emissão de dióxido de carbono é calculado através de uma avaliação do ciclo de vida (ACV) que irá englobar todos os fluxos de seqüestro e emissão advindos do processo de geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro.

A avaliação de ciclo de vida é uma ferramenta de uso crescente como metodologia de avaliação de impacto ambiental. Esta atividade é altamente consumidora de tempo e recursos. A obtenção de dados para toda a cadeia produtiva é complexa, exaustiva e custosa e os dados obtidos podem ser pobres em qualidade e quantidade. A avaliação de todos os impactos ambientais de um empreendimento inclui efeitos provenientes de muitas atividades relacionadas com ele (CUNHA e GUERRA, 2000).

Conforme KADAM (2002) e MOHEE (1999) uma análise de ciclo de vida é uma imagem completa de como um sistema reage com o meio ambiente ao seu redor. Esta análise possibilita a quantificação e a avaliação de todos os fluxos de materiais, energia, resíduos e emissões relacionados ao sistema de produção desde a sua origem até o seu termo. São considerados detalhes dos fluxos advindos do ambiente para os materiais e vice-versa. A análise também inclui detalhes sobre a atividade como extração e processamento da matéria-prima, fabricação, transporte e distribuição, uso e re-uso, manutenção, reciclagem e disposição final incluindo os impactos ambientais pertinentes.

Uma avaliação de ciclo de vida é, basicamente, uma tentativa de inventariar todos os possíveis danos ambientais causados por um produto e sua cadeia produtiva. Daí ser uma análise focalizada no produto e denominada assim, convenientemente, de análise "do-berço-ao-túmulo", onde consideram-se os impactos ambientais causados desde a obtenção da matéria-prima necessária, passando pela produção em si, pela utilização do produto e, finalmente, os impactos da necessidade de um destino final, abrangendo assim, todo o ciclo de vida dos produtos e seus constituintes. Uma ACV completa irá englobar emissões indiretas como as advindas da implantação ou construção de uma atividade (CUNHA e GUERRA, 2000).

#### 3.4.2- Metodologia de cálculo de seqüestro de CO<sub>2</sub>

As plantas verdes absorvem dióxido de carbono durante a fotossíntese. Os resultados deste efeito seqüestro de carbono podem ser quantificados através de uma metodologia de (BEEHARRY, 2001). A

metodologia existente para o cálculo do seqüestro envolve o processo de fotossíntese da biomassa da cana-de-açúcar. Na presença da luz solar, ela retira o dióxido de carbono da atmosfera e utiliza o carbono para crescer, liberando-o como CO<sub>2</sub> ao final do seu ciclo de vida.

Através desta metodologia é feito um estudo da biomassa vegetal de cada componente da vegetação da planta acima e abaixo do solo e do cálculo do carbono estocado nesta biomassa. Pode-se, então, proceder à avaliação dos teores de carbono dos diferentes componentes da vegetação (raízes, folhas e outros).

A cana-de-açúcar tem um potencial fotossintético que ultrapassa o da maioria de plantas. Três motivos justificam a alta captura de CO<sub>2</sub> da cana. Plantas do tipo C<sub>3</sub> consomem O<sub>2</sub> e liberam CO<sub>2</sub> num processo chamado de fotorrespiração. Por outro lado, plantas do tipo C<sub>4</sub> como a cana-de-açúcar e o milho são capazes de eliminar esta perda de CO<sub>2</sub> liberada pela fotorrespiração das folhas tendo assim um poder continuado de fixação de carbono. Outro motivo que justifica a alta captura de CO<sub>2</sub> é o alto teor de produção de sacarose na cana-de-açúcar, que sugere um alto potencial de captura de CO<sub>2</sub>, já que a sacarose é uma fonte de carbono. Outra razão é o fato de a cana-de-açúcar ser competitiva em países de alta incidência solar, dado o papel fundamental da luz solar na fotossíntese (ALEXANDER, 1973).

Conhecendo as quantidades de carbono retidas pela vegetação, pode-se proceder ao cálculo do equivalente seqüestro de CO<sub>2</sub> da biomassa. A metodologia do cálculo é apresentada no item 4.2.3.

### 3.4.3- Metodologia de cálculo de emissão de CO<sub>2</sub>

Através de análises de ciclo de vida em NREL (2002), pode-se observar que qualquer sistema de produção de eletricidade irá resultar em emissões indiretas advindas do uso de combustíveis fósseis, por isso, as emissões indiretas resultantes da fração destes combustíveis utilizados no ciclo de vida da produção de eletricidade excedente nas usinas de açúcar e álcool serão consideradas.

A metodologia de cálculo da emissão total de dióxido de carbono foi feita através de uma ACV. A atividade de geração de eletricidade em usinas sucro-alcooleiras requer a ocupação de uma área, consumo de recursos naturais e, conseqüentemente, a liberação de poluição como qualquer outra usina geradora de energia elétrica. Quando é aplicada a avaliação de ciclo de vida numa usina sucro-alcooleira, a emissão atmosférica total constitui uma emissão maior do que a usualmente esperada. Isto se dá porque as emissões de dióxido de carbono durante a queima do bagaço na caldeira somam-se às emissões realizadas durante os processos de produção de insumos, de transporte da cana-de-açúcar e outros. Alguns destes processos repetem durante todo um ciclo da cana, que dura seis anos.



## Capítulo 4- Metodologia

### 4.1- Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados como materiais:

- Bibliografia referente ao tema (livros, revistas, materiais de consultas à internet, dissertações e teses);
- Visitas a bibliotecas especializadas como a do Centro Tecnológico Copersucar e da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP e a usinas sucro-alcooleiras de cogeração e comercialização de eletricidade excedente no Estado de São Paulo.

### 4.2- Métodos

O objetivo da presente metodologia é quantificar, em todo o ciclo de vida, os fluxos de emissão e de seqüestro de CO<sub>2</sub> associados à prática de produção de eletricidade excedente.

Assim, o trabalho não irá cobrir todos os materiais e fluxos associados à indústria do álcool e açúcar por não fazerem parte do ciclo de vida em estudo. Na FIGURA 4.1 é mostrado o fluxograma do trabalho.

- 1) Objetivos definidos no Capítulo 2;
- 2) Leitura de livros, artigos científicos, dissertações, teses e consulta a internet;
- 3) Estudo das fases do processo de geração de eletricidade - consiste na avaliação das seis fases que envolvem o processo de geração de eletricidade no setor sucro-alcooleiro. A definição precisa das seis fases permite o desenvolvimento de todo o contexto que envolve a geração de eletricidade, ou seja, deve ser levada em conta o impacto ambiental de toda a cadeia produtiva do ciclo da cana;
- 4) Estudo de casos - foram realizados com o objetivo de obter conhecimento e informações específicas para os cálculos do trabalho;

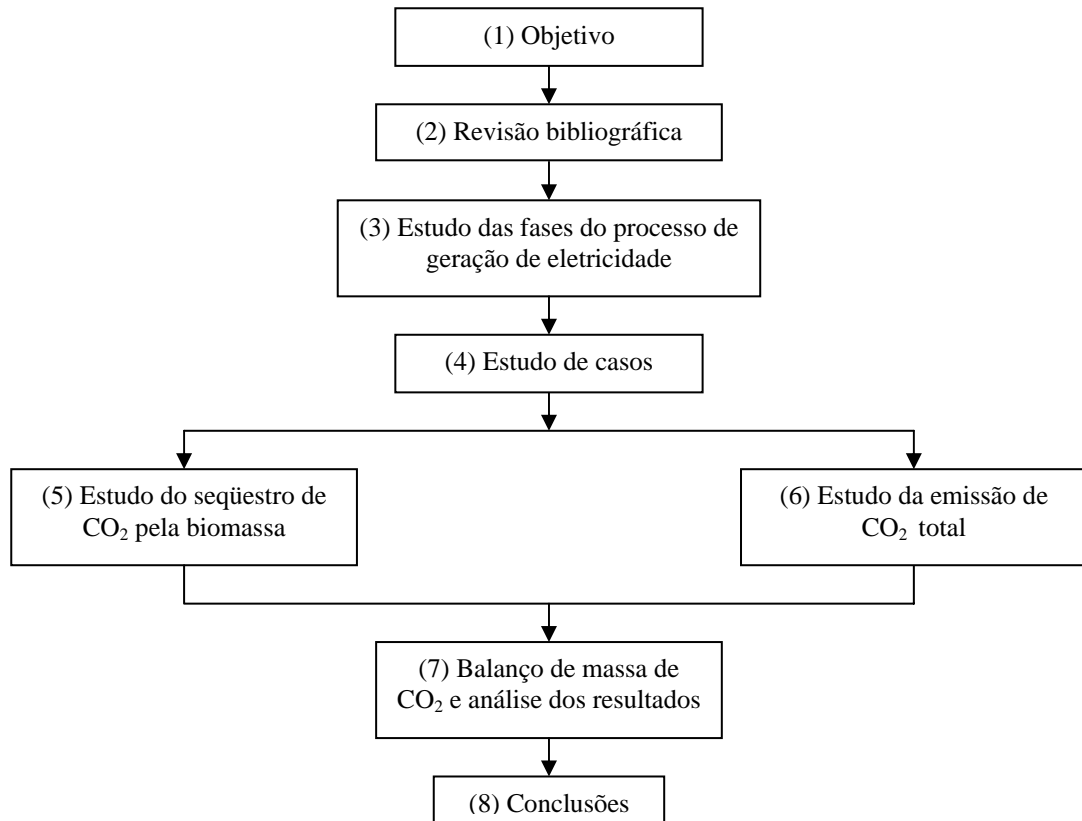


FIGURA 4.1- Fluxograma da metodologia

- 5) Estudo do seqüestro de CO<sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar - fundamentando-se na pesquisa de vários autores, foi elaborado o cálculo do seqüestro de dióxido de carbono durante a fotossíntese da biomassa vegetal (ALEXANDER, 1973; CAMPBELL, 2000; RAVEN, 2001; BEEHARRY, 2001 a e b, dentre outros).
- 6) Estudo da emissão de CO<sub>2</sub> total - consiste no cálculo que envolve não apenas a emissão originária da queima da matéria-prima, mas também todas as diferentes atividades incluídas na produção de eletricidade que vão desde a produção e manutenção dos equipamentos e máquinas agrícolas até a emissão decorrente da queima do diesel nos caminhões e "treminhões" (KADAM, 2002; CUNHA *et al.*, 2000, dentre outros).
- 7) Balanço de CO<sub>2</sub> e análise dos resultados - considerando o seqüestro e a emissão de CO<sub>2</sub>, é apresentado um balanço de dióxido de carbono que mostra as compensações que o seqüestro da vegetação garante no impacto ambiental final.

## 8) Conclusões.

### 4.2.1- Estudo de casos

Duas usinas sucro-alcooleiras cogeneradoras de eletricidade excedente foram visitadas para estudo de caso no período de 6 a 10 de outubro de 2003. A FIGURA 4.2 mostra a localização dos empreendimentos estudados.



FIGURA 4.2- Mapa de localização das usinas

A seguir, é descrito as características de cada uma delas.

#### Usina Barra Grande:

- Localização- Rua 15 de Novembro, 805, Lençóis Paulista- SP
- Grupo- Empresas Zillo Lorenzetti
- Capacidade média moagem- 903 tC/h
- Produção de eletricidade excedente- 17 MW/safra 2002
- Contrato de venda de energia- CPFL
- Outros produtos- Álcool, Açúcar, Leveduras e Energia Elétrica

#### Usina Equipav S/A. Açúcar e Álcool:

- Localização- Rodovia Marechal Rondon, km 455, Promissão- SP
- Grupo- Equipav
- Área de plantio- 35.000 ha, com 29.000 ha de colheita/safra

- Produção de eletricidade excedente total- 28 MW/safra 2003
- Contrato da venda de energia- ELETROPAULO
- Outros produtos- Álcool, Açúcar, Levedura Seca e Energia Elétrica
- Observação- Certificada para obtenção de créditos de carbono.

#### 4.2.2- Fronteiras de estudo e suas características

É importante definir as fronteiras para a avaliação de ciclo de vida. Na FIGURA 4.3 são mostradas as etapas inclusas dentro das fronteiras do ciclo de vida de produção de eletricidade excedente. As fases do processo estão descritas na ordem em que acontecem ao longo do ciclo da cana-de-açúcar que consiste de seis anos.

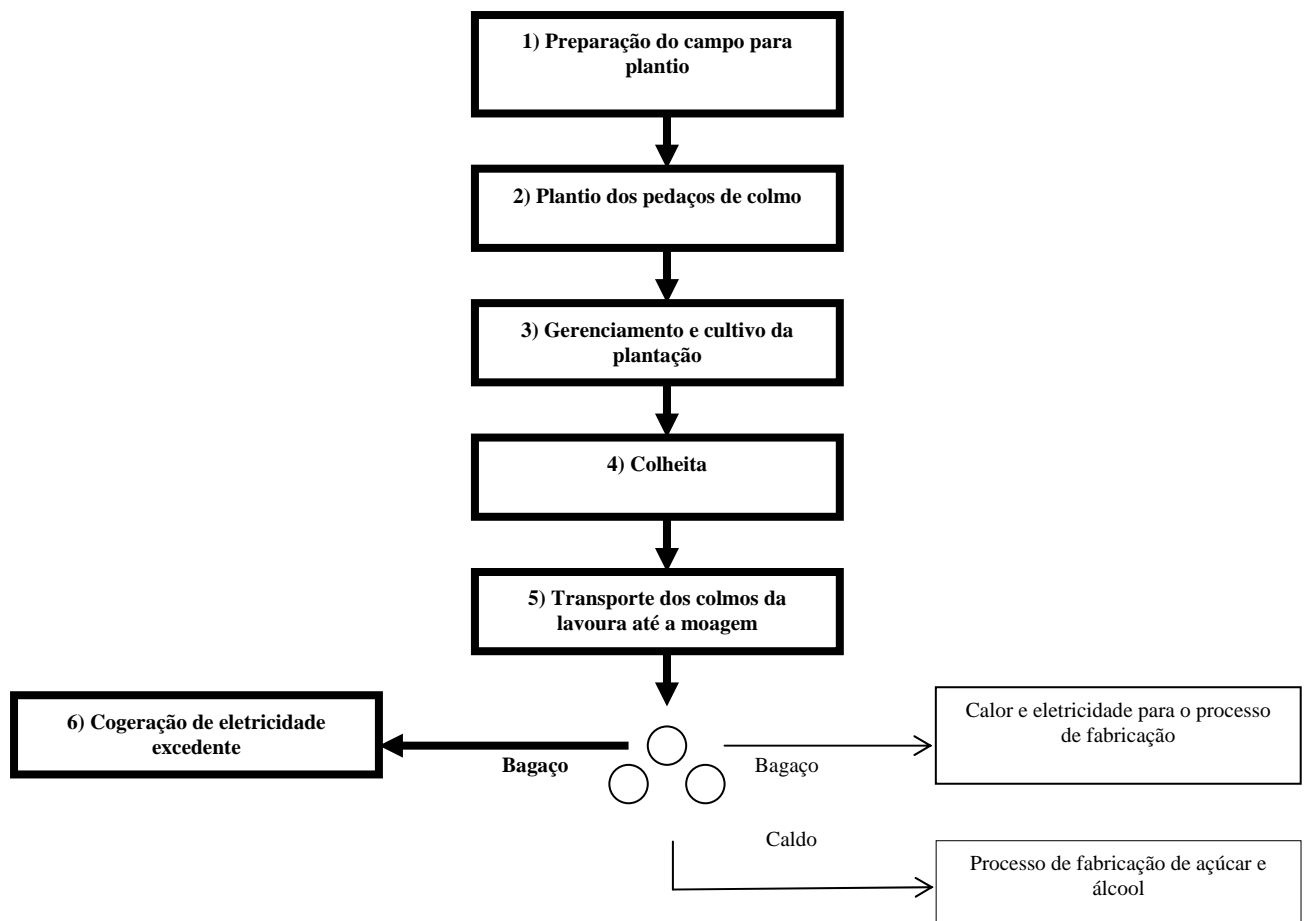


FIGURA 4.3- Em negrito são mostradas as fronteiras de estudo- fases de 1) a 6) envolvidas na produção de eletricidade excedente em usinas sucroalcooleiras

- 1) Preparação do campo para plantio. Consiste de gradagem e subsolagem. A grade irá destruir e picar as raízes da plantação anterior e a subsolagem tem como objetivo afofamento da terra. Ocorre uma vez a cada seis anos com objetivo de preparar o solo para novas mudas da cana-planta. A preparação do campo para o plantio é feita com tratores e máquinas agrícolas.
- 2) Plantio dos pedaços de colmo. Consiste da propagação, sulcação, transporte e cobertura das mudas. A propagação da cana-de-açúcar consiste da seleção de uma plantação madura de primeiro corte de onde retira-se as mudas e transporta-se para o local de plantio. A sulcação consiste da abertura de um sulco de 25 a 30 centímetros de profundidade e a cobertura é com terra e adubo. As operações de plantio necessitam de mão-de-obra e ocorrem apenas uma vez a cada ciclo da cana.
- 3) Gerenciamento e cultivo da plantação. Para o plantio de novas mudas é aplicado sobre as brotas uma vez a cada seis anos os seguintes insumos: torta de filtro, adubos, vinhoto, inseticidas, herbicidas e fertilizantes. O calcáreo é aplicado em cima das brotas após o plantio e pode voltar a ser aplicado dependendo da deficiência de nutrientes. Em média, é utilizado apenas uma vez em cada seis anos. A aplicação da torta de filtro é feita no fundo do sulco, em plantações onde a produtividade é baixa. É aplicada apenas uma vez a cada seis anos. O adubo é colocado dentro do sulco após o plantio. Além disso, também é necessário aplicá-lo sobre as soqueiras todos os anos após a colheita. A aplicação do vinhoto é feita em áreas próximas à usina. Os inseticidas são espalhados sobre o sulco durante o plantio de novas mudas. Os herbicidas são aplicados a cada ano. A aplicação de fertilizantes irá depender da característica do solo local. A irrigação é uma prática muito rara no Estado de São Paulo devido às chuvas freqüentes nesta região. Na FIGURA 4.4 é mostrado um depósito de vinhoto, parte deste resíduo da produção de álcool (cerca de 20 %) é utilizado como adubo na plantação de cana-de-açúcar, o restante, constitui um problema ambiental na sua disposição final.



FIGURA 4.4- A fotografia mostra a vinhaça (ou vinhoto) resíduo do processo industrial utilizado como fertilizante. Fonte: (CHOHFI, 2003).

- 4) Colheita. A safra da cana-de-açúcar é de abril até novembro. Nesta época a cana estará sendo colhida em vários pontos estratégicos da plantação. Em média a colheita é feita 25 % mecanizada e 75 % corte manual. Na FIGURA 4.5 são mostradas soqueiras da cana-de-açúcar brotando após a colheita. Na FIGURA 4.6 é mostrada uma máquina colhedeira e o caminhão agrícola. A máquina colhedeira irá abastecer o caminhão agrícola que irá transportar os colmos para o “treminhão”.



FIGURA 4.5- A fotografia mostra as soqueiras da cana-de-açúcar com três semanas no período de crescimento após a colheita. Fonte: (CHOHFI, 2003).



FIGURA 4.6- A fotografia mostra a máquina colhedeira e o caminhão agrícola. Fonte: (CHOHFI, 2003).

- 5) Transporte dos colmos da lavoura até a moagem. Após a colheita o caminhão agrícola irá levar os colmos para os "treminhões" que irão transportá-los para a usina onde serão moídos. Na FIGURA 4.7 é mostrado o "treminhão".



FIGURA 4.7- A fotografia mostra a operação de transporte dos colmos da lavoura até a usina. Fonte: (CHOHFI, 2003).

- 6) Cogeração de eletricidade excedente. Após a moagem, o bagaço-de-cana vai ser utilizado para suprir as necessidades de calor e eletricidade para o processo. O bagaço restante pode ser utilizado para a geração de eletricidade excedente vendida às concessionárias. Na FIGURA 4.8 é mostrado um croqui de cogeração no setor sucro-alcooleiro que utiliza o bagaço como combustível (FIGURA 4.9).

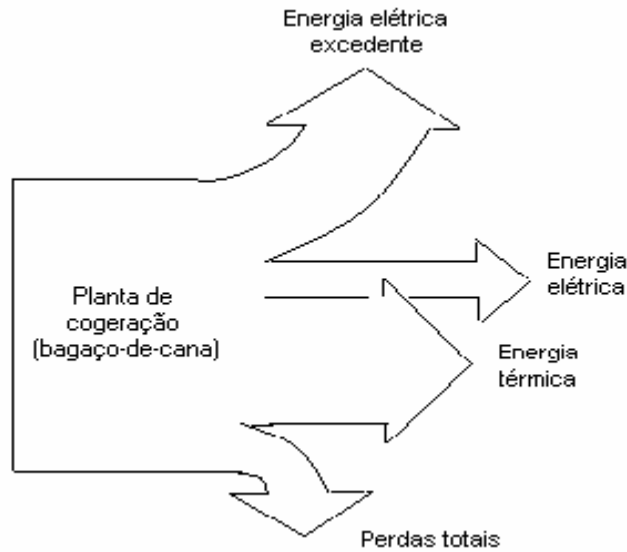


FIGURA 4.8- Sistema de cogeração no setor sucro-alcooleiro



FIGURA 4.9- A fotografia mostra um depósito de bagaço, o combustível usado para geração de energia. Fonte: (CHOHFI, 2003).

A fim de analisar o ciclo de vida da geração de eletricidade excedente será determinada a fração de bagaço total utilizado como combustível neste processo. Uma vez definido este valor, o mesmo será utilizado para a partição das emissões e seqüestro de CO<sub>2</sub> nas etapas que antecedem a moagem da cana.

Dadas as circunstâncias, na abordagem da análise e cálculos contidos neste trabalho, a seguinte suposição é feita: nem toda a cana que foi colhida em uma safra está relacionada com a geração de eletricidade excedente. Por



isto, é preciso definir a fração do bagaço (e da biomassa da cana-de-açúcar) que é utilizado para a geração de eletricidade excedente. A produção de eletricidade no setor sucro-alcooleiro aproveita a lavoura e sistema de transporte campo-indústria organizado da indústria do álcool e açúcar que libera o insumo energético pronto após a moagem (CAMARGO, 1990). Durante todo cultivo e colheita da cana existem emissões associadas ao uso de máquinas e equipamentos, transporte e produção de insumos. Estas emissões não podem ser alocadas apenas para a produção de eletricidade e isto será considerado nos cálculos contidos no Capítulo 5. Pode-se ver que nem toda cana que esta sendo plantada, processada e transportada irá gerar eletricidade excedente e, por isto nem todas as emissões que ocorrem nas fases agrícolas são emissões pertinentes ao ciclo de vida em estudo.

No cálculo da fração da cana-de-açúcar que irá gerar eletricidade excedente são utilizados dados obtidos de usinas sucro-alcooleiras através de uma análise exérgica. Os resultados estão inclusos na TABELA 5.6, inserida no capítulo Resultados e análise. Ainda na TABELA 5.6, a produção de energia do bagaço nas usinas pode ser dividida em produção elétrica, mecânica e térmica. Sabe-se então que, uma média de bagaço será utilizada para a produção de potência elétrica. A produção elétrica total da usina pode ser dividida entre o consumo nos processos de fabricação e a eletricidade excedente comercializada. Foram utilizados, ainda, dados médios de eletricidade excedente produzida por produção elétrica total em três usinas brasileiras, como descrito na TABELA 5.7. Portanto, uma porcentagem da eletricidade produzida será vendida. Por meio dos resultados das TABELAS 5.6, 5.7 e FIGURA 5.2, conclui-se quanto do bagaço e da cana-de-açúcar irá produzir eletricidade excedente.

#### 4.2.3- Biomassa da cana-de-açúcar e o seqüestro de CO<sub>2</sub> atmosférico

A biomassa da cana-de-açúcar que é encontrada no campo, consiste de partes subterrâneas e aéreas incluindo raízes e as pontas e folhas, palha e colmos. Durante a colheita, separam-se os colmos para uso no processo de moagem, enquanto os topos e folhas e a palha da cana são deixadas no

campo. Após a moagem, o colmo da cana irá ser separado em bagaço-de-cana e caldo. A torta de filtro e o melaço são subprodutos do processamento do caldo na indústria do álcool e do açúcar. O bagaço é o combustível usado como insumo energético.

Existem diversas variedades de cana. Cada uma com características próprias como o teor de açúcar e bagaço, rendimento agrícola e brotação. No entanto, para fins deste trabalho serão consideradas como iguais as características da biomassa da cana-de-açúcar independentemente da variedade ou país de origem.

De acordo com BEEHARRY (2001 b), pode-se dividir a biomassa da cana-de-açúcar em oito componentes distintos que incluem 1) o sistema de raízes, 2) a palha seca da cana-de-açúcar deixada no campo após a fase de colheita, 3) as pontas ou topos e folhas da cana, 4) o bagaço-de-cana, o caldo que consiste de 5) açúcar e 6) água, impurezas no caldo após a adição do calcáreo 7) torta de filtro e 8) o melaço, um resíduo do processamento industrial do caldo não transformado completamente em açúcar sólido. Na FIGURA 4.10 são mostradas as raízes da cana-de-açúcar. Nas FIGURAS 4.11 e 4.12 são mostrados os componentes da biomassa, a torta de filtro e o melaço.



FIGURA 4.10- Fotografia mostrando as raízes da biomassa da cana-de-açúcar. Fonte: (CHOHFI, 2003).



FIGURA 4.11- A fotografia mostra a torta de filtro depois da moagem. Fonte: (CHOHFI, 2003).



FIGURA 4.12- Fotografia do melão sendo retirado durante o processo de produção de açúcar. Fonte: (CHOHFI, 2003).

BEEHARRY (2001 b), determinou a porção de cana que constitui cada um dos oito componentes acima. Os colmos são a matéria-prima para todos os processos e são extraídos durante a colheita, por isto, a porção total de cada componente da biomassa da cana-de-açúcar total é calculada como uma porcentagem em peso dos colmos, como mostrado na FIGURA 4.13. Dados de Porto Rico, ALEXANDER (1973) mostram que o colmo da cana consiste de 68,6% em fração de peso da biomassa aérea da cana-de-açúcar total, as pontas e folhas 17,1% e a palha 14,3%. Ainda segundo BEEHARRY (2001 b), as raízes consistem de 9,6% da biomassa da cana-de-açúcar total. O colmo é composto de 30% bagaço, 5% torta de filtro e 65% de caldo, este que será utilizado na indústria é constituído por 52% água, 3% melão e 10% açúcar. A água está presente em todos os componentes da biomassa menos

o açúcar, componentes como a torta de filtro e os topos e folhas contém mais de 50% de umidade. No total, a biomassa consiste de cerca de 68,1% em peso de água. Impurezas que não fazem parte da biomassa da cana-de-açúcar também podem ser encontradas junto com os colmos.

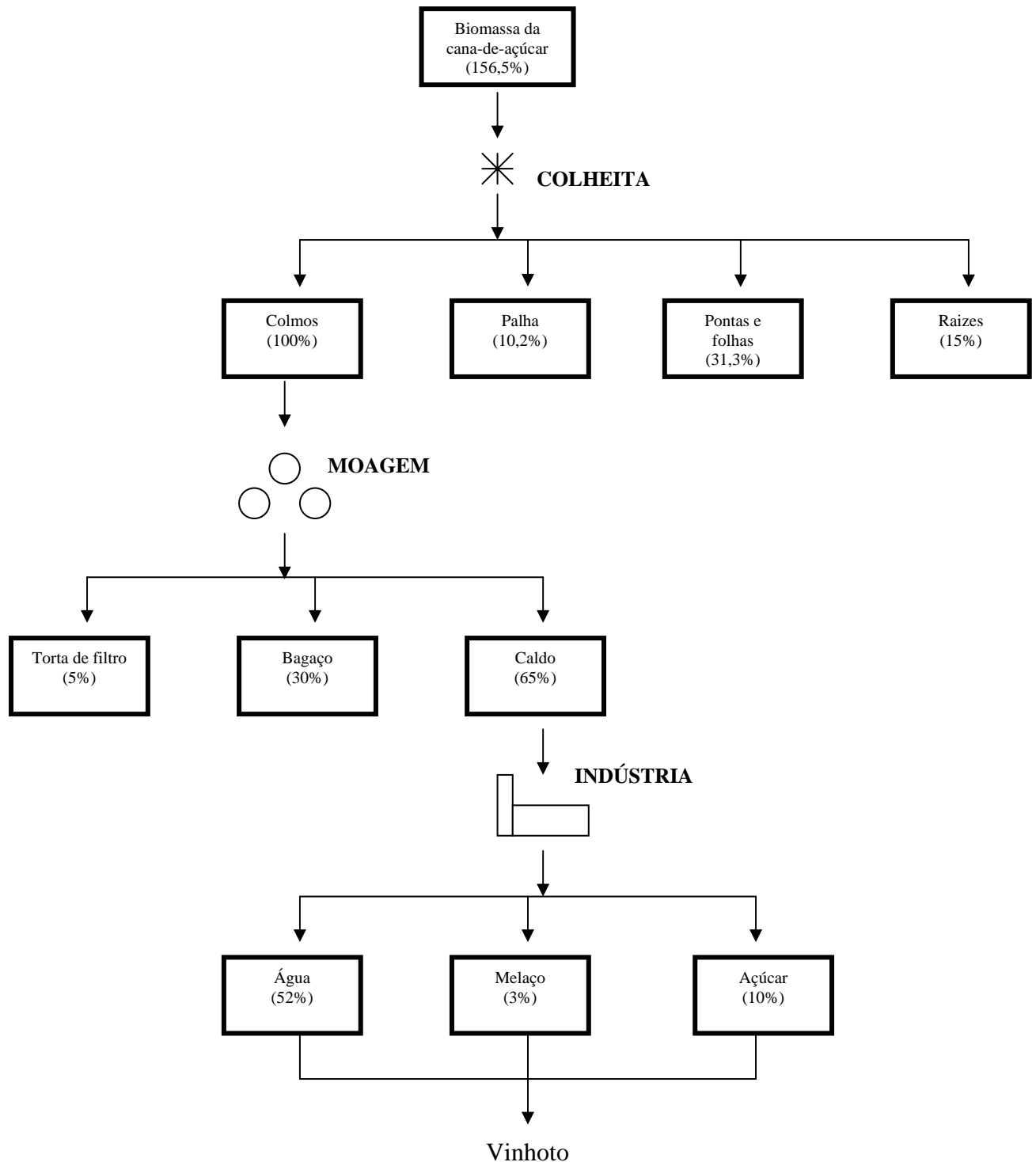
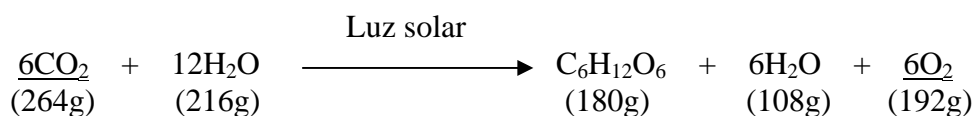


FIGURA 4.13- Biomassa da cana-de-açúcar em suas várias formas. Fonte: dados adaptados (ALEXANDER, 1973; BEEHARRY, 2001 a e b).

Segundo ALEXANDER (1973), o CO<sub>2</sub> atmosférico está presente na biomassa das plantas como carbono em forma de amido, sacarose e glicose. Por isto, para saber o quanto de CO<sub>2</sub> é seqüestrado pela biomassa usamos o seu conteúdo de carbono. Para o cálculo do total de CO<sub>2</sub> seqüestrado pela biomassa da cana-de-açúcar, seguem-se os passos a seguir. Primeiro, calcula-se a porção de biomassa seca ( $\gamma_{bs}$ ) que esta sendo produzida de cada componente utilizando a equação (1),  $\gamma_{bs} = \gamma_{total} \times (1 - \%u)$ . Neste cálculo multiplica-se a produção total de cada componente da biomassa da cana-de-açúcar por [1 - (%u)], onde %u é a porcentagem de umidade de cada componente. Os resultados e cálculos são mostrados nas TABELAS 5.8 e 5.9.

Através de BEEHARRY (2001 b), foram obtidas informações sobre o conteúdo (teor) de carbono (%c) na biomassa seca de cada componente da cana-de-açúcar. Os valores estão apresentados nas TABELAS 5.10 e 5.11 no item Resultados e Análise. Para calcular o conteúdo total de carbono em cada fração da cana-de-açúcar (Cbs) conforme a equação (2)  $Cbs = (\gamma_{bs}) \times (\%c)$ , admitiu-se estes valores juntamente com os cálculos anteriores da porção de biomassa seca ( $\gamma_{bs}$ ).

Durante a fotossíntese plantas como a cana-de-açúcar utilizam-se do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico, energia na forma de luz solar, água e cloroplastos para produzir alimento, água e oxigênio (O<sub>2</sub>). A equação (3), mostra esta conversão do dióxido de carbono para uma molécula de alimento contendo carbono nas proporções indicadas na equação química balanceada (CAMPBELL, 2000; RAVEN, 2001).



Conforme BEEHARRY (2001 b), o carbono contido na biomassa da cana-de-açúcar originou do CO<sub>2</sub> atmosférico seqüestrado durante a fotossíntese, nas proporções estequiométricas de acordo com o peso

molecular do CO<sub>2</sub> frente ao elemento carbono. Pode-se então adotar a metodologia de cálculo apresentada por BEEHARRY (2001 b), no cálculo do seqüestro equivalente de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>abs) de um certo conteúdo de carbono. O calculo é feito de acordo com a equação (4) a seguir, onde (Cbs) é o conteúdo total de carbono contido na biomassa e  $\left(\frac{44}{12}\right)$  é a relação dos pesos estequiométricos do CO<sub>2</sub> (44g) frente ao elemento carbono (12g). Temos,

$$\text{CO}_2\text{abs} = (\text{Cbs}) \times \left(\frac{44}{12}\right).$$

Conforme MASTERS (1990) a fórmula química balanceada da fotossíntese pode ser usada no cálculo da emissão de O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>em). A cana não só seqüestra CO<sub>2</sub> durante o seu cultivo como também emite o oxigênio O<sub>2</sub>. Para calcular O<sub>2</sub>em, incluem-se os pesos moleculares em (g) verificando que a fórmula química esta balanceada, calculamos então quantas gramas de O<sub>2</sub> iremos produzir conhecendo o seqüestro de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>abs) da cana-de-açúcar em gramas (g). Os cálculos são feitos de acordo com a equação (5),

$$\text{O}_2\text{em} = \text{CO}_2\text{abs} \times \left(\frac{192}{264}\right).$$

#### 4.2.4- Emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida

Na abordagem da análise e cálculos contidos neste trabalho, outra suposição é feita a fim de analisar o ciclo de vida da geração de eletricidade excedente. Observa-se todas as emissões de CO<sub>2</sub> advindas da liberação do carbono fixado pela cana-de-açúcar no seu crescimento, ou seja, na queima da palha no campo, na queima do bagaço em caldeiras, na fermentação alcoólica, na metabolização do açúcar e no seu consumo final e da queima do etanol em motores, são compensadas pela fixação da mesma quantidade de carbono na safra seguinte, com novo crescimento da cana, e por isto não alteram o balanço líquido (LEÃO, 1980). Outros autores como KADAM (2002) afirmam que o carbono contido na fração de biomassa de onde se origina o etanol é derivado do CO<sub>2</sub> absorvido pelas plantas durante a fotossíntese. Estes átomos de carbono são liberados no fim da vida do produto

predominantemente na forma de CO<sub>2</sub>. São liberadas ainda mínimas quantidades de CO, hidrocarbonos e CH<sub>4</sub>. Estas emissões de CO<sub>2</sub> são balanceadas (apesar de não ao mesmo tempo) pelo seqüestro que ocorre durante o crescimento e cultivo da vegetação.

Conclui-se que o carbono contido na biomassa da cana-de-açúcar foi originado do CO<sub>2</sub> atmosférico seqüestrado durante a fotossíntese. É importante ressaltar que o carbono voltará para a atmosfera nas mesmas quantidades seqüestradas após a colheita. Assim, sabe-se que se todo sistema energético, industrial, agrícola e ambiental de uma usina sucro-alcooleira for estudado, a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida pela biomassa da cana-de-açúcar irá voltar para a atmosfera. No entanto, o presente trabalho apenas irá considerar o estudo do retorno do CO<sub>2</sub> referente à fração da biomassa incluída na avaliação do ciclo de vida em estudo.

As emissões de dióxido de carbono provenientes da biomassa da cana-de-açúcar incluída nas fronteiras da avaliação de ciclo de vida de produção de eletricidade excedente (FIGURA 4.3), ocorrem na queima de 26,4% do bagaço e na decomposição da mesma fração de palha, pontas e folhas e raízes no campo. Para fins deste estudo, no entanto, o retorno do CO<sub>2</sub> incluído na fração de biomassa contida no caldo e seus derivados como o melaço, que serão utilizados para fins industriais, não será considerado, pois será emitido não na geração de energia e sim na metabolização do açúcar por organismos vivos no ciclo de vida da indústria do açúcar e do álcool.

Um cenário realista sobre a emissão indireta de CO<sub>2</sub> no ciclo de vida da produção de eletricidade no setor sucro-alcooleiro é apresentado na FIGURA 4.14. Ela mostra as atividades que irão emitir CO<sub>2</sub> para cada fase desde a 1) preparação do campo para plantio até 5) o transporte dos colmos da lavoura até a moagem mostradas na FIGURA 4.3. Cada atividade emissora está listada na ordem em que acontece cronologicamente. Todos os valores de emissão de CO<sub>2</sub> desde a produção e manutenção de equipamentos e máquinas agrícolas (1.1) até o transporte dos colmos até a moagem em caminhões e “treminhões” (5.1) estão baseados num intervalo

de tempo de um ciclo de vida de geração de eletricidade excedente que compreende seis anos.

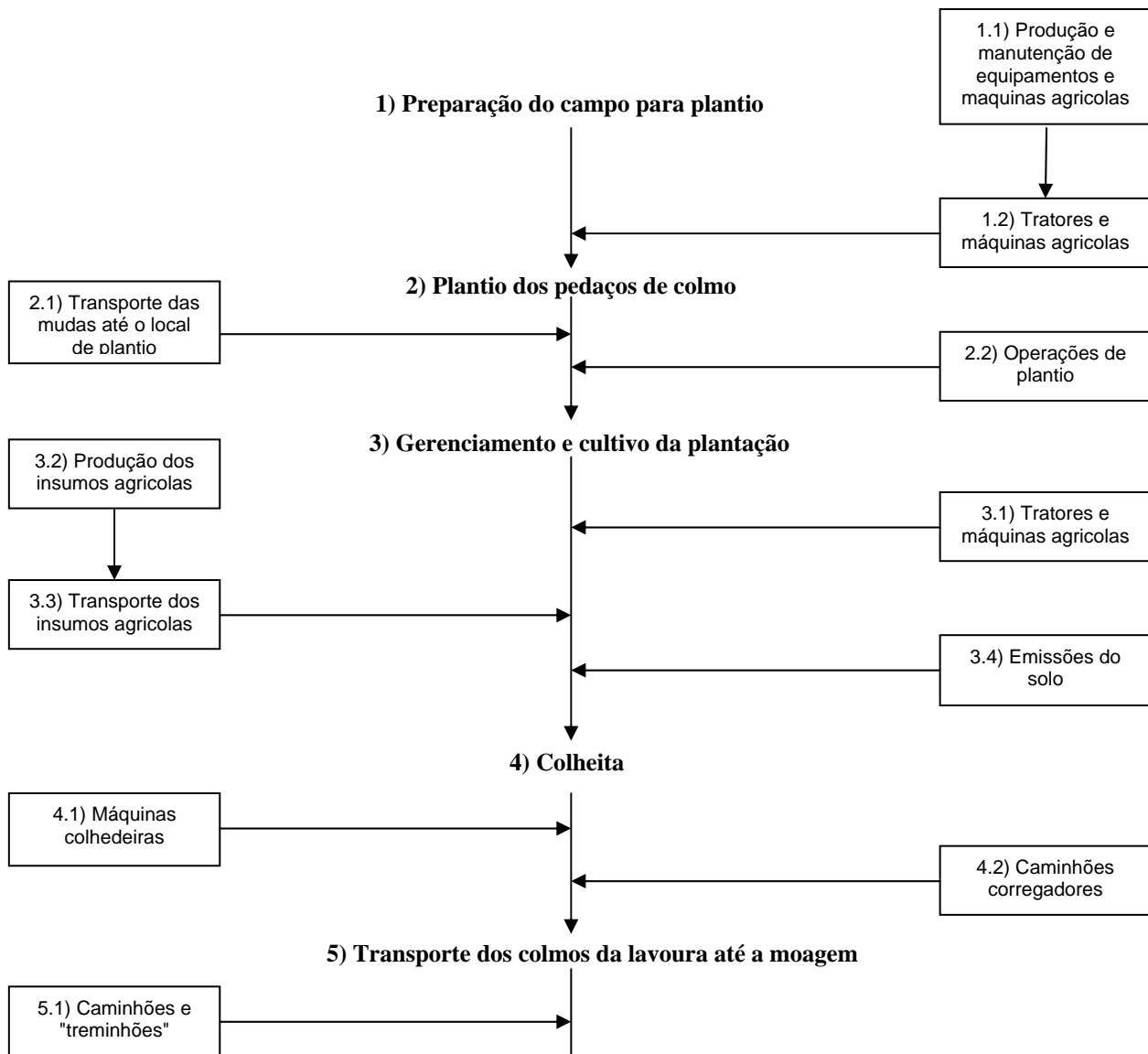


FIGURA 4.14- Emissões indiretas no ciclo de vida de geração de eletricidade excedente do setor sucro-alcooleiro. Fonte: dados adaptados de HORTA (1987), MACEDO (2003) e LEWANDOWSKI (1995).

Foram levantados o consumo de diesel em algumas atividades agrícolas e de transporte incluídas no item 5.3.2 do capítulo 5. Os consumos de diesel são representativos da prática em usinas produtoras de eletricidade excedente no Estado de São Paulo. Para calcular o CO<sub>2</sub> total emitido nestas operações consumidoras de diesel é utilizado o fator de emissão do diesel



em LEWANDOWSKI (1995), conforme os cálculos 1), 2), 3), 4) e 5) mostrados no item 5.3.2.

Neste estudo também foram utilizados trabalhos de HORTA (1987) e MACEDO (2003), onde pode-se obter dados específicos referentes ao consumo de diesel e de energia em outras etapas importantes do ciclo de vida estudado, que incluem a 1.1) Preparação e manutenção de equipamentos e máquinas agrícolas, 2.1) Transporte das mudas até o local de plantio, 3.1) Aplicação dos insumos agrícolas, 3.2) Produção dos insumos agrícolas, produção de máquinas e propagação das mudas. Para calcular a emissão indireta de dióxido de carbono foram considerados cada um destes consumos junto com os respectivos fatores de emissão mostrados na TABELA 3.2 do Capítulo 3 - Revisão bibliográfica.

Para o cálculo das emissões do solo foram assumidos dados de LEWANDOWSKI (1995) onde 1 hectare de plantação nas condições climáticas da Alemanha emite 450 KgCO<sub>2</sub> como mostrado na TABELA 3.2.

Emissões de dióxido de carbono provenientes da ampliação e modernização do parque industrial da usina sucro-alcooleira para geração e comercialização de eletricidade excedente são considerados como de pequena relevância, por isso, no balanço geral de CO<sub>2</sub> não serão levados em conta.

#### 4.2.5- Investimentos previstos através do mercado de créditos de carbono para diferentes formas de geração de eletricidade

Para que um projeto sustentável do setor energético possa receber financiamento através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto um documento de concepção do projeto terá que ser feito e enviado para uma entidade operacional designada. O documento de concepção do projeto deverá incluir toda informação sobre o projeto específico de MDL como por exemplo o tipo de metodologia aprovada adotada para o projeto e descrição de como as emissões antrópicas de gases de efeito estufa são reduzidas.

A entidade operacional designada irá analisar o documento durante a fase de validação e se este for aceito será registrado obtendo assim reduções certificadas de emissões (RCEs) ou créditos comercializáveis de carbono.

O documento de concepção do projeto deverá ser feito de acordo com as metodologias aprovadas para projetos de MDL. As metodologias aprovadas para projetos de MDL são várias e deverão ser adotadas de acordo com a categoria de fonte de emissão na qual o projeto está sendo feito. Algumas envolvem estimações a partir de valores de carbono contido em combustíveis e outras a aplicação de dados de fontes internacionais.

Independentemente da metodologia utilizada o documento de concepção do projeto terá que calcular a adicionalidade do projeto no cálculo da magnitude dos financiamentos previstos. A atividade de projeto do MDL é adicional se reduzir as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes para níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto do MDL registrada. Os níveis de emissões antrópicas que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto do MDL proposta, também conhecida como linha de base, terá que ser calculada levando em consideração fatores como por exemplo emissões médias de projetos similares ou até a expansão do setor elétrico. A linha de base de uma atividade de projeto do MDL é o cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta.

## Capítulo 5- Resultados e análise

Este capítulo apresenta os cálculos e resultados referentes à geração de eletricidade excedente, discutidos conforme a sequência do Capítulo 4.

### 5.1- Fração de bagaço utilizado

Através da análise de parâmetros de operação da usina sucroalcooleira estudada e do método exergético, foram feitos os cálculos de alocação do combustível que irá gerar eletricidade na planta de cogeração. O método exergético envolve cálculos fundamentados na equação (6) de exergia da água e vapor (SHAPIRO, 1996):  $e_v = \dot{m} \times (h - h_0) - T_0 \times (S - S_0)$  onde:  $e_v$  = Exergia do vapor;  $\dot{m}$  = Vazão;  $h$  = Entalpia em um ponto fixo;  $h_0$  = Entalpia em um ponto referência;  $T_0$  = Temperatura ambiente de referência;  $S$  = Entropia em um ponto fixo;  $S_0$  = Entropia em um ponto referência.

Dados atmosféricos e de exergia dos fluxos de água e vapor foram admitidos nos cálculos conforme os apresentados na TABELA 5.1 e 5.2.

TABELA 5.1- Condições de referência do ambiente

$(T_0)$ Temperatura de Referência (°C)	25
$(p_0)$ Pressão de Referência (bar)	1,013
$(h_0)$ Entalpia de Referência (kJ/kg)	104,8
$(S_0)$ Entropia de Referência (kJ/kgK)	0,3667

TABELA 5.2- Dados de exergia dos fluxos de água e vapor

(p) Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	(T) Temperatura (°C)	(h) Entalpia (kJ/kg)	(s) Entropia (kJ/kgK)	(e) Exergia (kJ/kg)
65	520	3464,9	6,91	1410,14
42	400	3212	6,76	1201,99
21	350	3135	6,93	1074,81
2,5	180	2826,9	7,31	653,21
2,5	130	2722,7	7,10	617,82
0,13	51	2235,9	6,96	166,01
1,013	75	313,8	1,02	15,63



TABELA 5.4- Dados dos turboacionadores (gerais)

( $\dot{t}_a$ ) Turboacionadores	( $\dot{m}$ ) Vazão (t/h)	( $P_e$ ) Eixo	( $E$ ) Exergia	
Contrapressão	8,60	919,96	1.310,98	kW
Contrapressão	6,57	702,81	1.001,53	kW
Contrapressão	12,04	1.287,95	1.835,38	kW
Contrapressão	40,92	3.502,07	4.792,25	kW
Contrapressão	6,75	722,06	1.028,97	kW
Contrapressão	8,70	930,66	1.326,23	kW
Contrapressão	13,51	1.445,19	2.059,47	kW
Contrapressão	50,24	5.374,28	7.658,59	kW
Total		14.884,98	21.013,40	kW

É necessário também o cálculo da exergia dos processos, que recebem 18,5 t/h de vapor a 21 bar e 350,2 t/h vapor a 2,5 bar. Este vapor volta condensado do processo a uma pressão atmosférica de 1,013 bar e a uma temperatura de 75° C, conforme a TABELA 5.5.

TABELA 5.5- Detalhes do processo

	( $\dot{m}$ ) Vazão (t/h)	( $P_t$ ) Térmica	( $E$ ) Exergia	
Média Pressão	18,5	14.497,63	5.443,02	kW
Baixa Pressão	350,2	244.464,89	62.022,10	kW
Total		258.962,52	67.465,12	kW

A somatória das exergias das turbinas e do processo é utilizada para a definição da fração de bagaço correspondente à geração de potência elétrica. Na TABELA 5.6 é mostrado a potência elétrica, mecânica e térmica produzida como uma porcentagem da energia total do bagaço.

TABELA 5.6- Alocação final do combustível através da exergia

Produtos	Valor (kW)	( $E$ ) Exergia (kW)	Bagaço (%)
Potência Elétrica	60.250,00	76.336,78	46,32
Potência Mecânica	14.884,98	21.013,40	12,75
Potência Térmica	258.962,52	67.465,12	40,93
Total	334.097,50	164.815,30	100,00

Pode ser visto na TABELA 5.7, a parcela de produção elétrica total que constitui o consumo próprio e a eletricidade excedente em três usinas sucro-alcooleiras no Estado de São Paulo. Conclui-se que 57,1% da produção elétrica total (TABELA 5.6) nestas usinas será vendida.

TABELA 5.7- Energia exportada em três usinas brasileiras

	Usina 1 (kWh total safra, %)	Usina 2 (MW total safra, %)	Usina 3 (MW total safra, %)	Média
Produção total	143.485.100 (100,0%)	52,5 (100,0%)	28,8 (100,0%)	100,0%
Excedente	89.528.620 (62,4%)	28,0 (53,3%)	16,0 (55,6%)	57,1%
Consumo próprio	53.956.480 (37,6%)	24,5 (46,7%)	12,8 (44,4%)	42,9%

Desta maneira, é possível concluir que, admitindo que todo bagaço é utilizado na planta de cogeração, 57,1% de todo o volume que irá produzir eletricidade serão destinados à produção de eletricidade excedente. Os resultados são mostrados na FIGURA 5.2.

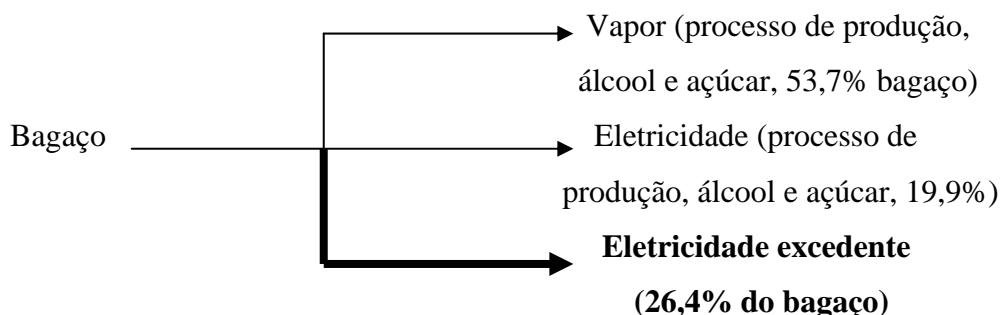


FIGURA 5.2- Parcela de bagaço utilizada na produção de eletricidade excedente

## 5.2- O seqüestro de CO<sub>2</sub> pela biomassa da cana-de-açúcar

Os seguintes dados são considerados nos cálculos:

- Produção de cana no primeiro corte (média) - 125 tC/ha (para 26,4%= 33,5 tC/ha);
- Produção de colmos no ciclo de cinco cortes (média) - 110 tC/ha (para 26,4%= 29,04 tC/ha);

- Plantação total para colheita/safra- 29.000 ha;
- Seqüestro de CO<sub>2</sub> pelas raízes apenas no primeiro corte.

No cálculo da matéria seca ( $\gamma_{bs}$ ) de cada um dos componentes da biomassa da cana-de-açúcar, segue-se a metodologia mostrada no item 4.2.3 do Capítulo 4. Os resultados dos cálculos são apresentados nas TABELAS 5.8 e 5.9 para o ciclo de primeiro corte e os cinco demais cortes. A seguir, é demonstrado um exemplo de cálculo para o açúcar e o bagaço, conforme a equação (1) já apresentada no item Metodologia.

Equação (1):  $\gamma_{bs} = \gamma_{total} \times (1 - \%u)$

$$\text{Açúcar, } \left( \frac{10}{156,5} \right) \times 52.427,5 = 3.350 \times (1 - 0) = 3.350,0 \text{ kg biomassa seca}$$

$$\text{Bagaço, } \left( \frac{30}{156,5} \right) \times 52.427,5 = 10.050 \times (1 - 0,53) = 4.723,5 \text{ kg biomassa seca}$$

TABELA 5.8- Produção total de biomassa seca (kg) para a produção de eletricidade excedente no primeiro corte (33,5 tC/ha/safra)

Componente da cana-de-açúcar		Fração da biomassa (%)	$\gamma_{total}$ (kg/ha/safra)	(% u)	$\gamma_{bs}$ (kg/ha/safra)
(A) Biomassa da					
cana que vai	Açúcar	10 (I1)	3.350	0,0 (II1)	3.350,0
para moagem	Melaço	3 (I2)	1.005	20,0 (II2)	804,0
	Torta de filtro	5 (I3)	1.675	75,0 (II3)	418,8
	Água	52 (I4)	17.420	100	0
	Bagaço-de-cana	30 (I5)	10.050	53,0 (II4)	4.723,5
(A) Sub-total, 100			33.500		9.296,3
(B) Biomassa da					
cana que fica	Topos e folhas	31,3 (I6)	10.485,5	68,0 (II5)	3.355,4
no campo	Palha	10,2 (I7)	3.417	19,3 (II6)	2.757,5
	Raízes	15 (I8)	5.025	70,0 (II7)	1.507,5
(B) Sub-total, 56,5			18.927,5		7.620,4
Média (toda cana)				68- 72 (II8)	
Total (A+B)		156,5	52.427,5		16.916,7
II- I8- BEEHARRY (2001 a), ALEXANDER (1973)			II4- AGUILAR (1995)		
III- I13- BEEHARRY (2001 a e b)			II5- II8- BEEHARRY (2001 b)		

$$\text{Açúcar, } \left( \frac{10}{156,5} \right) \times 46.167,5 = 2.950,0 \times (1 - 0) = 2.950,0 \text{ kg de biomassa seca}$$

$$\text{Bagaço, } \left( \frac{30}{156,5} \right) \times 46.167,5 = 8.850 \times (1 - 0,53) = 4.159,5 \text{ kg de biomassa seca}$$

TABELA 5.9- Produção total de biomassa seca (kg) para produção de eletricidade excedente em um corte típico de um ciclo de cinco cortes (29,5 tC/ha/safra)

Componente da cana-de-açúcar	Fração da biomassa (%)	$\gamma_{total}$ (kg/ha/safra)	(% U)	$\gamma_{bs}$ (kg/ha/safra)
(A) Biomassa da cana que vai para moagem				
Açúcar	10 (I1)	2.950	0,0 (II1)	2.950,0
Melaço	3 (I2)	885	20,0 (II2)	708,0
Torta de filtro	5 (I3)	1.475	75,0 (II3)	369,0
Água	52 (I4)	15.340	100	0
Bagaço-de-cana	30 (I5)	8.850	53,0 (II4)	4.159,5
(A) Sub-total, 100		29.500		8186,5
(B) Biomassa da cana que fica no campo				
Topos e folhas	31,3 (I6)	9.217	68,0 (II5)	2.950,0
Palha	10,2 (I7)	3.004	19,3 (II6)	2.424,0
(B) Sub-total, 56,5		16.667,5		5.373,0
Média (toda cana)			68- 72 (II8)	
Total (A+B)	156,5	46.167,5		13.559,5
II- I8- BEEHARRY (2001 a), ALEXANDER (1973)		II4- AGUILAR (1995)		
III- II3- BEEHARRY (2001 a e b)		II5- II7-BEEHARRY (2001b)		

No cálculo do conteúdo de carbono (Cbs) e do seqüestro de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>abs) da biomassa da cana-de-açúcar seguem-se os passos mostrados e explicados na metodologia conforme as equações (2) e (3). Além disso, é demonstrado um exemplo de cálculo para o açúcar e para os topos e folhas. O resultado dos cálculos foram feitos para cada componente da biomassa em toda a avaliação de ciclo de vida e são apresentados nas TABELAS 5.10 e 5.11. Uma aproximação da emissão de O<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>em) pela biomassa também é mostrado na TABELA 5.10 conforme a equação (4).



Açúcar,  $(3.350) \times 0,42 = 1.407 \text{KgC} \times \left(\frac{44}{12}\right) = 5.159,0 \text{kgCO}_2$  equivalente seqüestro

$$\left(\frac{5.159.000 \text{gCO}_2}{\chi \text{gO}_2} = \frac{264 \text{gCO}_2}{192 \text{gO}_2}\right) \therefore \chi \text{gO}_2 = 5.159.000 \times \left(\frac{192}{264}\right) = 3.752,0 \text{kgO}_2$$

emissão equivalente de O<sub>2</sub> do componente açúcar

Topos e folhas,  $(3.355) \times 0,493 = 1.654 \text{kgC} \times \left(\frac{44}{12}\right) = 6.065,0 \text{kgCO}_2$  seqüestro =

$$\left(\frac{6.065.000 \text{gCO}_2}{\chi \text{gO}_2} = \frac{264 \text{gCO}_2}{192 \text{gO}_2}\right) \therefore \chi \text{gO}_2 = 4.410,9 \text{kgO}_2 \text{ emissão.}$$

TABELA 5.10- Seqüestro equivalente de CO<sub>2</sub> no primeiro corte da biomassa da cana-de-açúcar para produção de eletricidade excedente (33,5 tC/ha/safra)

Componente da cana-de-açúcar		(γbs) (kg/ha/safra)	(%C)	(Cbs)	(CO <sub>2</sub> abs)	(O <sub>2</sub> em)
<b>(A) Biomassa</b>						
da cana que	Açúcar	3.350	42,0 (I1)	1.407	5.159,0	3.752
vai para	Melaço	804	35,7 (I2)	287	1.052,5	766
Moagem	Torta de filtro	418,8	40,0 (I3)	167,5	614,0	447
	Água	0	0,0 (I4)	0	0	0
	Bagaço-de-cana	4.723,5	49,4 (I5)	2.333,5	8.556,0	6.223
	Sub-total (A)	9.296,3		4.195	15.381,5	11.188
<b>(B) Biomassa</b>						
da cana que	Topos e folhas	3.355,4	49,3 (I6)	1.654	6.065,0	4.411
fica no	Palha	2.757,5	49,0 (I7)	1.351	4.954,0	3.603
Campo	Raízes	1.507,5	49,0 (I8)	739	2.710,0	1.971
	Sub-total (B)	7.620,4		3.744	13.729,0	9.985
	Média (toda cana)		31,7			
Total (A+B)		16.916,7		7.939	29.110,5	21.173

I1- Assumindo a fórmula química C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>

I2- O Brix é 0,85 (sacarose/sólidos secos)

I3- BEEHARRY (2001 a e b)

I4- Assumindo a fórmula química H<sub>2</sub>O

I5- HORTA (1987)

I6-I8- BEEHARRY (2001 b)

Açúcar,  $(2.950) \times 0,42 = 1.239 \text{KgC} \times \left(\frac{44}{12}\right) = 4.543,0 \text{kgCO}_2$  equivalente

seqüestro

$$\text{Topos e folhas, } (2.949) \times 0,493 = 1.453,8 \times \left(\frac{44}{12}\right) = 5.330,8 \text{ kgCO}_2 \text{ seqüestro}$$

TABELA 5.11- Seqüestro equivalente de CO<sub>2</sub> da biomassa da cana-de-açúcar para geração de eletricidade excedente num ano típico de um ciclo de cinco cortes (29,5 tC/ha/safra/soqueira)

Componente da cana-de-açúcar		(γbs) (kg/ha/safra)	(%C)	(Cbs)	(CO <sub>2</sub> abs)	(O <sub>2</sub> em) (kg/ha/5safras)
(A) Biomassa						
da cana que vai	Açúcar	2.950	42,0 (I1)	1.239	4.543,0	22.715,0
para moagem	Melaço	708	35,7 (I2)	253	927,0	4.640,0
	Torta de filtro	369	40,0 (I3)	148	543,0	2.715,0
	Água	0	0,0 (I4)	0	0	0
	Bagaço-de-cana	4.159,5	49,4 (I5)	2.055	7.535,0	37.675,0
	Sub-total (A)	8186,5		3.695	13.549,0	67.745,0
(B) Biomassa						
da cana que	Topos e folhas	2.949	49,3 (I6)	1.454	5.331,0	26.655,0
fica no campo	Palha	2.424	49,0 (I7)	1.188	4.356,0	21.780,0
	Sub-total (B)	5.373		2.642	9.687,0	48.435,0
	Média (toda cana)		31,7			
Total (A+B)		13.559,5		6.986	23.236,0	116.180,0
I1- Assumindo a fórmula química C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>			I2- O Brix é 0,85 (sacarose/sólidos secos)			
I3- BEEHARRY (2001 b)			I4- Assumindo a fórmula química H <sub>2</sub> O			
I5- HORTA (1987)			I6 e I7- BEEHARRY (2001 a e b)			

Na FIGURA 5.3, é mostrado o resumo do balanço de massa dos valores totais de seqüestro equivalente de CO<sub>2</sub> de uma plantação de cana-de-açúcar em um ciclo de vida. Estes valores são obtidos através da somatória dos valores contidos nas TABELAS 5.10 e 5.11, que são utilizados na obtenção do total seqüestro da biomassa em um ciclo de vida de geração de eletricidade excedente que compreende seis anos. Os topos e folhas, a palha, o bagaço e o açúcar são os componentes que contêm maior conteúdo de carbono e, conseqüentemente, os que seqüestram mais CO<sub>2</sub>. Por outro lado, as raízes, o melaço e a torta de filtro contêm um teor de carbono bem menor que o do restante da biomassa da cana-de-açúcar como pode ser visto através do seu baixo seqüestro.

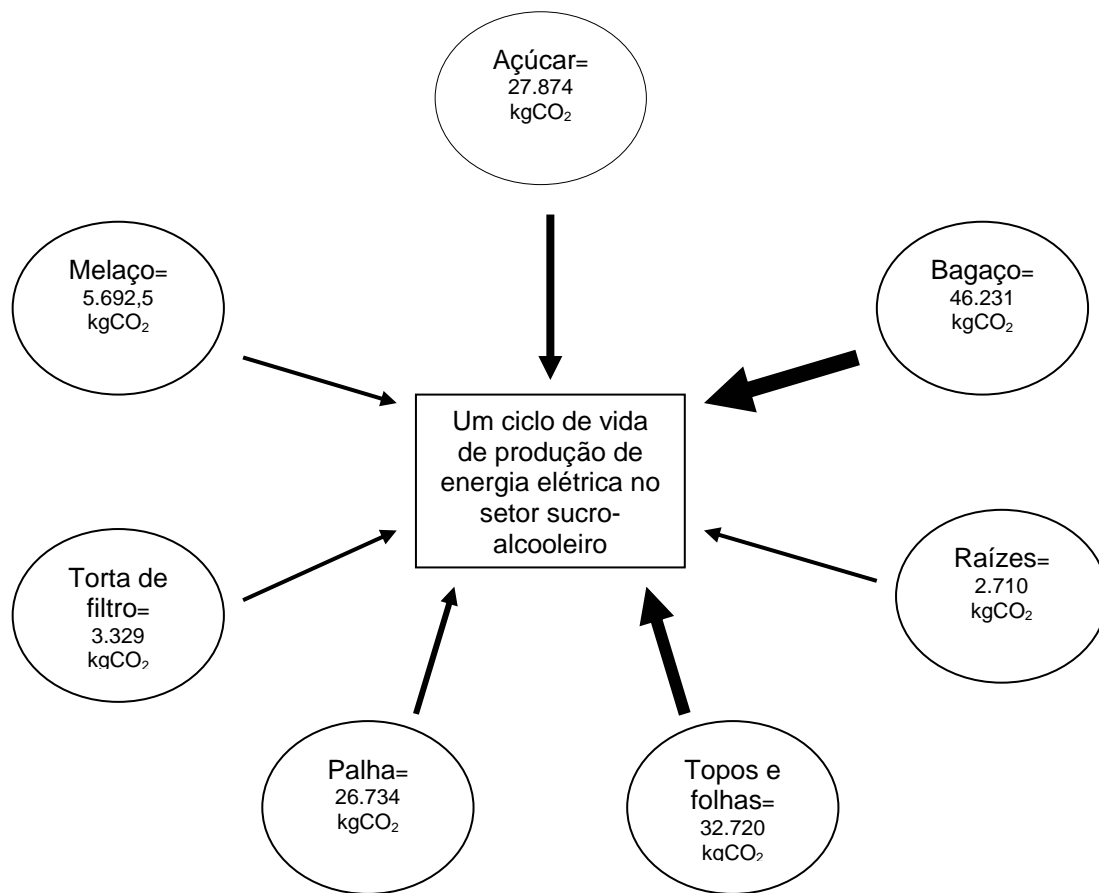


FIGURA 5.3- Resumo do balanço de massa do seqüestro total para cada componente de uma plantação de cana-de-açúcar (kgCO<sub>2</sub>/ha/ciclo de vida)

### 5.3- A emissão de CO<sub>2</sub> na produção de eletricidade

A emissão de CO<sub>2</sub> é calculada através de uma avaliação de ciclo de vida de produção de eletricidade. Os cálculos e resultados discutidos neste item irão dividir claramente a emissão que advém da própria biomassa da cana-de-açúcar e aquela que resulta de atividades e processos necessários à produção de eletricidade no cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> total.

#### 5.3.1- Emissão de CO<sub>2</sub> através do uso da biomassa da cana-de-açúcar

Para obter o resultado da emissão de CO<sub>2</sub> advinda da volta do carbono contido na biomassa da cana-de-açúcar após a colheita, foi elaborada a TABELA 5.12, onde apenas será considerada a emissão de CO<sub>2</sub>

para a biomassa incluída dentro das fronteiras da avaliação de ciclo de vida. Esta tabela é dividida em emissão de CO<sub>2</sub> no ciclo de primeiro corte, emissão de CO<sub>2</sub> no ciclo de cinco cortes e emissão total em seis anos. Nota-se que apenas o bagaço, a palha, pontas e folhas e raízes estão incluídas no ciclo de vida.

TABELA 5.12- Emissão de CO<sub>2</sub> total da biomassa incluída dentro das fronteiras da produção de eletricidade.

Componente da biomassa da cana-de-açúcar	Emissão de CO <sub>2</sub> no ciclo de primeiro corte (kgCO <sub>2</sub> /hectare/primeiro corte)	Emissão de CO <sub>2</sub> no ciclo de 5 cortes (kgCO <sub>2</sub> /hectare/5 demais cortes)	Emissão de CO <sub>2</sub> total (kgCO <sub>2</sub> /hectare/ciclo de vida)
Palha (6 cortes)	4.954	21.780	26.734
Topos e folhas (6 cortes)	6.065	26.655	32.720
Raízes (1corte)	2.710	0	2.710
Bagaço (6 cortes)	8.556	37.675	46.231
Total	22.285	86.110	108.395

### 5.3.2- Emissão de CO<sub>2</sub> por fontes indiretas

Admitiu-se para fins dos cálculos neste item os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> demonstrados na TABELA 3.2 e o consumo de combustível diesel de demanda de energia para várias fases do processo de acordo com HORTA (1987) e MACEDO (2003). A conversão de 1 kcal= 4,187 kJ foi considerada conforme MCMULLAN (1998).

As atividades que irão emitir CO<sub>2</sub> indiretamente no ciclo de vida de geração de eletricidade excedente ocorrem da fase 1) à fase 5), apresentadas na FIGURA 4.3. Cada uma destas atividades que originam, uma fonte da emissão de CO<sub>2</sub>, está mostrada detalhadamente na FIGURA 4.14. A TABELA 5.13 contém os resultados de cálculos da emissão de CO<sub>2</sub> em kgCO<sub>2</sub> por hectare para cada atividade emissora. Estes valores de emissão de CO<sub>2</sub> são organizados na TABELA 5.13 para o primeiro corte, para os cinco demais cortes e, finalmente, conforme o número de ocorrências em todo um ciclo de vida em estudo (kg de CO<sub>2</sub> por um hectare em todo um ciclo de vida).

TABELA 5.13- Emissões indiretas de CO<sub>2</sub> num ciclo de vida de produção de eletricidade excedente do setor sucro-alcooleiro

Fase emissora, processo, operação ou atividade que emite CO <sub>2</sub>	Ciclo de primeiro corte (kgCO <sub>2</sub> /ha 1º corte)	Ciclo de 5 cortes (kgCO <sub>2</sub> /ha)	Emissão total (kgCO <sub>2</sub> /ha/ciclo de vida)
1) Preparação do campo para plantio			
1.1) Produção e manutenção de equipamentos e máquinas agrícolas	75,3		75,3
1.2) Tratores e máquinas agrícolas	19,4		19,4
2) Plantio dos pedaços de colmo			
2.1) Transporte das mudas até o local de plantio	46,6		46,6
2.2) Operações de plantio	5,2		5,2
3) Gerenciamento e cultivo da plantação			
3.1) Aplicação (tratores e máquinas)			
Calcário	0,4		0,4
Herbicidas	0,4	2,0	2,4
Torta de filtro	27,3		27,3
Vinhoto	35,3	176,3	211,6
Adubo	9,2		9,2
3.2) Produção dos insumos agrícolas			
Calcário	16,8		16,8
Herbicidas	36,1	180,5	216,6
Inseticidas	2,0		2,0
3.3) Transporte dos insumos agrícolas			
Calcário	0,6		0,6
Herbicidas	0,6	3,0	3,6
Torta de filtro	0,6		0,6
Vinhoto	0,6	3,0	3,6
Adubo	0,6		0,6
Inseticidas	0,6		0,6
3.4) Emissões do solo			450,0
4) Colheita			
4.1) Máquinas colhedoras	4,6	33,5	38,1
4.2) Caminhões carregadores	304,7	1.267,5	1.554,2
5) Transporte dos colmos até a moagem			
5.1) "Treminhões"	67,6	338,0	405,6
Total			3.054,2

A memória dos cálculos da TABELA 5.13 para cada fase emissora são apresentados a seguir desde a preparação do campo para o plantio até o transporte dos colmos para a moagem.

#### 1) Preparação do campo para plantio

A preparação do campo, que ocorre sempre antes do plantio, consiste de gradagem e subsolagem, que necessitam de equipamentos e máquinas agrícolas como tratores. Estes emitem CO<sub>2</sub> durante as operações no campo.

## 1.1) Produção e manutenção de equipamentos e máquinas agrícolas

5.570 kcal/tC= 23.322 kJ/tC (HORTA, 1987)

$$0,02332 \frac{\text{GJ}}{\text{tC}} \times 80,9 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} = 1,89 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tC}} = 62,3 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

Ou em (MACEDO, 2003)= 33,07 MJ/tC

$$0,03307 \frac{\text{GJ}}{\text{tC}} \times 80,9 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} = 2,67 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 88,3 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

Por isto, será utilizada, para fins deste trabalho, a média dos dois autores correspondente a 75,3 kgCO<sub>2</sub>/ha.

TOTAL: 75,3 kgCO<sub>2</sub>/ha.

## 1.2) Tratores e máquinas agrícolas

Grade pesada 1 = 0,0447 L/tC

Grade pesada 2 = 0,0447 L/tC

Grade intermediária = 0,0154 L/tC

Grade niveladora = 0,0788 L/tC

Subsolagem = 0,0181 L/tC

TOTAL = 0,2017 L/tC

$$0,2017 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 6,7 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 19,37 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

## 2) Plantio dos pedaços de colmo

Neste item se incluem a propagação, sulcação, transporte e cobertura das mudas.

## 2.1) Transporte das mudas até o local de plantio:

16 L/ha (HORTA, 1987)

$$16 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 46,6 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

## 2.2) Operações de plantio:

Sulcação = 0,0414 L/tC (EQUIPAV, 2003)

Cobertura de sulco = 0,0121 L/tC (EQUIPAV, 2003)

TOTAL = 0,0535 L/tC

$$0,0535 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 1,8 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 5,2 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

## 3) Gerenciamento e cultivo da plantação

O cultivo da plantação necessita dos seguintes procedimentos: aplicação, produção e transporte dos insumos. Para a aplicação foi levada em consideração a emissão de CO<sub>2</sub> durante as operações dos tratores e máquinas agrícolas.

### 3.1) Tratores e máquinas agrícolas

Aplicação dos insumos agrícolas

São utilizados tratores e máquinas agrícolas nas seguintes operações:

Segundo EQUIPAV (2003),

A aplicação de calcário = 0,0044 L/tC= 0,15 L/ha

$$0,15 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 0,4 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

a aplicação de herbicidas = 0,0039 L/tC= 0,13 L/ha

$$0,13 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 0,4 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

Segundo HORTA (1987),

a aplicação da torta de filtro = 9,38 L/ha

$$9,38 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 27,3 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

a aplicação de vinhoto = 60,60 L/ha

$$60,6 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 176,3 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

a aplicação de adubo = 10,47 L/ha

$$10,47 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 30,5 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

### 3.2) Produção dos insumos agrícolas

Para o cálculo da emissão ocasionada pela produção dos insumos, foi levada em conta a demanda de energia durante a fabricação do ingrediente como o herbicida, o calcário e inseticidas.

Conforme HORTA (1987),

a produção de calcário é de 1.620 kcal/tC

$$6.782,9 \frac{\text{kJ}}{\text{tC}} = 0,0068 \frac{\text{GJ}}{\text{tC}} \times 74,9 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} = 0,51 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 16,8 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} ;$$

a produção de herbicidas é de 3.490 kcal/tC

$$14.612,6 \frac{\text{kJ}}{\text{tC}} = 0,0146 \frac{\text{GJ}}{\text{tC}} \times 74,9 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} = 1,09 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 36,1 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}};$$

a produção de inseticidas é de 190 kcal/tC

$$795,5 \frac{\text{kJ}}{\text{tC}} = 0,0008 \frac{\text{GJ}}{\text{tC}} \times 74,9 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}} = 0,06 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 2,0 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}.$$

### 3.3) Transporte dos insumos agrícolas

Através de dados obtidos em EQUIPAV (2003), tem-se 0,0067 L/tC como o total de todas as operações que compõem o transporte dos insumos.

$$0,0067 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 0,22 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 0,6 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}.$$

### 3.4) Emissões do solo

De acordo com LEWANDOWSKI (1995), 450 kgCO<sub>2</sub> são emitidos por hectare de solo durante um ciclo de vida no cultivo da biomassa *Miscanthus*. Foi utilizado este estudo no cálculo da emissão equivalente de CO<sub>2</sub> por um hectare de solo. O valor é apresentado na TABELA 3.2 do Capítulo 3.

### 4) Colheita

A seguir estão mostradas as atividades que irão emitir CO<sub>2</sub> durante a fase de colheita. Durante o corte mecanizado, a emissão de CO<sub>2</sub> ocorre na operação das máquinas colhedoras e no cultivo. Operações dos caminhões carregadores também irão emitir CO<sub>2</sub> como no transbordo, no carregamento e no reboque. Os dados de consumo de combustível e os cálculos das emissões de CO<sub>2</sub> são mostrados conforme EQUIPAV (2003).

#### 4.1) Máquinas colhedoras (corte mecanizado 25%) = 1,22 L/tC

Cultivo = 0,3671 L/tC

TOTAL = 1,5871 L/tC

$$1,5871 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 52,37 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 152,4 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} \times 0,25 = 38,1 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}.$$

#### 4.2) Caminhões carregadores = 2,64 L/tC

Carregamento = 0,2307 L/tC

Reboque = 0,4392 L/tC

Cultivo = 0,0416 L/tC

TOTAL = 3,351 L/tC

$$3,351 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 110,59 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 304,7 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}.$$



### 5) Transporte dos colmos até a moagem

O transporte dos colmos da lavoura até a moagem é feito em “treminhões” que consomem o combustível diesel. Segundo HORTA (1987):

5.1) “Treminhões”= 0,704 L/tC

$$0,704 \frac{\text{L}}{\text{tC}} \times 33 \frac{\text{tC}}{\text{ha}} = 23,232 \frac{\text{L}}{\text{ha}} \times 2,91 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{L}} = 67,6 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}}$$

### 5.4- Balanço de massa dos fluxos entre emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub>

O balanço de massa é definido em crédito de CO<sub>2</sub> se o resultado do cálculo (Emissão total + Seqüestro total) for positivo e será definido como débito de CO<sub>2</sub> se o resultado for negativo.

Na FIGURA 5.4 é mostrado um diagrama do balanço de massa dos fluxos entre a emissão e o seqüestro na cogeração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro.

$$\text{Balanço de massa de CO}_2 = \text{Emissão total (TABELAS 5.12 e 5.13) + Seqüestro total (TABELAS 5.10 e 5.11)}$$

Onde:

$$\text{Emissão total} = 108.395 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida} + 3.054,2 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida} = 111.449,2 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida}$$

$$\text{Seqüestro total} = 29.110,5 \text{ kgCO}_2/\text{ha/safra de primeiro corte} + 116.180 \text{ kgCO}_2/\text{ha/5 demais cortes} = 145.290,5 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida}$$

Balanço de massa de CO<sub>2</sub> :

$$111.449,2 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida} + (-145.290,5 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida}) = -33.841,3 \text{ kgCO}_2/\text{ha/ciclo de vida de débito de CO}_2$$

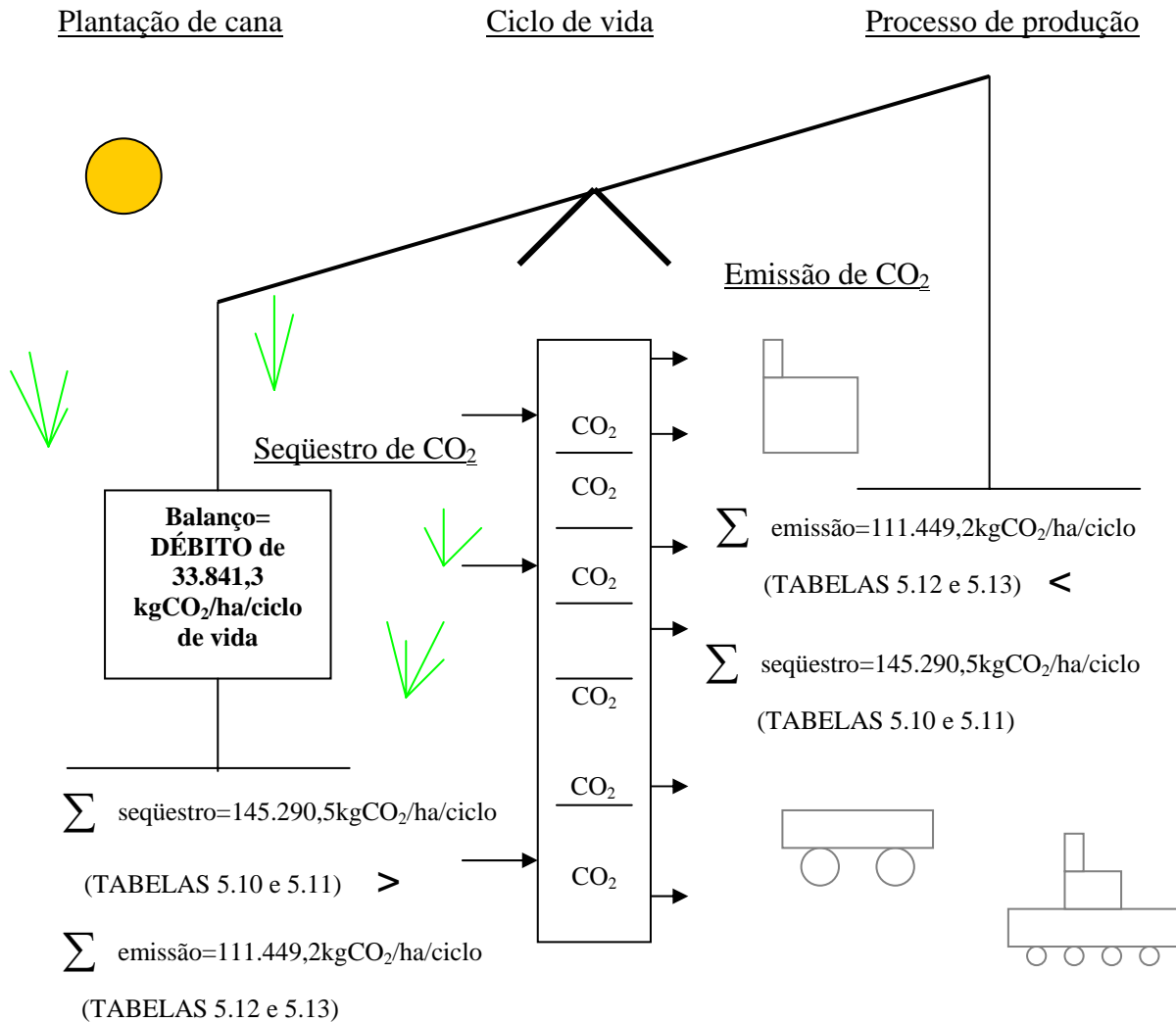


FIGURA 5.4- O balanço de massa entre emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> na produção de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro

Pode ser visto na FIGURA 5.4 que mais CO<sub>2</sub> é seqüestrado do que emitido, o que gera um saldo negativo de emissão. Para chegar a este saldo foi considerado o seqüestro da cana-de-açúcar e a emissão total, ou seja, a proveniente da biomassa após a colheita e a resultante dos combustíveis fósseis utilizados de forma indireta.

5.5- Análise comparativa da emissão de CO<sub>2</sub> por diferentes fontes de produção de eletricidade

CHOHFI, F. M. *Balço, análise de emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro*, Itajubá, 2004, Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, 81p

Comparando o impacto ambiental em emissão de CO<sub>2</sub> de diferentes formas de produção de energia elétrica pode-se determinar quais as mais favoráveis do ponto de vista ambiental. Na FIGURA 5.5 é mostrado o cenário de CO<sub>2</sub> como débito, crédito ou nulo em kgCO<sub>2</sub>/GJ de algumas das diferentes formas mais conhecidas de geração de energia elétrica.

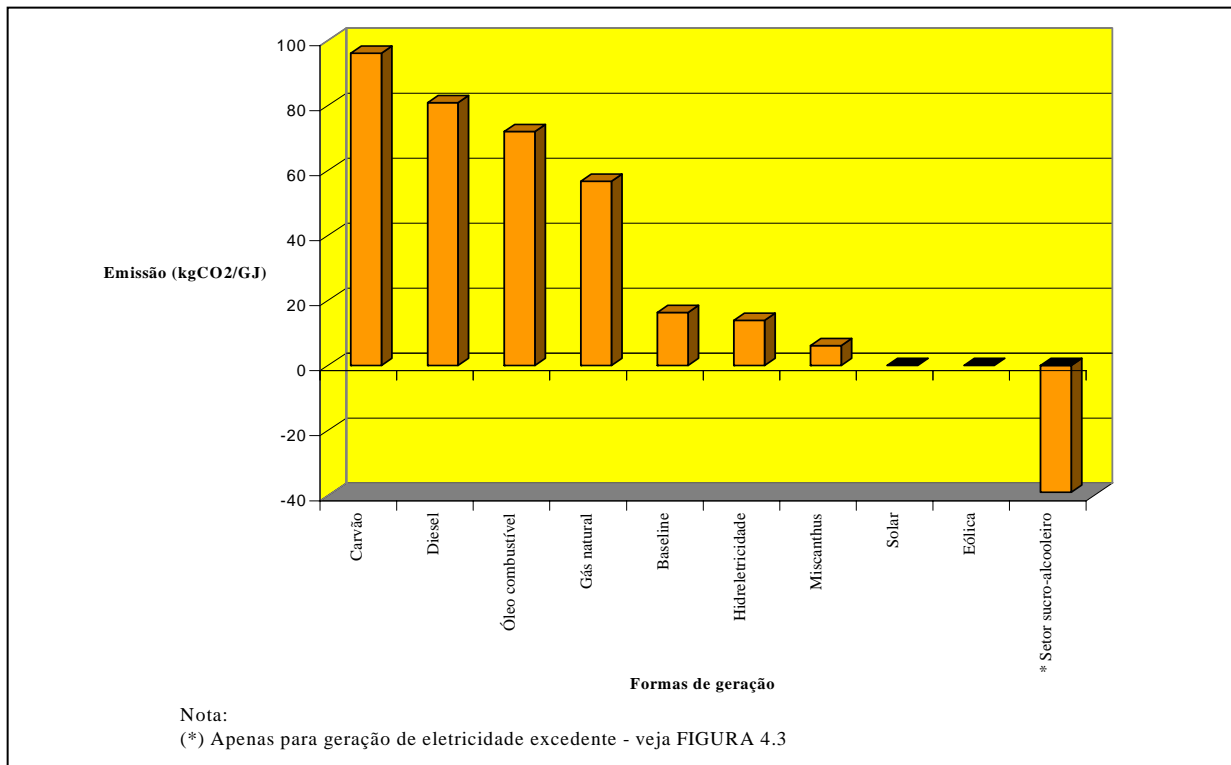


FIGURA 5.5- Comparação do cenário de CO<sub>2</sub> de algumas diferentes formas de geração de eletricidade

Os dados obtidos no uso do carvão e do diesel para geração de energia em kgCO<sub>2</sub>/GJ foram tirados de LEWANDOWSKI (1995) e são 96,1 kgCO<sub>2</sub>/GJ e 80,8 kgCO<sub>2</sub> respectivamente como mostrado na TABELA 3.2.

Através de HORTA (1987), é possível obter o fator de emissão em kgCO<sub>2</sub>/kg de óleo combustível correspondente a 3,156 kgCO<sub>2</sub>/kg. Para facilitar as comparações entre as diferentes formas de produção de energia, o fator de emissão do óleo combustível em kgCO<sub>2</sub>/kg terá que ser convertido em kgCO<sub>2</sub>/GJ. Para isto, será utilizado o poder calorífico do óleo combustível, que segundo CAMARGO (1990) é de 43,8 MJ/kg, como no cálculo demonstrado abaixo:

$$3,156 \frac{\text{kgCO}_2}{43,8\text{MJ}} = 0,072 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}} = 72,0 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}}.$$

Para o caso do gás natural o fator de emissão 56,7 kgCO<sub>2</sub>/GJ foi obtido em trabalho de HORTA (1987) como mostrado na TABELA 3.2.

Na FIGURA 5.5, também é comparada a emissão de CO<sub>2</sub> em projetos referência de emissão de carbono no Brasil (*baseline* Brasil- ver item 4.2.5) com outras formas de produção de eletricidade. Utilizou-se o cenário referência de janeiro de 2000, onde temos, 18,1 kgC/MWh conforme a FIGURA 4.15. A seguinte conversão foi feita para obter este resultado em kgCO<sub>2</sub>/GJ, incluso na FIGURA 5.5.

$$18,3 \frac{\text{kgC}}{\text{MWh}} \times \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgC}} = 58,7 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MWh}}, 1 \text{ MWh} = 3,6 \text{ GJ},$$

temos 16,3 kgCO<sub>2</sub>/GJ.

Adotou-se, para o valor da emissão de CO<sub>2</sub> por GJ de hidreletricidade, o resultado do projeto BRA/00/029 (2003) sobre a emissão de GEE dos grandes reservatórios hidrelétricos onde se tem 0,05 TgCO<sub>2</sub> de crédito de CO<sub>2</sub> por TWh (MATVIENKO e TUNDISI, 2003). Para a inserção dos valores na FIGURA 5.5, foi feita a conversão para kgCO<sub>2</sub>/GJ, conforme demonstrados abaixo:

$$0,05 \text{ TgCO}_2/\text{TWh} = 50.000.000 \text{ kgCO}_2/\text{TWh}$$

$$\begin{aligned} E \text{ (J)} &= P(W) \times T(s) \\ &= TW \times h \\ &= 1.000.000.000.000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} \\ 3,6 \text{ PJ} &= 1 \text{ TWh} \end{aligned}$$

$$13.888.888,9 \text{ kgCO}_2/\text{PJ} = 13,9 \text{ kgCO}_2/\text{GJ}.$$

O *Miscanthus* é uma biomassa asiática de alto poder calorífico explorada para fins energéticos, porém o seu uso é diferente do bagaço, já que é explorado com a única finalidade de geração de eletricidade. Assim, todas as emissões de CO<sub>2</sub> advindas da combustão da biomassa podem ser consideradas nulas, conforme mostrado na TABELA 5.14. Desta forma, a única emissão de CO<sub>2</sub> ocorre devido à utilização indireta de combustíveis fósseis. Conforme LEWANDOWSKI (1995), sabe-se que o cenário final de CO<sub>2</sub> na produção de eletricidade através do *Miscanthus* é de 6,1 kgCO<sub>2</sub>/GJ.

TABELA 5.14- Balanço de CO<sub>2</sub> no uso da biomassa do *Miscanthus*

Biomassa <i>Miscanthus</i>	
Fase	Emissão por fase (kgCO <sub>2</sub> /GJ)
Provisão	6,1
Combustão	Nulo
Cenário	6,1

Fonte: LEWANDOWSKI (1995)

A energia solar e eólica apresentam um impacto ambiental em emissão de CO<sub>2</sub> devido à fabricação dos equipamentos. No entanto, se a avaliação de ciclo de vida não for considerada, poderá considerar-se que a emissão é nula, conforme a FIGURA 5.5.

Como esta pesquisa considera apenas o cenário de emissão e seqüestro de CO<sub>2</sub> na geração de energia elétrica excedente, não leva em conta o processo de fabricação (FIGURA 4.3). O débito no balanço de CO<sub>2</sub> obtido de 33.844 kgCO<sub>2</sub>/ha/ciclo de vida foi utilizado na conversão para kgCO<sub>2</sub>/GJ para análise na FIGURA 5.5. Os cálculos para a conversão são mostrados a seguir:

Assumindo 1 ha de plantação = 33,5 tC/hectare, temos -1.010,3 kgCO<sub>2</sub>/tC/ciclo de vida.

$$-1.010,3 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{tC}} \times \frac{\text{tC}}{\text{tb}} = -303,1 \frac{\text{KgCO}_2}{\text{tb}}$$

Bagaço com poder calorífico (50% humidade)= 7.740 MJ/tb

$$-303,1 \frac{\text{kgCO}_2}{7.740\text{MJ}} = -0,039 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{MJ}} = -39 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{GJ}}$$

## Capítulo 6- Conclusão

Durante a avaliação de ciclo de vida de cogeração de eletricidade excedente, 31,8% do CO<sub>2</sub> armazenados pela biomassa da cana-de-açúcar através da fotossíntese são emitidos na fornalha através da queima do bagaço. Além disso, 42,8% do carbono voltarão para a atmosfera na decomposição da palha, pontas e folhas e raízes na lavoura. O restante do CO<sub>2</sub> será emitido através da metabolização do açúcar e seus derivados por organismos vivos. A provisão do combustível, decorrente do seu transporte e outras atividades como as operações de colheita, resultam em emissões indiretas, que também são relevantes no balanço final. A emissão total indireta foi de 3.054,2 kgCO<sub>2</sub> por hectare em um ciclo de vida, o que constitui apenas 2,7% da emissão total. Uma grande parte da emissão indireta total ocorre no primeiro corte sendo que apenas 65,6% da emissão indireta ocorre nos cinco demais cortes. Isto acontece porque grandes quantidades de energia e combustível são utilizadas durante as operações de preparação do campo, no plantio e no cultivo da cana de primeiro corte.

Os resultados desta pesquisa mostram que através de uma avaliação de ciclo de vida de geração de eletricidade excedente, 145.290,5 kgCO<sub>2</sub>k /ha/ciclo de vida são seqüestrados e 111.449,25 kgCO<sub>2</sub>k /ha/ciclo emitidos resultando num crédito de seqüestro de 33.841,3 kgCO<sub>2</sub> por hectare num ciclo de vida. Mais dióxido de carbono é seqüestrado do que emitido, representando um saldo negativo no balanço de emissão e seqüestro de dióxido de carbono da distribuição de excedentes de energia elétrica no setor sucro-alcooleiro.

O balanço, análise de emissão e seqüestro de dióxido de carbono pesquisado através de uma metodologia de avaliação de ciclo de vida de geração de eletricidade excedente demonstra a sustentabilidade da cogeração no setor sucro-alcooleiro. A diversidade de produtos resultantes do manejo da biomassa da cana-de-açúcar garante este cenário altamente favorável do ponto de vista ambiental. O combustível utilizado, o bagaço, é produzido durante a moagem e já está inserido no sistema de produção das usinas sucro-alcooleiras. Portanto, o resíduo é obtido através de um sistema

de produção pré-estabelecido. Todo o suporte em lavoura, sistema de distribuição e equipamentos correm por conta dos produtos nobres álcool e açúcar.

O cenário de emissão e seqüestro de dióxido de carbono atmosférico contido neste trabalho basea-se na metodologia de ciclo de vida e, mostra-se pertinente para fins comparativos. No entanto, não deve ser utilizado como cenário referência de emissão dado que existem outras metodologias que podem ser utilizadas no cálculo do cenário de dióxido de carbono na geração de excedentes de energia elétrica no setor sucro-alcooleiro. Ao se comparar os resultados obtidos através da metodologia de ciclo de vida com os outros conclui-se que o seqüestro fica superestimado. Isto ocorre porque o dióxido de carbono seqüestrado no caldo e seus derivados como a torta de filtro e o melaço são considerados uma vez que serão lançados para a atmosfera no final do ciclo de vida.

O cultivo da biomassa da cana-de-açúcar pode ser inserido no cenário das fontes de produção de energia alternativa através da cogeração de eletricidade excedente. Neste estudo é feita uma comparação do cenário de emissão e seqüestro contido neste trabalho e o de várias outras formas de geração de eletricidade. Pode-se concluir, assim, que entre todas as formas de geração de eletricidade, a cogeração no setor sucro-alcooleiro é a que apresenta os valores mais ambientalmente favoráveis em emissão de CO<sub>2</sub>, seguidos do óleo combustível e do gás natural. Várias fontes de geração de energia são comparadas, inclusive, em relação a projetos de referência de emissão de carbono no Brasil.

Há de se considerar que se a metodologia de ciclo de vida fosse considerada para determinação da adicionalidade através do Protocolo de Kyoto os investimentos iriam se maximizados. No entanto, a metodologia de avaliação de ciclo de vida não é uma das aprovadas pelo IPCC que assessora a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e, por isto, não poderá ser utilizada no cálculo da obtenção de financiamentos para projetos de MDL. Conseqüentemente, os resultados deste estudo servem para fins comparativos e não para demonstrar a

adicionalidade através de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto.



**Referências bibliográficas**

- ABDALAD, R. **Perspectivas da Geração Termelétrica no Brasil e emissões de CO<sub>2</sub>**, Dissertação de Mestrado, UFRJ- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000, pp 23-31, 114-121.
- AGUILAR, A, *et al.* **Cane agricultural waste fuel potential and available technology**, Cartagena, Colombia, ISSCT, 1995.
- ALEXANDER, A. **Sugarcane physiology, a Comprehensive Study of the Saccharum Source-to-Sink System**, Puerto Rico, University of Puerto Rico, 1973, pp 44-99, 410- 643.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br> acesso em 24 fev 2003.
- ARRIETA, F. **Utilização do gás natural como combustível complementar em sistemas BIG/GT para a cogeração no setor sucro-alcooleiro**, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, 2000, pp 23-28
- BANCO MUNDIAL. **O Pequeno Livro Verde de Dados**, 2003.
- BASSOREAN, D; FAUCONNIER, R. **La Canne à Sucre**, Paris, Larose, 1970.
- BEEHARRY, R. **Strategies for augmenting sugarcane biomass availability for power production in Mauritius**, Reduit, Elsevier Science, Biomass and Bioenergy 20, 2001a, pp 421-429. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- BEEHARRY, R. **Carbon balance of sugarcane bioenergy systems**, Reduit, Elsevier Science, Biomass and Bioenergy 20, 2001b, pp 361-370. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- BEEHARRY, R. **Extended sugarcane biomass utilization for exportable electricity production in Mauritius**, Reduit, Elsevier Science, Biomass and Bioenergy 11, 1996, pp 441-449. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- BEN, Balanço Energético Nacional, ano base 1999. Disponível em [http://www.mme.gov.br/sen/dadhist/sinop\\_p.htm](http://www.mme.gov.br/sen/dadhist/sinop_p.htm) acesso 24 Jan, 2004.
- BLACKBURN, F. **Sugar-cane**, New York, Longman, 1984, pp 31- 43.
- BRAGA, B *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**, São Paulo, SP, Prentice Hall, 2002.
- CAMARGO, C. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**, São Paulo, SP, Publicação Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, 1990, pp 5-16, 125-130, 361-408.

- CAMPBELL, N *et al.* **Biology concepts and connections**, 3 ed, Nova Iorque, Adisson Wesley Longman Inc, 2000, pp 108-112.
- CEBDS, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, **Mercado de carbono**, Rio de Janeiro, RJ, Câmara de Mudanças Climáticas, 2003, pp 6-10.
- CENBIO, **Levantamento do potencial real de cogeração de excedentes no setor sucro-alcooleiro**, São Paulo, SP, USP- CENBIO, 2001, pp 1- 69.
- CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa, **Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica**, Brasília, Dupligráfica, ANEEL, 2000. pp 97- 135.
- CESAR, M; SILVA, F. **A cana-de-açúcar como matéria prima para a indústria sucro-alcooleira**, Piracicaba, SP, ESALQ- USP, 1993, pp 1- 19.
- COELHO, S. **Avaliação da cogeração de eletricidade a partir de bagaço-de-cana em sistemas de gaseificador/turbina a gás**, Dissertação de Mestrado, USP, 1992, pp 29- 191.
- COELHO, S. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo**, Tese de doutorado, USP, 1999, pp 29- 32, 100- 120, 186- 190.
- COBAS, V. **Análise Técnico Econômico e Normativo para a Implementação da Geração Distribuída**, Dissertação de mestrado, EFEI, 2000, pp 3-9.
- CUNHA, S e GUERRA, A. **Avaliação e perícia ambiental**, 2ª edição, Rio de Janeiro, RJ, Bertrand, 2000.
- DEEPCHAND, K. **Sharing of revenue from cogenerated bagasse energy in Mauritius**, Port Louis, International Sugar Journal, 2001.
- EARTHTRENDS, *World Resources Institute*, **The Environmental Information Portal**, Disponível em <http://www.earthtrends.wri.org> acesso em 22 nov 2003.
- ESD, **Energy and Sustainable Development magazine**, volume no. 4, Dezembro 2002.
- FERNANDES, A. **Manual da cana-de-açúcar**, Piracicaba, SP, Livroceres, 1984, pp 8- 17
- F. O. lights EDITORIAL, **World Ethanol and biofuels report**, Kent, 2003, Disponível em <http://www.agra-net.com> pp 3- 18.

- FIGUEROA, F. **Avaliação econômica de ambientes naturais. O caso das áreas alagadas. Uma proposta para a represa do lobo (BROA) Itirapina- SP**, Dissertação de mestrado, USP, 1996.
- FINEP, Financiadora de Estudos e Projetos, Notícias, <http://www.finep.gov.br/clipping/meio&imagem.htm> acesso, 04 Mar 2003.
- GIEDS, **Curso sobre energia e desenvolvimento sustentável, UNICAMP**, Lisboa, IPT, Instituto Superior Técnico, 23-25 Abr 2003.
- GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**, São Paulo- SP, Editora da USP, 1998.
- GRAÇA, G. **ENERGIA E FLORESTAS: tendências e potencialidades brasileiras de emissão e captação de dióxido de carbono**, Campos do Jordão, III Congresso Latino Americano de Energia Elétrica, 1997.
- HADDAD, P, REZENDE, F. **Instrumentos econômicos para o desenvolvimento sustentável da Amazônia, Brasília, Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de coordenação da Amazônia, 2002, 146p.**
- HORTA NOGUEIRA, L. **Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana-de-açúcar**, Tese de doutorado, UNICAMP, 1987.
- HORTA NOGUEIRA, L. **Cogeração e sustentabilidade energética no Brasil**, Energia y desarrollo sustentable em américa latina y el caribe, Itajubá, 1997.
- KADAM, K. **Environmental benefits on a life cycle basis of using bagasse-derived ethanol as a gasoline oxygenate in India**, Florida, Elsevier Science, Energy policy 30 (2002), pp 371-384. Disponível em <http://periodicos.capes.gov.br>
- LEÃO, RM. **Álcool, energia verde**, São Paulo, SP, Instituto de Qualificação Editora Ltda, 1980.
- LEWANDOWSKI *et al.* **CO<sub>2</sub> balance for the cultivation and combustion of Miscanthus**, Frankfurt, Elsevier science, Biomass and Bioenergy, Vol 8, No 2 (1995), pp 81-90. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- LORA, E. **Controlling air quality in the sugar and alcohol industry**, Itajubá, Bartens, 1998, pp 35-42, 51-53.
- LORA, E. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**, Brasília, DF, ANEEL, 2000, pp 93- 120, 293-313.
- LORA, E. **Calderas de vapor y cogeneración en la industria azucarera**, relatório de palestra, Minas Gerais, UNIFEI, 2003.

- LUCCI, E. **Geografia, o homem no espaço global**, São Paulo, SP, Editora Saraiva, 1997, pp 96- 124.
- MACEDO, C e LEAL, M. **Ethanol production and use**, ISCCT Co-products workshop, Piracicaba, 2003.
- MARTINE, G. **População, Meio Ambiente e Desenvolvimento, Verdades e Contradições**, 2ª edição, Campinas, SP, Editora da UNICAMP, 1996.
- MARTINS, A. **Conceitos de Termodinâmica**, Itajubá, MG, Grupo de Estudos Energéticos, EFEI, 2002.
- MATVIENKO, B; TUNDISI, J, G *et al.* **CD ANEEL, Projeto BRA/00/29: capacitação do setor elétrico brasileiro em relação à mudança global do clima, 2003.**
- MASTERS, I. **Environmental engineering and science**, 2 ed, New Jersey, Simon & Schuster, 1990.
- MCMULLAN, R. **Environmental Science in Building**, 4 ed, London, Macmillan press ltd, 1998, pp 1-6.
- MCT, Ministério de Ciência e Tecnologia, Convenção Sobre Mudança de Clima, Disponível em <http://www.mct.gov.br/clima/quioto/signata.htm> acesso 31 Jan, 2004.
- MENEZES, C. **Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, a experiência de Curitiba**, Campinas, SP, Papyrus, 1996.
- MELLO, M *et al.* **Biomassa, energia dos trópicos em Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, Editora UFMG, 2001, pp 49- 85, 181- 262.
- MOHEE, R. **Life-cycle analysis of compost incorporated sugarcane bioenergy systems in Mauritius**, Reduit, Elsevier Science, Biomass and Bioenergy, 17 (1999) pp 73-83. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- MMA, **Primeiro relatório nacional para a convenção sobre diversidade biológica**, Brasil, 1998.
- NEWMAN, E. **Applied Ecology and Environmental Management**, Bristol, UK, Blackwell, 2000, pp 7-9.
- NREL, **National Renewable Energy Laboratory, Turning Corn Stover into Ethanol**, Estados Unidos da América, 2002.
- PAYNE, J. **Cogeneration in the Cane Sugar Industry**, Elsevier, Oxford, 1991, pp 61-64.
- PLOUMEN, P *et al.* **Cost allocation of electricity and water**, Bahamas, Carilec, 2000, pp 18.

- PRATO, T. **Natural resource and environmental economics**, Iowa, Iowa state University press, 1998.
- RAMJEANEON, T. **Cleaner production in Mauritian cane-sugar factories**, Reduit, Elsevier Science, Journal of Cleaner Production 8, 2000, pp503-510, Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- RAVEN, P *et al.* **Biologia Vegetal**, sexta edição, Editora Guanabara Koogan, S.A, 2001, pp 124- 128.
- SIEMENS POWER JOURNAL, **Energetic use of waste from the sugar industry**, London, 1996, pp 4.
- SOLOMON, K. **Avaliação quantitativa do impacto ambiental das emissões gasosas e do uso da água de resfriamento em instalações de geração termelétrica**, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, 2003, pp 40.
- SOUZA, J; BURNQUIST, H. **A comercialização de energia elétrica cogenerada pelo setor sucro-alcooleiro**, São Paulo, SP, editora Plêiade, 2000, pp 28- 71.
- SANTOS, A *et al.* **Conservação de energia, eficiência energética de instalações e equipamentos**, Itajubá, MG, Editora da EFEI, 2001.
- SHAPIRO, M. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**, third edition, EUA, John Willey and sons, Inc, 1996
- UHLIG, A. **Modelo Cascata: Um instrumento de planejamento energético aplicado ao Setor Sucro-Alcooleiro no estado de São Paulo**, Dissertação de Mestrado, USP, Universidade de São Paulo, 1995
- UNEP, **Introduction to the Clean Development Mechanism**, Denmark, Riso National Laboratory, pp 1-24.
- UNFCCC, **United Nations Framework Convention on Climate Change**, <http://unfccc.int/resource/convkp.html>, acesso 28 Jan, 2004.
- UNIDO, **CDM Investor Guide Brazil**, Vienna, 2003, pp 35-58.
- WALTER, A. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termoeletrica junto ao Setor Sucro-Alcooleiro**, Tese de Doutorado, UNICAMP, 1994, pp 74-93.
- WINROCK International Brasil, **Trade Guide on Renewable Energy in Brazil**, Salvador- BA, 2002, pp 39-52.
- YAN, J *et al.* **Potential market niches for biomass energy with CO<sub>2</sub> capture and storage- opportunities for energy supply with negative CO<sub>2</sub> emissions**, Elsevier Science, Biomass and Bioenergy 25 (2003), pp 273-285. Disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br>

## Glossário

*Baseline* Brasil- A emissão média de carbono atmosférico na produção de energia no Brasil. Utilizando como referência o ano 2000 (KgC/MWh) (LORA, 2003).

Ciclo Brayton- Um ciclo de geração com turbina a vapor.

Ciclo Rankine- Um ciclo de geração com turbina a gás.

Desenvolvimento- Estágio econômico, social e político de uma comunidade, caracterizado por altos índices de rendimento dos fatores de produção.

Entalpia- Medida de quantidade de energia gerada.

Entropia- Medida da habilidade de um sistema gerar trabalho organizado (MARTINS, 2002).

Exergia- A capacidade de realização de trabalho de um sistema quando este é levado ao estado de equilíbrio com o meio ambiente. A energia sempre se conserva, qualquer que seja o processo desenvolvido. Entretanto, a sua capacidade de realização de trabalho pode diminuir (MARTINS, 2002). A exergia de um fluxo é a máxima quantidade de trabalho disponível se este fluxo for convertido desde as condições reais até as condições de equilíbrio termodinâmico, somente quando calor e materiais são trocados com o meio ambiente (PLOUMEN, *et al*, 2000).

Gases de Efeito Estufa- Constituintes gasosos da atmosfera que podem ser naturais ou de fontes humanas que absorvem ou re-emitem radiação infravermelha (UNFCCC, 2004). De acordo com o Protocolo de Kyoto, os seguintes gases são considerados GEE; o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido nitros (N<sub>2</sub>O), Hidrofluorcarbonos (HFCs), Perfluorcarbonos (PFCs), e Hexafluoretos de enxofre (SF<sub>6</sub>). A principal meta do convenção de mudança de clima é no entanto a redução de CO<sub>2</sub> devido a destacada participação deste gás para o efeito estufa.

Impacto ambiental- A definição de impacto para fins de uma análise de ciclo de vida é uma consequência potencial ou final associada com um processo ou atividade identificada no inventário, o qual pode se manifestar numa mudança no ambiente natural, um efeito na saúde humana, ou uma mudança (possivelmente ou diminuição) na disponibilidade de recursos (CUNHA e GUERRA, 2000).

*Miscanthus*- Uma biomassa cuja origem é da ásia oriental. Pode ser utilizada para produção de celulose ou material de construção. O baixo conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na

biomassa faz com que ela tenha especiais características para combustão. O maior uso que costuma ser dado a esta biomassa é o uso específico para geração de energia (LEWANDOWSKI, 1995).

Mudanças climáticas- Uma mudança no clima da terra relacionada direta ou indiretamente a atividades humanas que causam uma alteração na atmosfera global observada em comparação com outros períodos de tempo notáveis (UNFCCC, 2004).

Poder calorífico- Quantidade de energia contida em um tipo de combustível, exemplo MJ/Kg.

Poder Calorífico Inferior, PCI- onde o vapor de água presente nos gases não se condensa. (LORA, E, 2003).

Turboacionador- Uma turbina a vapor acionando uma bomba ou moenda.

Turbogerador- Uma turbina a vapor acionando um gerador.

Vazão- Quantidade de matéria por um período de tempo.

## **Anexo I- Questionário aplicado nas visitas as usinas sucro-alcooleiras Equipav S/A Açúcar e Álcool e Barra Grande**

- 1) Parâmetros de funcionamento da caldeira e dos turbogeradores
  - 1.1) Estado do combustível na entrada da caldeira (umidade e poder calorífico).
  - 1.2) Capacidade da usina (tC/h)
  - 1.3) Fator de capacidade (de utilização) da usina.
  - 1.4) Parâmetros na/s turbina/s a vapor; temperatura, pressão e vazão (na entrada e saída da/s turbina/s).
  
- 2) Produção elétrica total da usina, consumo próprio e eletricidade excedente comercializada. Consumo nas moendas.
  
- 3) Total área de plantio de cana-de-açúcar (ha), total produção de cana por hectare (Kg/ha).
  
- 4) Fases do ciclo de vida de produção de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro
  - 4.1) Identificar quais são as fases incluídas dentro das fronteiras do ciclo de vida de produção de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro.
  - 4.2) Operações agrícolas, tipo de combustível e consumo total nos tratores e máquinas agrícolas em litros por tonelada de cana (L/tC)
  - 4.3) Colheita, a fração da plantação colhida a mão ou com máquinas colhedoras, e o consumo de combustível na colheita mecanizada (L/tC).
  - 4.4) Transporte dos colmos, tipo de combustível utilizado nos caminhões agrícolas e treminhões e consumo total em litros por tonelada de cana (L/tC).