

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Avaliação do Balanço Energético e dos  
Impactos Ambientais do Processo de Produção  
de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-  
açúcar, utilizando a ACV**

**Autor: MSc. Maria Luiza Grillo Renó  
Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora  
Co-Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Itajubá, Maio de 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Avaliação do Balanço Energético e dos  
Impactos Ambientais do Processo de Produção  
de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-  
açúcar, utilizando a ACV**

**Autor: MSc. Maria Luiza Grillo Renó**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

**Curso: Doutorado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Maio de 2011  
M.G. – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Avaliação do Balanço Energético e dos  
Impactos Ambientais do Processo de Produção  
de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-  
açúcar, utilizando a ACV**

**Autor: MSc. Maria Luiza Grillo Renó**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Gil Anderi da Silva – USP**

**Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares – UFSC**

**Prof. Dr. Vladimir Rafael Melián Cobas - UNIFEI**

**Prof. Dr. Francisco Antônio Dupas – UNIFEI**

## **Dedicatória**

*Á minha família*

*Ao meu marido José Carlos*

*A todos que contribuíram na realização deste trabalho*

*“Procure ser um homem de valor, em vez  
de procurar ser um homem de sucesso.”*

**Albert Einstein**

## Resumo

**RENÓ, M. L. G. (2011)**, Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo de Produção do Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-Açúcar, Utilizando a ACV, Itajubá, 176p. Tese de Doutorado (Doutorado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O presente trabalho objetiva realizar uma avaliação ambiental e energética do processo de produção do metanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar, para as condições brasileiras. Para tal, foi proposto que uma planta de metanol fosse suprida de bagaço excedente originado de uma usina de açúcar e álcool e destilaria autônoma. Assim quatro diferentes configurações foram propostas através de quatro estudos de caso, os quais são constituídos por uma planta de cogeração, de metanol e em dois estudos de caso por uma destilaria autônoma e nos outros dois por uma usina de açúcar e álcool. Os sistemas de cogeração foram equipados com turbinas a vapor de condensação/extração (CEST), e num dos estudos de caso aplicou conceitos avançados de cogeração, especificamente a tecnologia BIG-GT (Biomass Integrated Gasifier-Gas Turbine). Para a avaliação dos estudos sob o ponto de vista ambiental e termodinâmico, foi utilizada a Análise do Ciclo de Vida e indicadores de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Também foi feita uma análise exergoambiental, aplicando conceitos de Termoeconomia para determinar o impacto ambiental da exergia destruída. Os resultados obtidos da Análise do Ciclo de Vida mostraram que a produção de biocombustíveis a partir da rota de gaseificação precisa de melhorias no que diz respeito, por exemplo, no processo de limpeza do gás de síntese, a fim de reduzir as emissões de poluentes. Como também o processo ainda precisa de um maior desenvolvimento tecnológico a fim de aumentar a conversão de biomassa a

biocombustível líquido. Outro aspecto a ser questionado é a ocupação do solo pelas lavouras de cana-de-açúcar, um problema que almeja uma política regulamentadora, a fim de que as lavouras não seja uma ameaça à produção de alimentos e à diversidade botânica. Quanto às outras formas de obtenção de metanol, por exemplo, o metanol produzido a partir do gás natural, os resultados mostraram que este combustível apresenta uma eficiência energética do ciclo de vida duas vezes maior em relação ao metanol produzido do bagaço. Porém os impactos ambientais daquele chega a ser 2,5 vezes maior em relação a este, sendo esta uma das grandes vantagens que deve ser discutida quando se procura buscar a renovabilidade dos processos térmicos.

**Palavras-chave:** Metanol, Gaseificação, Setor sucroalcooleiro, Análise do Ciclo de Vida, Análise Exergoambiental.

## **Abstract**

**RENÓ, M. L. G. (2011)**, Evaluation of Energy Balance and Environmental Impacts of Methanol Production from Sugarcane Bagasse using the LCA, Itajubá, 176p. PhD Thesis (PhD in Energy Conversion) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

The present work aims to accomplish an environmental and energetic evaluation of the methanol production from bagasse for the Brazilian conditions. To this end, it was proposed that a methanol plant was supplied with surplus bagasse originated from a sugar mill and autonomous distillery. Thus four different configurations were proposed by four case studies, which are consisting of a cogeneration and methanol plants, and two case studies by an autonomous distillery and the others by sugar and alcohol mill. The cogeneration system was equipped with Condensing Extraction Steam Turbine (CEST), and one case study applied concepts of advanced cogeneration technology, specifically BIG-GT (Biomass Integrated Gasifier – Gas Turbine). In evaluating of the studies from view point environmental and thermodynamic, the Life Cycle Assessment was used and performance indicators based on the First and Second Law of Thermodynamics. Also an exergoenvironmental analysis was made, applying concepts of Thermoconomics to determine the environmental impact of exergy destroyed. The results obtained of the Life Cycle Analysis showed that the fuel production from gasification route still needs to improve some aspects as, for instance, in the clean system process of the synthesis gas, in order to reduce the pollutant emissions. But the process still needs further technological development to enhance biomass conversion to liquid biofuel. Another aspect to be questioned is the occupation of land by cultivation of sugarcane, a problem that targets a regulatory policy, so that crops are not a threat to

food production and botanical diversity. The other ways of obtaining methanol, for example, the methanol produced from natural gas, the results showed that this fuel presents a life cycle energetic efficiency two times higher than that methanol produced from bagasse. But the environmental impact of that is up to 2.5 times higher in relation to this. So, it is one of the great advantages that must be discussed when trying to seek the renewability of thermal processes.

**Keywords:** Methanol, Gasification, Sugar and alcohol sector, Life Cycle Assessment, Exergoenvironmental Analysis

# Sumário

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

1.1 Objetivo da Pesquisa	4
1.2 Contribuição e Hipótese da Pesquisa	5
1.3 Conteúdo da Tese de Doutorado	5

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1 Rotas Tecnológicas para a Produção de Biocombustíveis	7
2.1.1 Gaseificação da Biomassa	9
2.1.2 Gaseificadores	11
2.1.3 Aplicações do Gás de Síntese	17
2.2 Metanol a Partir da Biomassa	18
2.2.1 Processo de Produção do Metanol	18
2.2.2 Tecnologias Atuais para Produção do Metanol	20
2.2.3 Propriedades do Metanol	27
2.2.4 Custos e Desempenho do Processo de Produção do Metanol	27
2.2.5 Tendências e Desafios	29
2.3 Análise do Ciclo de Vida	31
2.3.1 Fases da ACV	32
2.3.2 Definição do Objetivo e do Escopo	32
2.3.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida	33
2.3.4 Avaliação de Impacto	35
2.3.5 Interpretação	38
2.3.6 Métodos de Análise de Impacto na ACV	39
2.3.7 Limitações do Estudo de ACV	44
2.3.8 ACV de Biocombustíveis	46
2.3.9 Ocupação do Solo para Produzir Biocombustível	52
2.4 Sistemas de Cogeração Aplicados nas Usinas Sucroalcooleiras	54
2.4.1 Conceito de Ciclo Rankine	55
2.4.2 Sistema de Cogeração com Turbina de Contrapressão	56
2.4.3 Sistema de Cogeração com Turbina a Vapor de Extração e Condensação	57

2.4.4 Sistema de Cogeração com Tecnologias Avançadas	58
--	----

### **CAPÍTULO 3**

#### **METODOLOGIA**

3.1 Fluxograma do Estudo	61
3.1.1 Inventário do ciclo de vida do metanol	62
3.1.2 Estudos de Caso no qual Insere a Produção de Metanol	64
3.1.3 Análise Exergoambiental	66
3.2 Ferramentas Computacionais	71
3.2.1 Software SimaPro	72
3.2.2 Software GateCycle	74
3.2.3 Software CSFMB	77

### **CAPÍTULO 4**

#### **INVENTÁRIO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE METANOL**

4.1 Cultivo e Transporte de Cana-de-açúcar	82
4.2 Manuseio da Cana-de-açúcar	88
4.3 Extração do Caldo	89
4.4 Pré-tratamento e Gaseificação do Bagaço	91
4.5 Conversão do gás de síntese a metanol	96
4.6 Inventário do Ciclo de Vida	97

### **CAPÍTULO 5**

#### **ESTUDOS DE CASO**

5.1 Destilaria Autônoma, Planta de Cogeração e Planta de Metanol Autônoma (Estudo de caso 1)	101
5.2 Destilaria Autônoma, Planta de Cogeração e Planta de Metanol Anexa (Estudo de caso 2)	106
5.3 Usina de Açúcar e Álcool, Planta de Cogeração e Planta de Metanol Anexa (Estudo de caso 3)	109
5.4 Usina de Açúcar e Álcool, Planta de Cogeração e Planta de Metanol Anexa e aplicação de um sistema BIG-GT (Estudo de caso 4)	113
5.5 Avaliação Termodinâmica dos Estudos de Caso	117

### **CAPÍTULO 6**

#### **RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE METANOL**

6.1 Alocação dos Impactos Ambientais	128
6.2 Avaliação dos Impactos para os Estudos de Caso	131
6.3 Avaliação Exergoambiental	140
6.4 Eficiência Energética do Ciclo de Vida	154
6.5 Ciclo de Vida do Metanol Fóssil x Metanol Renovável	156
<b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	161
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	164
<b>APÊNDICE A</b>	

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Participação das fontes energéticas no consumo interno brasileiro	2
Figura 2.1 – Principais etapas para a produção e uso dos biocombustíveis	8
Figura 2.2 - Esquema de um gaseificador contracorrente ("Updraft")	12
Figura 2.3 - Esquema do gaseificador concorrente ("Downdraft")	13
Figura 2.4 - Esquema do gaseificador de fluxo cruzado ("cross-flow")	14
Figura 2.5 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante	15
Figura 2.6 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante	16
Figura 2.7 – Estágios para o processo de produção de combustível a partir do gás de síntese	17
Figura 2.8 – Produção de eletricidade a partir do gás de síntese	17
Figura 2.9 - Processo ICI para obtenção do metanol	20
Figura 2.10 - Processo Lurgi para obtenção do metanol	21
Figura 2.11 - Esquema de um reator em lama borbulhante	23
Figura 2.12 – Esquema do processo de produção do metanol Fase-Líquida	24
Figura 2.13 – Estratificação dos custos para o processo de produção do metanol	28
Figura 2.14 – Diagrama de Sankey para a eficiência da produção do metanol	29
Figura 2.15 – Esquema do processo de produção de metanol integrado a usina	30
Figura 2.16 – Ciclo de Vida de um Produto	31
Figura 2.17 – Fases da Análise do Ciclo de Vida	32
Figura 2.18 – Sistema de alocação por substituição (subtração)	34
Figura 2.19 – Sistema de alocação por substituição (adição)	34
Figura 2.20 – Entradas e saídas do processo de cultivo de biomassa	47
Figura 2.21 – Emissões de GEE evitadas em comparação ao ciclo de vida da gasolina	48
Figura 2.22 – Sistema de fronteiras para realizar a ACV da produção de biodiesel	49
Figura 2.23 – Participação percentual das etapas produtivas no consumo energético do ciclo de vida no Brasil	50
Figura 2.24 – Consumo energético em diferentes etapas da produção do biodiesel	50
Figura 2.25 – Análise do Ciclo de Vida para os combustíveis diesel FT e diesel fóssil	52
Figura 2.26 – Evolução das áreas plantadas com cana-de-açúcar no Centro-Sul do	53

## Brasil

Figura 2.27 – Esquema do Ciclo Rankine	55
Figura 2.28 – Sistema de cogeração com turbina de contrapressão em uma usina de açúcar e álcool	56
Figura 2.29 – Esquema do Sistema BIG-GT – <i>Biomass Integrated Gasifier/ Gas Turbine</i>	59
Figura 3.1 – Fluxograma do estudo da tese de doutorado	62
Figura 3.2 – Estudos de caso propostos para análise	65
Figura 3.3 – Estrutura do método exergoambiental	66
Figura 3.4 – Estrutura física de um sistema térmico	69
Figura 3.5 – Estrutura produtiva de um sistema térmico	70
Figura 3.6 – Criação de uma base de dados para um determinado processo no SimaPro	73
Figura 3.7 – Apresentação dos resultados para avaliação de impactos no SimaPro 7	74
Figura 3.8 – Modelagem de uma caldeira de recuperação utilizando o software GateCycle	76
Figura 3.9 – Modelagem das seções de uma turbina a vapor utilizando o software GateCycle	77
Figura 3.10 – Interface gráfica do programa CSFMB para os dados de entrada	79
Figura 3.11 – Interface gráfica do programa CSFMB de apresentação dos resultados	80
Figura 4.1 – Estrutura típica da biomassa cana-de-açúcar	82
Figura 4.2 – Exemplo da colheita manual da cana-de-açúcar queimada	86
Figura 4.3 – Exemplo de caminhão para transporte da cana-de-açúcar	86
Figura 4.4 – Esquema de um desfibrador	89
Figura 4.5 – Esquema de um terno de moenda	90
Figura 4.6 – <i>Pelletes</i> de biomassa	91
Figura 4.7 – Esquema de um processo de absorção química	95
Figura 4.8 – Diagrama do inventário do ciclo de vida da produção de cana-de-açúcar	98
Figura 5.1 – Balanço mássico e energético para o estudo de caso 1	103
Figura 5.2 – Esquema do sistema de cogeração para o estudo de caso 1	104
Figura 5.3 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 2	106
Figura 5.4 – Esquema do sistema de cogeração para o estudo de caso 2	107
Figura 5.5 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 3	111
Figura 5.6 – Esquema do sistema de cogeração para o estudo de caso 3	112

Figura 5.7 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 4	114
Figura 5.8 – esquema do sistema de cogeração + BIG/GT para o estudo de caso 4	115
Figura 5.9 – Representação da distribuição da exergia da cana-de-açúcar	121
Figura 5.10 – Contribuição de cada unidade produtora sob a exergia total destruída	124
Figura 5.11 – Aproveitamento exerгético da cana-de-açúcar	127
Figura 6.1 – Resultados dos impactos ambientais da produção do metanol a partir do bagaço	132
Figura 6.2 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 1	132
Figura 6.3 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 2	133
Figura 6.4 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 3	133
Figura 6.5 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 4	134
Figura 6.6 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 1	138
Figura 6.7 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 2	138
Figura 6.8 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 3	139
Figura 6.9 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 4	139
Figura 6.10 – Estrutura produtiva do estudo de caso 1	142
Figura 6.11 – Estrutura produtiva do estudo de caso 2	143
Figura 6.12 – Estrutura produtiva do estudo de caso 3	144
Figura 6.13 – Estrutura produtiva do estudo de caso 4	145
Figura 6.14 – Configuração para produzir metanol de forma mais eficiente	153
Figura 6.15 – Etapas envolvidas na elaboração do inventário do ciclo de vida do metanol fóssil	157
Figura 6.16 – Impacto ambiental por categoria de impacto da produção do metanol fóssil e metanol de bagaço	159
Figura 6.17 – Impacto ambiental total da produção do metanol	159

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedade energética de diferentes tipos de resíduos de biomassa	9
Tabela 2.2 – Características típicas dos gaseificadores	16
Tabela 2.3 – Descrição das principais correntes no processo de produção de metanol pela tecnologia Metanol Fase-Líquida	25
Tabela 2.4 – Propriedades do combustível metanol em relação a gasolina	27
Tabela 2.5 – Categorias de Impacto usadas pelo método CML 2 (2000)	39
Tabela 2.6 – Categorias de Impacto usadas pelo método Eco-Indicador 99	40
Tabela 2.7 – Visão dos parâmetros para determinados tipos de uso do solo	42
Tabela 2.8 – Categorias de Impacto usadas pelo método IMPACT 2002+	44
Tabela 2.9 – Eficiência de conversão do processo de síntese de combustível líquido	47
Tabela 2.10 – Balanço energético da produção do etanol a partir da cana-de-açúcar	48
Tabela 2.11 – Estratégias para aplicação do gás de síntese numa turbina a gás	60
Tabela 4.1 – Uso do solo para cultivo da cana-de-açúcar	84
Tabela 4.2 – Insumos aplicados no cultivo da cana-de-açúcar	85
Tabela 4.3 – Principais poluentes emitidos pelos tratores agrícolas	87
Tabela 4.4 – Principais poluentes emitidos por veículos de carga pesada	87
Tabela 4.5 – Emissões provenientes durante o cultivo e queimadas	88
Tabela 4.6 – Emissões para água proveniente do cultivo da cana	88
Tabela 4.7 – Dados de entrada do processo de gaseificação do bagaço	92
Tabela 4.8 – Características do bagaço de cana-de-açúcar	92
Tabela 4.9 – Principais saídas produzidas durante a gaseificação do bagaço	93
Tabela 4.10 – Características e composição do gás de síntese produzido	94
Tabela 4.11 – Dados de entrada do processo de síntese de metanol	96
Tabela 4.12 – Dados de saída do processo de síntese de metanol	96
Tabela 4.13 – Principais dados de entrada e saída do processo de produção de metanol	99
Tabela 5.1 – Principais parâmetros para o estudo de caso 1	102
Tabela 5.2 – Principais emissões provenientes da combustão do bagaço	108
Tabela 5.3 – Principais parâmetros para o estudo de caso 3	109
Tabela 5.4 – Fração mássica dos elementos químicos do bagaço	120

Tabela 5.5 – Índices de desempenho calculados para os estudos de caso	121
Tabela 6.1 – Produtos dos estudos de caso para a referência de 1 tonelada de cana-de-açúcar	129
Tabela 6.2 – Valores exergéticos dos produtos obtidos a partir de 1 tonelada de cana-de-açúcar	130
Tabela 6.3 – Fatores de alocação dos impactos ambientais para cada estudo de caso	130
Tabela 6.4 – Impactos ambientais na produção de 1 kg de metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar	131
Tabela 6.5 – Valores normalizados no método Eco-Indicador 99	137
Tabela 6.6 – Equacionamento matemático para o sistema do estudo de caso 1	146
Tabela 6.7 – Equacionamento matemático para o sistema do estudo de caso 2,3,4	147
Tabela 6.8 – Impacto ambiental da exergia destruída para os estudos de caso	151
Tabela 6.9 – Relação energética do sistema de produção de metanol	155
Tabela 6.10 – Inventário final da produção do metanol fóssil	157
Tabela 6.11 – Relação energética do sistema de produção de metanol fóssil	160

# Simbologia

## Subscritos

Ag    Água

Comb    Combustível

D    Destruída

E    Entrada

Eq    Equivalente

Exced    Excedente

F    Fuel (combustível)

In    Entrada

k    Equipamento ou subsistema

Out    Saída

P    Produto

Pump    Bomba

Ref    Referência

S    Saída

Sac    Sacarose

Ssa    Solução água + sacarose

Turb	Turbina
Uso	Uso do solo
Vc	Volume de controle

## **Siglas**

ACV	Análise do Ciclo de Vida
BEN	Balanço Energético Nacional
BIG-GT	Biomass Integrated Gasifier - Gas Turbine
BTL	Biomass to Liquid
CEST	Condensing-Extraction Steam Turbine
CFC	Clorofluorcarbono
CSFMB	Comprehensive Simulator for Fluidized and Moving Bed Equipment
DALY	Disability Adjusted Life Year
EPS	Environmental Priority System
ETBE	Bioéter Etil-ter-Butílico
FER	Fossil Energy Ratio
FT	Fischer-Tropsch
FUE	Fator de Utilização de Energia
GEE	Gases de Efeito Estufa
GTL	Gas to Liquids

ICI	Imperial Chemical Industries
IEE	Integral Environmental Evaluation
LCEE	Life Cycle Energy Efficiency
MEA	Mono-etanol-amina
MTBE	Bioéter Metil-ter-Butílico
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída
NOEC	No Observed Effect Concentration
PAF	Potentially Affected Fraction
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDF	Potentially Disappeared Factor
PIB	Produto Interno Bruto
PM10	Particulate Matter < 10 µm
PM2,5	Particulate Matter < 2,5 µm
TOC	Total Organic Carbon
TR	Torre de Resfriamento
VOC	Volatile Organic Compounds

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

O afortunado desempenho da empresa Petrobrás na busca de fontes de petróleo, tem levado ao Brasil a situar-se entre os grandes produtores e exportadores, com reservas expressivas. Porém isto não pode conduzir o Brasil a uma política errônea de desestimular a investigação de novas fontes e de novos processos de produção de combustíveis renováveis.

Como economia emergente de impacto mundial, o Brasil tem um espaço muito significativo na busca da suficiência energética, produção suficiente de alimentos, e a preservação do meio ambiente.

Contudo o esforço é direcionado de modo que para alcançar cada um desses aspectos, não signifique prejudicar os outros. Logo é tempo de desenvolver modos de resolver o problema, procurando encontrar inovações em estudos racionais.

Há um exemplo histórico de sucesso no Brasil, que foi o bem sucedido Programa Pró-Álcool, desenvolvido nas décadas de 70 e 80. O programa no início teve controvérsias, mas ao longo dos anos levou o Brasil a situar-se num dos grandes produtores mundiais de biocombustível.

Tal fato justifica o crescimento da produção de cana-de-açúcar, que no ano de 2009 alcançou 622,6 milhões de toneladas. Este montante foi 12,6% superior ao registrado no ano anterior, quando a safra foi de 552,8 milhões de toneladas, de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009).

Como consequência, os produtos derivados da cana-de-açúcar têm aumentado sua participação na matriz energética brasileira. Seja para serem usados como combustível (etanol), quanto para produção de eletricidade (sistemas de cogeração com bagaço, instalados

em usinas de açúcar e álcool). O gráfico da Figura 1.1 apresenta a participação das principais fontes energéticas consumidas no Brasil desde a década de 70.

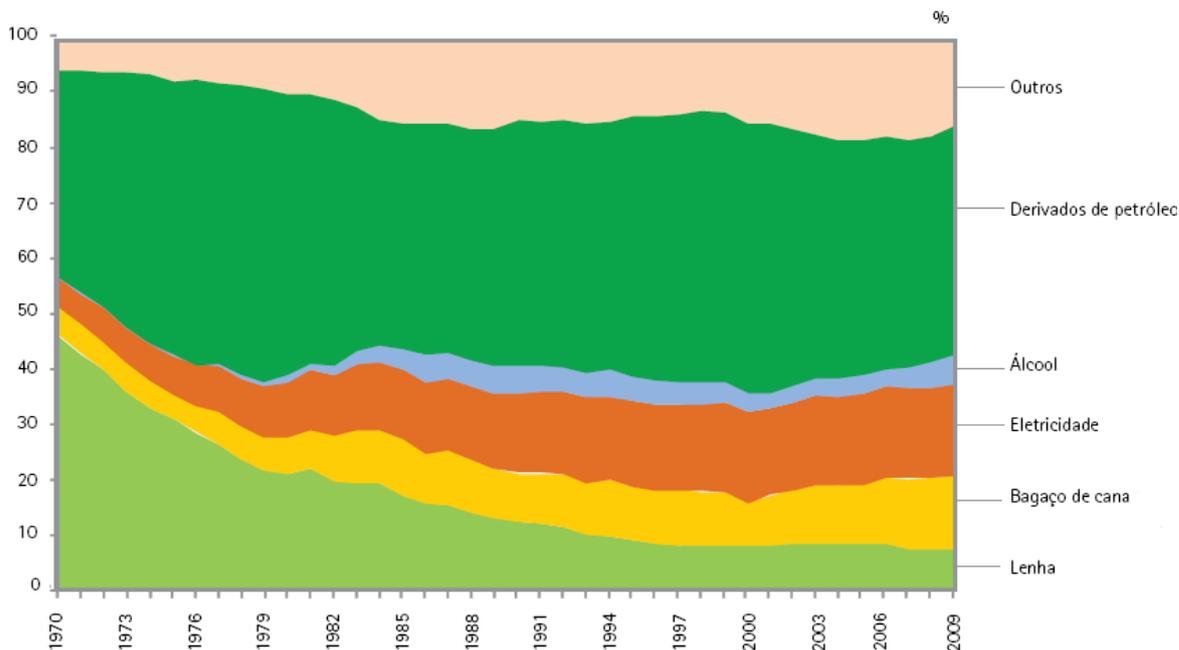


Figura 1.1 – Participação das fontes energéticas no consumo interno brasileiro (BEN, 2009)

Da Figura 1.1 pode ser observado o crescimento da participação dos produtos derivados da cana-de-açúcar, principalmente entre os anos de 2000 a 2009, quando a participação do bagaço de cana cresceu em 67%, enquanto que o álcool cresceu 50%.

O governo brasileiro também tem investido em outras formas renováveis de energia, como por exemplo, o programa de estímulo à produção de biodiesel, determinando percentuais deste a serem adicionados ao óleo diesel de forma progressiva nos próximos anos.

Com relação aos biocombustíveis de segunda geração, produzidos a partir da biomassa e dos resíduos da mesma, estes são de tecnologias mais recentes, as quais o governo brasileiro tem investido. A empresa brasileira Petrobrás prevê para os anos de 2011 a 2015 a demonstração de tecnologias para estes tipos de biocombustíveis, os quais podem ser produzidos a partir de resíduos da biomassa.

Para analisar a viabilidade energética e ambiental dos biocombustíveis existem muitos trabalhos publicados e que utilizaram como ferramenta a Análise do Ciclo de Vida (ACV), abordando assim questões relacionadas aos impactos ambientais produzidos durante o ciclo de vida destes combustíveis.

Um exemplo destes estudos é o trabalho desenvolvido em Lindholm (2006), no qual foi feita uma Análise de Inventário do Ciclo de Vida da produção da madeira nas regiões

florestais da Suécia, considerando desde o cultivo das sementes até o transporte da madeira extraída. Este trabalho merece destaque, pois a madeira é uma das matérias-primas típicas para alguns bicomcombustíveis como metanol, diesel Fischer-Tropsch e dimetil éter.

A produção da madeira e a aplicação da Análise do Ciclo de Vida, também foi o foco de estudo em Seppälä *et al.* (1998), no qual selecionou a Finlândia para a realização do trabalho. Outra referência bibliográfica para ACV aplicado ao sistema florestal está no trabalho de Berg (1997), porém se enfocou na análise dos impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis nas operações florestais.

Com respeito às demais produções agrícolas, como por exemplo, a cana-de-açúcar, o trabalho Renouf *et al.* (2008) apresentou um estudo comparativo de ACV da plantação de cana-de-açúcar australiana, de milho norte-americano, e da beterraba inglesa.

Em Macedo *et al.* (2008) também foi apresentado um estudo o qual se aplica a cana-de-açúcar. Essa pesquisa foi realizada para as condições do Brasil e centrou-se numa ACV da produção do etanol a partir da cana-de-açúcar. Um trabalho semelhante a este, foi o estudo em Luo *et al.* (2008), também focado numa ACV para a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar, porém agregando a esta uma análise de custos do processo de síntese do etanol.

Beeharry (2001) também trabalhou com cana-de-açúcar, porém o seu estudo de ACV deu enfoque às emissões de gases de efeito estufa, que eram provenientes principalmente do consumo de combustíveis fósseis nas operações agrícolas da cana-de-açúcar. Já no trabalho de Silalertruska e Gheewala (2009) foi estudada a eficiência energética do etanol, identificando os principais impactos ambientais e disponibilidade de matéria-prima na Ilha de Maurício, na qual foi feito o estudo. Algumas recomendações feitas neste estudo incluem aumentar a produtividade melhorando a qualidade do solo com fertilizantes orgânicos e recuperação de resíduos para produção de eletricidade.

Em relação aos biocombustíveis obtidos pela rota termoquímica, existem trabalhos de ACV, como por exemplo, o estudo em Unnasch (2005), que consistiu na realização de um balanço energético do processo de produção de biocombustíveis obtidos através da gaseificação da biomassa.

Outro trabalho, porém voltado para uma abordagem econômica e ambiental, foi o de Kumabe (2006), seu estudo centrou-se no processo de produção do metanol via gaseificação da biomassa, considerando o fornecimento de vapor e eletricidade ao processo, realizado por um sistema de co-geração.

Assim, no contexto sucroalcooleiro e da rota termo-química da gaseificação o presente trabalho objetiva inserir a produção de metanol a partir do bagaço de cana nas instalações reais existentes de produção de açúcar e álcool.

Tal inserção da produção de metanol é realizada através de quatro estudos de caso, os quais são avaliados do ponto de vista ambiental e energético, apontando assim as principais vantagens e desvantagens de cada um deles, e assim com os resultados alcançados o presente trabalho almeja oferecer recomendações de programas de investimento na área da produção de biocombustíveis no Brasil.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho objetiva realizar uma avaliação ambiental e energética da produção de metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar utilizando a Análise do Ciclo de Vida e indicadores de desempenho termodinâmicos.

Para atingir tal objetivo foram traçadas as seguintes metas a serem alcançadas:

- Revisão bibliográfica do estado da arte e situação atual de alternativas tecnológicas da produção de biocombustíveis de 2ª geração e da metodologia Análise do Ciclo de Vida;
- Com base na revisão bibliográfica, ordenar os dados técnicos e complementá-los para elaborar um Inventário de Ciclo de Vida do metanol produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar.
- Definir as possibilidades de integração de uma planta de metanol aos processos produtivos de uma usina de açúcar e álcool e destilaria, baseando-se em esquemas e parâmetros das instalações reais existentes;
- Desenvolver quatro estudos de casos, sendo o primeiro um processo convencional, no qual a eletricidade é fornecida por uma concessionária e o vapor por uma caldeira, operando com combustível fóssil. No segundo estudo, a eletricidade e vapor são supridos por um sistema de cogeração com bagaço, enquanto no terceiro aplica-se também a cogeração, porém operando com bagaço e palha. No último estudo de caso o vapor e eletricidade são fornecidos por uma planta de cogeração com bagaço que aplica conceitos avançados de cogeração, como o BIG-GT;
- Estabelecer indicadores de desempenho para cada estudo de caso proposto;

- Realizar uma avaliação ambiental do metanol produzido a partir do bagaço nos estudos de caso proposto, utilizando como ferramenta a Análise do Ciclo de Vida;
- Definir a alternativa com menor impacto ambiental e melhor desempenho energético para produção do metanol a partir da gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar;
- Realizar uma análise exergoambiental para alocar os impactos ambientais da produção do metanol do bagaço entre os equipamentos que constituem cada estudo de caso e assim determinar o impacto ambiental da exergia destruída;
- Comparar os impactos ambientais originados na produção do metanol do bagaço com os impactos ambientais da produção de metanol a partir do gás natural;

## **1.2 CONTRIBUIÇÃO E HIPÓTESE DA PESQUISA**

A hipótese do presente trabalho é que a produção de metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar seja vantajosa desde o ponto de vista ambiental e energético, e assim abre uma oportunidade de inserção deste produto no setor sucroalcooleiro.

Com base no cumprimento do objetivo e das metas traçadas espera-se que a presente tese de doutorado possa contribuir no conhecimento técnico e no desenvolvimento de uma capacidade de avaliação que permita oferecer recomendações ao desenvolvimento da produção de biocombustíveis no Brasil.

## **1.3 CONTEÚDO DA TESE DE DOUTORADO**

Além do capítulo 1 apresentado, a tese de doutorado é composta por outros 6 capítulos descritos a seguir:

### **Capítulo 2**

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica das rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis, em especial aqueles que usam a rota da gaseificação da biomassa. Centralizando-se no processo de produção de metanol a partir da biomassa, as tecnologias disponíveis, os custos e desempenho do processo, como também as tendências e desafios.

O presente capítulo também faz uma revisão bibliográfica sobre a ferramenta de gestão ambiental Análise do Ciclo de Vida (ACV), e apresenta alguns resultados obtidos na literatura sobre ACV aplicados a produção de biocombustíveis.

Apresenta também os sistemas aplicados para geração de eletricidade e vapor, como a cogeração CEST (*Condensing-Extraction Steam Turbine*- Turbina a Vapor de Extração e Condensação), e o sistema BIG-GT (*Biomass Integrated Gasifier-Gas Turbine* - Gaseificação de Biomassa Integrada a Turbina a Gás).

### **Capítulo 3**

No capítulo 3 está apresentada a metodologia da tese de doutorado, apresentando as ferramentas computacionais aplicadas neste trabalho, como também algumas considerações feitas no estudo de Análise do Ciclo de Vida e de análise exergoambiental

### **Capítulo 4**

No capítulo 4 está apresentado o inventário do processo de produção de metanol, considerando desde a etapa de cultivo da cana até a síntese do metanol na planta.

### **Capítulo 5**

Este capítulo apresenta os estudos de caso nos quais a planta de produção de metanol está instalada, apresentando também uma avaliação termodinâmica de cada estudo através de índices de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica.

### **Capítulo 6**

O capítulo 6 apresenta os principais impactos ambientais da produção do metanol aplicando o método Eco-Indicador 99 da Análise do Ciclo de Vida, e também os impactos ambientais provenientes da exergia destruída.

Por último foram determinados dois indicadores relacionados à eficiência energética do ciclo de vida e comparou os impactos ambientais produzidos pelo metanol obtido a partir do gás natural com o metanol produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

### **Capítulo 7**

Neste último capítulo foram apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Por biocombustível entende-se o combustível líquido, gasoso ou sólido produzidos a partir de fontes renováveis de energia como a biomassa. De acordo com a Diretiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu, transposta para a legislação brasileira pelo Decreto-Lei nº 62/2006, são considerados biocombustíveis:

- **Bioetanol:** Etanol produzido a partir da biomassa e/ou da fração biodegradável de resíduos. É produzido a partir da fermentação dos açúcares, encontrados nas culturas como cana-de-açúcar, trigo, milho, batata, etc.

- **Biodiesel:** Éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, que apresenta qualidades de combustível para motores diesel. É obtido, principalmente a partir de plantas oleaginosas, como a colza, soja, palma de azeite, mamona, girassol, através de um processo químico de transesterificação.

- **Biometanol:** Metanol produzido a partir de biomassa, através de um processo de gaseificação.

- **Biogás:** Gás combustível produzido a partir de biomassa e/ou da fração biodegradável de resíduos (efluentes agropecuários, agro-industriais e urbanos) e que pode ser purificado até

atingir a qualidade do gás natural. Resulta, pois, da degradação biológica anaeróbica da matéria orgânica contida nos resíduos.

- **Bioéter dimetílico:** Éter dimetílico produzido a partir de biomassa

- **Bio-ETBE** (bioéter etil-ter-butílico): ETBE produzido a partir do bioetanol. Na França é utilizado como aditivo oxigenado nas formulações de gasolina sem chumbo.

- **Bio-MTBE** (bioéter metil-ter-butílico): Combustível produzido com base em biometanol.

- **Biocombustíveis sintéticos:** Hidrocarbonetos sintéticos ou misturas produzidas a partir de biomassa.

- **Biohidrogênio:** Hidrogênio produzido a partir de biomassa e/ou fração biodegradável de resíduos.

- **Óleo vegetal puro produzido a partir de plantas oleaginosas:** Óleo bruto ou refinado produzido por pressão, extração ou métodos comparáveis a partir de plantas oleaginosas.

Na atualidade existem diferentes rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis a partir das diferentes fontes de biomassas, sendo estas rotas classificadas de primeira e segunda geração. Uma representação gráfica destas rotas tecnológicas é apresentada na figura 2.1.

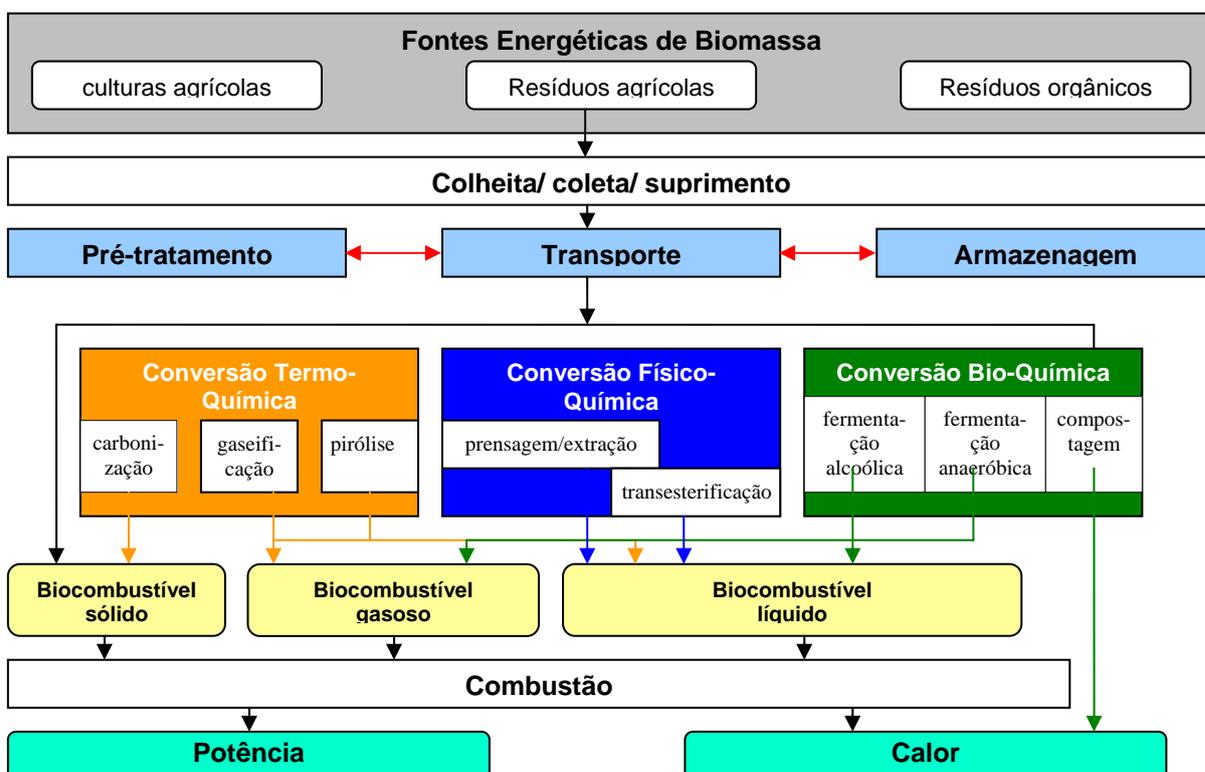


Figura 2.1 – Principais etapas para a produção e uso dos biocombustíveis (Adaptada de Zinoviev *et al.*, 2007).

É importante ter em conta que o valor energético da biomassa difere para cada tipo, como também o conteúdo de cinzas, determinando assim as características do biocombustível a ser produzido. Portanto, os biocombustíveis que são produzidos a partir da biomassa, têm propriedades e características diferentes, dependendo do tipo de biomassa utilizada em sua produção. Na tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades energéticas e densidades de alguns resíduos de biomassas utilizadas como fontes energéticas:

Tabela 2.1 – Propriedade energética de diferentes tipos de resíduos de biomassa  
(Alakangas *et al.*, 2007).

Resíduos de biomassa	PCI (MJ/kg)	Umidade (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Florestais	18,5 - 20	40 - 55	250 - 350
Palha de arroz	16,7	25	0,13
Oliveira	17,5 - 19	10 - 60	-
Milho	18,4	50 - 60	-

No presente trabalho está focalizado a produção do combustível metanol líquido a partir do bagaço de cana-de-açúcar pela rota da conversão termo-química da gaseificação, que está descrita no item a seguir.

### 2.1.1 Gaseificação da Biomassa

O processo de gaseificação para produção de combustível de origem orgânica e posterior uso em fornalhas já era aplicado há 180 anos. A possibilidade de usar o gás de síntese para geração de calor e potência foi concretizada a partir da década de 70 e usada nos sistemas de produção de gás europeu, o qual utiliza carvão vegetal e turfa como matéria-prima (Rajvanshi, 1986).

A gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que tenha carbono em sua composição) em um produto gasoso combustível. Estes gases combustíveis contêm CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, outros hidrocarbonetos, gases inertes e diversos contaminantes (particulados e alcatrões). O processo resulta de complexas reações, e pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Etapa de pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C.

2. Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, processo que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.

3. Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados.

4. Craqueamento do alcatrão – processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros gases como produtos.

5. Oxidação parcial dos produtos da pirólise.

A seguir, nas equações (2.1) até (2.10), estão as principais reações químicas de cada uma das etapas do processo de gaseificação listadas anteriormente (Waldheim, 2005):

### 1 – Pirólise:



### 2 – Oxidação do Carbono:



### 3 – Gaseificação:

Reações de Boudouard:



Reação gás-água:



Reação de formação de metano:



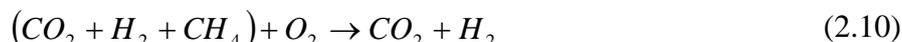
Reação de deslocamento da água



#### 4 – Craqueamento do alcatrão:



#### 5 – Oxidação parcial dos produtos da pirólise:



## 2.1.2 Gaseificadores

A gaseificação pode ser realizada em diferentes tipos de gaseificadores, cada um com suas características particulares. Eles podem ser a pressão atmosférica ou pressurizado, de leito fixo ou fluidizado. Os gaseificadores de leito movente se dividem em co-corrente, contracorrente e fluxo cruzado, os de leito fluidizado são classificados em borbulhante e circulante (Ciferno e Marano, 2002).

### I – Gaseificador de leito fixo

Esse tipo de gaseificador é tradicionalmente usado no processo de gaseificação, com a vantagem de utilizar uma tecnologia simples, porém com limite de capacidade da planta 10 – 15 t biomassa seca por hora, e normalmente opera numa temperatura de 1000°C na zona de oxidação (Olofsson *et al.*, 2005).

Dependendo da direção do fluxo do ar e da biomassa, os gaseificadores de leito movente (fixo) são classificados em: contracorrente (“updraft”), co-corrente (“downdraft”), fluxo cruzado (“cross-flow”) (Mckendry, 2002).

No gaseificador contracorrente (“updraft”) a alimentação de biomassa é feita pelo topo, o ar é introduzido no sistema pela parte inferior do equipamento, e o gás produzido é extraído na parte superior do gaseificador. A oxidação ocorre na região do fundo do leito do gaseificador, na chamada zona de combustão liberando CO<sub>2</sub> e água. Os gases quentes (~1000°C) passam através da zona de redução na qual são reduzidos a H<sub>2</sub> e a CO e resfriados à 750°C.

Na zona de pirólise há formação de voláteis, contendo alcatrão, que não é craqueado na zona de combustão. O gás sai do gaseificador com uma temperatura de aproximadamente 500°C, e o controle da temperatura de gaseificação é feito pela adição do agente de gaseificação (ar, oxigênio ou vapor) (Olofsson *et al.*, 2005).

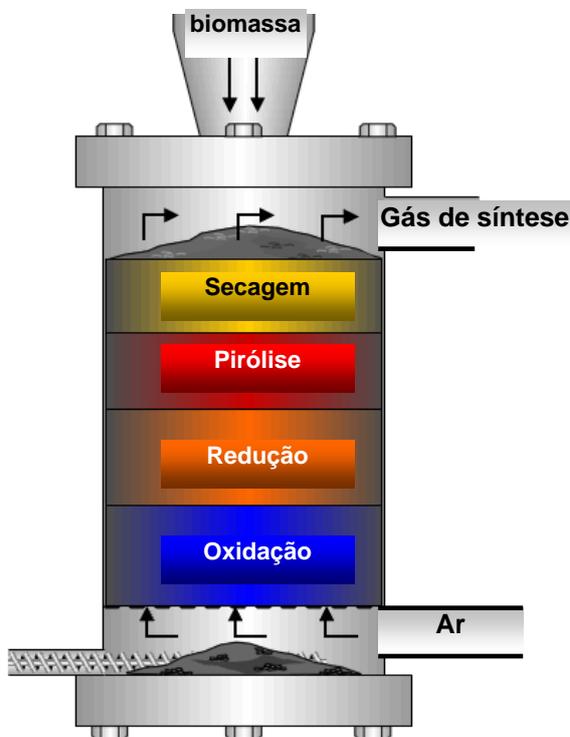


Figura 2.2 - Esquema de um gaseificador contracorrente ("Updraft") (Olofsson *et al.*, 2005)

No gaseificador co-corrente ("downdraft") a alimentação de biomassa é feita pelo topo, o ar pode ser fornecido ao sistema, ou pelo topo, ou pela lateral, e a extração do gás é feita pelo fundo. Os gases deixam o equipamento após passarem pelas zonas quentes, onde o alcatrão contido nos gases é submetido ao craqueamento.

As zonas de reação nesse tipo de gaseificador estão bem definidas. Assim a biomassa passa pela zona de secagem, pirólise, oxidação e por último pela zona de redução onde são formados o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H<sub>2</sub>) por meio da reação com carvão que foi formado na zona de pirólise (Olofsson *et al.*, 2005).

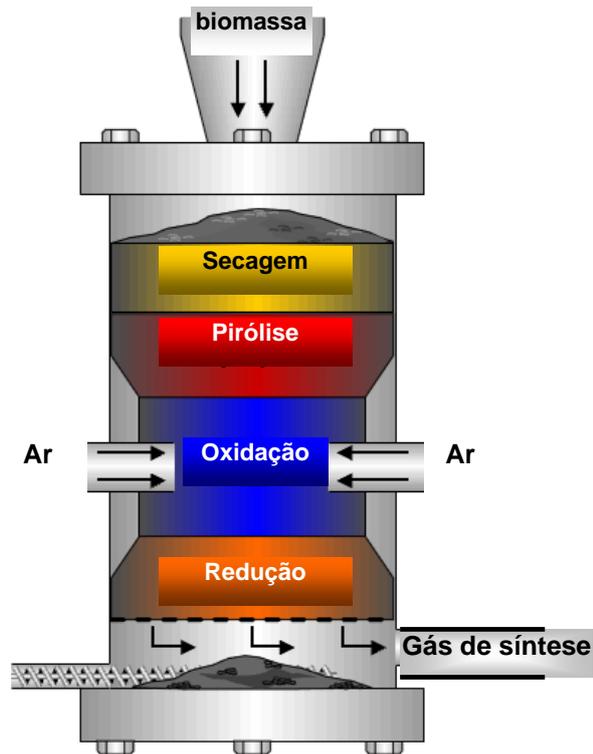


Figura 2.3 - Esquema do gaseificador concorrente ("Downdraft") (Olofsson *et al.*, 2005)

No gaseificador de fluxo cruzado ("cross-flow") a alimentação de biomassa é feita pelo topo do reator, o agente gaseificador é introduzido no sistema pelas laterais. A extração do gás é realizada também pela lateral, pelo lado oposto ao da entrada de ar numa temperatura de cerca de 800-900°C. Essa configuração é simples, porém fornece um gás de qualidade inferior, com baixo poder calorífico, com grande quantidade de voláteis.

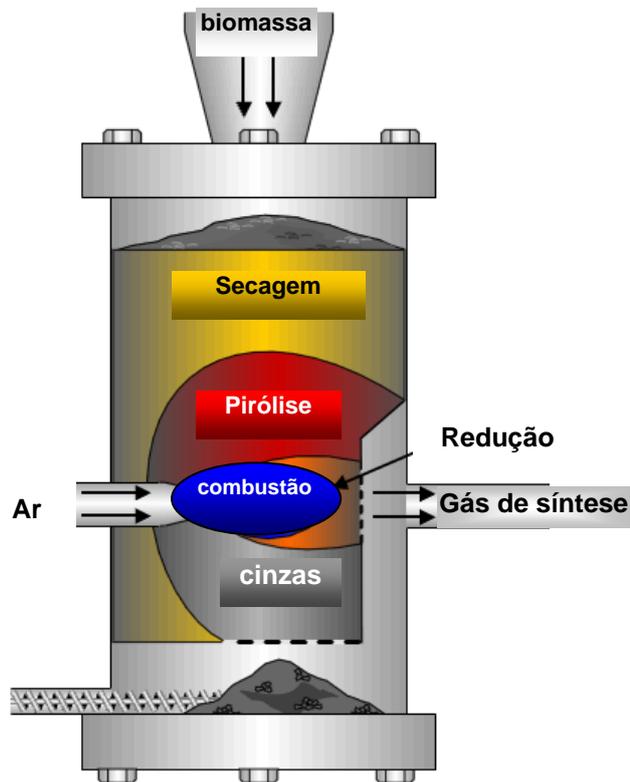


Figura 2.4 - Esquema do gaseificador de fluxo cruzado ("cross-flow") (Olofsson *et al.*, 2005)

## II – Gaseificador de leito fluidizado

Segundo McKendry (2002), esse tipo de gaseificador foi comumente utilizado na gaseificação de carvão mineral, com a vantagem de fornecer uma distribuição uniforme da temperatura em todo o leito. Esse sistema possibilita um bom contato entre sólido e gás e uma boa circulação das partículas de biomassa, além de alta velocidade de reação.

Esse tipo de gaseificador normalmente utiliza um leito de areia com granulometria inferior a 1 mm, que normalmente intensifica a troca de calor entre as partículas, aumentando a eficiência do processo. O gaseificador de leito fluidizado permite trabalhar com uma ampla faixa de combustíveis sólidos, além de ser um sistema de maior capacidade. Os gaseificadores são ainda classificados em leito fluidizado borbulhante e em leito fluidizado circulante.

O gaseificador de leito fluidizado borbulhante consiste de um vaso com um distribuidor ou placa distribuidora, localizada no fundo do reator, onde o agente gaseificador, normalmente o ar, é introduzido numa velocidade de 2 a 3 m/s.

O controle da temperatura (700-900°C) é realizado por meio da relação ar/combustível. A biomassa é pirolisada no leito formando voláteis e compostos gasosos de alto peso molecular que são craqueados quando em contato com o material inerte do leito. O gás é

extraído pelo topo do reator, onde geralmente se tem um ciclone para separar a areia e as cinzas contidas no gás.

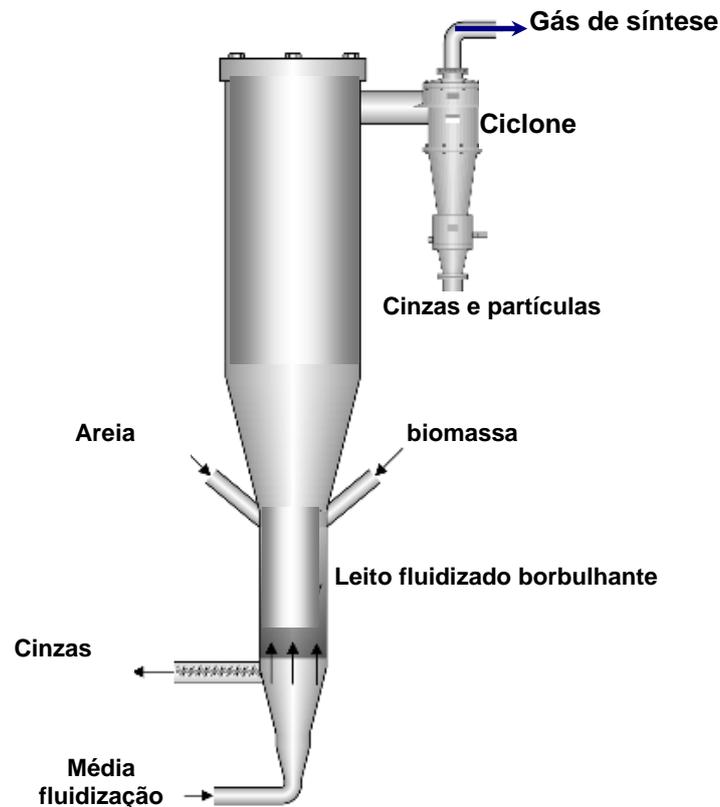


Figura 2.5 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante (Olofsson *et al.*, 2005).

No processo de gaseificação em leito fluidizado circulante as partículas são arrastadas pelo agente de fluidização no interior do reator e enviadas de volta ao leito. Esses gaseificadores operam em regime de transporte pneumático e possuem uma maior conversão de carbono devido ao maior tempo de residência das partículas. O gaseificador de leito fluidizado circulante é apresentado na Figura 2.6.

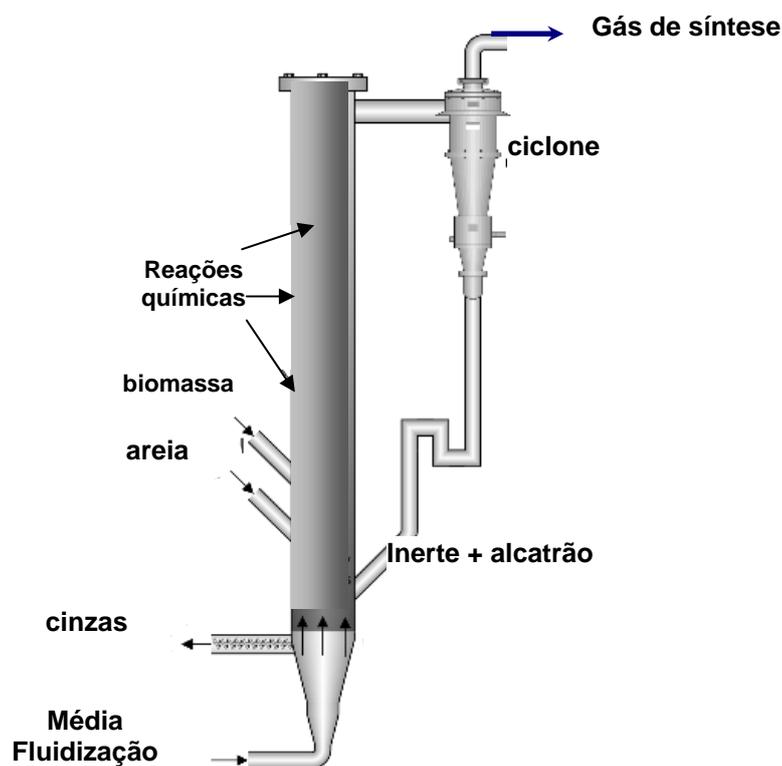


Figura 2.6 - Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante (Olofsson *et al.*, 2005).

Cada gaseificador listado anteriormente é caracterizado pela produção de diferentes composições para o gás de síntese, este depende também da biomassa e do agente gaseificante. Na tabela 2.2 estão listados as composições químicas do gás de síntese obtido em diferentes gaseificadores, biomassas e agentes gaseificantes.

Tabela 2.2 – Características típicas dos gaseificadores (Bain, 2004).

Tipo de gaseificador	Leito fluidizado circulante	Leito fixo	Leito fixo
Agente gaseificante	Vapor	Ar	Vapor
Biomassa	Madeira	Madeira	Licor negro
Composição do gás de síntese			
H <sub>2</sub>	26,2	21,70	29,4
CO	38,2	23,8	39,2
CO <sub>2</sub>	15,1	9,4	13,1
N <sub>2</sub>	2	41,6	0,2
CH <sub>4</sub>	14,9	0,08	13,0
PCI (MJ/Nm <sup>3</sup> )	16,3	5,4	17,2

### 2.1.3 Aplicações do Gás de Síntese

O gás de síntese obtido na gaseificação pode ser aplicado na produção de combustíveis líquidos, como: metanol, hidrocarbonetos sintéticos e dimetil-éter, esquematizado na Figura 2.7, depois de passar pelas etapas de limpeza e condicionamento.

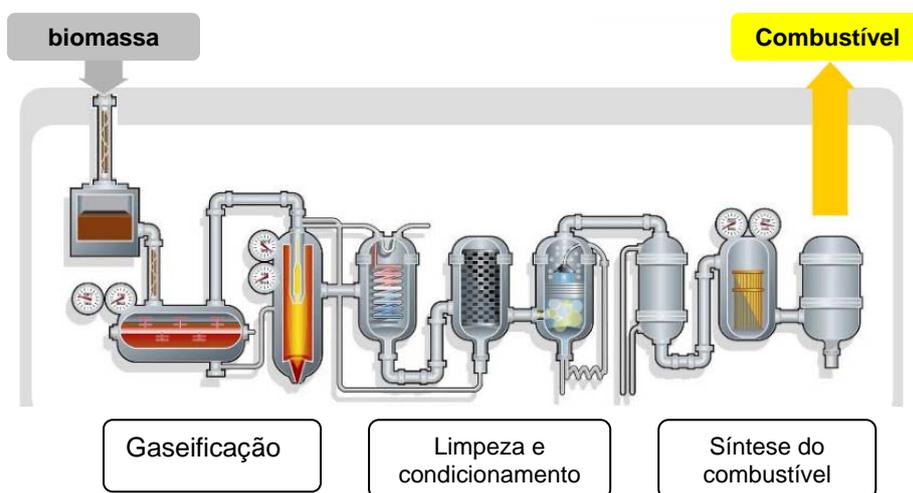


Figura 2.7 – Estágios para o processo de produção de combustível a partir do gás de síntese (Rudloff, 2008)

A etapa de limpeza é importante porque o gás de síntese contém impurezas, tais como alcatrão, partículas sólidas, álcalis, poeira, composto de enxofre e outros. Estas podem correr equipamentos, como também corromper a ação dos catalisadores. A etapa de condicionamento de sua composição já depende do tipo de biocombustível a ser produzido, no caso do metanol esta etapa está mais detalhada no item 3.1

Outra aplicação para o gás de síntese é a produção de eletricidade, um exemplo para tal aplicação, é o uso dele como combustível num ciclo combinado de turbina a gás e turbina a vapor, como está apresentado na Figura 2.8.

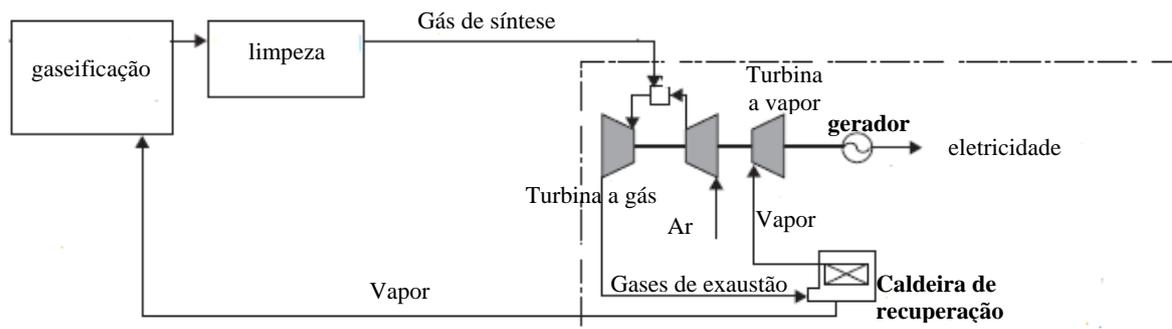


Figura 2.8 – Produção de eletricidade a partir do gás de síntese (Sonoda, 2004)

Na figura 2.8, o gás de síntese após passar pela etapa de limpeza é queimado na câmara de combustão de uma turbina a gás a fim de produzir eletricidade. Os gases quentes provenientes da mesma seguem para uma caldeira de recuperação, onde é produzido vapor. Uma parte deste é direcionado para uma turbina a vapor para produção de eletricidade, outra é encaminhada ao processo de gaseificação, como fluido de trabalho.

## 2.2 METANOL A PARTIR DA BIOMASSA

O metanol tem várias definições, por exemplo, para um químico o metanol é um líquido de baixa viscosidade, cuja fórmula é  $\text{CH}_3\text{OH}$ . O metanol pode ser utilizado como combustível para os meios de transportes devido ao seu alto número de octanos e baixo número de cetanos (Kavalov e Peteves, 2005). Outro uso do metanol é como solvente industrial e também é usado no processo de transesterificação do óleo vegetal para a produção do biodiesel.

### 2.2.1 Processo de Produção do Metanol

Atualmente existem várias rotas comerciais para a produção de metanol, bem como estão em desenvolvimento tecnologias avançadas para a sua produção. De acordo com Cifre e Badr (2007) o processo de produção do metanol a partir da biomassa segue os seguintes passos:

**I - Pré-tratamento da matéria-prima:** As fontes de biomassa mais apropriadas para esta aplicação são a madeira e os resíduos de madeira. A preparação da matéria-prima depende das características da biomassa e do gaseificador, e normalmente inclui a redução granulométrica da biomassa e a sua secagem.

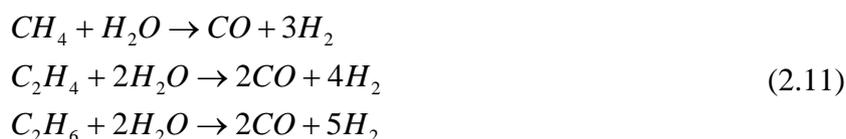
**II - Gaseificação da biomassa:** A seleção e projeto de qualquer sistema de gaseificação de biomassa estão determinados, principalmente, pelas características da matéria-prima, legislação ambiental vigente, custos e desempenho do equipamento avaliado, como também da capacidade necessária.

**III - Limpeza do gás de síntese:** O gás produzido na gaseificação contém alcatrão, partículas sólidas, álcalis, poeira, compostos de enxofre e cloro, os quais podem corroer o equipamento e também bloquear ou corromper a ação dos catalisadores.

O gás pode ser limpo usando tecnologias convencionais, como resfriamento, filtração em baixa temperatura, e lavadores utilizando água. Outra possibilidade é a limpeza do gás a quente, usando filtros de cerâmicas e diversos reagentes operando a 350 – 800°C.

**IV - Reforma dos Hidrocarbonetos:** Na presença de catalisadores (níquel), metano, alcatrão e outros hidrocarbonetos são reformados até CO e H<sub>2</sub> em altas temperaturas (830 – 1000°C).

As reações apresentadas na equação (2.11) representam o processo de reforma dos hidrocarbonetos, as reações são consideradas altamente endotérmicas e catalíticas (catalisador de níquel).



A reforma é favorecida em baixas pressões, mas elevadas pressões beneficiam economicamente (equipamentos menores). Reformadores típicos operam entre 1,0 e 3,5 MPa, com uma temperatura entre 830°C e 1000°C (Katofsky 1993).

**V - Ajuste H<sub>2</sub>/CO:** O ajuste da relação H<sub>2</sub>/CO é realizado através da reação química do CO com H<sub>2</sub>O, conforme mostrado na equação (2.12). Em experimentos laboratoriais tem-se alcançados bons resultados de síntese de metanol para uma relação H<sub>2</sub>/CO pouco maior que 2 (Maiya *et al.*, 2000).



#### **VI - Síntese do Metanol:**

O metanol é produzido pela hidrogenação dos óxidos de carbono (equação 2.13) na presença de catalisadores que são baseados em óxido de cobre, óxido de zinco, ou óxido de cromo Ouellette *et al.* (1995):



A primeira reação é a síntese do metanol primário. Uma pequena quantidade de CO<sub>2</sub> na alimentação (2 – 10%) age como um promotor da segunda reação e ajuda a manter a atividade catalítica. A estequiometria de ambas as reações é satisfeita quando o coeficiente *R* (equação (2.14)) apresenta um mínimo de 2,03.

$$R = \frac{H_2 - CO_2}{CO + CO_2} \quad (2.14)$$

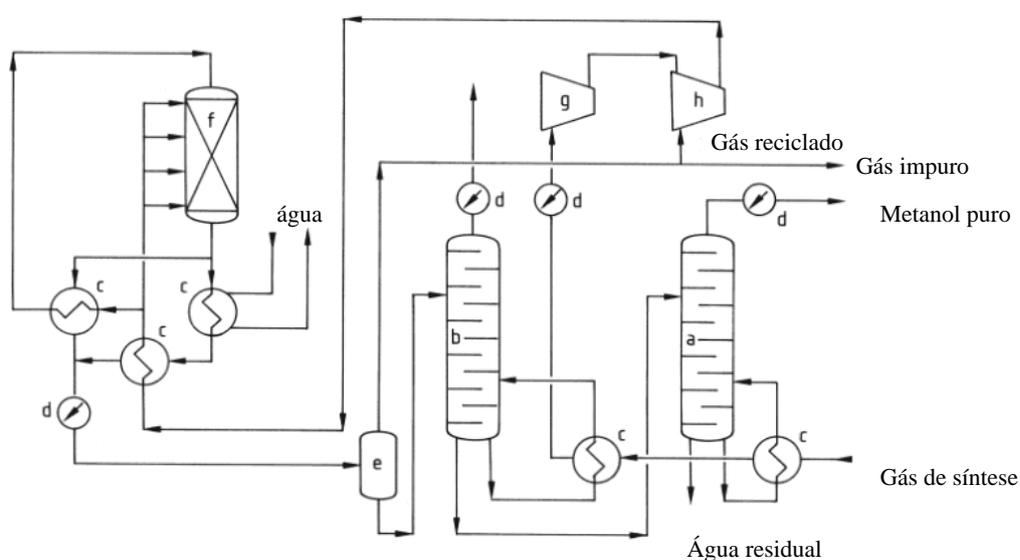
As reações de síntese do metanol são exotérmicas e levam a uma diminuição líquida no volume molar. Portanto o equilíbrio é favorecido pela alta pressão e baixa temperatura. O calor liberado deve ser removido para manter a catálise e taxa de reação.

**VII - Destilação:** Depois do resfriamento e separação das impurezas do gás, o metanol cru é processado numa unidade de destilação para alcançar a qualidade requerida.

## 2.2.2 Tecnologias Atuais para Produção do Metanol

Atualmente o processo de conversão do gás de síntese a metanol está disponível realizado em três principais tecnologias: Processo ICI (Imperial Chemical Industries), Sistema Lurgi e Metanol Fase-Líquida.

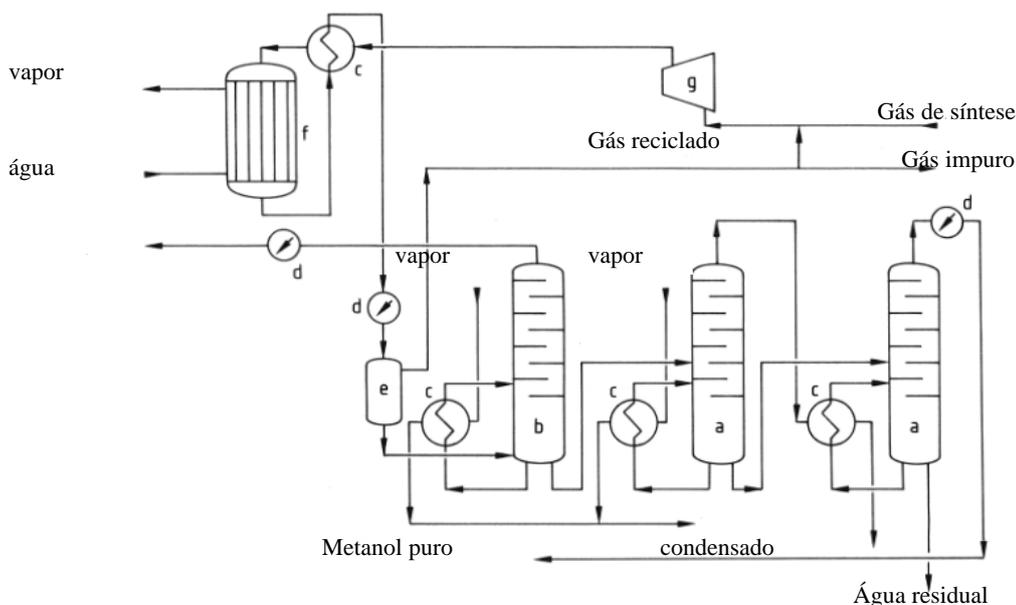
Os dois primeiros processos são de tecnologia de leito fixo. O processo ICI consiste em um reator adiabático, onde o gás não reagido é injetado nos leitos catalíticos, causando o resfriamento. Enquanto o sistema Lurgi emprega um reator tubular, onde os catalisadores estão localizados dentro dos tubos, e água quente circula do lado externo dos mesmos, tornando o processo próximo a um isotérmico (Cybulski, 1994). As Figuras 2.9 e 2.10 ilustram os dois tipos de reatores.



- a) Coluna de metanol puro; b) coluna "light ends"; c) Trocador de calor; d) Resfriador; e) Separador; f) Reator; g) Compressor; h) Compressor de recirculação.

Figura 2.9 - Processo ICI para obtenção do metanol (Rauch, 2002).

No esquema da Figura 2.9, o gás de síntese é pressurizado no compressor “g” e depois segue para um trocador de calor, onde há o resfriamento do gás, antes deste entrar no reator “f”, onde ocorrem as reações de síntese do metanol. Após a síntese, o metanol passa por um processo de separação de fases gasosas na coluna “e” e destilação nas colunas “b” e “a”, para atingir um teor maior de pureza. A parcela do gás de síntese que não foi convertida a metanol será pressurizada e encaminhada ao reator.



- a) Coluna de metanol puro; b) coluna light ends; c) Trocador de calor; d) Resfriador; e) Separador; f) Reator; g) Compressor de recirculação.

Figura 2.10 - Processo Lurgi para obtenção do metanol (Rauch, 2002).

Já no esquema da Figura 2.10, o gás de síntese também é pressurizado e resfriado antes de entrar no reator “f”, depois passará pela separação das fases gasosas na coluna “e”, e destilação nas colunas “b” e “a”.

A diferença deste processo em relação ao ICI (Figura 2.9) é a presença de mais uma coluna de destilação, como também o aproveitamento do calor liberado nas reações químicas ocorridas no reator para a produção de vapor, conforme é visto na Figura 2.10. Quanto à semelhança nestes dois processos refere-se às condições de operação: temperatura de 230 a 270°C, e pressão em torno de 5 a 10 MPa.

Outra característica do processo ICI é o fato dele apresentar uma eficiência um pouco baixa, mas o reator apresenta uma boa confiabilidade, portanto este processo ainda é o predominante (Rauch, 2002). Já no sistema Lurgi a conversão do metanol depende das

condições de equilíbrio das reações químicas e os catalisadores são muito sensíveis a altas temperaturas. Apresenta como principais vantagens (Ouellette *et al.*, 1995):

- Baixos investimentos e custos de produção,
- Melhor confiabilidade operacional e maior flexibilidade na escolha do tamanho da planta,
- Não gera subprodutos, logo tem um baixo impacto ambiental,
- Alta eficiência energética.

Já o processo Metanol Fase-Líquida é caracterizado pela alta transferência de calor entre o catalisador sólido e a fase líquida, além de ser eficiente, torna a temperatura do processo uniforme e estável (DOE, 1999). A alta eficiência de conversão em cada síntese do metanol no reator elimina a necessidade da recirculação do gás não convertido, o que implica em uma menor necessidade de equipamentos auxiliares, menor requerimento energético, menor fluxo volumétrico no reator.

Outra vantagem é a facilidade de extração e adição de catalisadores sem interromper o processo (Hamelinck e Fajj, 2001). Como a tecnologia Fase-Líquida é considerada a mais eficiente das existentes, foi selecionada para realização do estudo deste trabalho.

Com respeito ao tipo de reator utilizado em tal tecnologia, tem-se obtido bons resultados com o reator em lama borbulhante, desenvolvido pela empresa Air Products and Chemicals na década de 70, que foi demonstrado em 1980 (Heydorn *et al.*, 2003).

No reator em lama borbulhante, reagentes das bolhas de gás se dissolvem no líquido e difundem para a superfície do catalisador, onde eles reagem. Os produtos então difundem através da fase líquida para fase gasosa. O calor é removido para geração de vapor nos tubos internos do trocador de calor. A Figura 2.11 ilustra como é o processo neste tipo de reator (DOE, 1999).

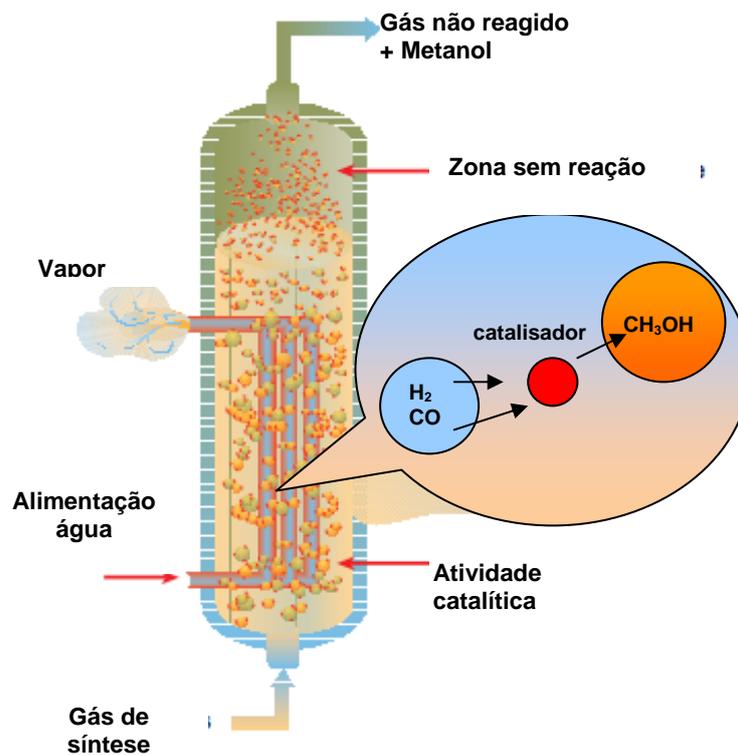


Figura 2.11 - Esquema de um reator em lama borbulhante (DOE, 1999).

Observa-se na Figura 2.11 que neste processo há o aproveitamento do calor liberado nas reações químicas exotérmicas da síntese do metanol para produzir vapor. As condições típicas para a síntese do metanol no reator são: Pressão: 5 a 10 MPa e Temperatura: 250°C.

Um esquema mais detalhado da síntese do metanol pela tecnologia Metanol Fase-Líquida aplicando o reator em lama borbulhante está apresentado na Figura 2.12:

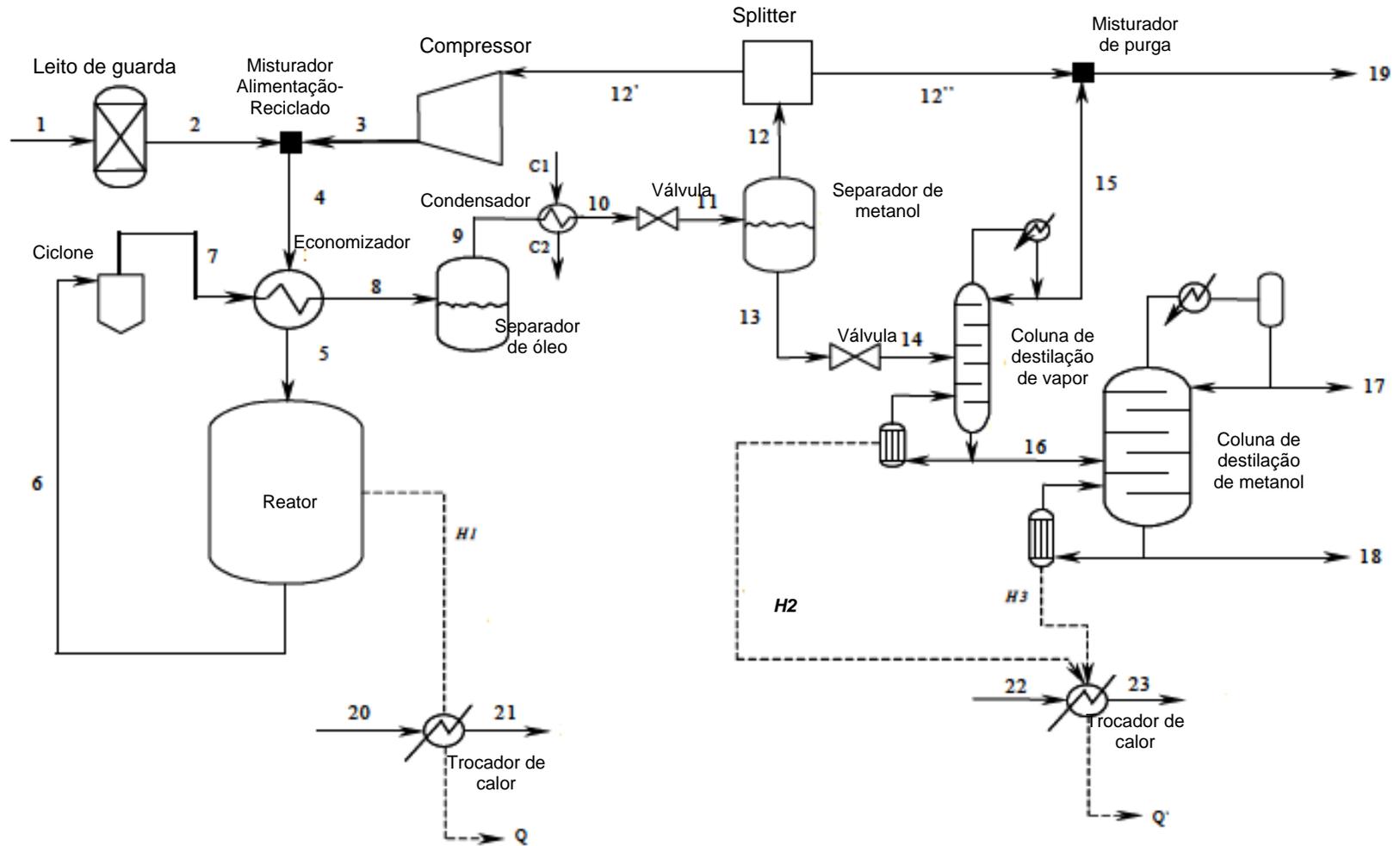


Figura 2.12 – Esquema do processo de produção do metanol Fase-Líquida (Vaswani, 2000)

Tabela 2.3 – Descrição das principais correntes no processo de produção de metanol pela tecnologia Metanol Fase-Líquida (Vaswani, 2000).

<b>Número da corrente</b>	<b>Descrição</b>
1	Gás de síntese na entrada do leito de guarda
2	Gás de síntese na saída do leito de guarda
3	Gás não convertido comprimido pelo compressor
4	Mistura de gás de síntese limpo e gás não convertido comprimido
5	Calor combinado na saída do economizador
6	Saída de produtos do reator
7	Gases quentes entrando no economizador
8	Gases frios na saída do economizador
9	Gases livre de óleo entrando no condensador
10	Metanol condensado e água saindo do condensador com gases não condensados
11	Metanol condensado, água, gases não condensados entrando no separador de metanol
12	Gases não condensados saindo do separador de metanol na fase de vapor
12'	Gases não convertidos reciclado ao reator metanol via compressor
12''	Saída de gases não convertidos
13	Fase líquida consistindo principalmente de metanol e água saindo do separador de metanol
14	Metanol cru entrando coluna de destilação de vapor
15	Remoção de vapor na coluna de destilação de vapor
16	Metanol entrando na coluna de destilação para purificação
17	Metanol refinado (99,99%)
18	Água residual da coluna de destilação de metanol
19	Saída total de gases não convertidos e vapor
20	Entrada de água no trocador de calor do reator metanol
21	Vapor saturado na pressão específica (2 MPa) produzido no trocador de calor do reator metanol
22	Vapor saturado (0,7 MPa) usado na coluna de destilação do metanol
23	Condensado
C1	Água resfriada entrando no condensador
C2	Água resfriada saindo do condensador
H1	Corrente de calor de reator metanol para o trocador de calor
H2	Corrente de calor da coluna de destilação de vapor para o trocador de calor
H3	Corrente de calor da coluna de destilação de metanol

O processo de produção (Figura 2.12) é semelhante aos outros processos anteriormente descritos, as reações químicas de síntese ocorrem no reator, onde há um trocador de calor para manter a temperatura baixa dentro do reator. A compressão do gás de síntese é necessária, pois a síntese é favorecida a altas pressões.

Na saída do reator o metanol é resfriado e enviado para colunas de separação e destilação, a fim de atingir a pureza desejada. Para maiores esclarecimentos, a seguir estão listados os principais equipamentos do esquema da Figura 2.12 e na tabela 2.13 estão descritas as principais correntes do mesmo (Vaswani, 2000):

**Reator:** O reator apresentado no esquema é o mesmo reator apresentado na Figura 2.11 (lama borbulhante), o catalisador cobre/zinco é suspenso em um óleo mineral inerte, que serve como um trocador de calor. O reator apresenta também um trocador de calor interno para remoção do calor das reações químicas.

**Leito de guarda:** O leito de guarda consiste de duas seções cujo objetivo é a remoção de  $H_2S$ , arsênico, ferro e níquel contido no gás de síntese.

**Economizador:** O economizador é um trocador de calor, que permite a troca de calor entre o gás frio que chega ao reator e o gás quente de saída do reator.

**Ciclone:** O ciclone é responsável por remover as gotículas de lama que saem do topo do reator, e posteriormente retornam ao reator. Quanto ao gás de saída do ciclone, o mesmo entra em tubos no economizador para haver a troca de calor com o gás frio.

**Separador de óleo:** Depois do resfriamento do gás que sai do reator, o mesmo é enviado a um separador de óleo de alta-pressão. A função deste separador é remover qualquer resíduo de óleo condensado presente na corrente de gás. O óleo condensado retorna ao reator juntamente com as gotículas de lama recolhidas no ciclone.

**Condensador:** O gás obtido do separador de óleo passa por um resfriamento com água e ar, em uma série de trocadores de calor.

**Separador de metanol:** Neste equipamento, o condensado líquido constituído de metanol e água é separado no fundo, e o gás não convertido sai no topo do separador.

**Seção de destilação e purificação do metanol:** O propósito da destilação é produzir metanol com alto teor de pureza (maior que 99% por peso). A seção de destilação consiste de duas colunas. A primeira é apenas uma coluna de recuperação de vapor e é usada para remover impurezas leves e gases. A segunda coluna já é para obter o metanol com a pureza desejada (99,99%), onde é extraído água, álcoois e traços de óleo.

**Compressor:** O gás não convertido do separador de metanol é enviado novamente ao reator para aumentar a conversão do gás de síntese, mas antes ele é comprimido até alcançar a pressão requerida ao processo de síntese de metanol. A pressão de entrada do gás não convertido está em média a 4,763 MPa e a pressão de saída em média é de 5 MPa.

### 2.2.3 Propriedades do Metanol

As principais propriedades do metanol encontram-se na tabela 2.4, sendo que as mesmas são comparadas com as da gasolina.

Tabela 2.4 – Propriedades do combustível metanol em relação a gasolina (IEA, 1996)

Propriedades do combustível	Metanol	Gasolina
Fórmula química	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>
Peso molecular (kg/kmol)	32	111
Número de Octanos	110	97
Número de Cetanos	5	8
Pressão de Vaporização [kPa] a 15°C	31,7	75
Densidade [kg/l] a 15°C	0,79	0,75
Poder Calorífico Inferior [MJ/kg] a 15°C	15,6	31
Poder Calorífico Superior [MJ/l] a 15°C	19,8	41,3
Relação estequiométrica ar/combustível [kg ar/kg combustível]	6,5	14,7

O número maior de octanos no metanol, em relação à gasolina, mostrado na Tabela 2.4, pode acarretar em uma maior eficiência, se a taxa de compressão no motor for adequadamente ajustada. Entretanto, o poder calorífico do metanol é inferior ao da gasolina. Além disso, esta tem uma relação estequiométrica ar/combustível (A/C) maior que a do metanol, logo precisa de mais oxigênio para realizar a combustão, e a eficiência decresce com o aumento da razão A/C (Thuijl *et al.*, 2003).

### 2.2.4 Custos e Desempenho do Processo de Produção do Metanol

Os custos para a gaseificação da biomassa e posterior síntese do metanol dependem dos custos de investimentos e operacionais, incluindo os custos da biomassa. Uma planta de metanol, com capacidade térmica de 400 MW de biomassa tem uma eficiência em torno de 50 – 55%, tem seu custo específico estimado em 1092 US\$/kW (Hamelinck e Faaij, 2001). A

Figura 2.13 apresenta a estratificação dos custos para um processo de produção de metanol a partir da biomassa, em cada departamento ou etapa produtiva do processo.

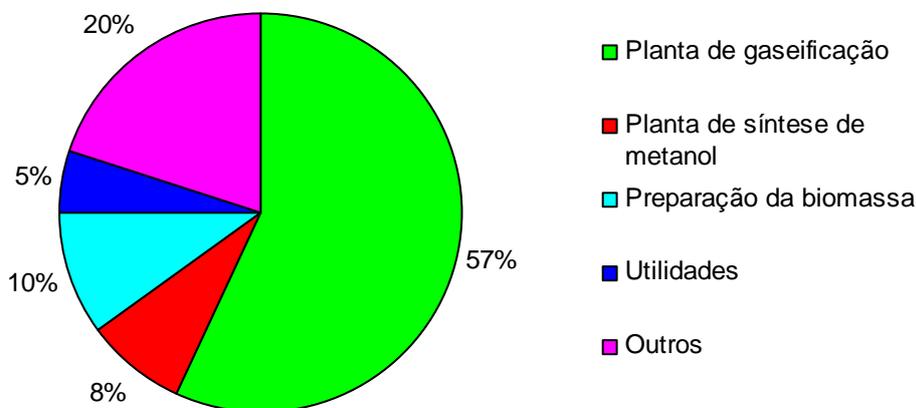


Figura 2.13 – Estratificação dos custos para o processo de produção do metanol (Ecotrafic R&D AB, 1997).

Pode ser observado na Figura 2.13 que o processo de gaseificação é o maior consumidor de recursos financeiros num processo de produção do metanol, isto se deve principalmente no investimento feito na fabricação dos gaseificadores.

Quanto ao balanço energético do processo de produção do metanol, na Figura 2.14 está apresentado um diagrama de Sankey referente a um projeto de produção de metanol a partir de resíduos da madeira realizado entre Nykomb Synergetics AB e Ecotrafic R&D. A capacidade deste processo é de 1000 t metanol / dia, e uma alimentação de biomassa (resíduos de madeira) de 90 t /hora. Outra característica deste projeto, é que a gaseificação dos resíduos da madeira é feita com a tecnologia de leito fluidizado.

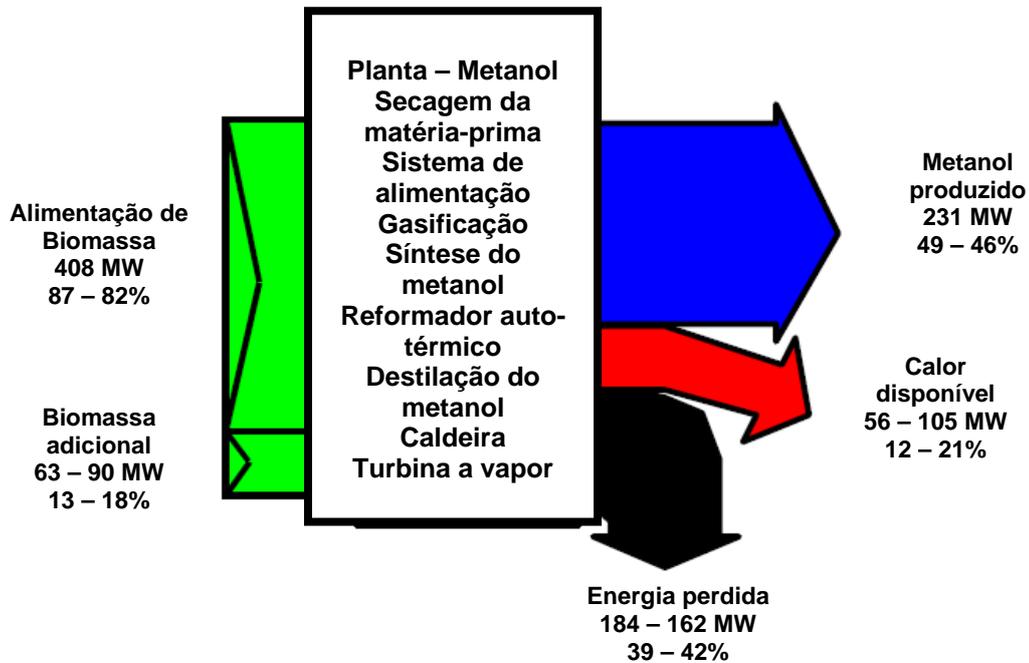


Figura 2.14 – Diagrama de Sankey para a eficiência da produção do metanol (Ecotrafic R&D AB, 1997).

Pelo diagrama de Sankey apresentado na Figura 2.14 pode ser notado que a quantidade de calor disponível (calor liberado durante o processo de síntese de metanol) é relativamente alta, representando de 12 a 21 % do total da energia. Este calor é aproveitado para produzir vapor numa caldeira de recuperação, assim se utiliza este vapor para gerar eletricidade numa turbina a vapor.

## 2.2.5 Tendências e Desafios

Como a tecnologia de gaseificação de biomassa não se encontra em escala comercial, é necessário maior desenvolvimento tecnológico dos gaseificadores e também da limpeza dos gases. Deve-se também, buscar melhorias e/ou desenvolvimento de novos catalisadores para a produção do metanol.

Outro avanço a ser feito está na otimização do processo, minimizando o consumo de oxigênio e obtendo-se maior rendimento do gás de síntese, através da conversão máxima do carbono, e da obtenção de baixa concentração residual de hidrocarbonetos no gás de síntese.

No Brasil, no estado do Paraná, está em desenvolvimento o Projeto RAUDI-METANOL, unidade pré-comercial para aproveitamento do excedente da biomassa (bagaço e palhas) via gaseificação e posterior síntese do metanol. Os desafios deste projeto são desenvolver um processo de gaseificação adequado à biomassa e otimizar os processos envolvidos, buscando a viabilidade econômica. Para tal, planeja-se a integração entre a usina

de açúcar e álcool com a unidade de gaseificação e síntese de metanol (Fiaschi e Audi, 2005), conforme a Figura 2.15:

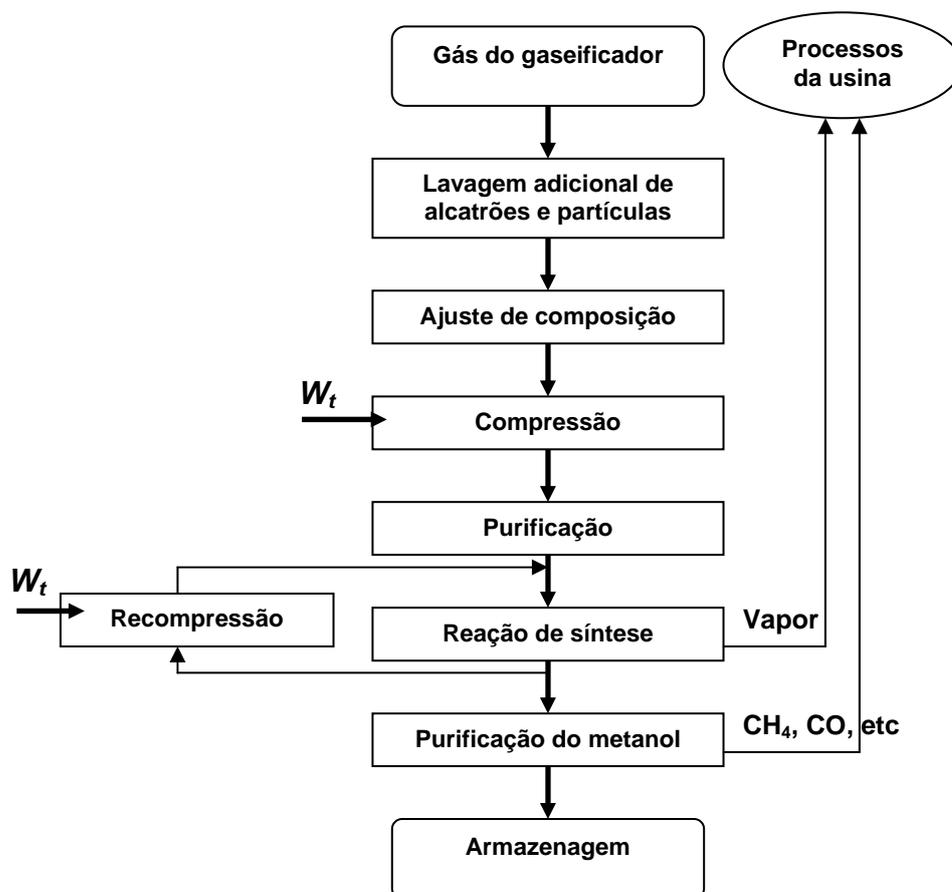


Figura 2.15 – Esquema do processo de produção de metanol integrado a usina (Fiaschi e Audi, 2005).

No esquema mostrado na Figura 2.15 o gás proveniente da gaseificação do bagaço e da palha excedentes da usina de açúcar e álcool é enviado para limpeza, a fim de remover o alcatrão e particulados, depois é feito o ajuste de  $H_2/CO$  neste gás. O mesmo será depois comprimido até atingir uma pressão próxima de 5 MPa e sofrerá um processo de purificação.

A próxima etapa é a reação de síntese, realizada num reator, uma parte do gás que não foi convertido a metanol será comprimido e enviado novamente ao reator, a fim de produzir metanol. Depois da reação de síntese o metanol é enviado ao processo de destilação, onde teores de água e outras impurezas são extraídos, assim consegue-se atingir um metanol de 99% de pureza.

Um dos objetivos do projeto RAUDI-METANOL, é aproveitar o calor gerado na reação de síntese de metanol para produzir vapor, assim este pode ser usado nos processos da usina, como também na própria síntese do metanol.

No mundo, atualmente há grande interesse no desenvolvimento de tecnologias que permitam reduzir os custos de conversão de biomassa a metanol, que hoje representam 60% dos custos totais. No futuro este porcentual pode ser reduzido, pois a tendência é implantar instalações de maior capacidade, diminuindo os custos em 25 – 30%. Quanto à eficiência, as instalações atuais apresentam eficiências de cerca de 50 – 55%, mas para plantas maiores, por exemplo, de 1000 MW<sub>th</sub>, estima-se que a eficiência será de 60 – 65%, assumindo a produção de eletricidade como subproduto (Faaij and Hamelinck, 2001).

Logo, a tecnologia da produção do metanol a partir da biomassa tornar-se-á viável se houver mais progressos nas várias rotas de produção: convencional, comercial, ou de tecnologias avançadas.

## 2.3 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A análise do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares que entram no sistema produtivo à disposição do produto final, como mostrado na Figura 2.16.



Figura 2.16 – Ciclo de Vida de um Produto

Logo, pode-se dizer que a ACV é uma ferramenta técnica que pode ser utilizada utilizada em uma grande variedade de propósitos. As informações coletadas na ACV e os resultados da suas análises e interpretações podem ser úteis para tomadas de decisão, na

seleção de indicadores ambientais relevantes para avaliação do desempenho de projetos ou reprojeto de produtos ou processos. A ACV ajuda ainda:

- Identificar oportunidades de melhoramentos dos aspectos ambientais considerando as várias fases de um sistema de produção,
- Tomada de decisão, por exemplo, no estabelecimento de prioridades ou durante o projeto de produtos e processos, podendo levar à conclusão de que a questão ambiental mais importante para uma determinada empresa pode estar relacionada ao uso de seu produto, e não às suas matérias-primas ou ao processo produtivo.

### 2.3.1 Fases da ACV

A ISO 14040 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006) estabelece que a Análise do Ciclo de Vida de Produtos deve incluir a definição do objetivo e do escopo do trabalho, uma análise do inventário, uma avaliação de impacto e a interpretação dos resultados, como mostrado na Figura 2.17.

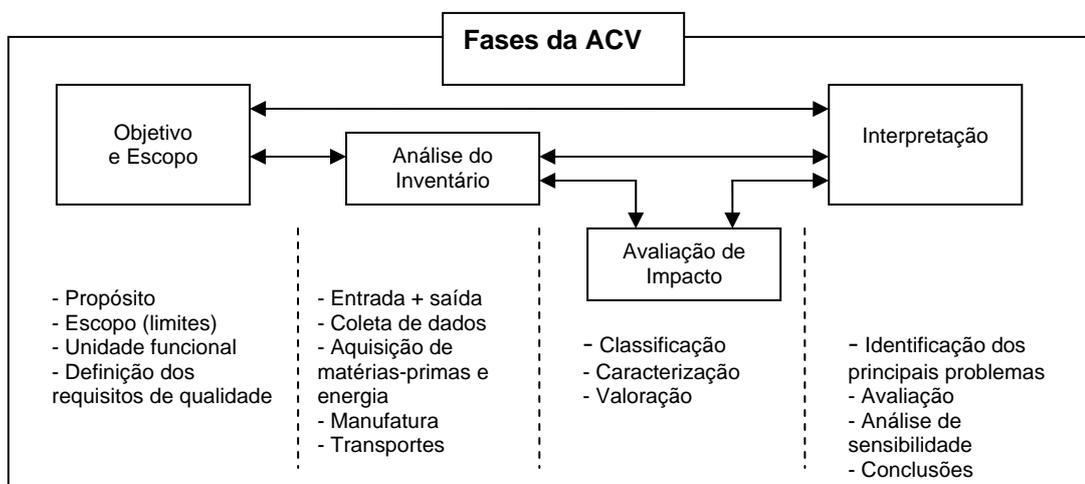


Figura 2.17 – Fases da Análise do Ciclo de Vida (Adaptada de Chehebe, 2002)

### 2.3.2 Definição do Objetivo e do Escopo

A INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2006) preconiza que na fase de definição dos objetivos seja esclarecida de forma clara e inequívoca a utilização que se pretende dar aos resultados do estudo, a que tipo de audiência se destina e o processo de revisão crítica que se pretende adotar. De forma geral, o conteúdo do escopo de

um estudo de ACV deve apresentar: onde iniciar e concluir o estudo do ciclo de vida (limites do sistema), quantos e quais subsistemas incluir, e o nível de detalhes do estudo.

Os limites da ACV são geralmente apresentados em fluxogramas que mostram a sequência principal do sistema de produto em estudo. A princípio o fluxograma deve começar na extração do material da natureza, quer seja uma etapa de mineração ou de agricultura e termina com as emissões e resíduos produzidos.

Porém, alguns fatores determinam os limites do sistema, são eles: as aplicações pretendidas do estudo, as hipóteses realizadas, os critérios de corte, as restrições de dados e de custo.

Outra etapa importante dentro do escopo de um estudo é estabelecer uma unidade funcional, que é a medida de desempenho das saídas funcionais do sistema de produto, com o objetivo de fornecer uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas. A unidade funcional também deve ser mensurável e consistente com os objetivos e escopo do estudo.

### **2.3.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida**

A análise de inventário é a fase de coleta e consiste na quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, etc) envolvidas durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade.

De uma forma geral deve-se organizar a fase de análise do inventário de acordo com as seguintes atividades (Chehebe, 2002):

**1 – Preparação para a coleta de dados:** A preparação pode ser feita através da elaboração de fluxogramas específicos que mostrem todas as unidades de processo do estudo, incluindo suas inter-relações. Outra forma de auxiliar esta etapa é descrever detalhadamente cada unidade do processo e a lista das categorias de dados associados às mesmas, com também desenvolver um glossário que defina as unidades de medidas utilizadas.

**2 – Coleta de dados:** Esta é a etapa que mais consome tempo e recursos da ACV. Dados de boa qualidade podem algumas vezes somente ser obtidos através de medições locais, ou fontes de informações como: normas técnicas, estatísticas ambientais, literatura técnica, informação interna nas empresas, e banco de dados de Análise do Ciclo de Vida.

**3 – Refinamento dos limites do sistema:** Após a coleta de dados deve-se revisar todo o sistema relacionado ao produto, analisando e reavaliando os limites e os critérios de corte estipulados na fase de definição do objetivo e do escopo do estudo.

**4 – Alocação:** Normalmente os sistemas de produto incluem múltiplos processos, alguns desses podem gerar mais de um produto, que são denominados de sub-produtos, logo há necessidade que o efeito ambiental seja alocado ao produto principal e aos co-produtos.

Entre os métodos de alocação existentes destacam-se (Soares, 2009):

**Alocação por substituição (subtração):** Neste método, tem-se por exemplo um sistema que realiza as funções A e B (sistema 1), considera-se então um novo sistema produzindo somente a função B (sistema 3). Os aspectos do inventário deste sistema são subtraídos do sistema 1 e o resultado comparado ao sistema 2 (que produz somente a função A), conforme está apresentado na Figura 2.18.

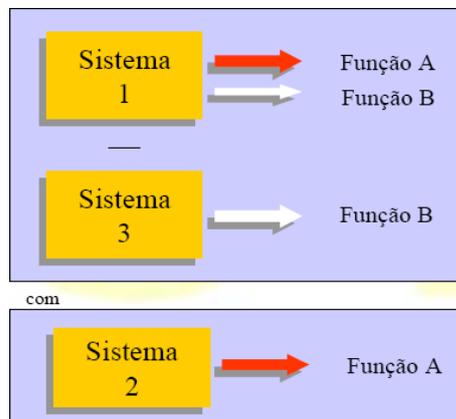


Figura 2.18 – Sistema de alocação por substituição (subtração) (Soares, 2009).

**Alocação por substituição (adição):** Neste método considera-se um novo sistema produzindo somente a função B (sistema 3). Os fatores de impacto deste sistema são adicionados ao sistema 2 e o resultado comparado ao sistema 1 (Figura 2.19).

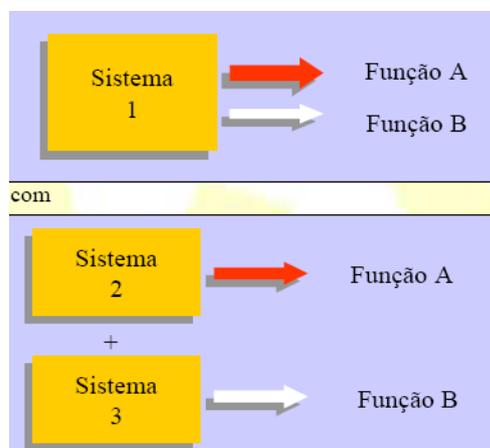


Figura 2.19 – Sistema de alocação por substituição (adição) (Soares, 2009).

**Alocação por decomposição do sistema:** neste caso existe dois tipos:

a) por propriedades físicas: Consiste em atribuir os fatores de impacto às diferentes funções oriundas do processo de acordo com uma propriedade física de referência (massa, conteúdo energético, equivalência química, exergia, densidade, etc.)

b) econômica: Semelhante ao caso anterior, onde a propriedade física é substituída pelo valor econômico da função.

### 2.3.4 Avaliação de Impacto

Algumas avaliações podem ser realizadas com base somente nos resultados obtidos na fase de inventário. No entanto, quando grandes diferenças nos vários parâmetros de impacto forem detectadas ou quando há necessidade de relacionar as intervenções ambientais aos problemas ambientais, a metodologia de avaliação de impacto pode ser de grande utilidade.

Atualmente há debates científicos em função das diferentes formas existentes para a realização de avaliações de impacto. No entanto, a INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2006) fornece uma indicação dos elementos que podem constar nesta fase:

#### I. Seleção e definição das categorias ambientais

A seleção e a definição das categorias ambientais devem levar em consideração as preocupações ambientais identificadas no objetivo e no escopo do estudo. Os requisitos e critérios para a seleção e definição das categorias são:

- As categorias, devem ser definidas com base no conhecimento científico, de forma clara e transparente,
- As categorias devem explicitar o(s) foco(s) do(s) problema(s) ambiental(is) em estudo representando tanto as preocupações do estudo quanto efeitos cientificamente observáveis sobre os recursos, ambiente natural ou saúde humana.
- As categorias devem permitir a clara identificação dos dados apropriados a serem coletados do inventário e que levam em consideração o foco de preocupação ambiental.

São exemplos de categorias de problemas ambientais normalmente utilizadas (Ferreira, 2004):

- **Exaustão de recursos não renováveis:** A extração de combustível fósseis ou minerais, minérios, etc.

- **Aquecimento Global:** Quantidades crescentes de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, aerossóis e outros gases na atmosfera terrestre estão conduzindo a uma absorção cada vez maior da radiação infravermelha emitidas pela Terra, e conseqüentemente, a um aquecimento global.

- **Redução da camada de ozônio:** A exaustão da camada de ozônio conduz a um crescimento na intensidade de radiação ultravioleta que atinge a superfície da Terra, o que pode resultar no aumento na incidência de doenças, danos a diversos tipos de materiais e interferências com o ecossistema.

- **Toxicidade humana:** A exposição a substâncias tóxicas (através do ar, água ou solo, especialmente através da cadeia alimentar) causa problemas à saúde humana.

- **Ecotoxicidade:** A flora e a fauna podem sofrer danos, algumas vezes até irreversíveis, causados por substâncias tóxicas.

- **Acidificação:** A deposição ácida, resultante da emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera, para o solo ou para água pode conduzir a mudanças de acidez de água e do solo, com efeito negativo tanto sobre a fauna quanto sobre a flora.

- **Oxidantes fotoquímicos:** Sob a influência dos raios ultra-violetas, os óxidos de nitrogênio reagem com substâncias orgânicas voláteis, produzindo oxidantes fotoquímicos que causam o nevoeiro denominado *smog*.

- **Nutrição:** A acidificação de nutrientes à água ou ao solo aumenta a produção de biomassa. Na água, isto conduz a uma redução na concentração de oxigênio, o que afeta outros organismos vivos como por exemplo os peixes. Tanto no solo quanto na água a nutrição pode levar a alterações indesejáveis no número de espécies no ecossistema e portanto a problemas relativos à biodiversidade.

## II. Classificação

A classificação tem o objetivo de atribuir a cada uma das categorias selecionadas e identificadas, os dados correspondentes do inventário, por exemplo a emissão do fosfato contribue à categoria de nutrição.

Outro exemplo as emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> contribuem para a categoria aquecimento global, pois o mecanismo básico destes gases consiste em aprisionar a radiação infravermelha oriunda da superfície da Terra, reenviando-a de volta para a própria Terra, conduzindo a uma elevação da temperatura do planeta.

### **III. Caracterização**

Na caracterização, as contribuições para cada impacto ambiental são quantificadas, por exemplo, algumas delas que estão descritas a seguir (Chehebe, 2002):

- Exaustão dos Recursos Não Renováveis
- Potencial de Aquecimento Global
- Formação de Oxidantes Fotoquímicos
- Potencial de Acidificação
- Potencial de Toxicidade Humana
- Ecotoxicidade Aquática
- Ecotoxicidade Terrestre
- Potencial de Nutrição
- Potencial de Redução da Camada de Ozônio

Para maiores esclarecimentos da medida do problema ambiental, tem-se como exemplo o caso do aquecimento global, o qual deve incluir a contribuição de todos os gases que causam o aquecimento do planeta tomando-se o CO<sub>2</sub> como substância de referência. Assim, o efeito do gás metano, por exemplo, é expresso em termos da quantidade equivalente de CO<sub>2</sub> que causaria o mesmo efeito de aquecimento global.

Vários modelos ambientais têm sido desenvolvidos para determinar a equivalência dos poluentes emitidos, esses modelos fornecem os chamados fatores de equivalência ou fatores de equivalência ou fatores de caracterização. Os fatores de caracterização indicam quanto um determinada substância contribui para um determinado problema ambiental comparada a uma substância de referência.

### **IV. Normalização**

A caracterização resulta em traçar um perfil ambiental, porém em alguns casos pode ser necessário normalizar os dados ambientais em relação a uma referência, como por exemplo (SAIC, 2006):

- Um determinado produto ou substância;
- Uma determinada condição de referência (área geográfica)
- Um determinado valor crítico (valor legal de limite de poluição)
- Uma expressão econômica da importância do parâmetro (custo de prevenção)

## V. Ponderação

Em alguns casos que apresentam uma grande quantidade de dados envolvidas e existe complexidade para relacioná-los, prefere-se trabalhar com um indicador único ambiental. Este é formado atribuindo-se pesos a cada categoria de impacto em termos de sua importância, somando-se, após isso, os resultados ponderados.

O fator de ponderação pode diferir de um país para outro devido ao estabelecimento de diferentes critérios em cada país. O ponto de vista político também afeta o processo de ponderação, como um resultado, por exemplo de diferentes opiniões sobre a importância relativa de problemas locais, como por exemplo, a nutrição comparada a aspectos globais, tais como aquecimento global e redução da camada de ozônio (SAIC, 2006).

### 2.3.5 Interpretação

O objetivo da fase de interpretação é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações para um estudo de inventário do ciclo de vida ou uma análise completa do ciclo de vida. Deve-se nesse estágio, consultar os objetivos e o escopo definidos inicialmente para o estudo. De forma geral, a fase de interpretação está compreendida nas seguintes etapas (Chehebe, 2002):

- **Identificação das questões ambientais mais significativas:** Esta etapa envolve a estruturação das informações provenientes do inventário, identificação das questões ambientais relevantes para o estudo.

- **Avaliação:** O objetivo desta etapa é fazer uma síntese do estudo baseado nas fases anteriores da ACV e nos dados estruturados na primeira etapa da interpretação. Assegurando que as entradas e saídas identificados no estudo representem informações importantes para o mesmo.

Outro objetivo desta etapa é checar a confiabilidade dos resultados, esta pode ser feita através de uma análise de sensibilidade. Assim, pode-se descobrir em que extensão pequenas mudanças nos dados influenciam o resultado final.

## 2.3.6 Métodos de Análise de Impacto na ACV

Ao longo dos anos várias metodologias foram elaboradas para realização da análise de impacto de um Análise do Ciclo de Vida, a seguir estão listadas as mais utilizadas nos estudos de ACV.

### Método CML 2 (2000)

O método CML 2 (2000) foi primeiramente desenvolvido em 1992 pelo Centro de Gestão Ambiental da Universidade de Leiden, na Holanda. Os modelos de caracterização recomendados, no método CML 2, para determinar os indicadores de categoria utilizados na maioria dos estudos de ACV estão descritos na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Categorias de Impacto usadas pelo método CML 2 (2000) (Haukland, 2004).

Fator de Caracterização	Equivalentes de caracterização por kg de emissão
Potencial de Depleção Abiótica	kg Sb
Potencial de Aquecimento Global (horizonte de tempo de 100 anos)	kg CO <sub>2</sub>
Potencial de Depleção da camada de ozônio	kg CFC -11
Potencial de Toxicidade Humana	kg 1,4 - diclorobenzeno
Potencial de ecotoxicidade aquática	kg 1,4 - diclorobenzeno
Potencial de ecotoxicidade marinha	kg 1,4 - diclorobenzeno
Potencial de ecotoxicidade terrestre	kg 1,4 - diclorobenzeno
Potencial de Formação do Ozono Foto-químico	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Potencial de Acidificação	kg SO <sub>2</sub>
Potencial de eutrofização	kg PO <sub>4</sub>

### Método Eco-Indicador 99

A metodologia Eco-Indicador 99 foi proposta sob a coordenação do *Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment*, e a colobaração de especialistas de ACV da Suíça e da Holanda. O método Eco-Indicador 99 consiste de onze categorias de impacto divididas em três categorias de danos (SimaPro 7, 2004). As onze categorias de impacto são apresentadas na tabela 2.6:

Tabela 2.6 – Categorias de Impacto usadas pelo método Eco-Indicador 99 (SimaPro 7, 2004)

Categorias de Impacto	Unidade
Carcinogênicos	DALY
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	DALY
Efeitos respiratórios (orgânicos)	DALY
Mudança climática	DALY
Radiação	DALY
Depleção da camada de ozônio	DALY
Ecotoxicidade	PAF*m <sup>2</sup> *ano
Acidificação/Eutrofização	PDF*m <sup>2</sup> *ano
Uso do solo	PDF*m <sup>2</sup> *ano
Uso de recursos minerais	MJ excedente
Uso de recursos fósseis	MJ excedente

Na tabela 2.6 tem-se a unidade DALY, e segundo a Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization, 2007*) este termo significa *Disability Adjusted Life Year*. Este sistema de medição representa uma escala de pesos para diversas inaptidões causadas por doenças. As pontuações da escala variam de zero a um, o valor zero indica uma saúde perfeita, já o valor um significa a morte.

O termo PDF (*Potentially Disappeared Factor*) é a unidade definida para avaliar o impacto sobre o ecossistema, expressando uma porcentagem do dano ou espécies que estão ameaçadas ou em extinção, em uma área específica durante um tempo determinado.

Quanto o termo PAF (*Potentially Affected Fraction*) é determinado com base de dados de toxicidade em organismos terrestres e aquáticos como microorganismos, plantas, algas, moluscos, crustáceos e peixes. O PAF expressa a porcentagem de espécies que é exposta a uma concentração acima do NOEC (*No Observed Effect Concentration*), quanto maior a concentração maior o número de espécies afetadas (Goedkoop e Spriensma, 2000).

Já a última unidade da tabela 2.6 refere-se à energia adicional exigida no futuro para compensar a menor disponibilidade do recurso utilizado (neste caso os recursos minerais e fósseis).

Definida as categorias de impacto e suas respectivas unidades, o próximo passo é agrupá-las em três categorias de danos, listados a seguir:

**1. Dano à saúde humana:** no método Eco-Indicador 99 os danos à saúde humana referem-se a:

• **Substâncias carcinogênicas:** O dano à saúde causado pelas substâncias carcinogênicas é estimada pela concentração dessas substâncias no meio ambiente e seu efeito sobre a saúde humana.

• **Efeitos respiratórios de compostos orgânicos e inorgânicos:** Os danos à saúde de compostos inalados, como: partículas (PM10 e PM2,5), nitratos (NO<sub>x</sub>), sulfatos (SO<sub>x</sub>), Ozônio (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (VOC) e amônia (NH<sub>3</sub>).

• **Mudanças climáticas:** normalmente é modelada a exposição a temperaturas extremas, mudanças nas variedades e atividade de vetores infecciosos e parasitas e um aumento no nível do mar, com as conseqüentes movimentações populacionais e destruição de infra-estrutura.

**2. Dano à qualidade do ecossistema:** Para este impacto dois aspectos são analisados:

• Emissões tóxicas e emissões que mudam a acidez e níveis de nutrientes no solo, sendo analisadas sob o ponto de vista das concentrações das mesmas, os efeitos das emissões tóxicas e o aumento da acidez. Também analisa a possibilidade de desaparecimentos de determinadas espécies de plantas.

• O uso do solo e transformação do mesmo, modelado com base em dados empíricos relacionados a qualidade do ecossistema, como tipo de solo e tamanho da área.

**3. Dano aos recursos:** Expresso no excedente de energia necessário para a extração futura de minerais e combustíveis fósseis, sendo causado por:

- Redução das reservas de minerais,
- Redução das reservas de combustíveis fósseis.

Finalmente, o resultado obtido após a normalização e ponderação é multiplicado por 1000 (fator de escala) e o resultado é apresentado com a unidade padrão o Eco-Indicador Point (Pt) ou também em mili-Point (mPt)

Por ser um método reconhecido e aplicado em muitos estudos da análise de ciclo de vida, este método foi selecionado para o presente trabalho. Outro motivo para a escolha deste método está numa das categorias de impacto calculadas por este método, a denominada “uso do solo”. Tal categoria é importante, pois neste estudo focaliza a avaliação ambiental e energética de um produto proveniente de uma cultura agrícola, que é o metanol produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

A fim de detalhar a categoria de impacto “uso do solo”, a equação 2.15 apresenta a fórmula básica utilizada pelo método Eco-Indicador 99 para determinar este impacto.

$$EQ = \frac{S_{ref} - S_{uso}}{S_{ref}} \times A \times t \quad (2.15)$$

Onde:

EQ = Qualidade do ecossistema

S<sub>ref</sub> = Diversidade de espécies na área de referência

S<sub>uso</sub> = Diversidade de espécies na área ocupada ou transformada

A = Tamanho da área

t = Período de tempo

A tabela 2.7 indica como os fatores da equação 2.15 devem ser aplicados.

Tabela 2.7 – Visão dos parâmetros para determinados tipos de uso do solo

Tipo	S <sub>ref</sub>	S <sub>uso</sub>	A	t
Transformação local	Estado original	S no novo uso da terra	Área convertida	Tempo de restauração
Ocupação local	Estado natural	S no novo uso da terra	Área ocupada	Tempo de ocupação
Transformação regional	Estado original	Área natural menor*	Área natural	Tempo de restauração
Ocupação regional	Estado natural	Área natural menor*	Área natural	Tempo de ocupação

\* área natural menor quer dizer o número de espécies que se encontram quando a área natural é reduzida pela ocupação ou transformação

## Método Suíço do Ecopontos

O método ecopontos é um método de avaliação quantitativo, com uma única fase que expressa os resultados da avaliação em “ecopontos”, baseado na relação entre fluxo atual e um fluxo considerado como crítico, para cada emissão. Segue a estrutura do método (Ferreira, 2004):

- Baseia-se na noção de “saturação ecológica”;
- As diversas cargas são avaliadas por meio de um “indicador de saturação ecológica”, chamado ecofator;
- A multiplicação da carga poluente pelo seu ecofator dá o peso ecológico expresso em pontos de carga ecológica, chamados ecopontos. A expressão matemática é:

$$Ecopontos = \sum Ecofator_i \times quantidade\ poluente \quad (2.16)$$

Para cada avaliação ecológica, devem-se dispor os seguintes dados:

- a) Emissões específicas (exemplo: 5 gr SO<sub>2</sub>/kg de material);
- b) Emissões totais (ou consumo) para um espaço determinado (exemplo, emissão total de SO<sub>2</sub> em um determinado país, para um período de um ano);
- c) Emissão ou consumo máximo admissível correspondente a esta ameaça ambiental num espaço determinado.

A função matemática escolhida para determinar o indicador de saturação ecológica ou ecofator é a seguinte função linear:

$$Ecofator = \left( \frac{1}{F_k} \right) \cdot \left( \frac{F}{F_k} \right)^2 \cdot c \quad (2.17)$$

Onde:

c = 1012 – coeficiente adimensional

F = representa o fluxo atual de uma carga ambiental (m<sup>3</sup>/ano);

F<sub>k</sub> = representa a carga máxima ambiental admissível, ou seja, o fluxo crítico (m<sup>3</sup>/ano);

(F / F<sub>k</sub>) = é um fator linear que exprime a ponderação de uma carga ambiental exercida sobre um determinado setor ecológico, em função da razão entre a carga atual máxima admissível para esse setor.

(1 / F<sub>k</sub>) = é um fator de normalização que exprime o fato de as cargas ambientais devem ser normalizadas, em função da carga total crítica para a área considerada.

## Método EPS 2000

O método EPS (*Environmental Priority System*) foi desenvolvido na Suécia, e tem sido destinado à orientação na seleção de materiais necessários à produção de um determinado produto. Neste método a base de todas as avaliações é estipular um valor para uma alteração no ambiente, e também estimar que contribuição certa depleção de recurso, emissão ou outra atividade irá fornecer a este valor de alteração no ambiente. Esta é classificada em cinco categorias: saúde humana; capacidade de produção do ecossistema; recursos abióticos; biodiversidade; valores culturais.

## Método IMPACT 2002+

Este método reúne todos os resultados do inventário e os classifica em 14 categorias de impacto e depois em quatro categorias de dano (saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas, recursos). As 14 categorias de impacto, bem como as respectivas unidades estão expressas na tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Categorias de Impacto usadas pelo método IMPACT 2002+ (Jolliet *et al.*, 2003).

Categorias de Impacto	Unidade
Toxicidade humana (carcinogênicos e não carcinogênicos)	DALY $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ cloro etileno no ar
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	DALY $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ PM <sub>2,5</sub> no ar
Ionização	DALY $\text{Bq}_{\text{eq}}^{-1}$ carbono-14 no ar
Esgotamento da camada de ozônio	DALY $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ CFC-11 no ar
Oxidação fotoquímica	DALY $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ etileno no ar
Ecotoxicidade aquática	PDF*m <sup>2</sup> *ano $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ trietilenglicol na água
Ecotoxicidade terrestre	PDF*m <sup>2</sup> *ano $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ trietilenglicol no solo
Acidez terrestre	PDF*m <sup>2</sup> *ano $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ SO <sub>2</sub> no ar
Uso do solo	PDF*m <sup>2</sup> *ano $\text{m}_{\text{eq}}^{-2}$ solo orgânico cultivável ano
Aquecimento global	$\text{kg}_{\text{eq}}$ CO <sub>2</sub> $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ CO <sub>2</sub>
Energia não-renovável	MJ $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ petróleo
Extração de minerais	MJ $\text{kg}_{\text{eq}}^{-1}$ ferro

### 2.3.7 Limitações do Estudo de ACV

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

Um aspecto importante a considerar durante a elaboração do inventário do ciclo de vida é a incerteza embutida nos dados coletados que se devem principalmente a (Frischknecht and Jungbluth, 2007):

- Variabilidade e erros estocásticos presentes nos dados de entrada e saída coletados, frutos das incertezas nas medições, variações específicas do processo, variações temporais, e outros.

- Incerteza do modelo: O modelo usado para descrever o processo pode estar inapropriado (por exemplo, usar modelo linear ao invés de não-linear).

Outra crítica, feita no trabalho de Owens (1997), é quanto à categorização dos impactos ambientais numa série de temas (efeito estufa, toxicidade humana e ecológica), etapa que é atualmente comum em muitas metodologias de ACV. Para algumas categorias (como por exemplo, o efeito estufa), as emissões sobre um período de tempo específico podem apropriadamente ser calculadas através do uso dos equivalentes, mas para outros, como a toxicidade humana, os diferentes fenômenos e mecanismos que estão envolvidos dificultam esse cálculo.

Meyer *et al.* (2009) também critica a forma atual de medição de impactos ambientais, pois não há um critério de medida absoluta para determinar os mesmos. Para algumas categorias, pela sua objetividade, este cálculo é preciso e bem fundamentado, enquanto para outras, que envolvem mais fenômenos e são dependentes de situações mais subjetivas, apresentam-se maiores dificuldades na utilização desta simplificação.

Já para a avaliação das informações resultantes do estudo de ACV, esta pode ser dificultada devido a elevada quantidade de categorias de impactos dos modelos de avaliação e as dúvidas existentes em relação as quais são preferenciais. Logo, na etapa de definição do objetivo e escopo, deve-se definir claramente qual é o modelo de avaliação de impacto mais adequado para o sistema ou produto analisado (Lora *et al.*, 2010, Rocha, 2007).

Apesar da elevada quantidade das categorias de impactos ambientais, no trabalho de Royal Society (2008) sobre sustentabilidade dos biocombustíveis foram destacados alguns aspectos importantes e que tem recebido pouca atenção nos trabalhos de ACV, como por exemplo, o uso da água e as alterações na biodiversidade, os quais poderiam ser incorporados ao estudo de ACV.

Outra limitação da ACV é a subjetividade da natureza das escolhas e suposições feitas numa ACV (como a seleção do sistema de fronteiras, dos dados de entrada e saída e das categorias de impacto). Outro ponto importante é que os modelos usados para análise de inventário e determinação dos impactos ambientais são limitados pelas suposições feitas nos modelos, e podem não determinar os impactos ambientais potenciais (González *et al.*, 2003).

Em relação aos estudos de ACV de biocombustíveis, existe a questão da competição entre o uso da terra para produção da biomassa e uso da terra para produção de alimentos. Tal problema ainda não apresenta solução através de uma ACV, mas alternativas como a metodologia IEE (*Integral Environmental Evaluation*) desenvolvida em Riedacker (2009) pode ser o caminho para uma solução. Nesta metodologia está incluído o conceito de

eficiência territorial e leva em consideração a área requerida para satisfazer as necessidades básicas da população (Renó *et al.*, 2010).

Porém, ainda precisa ampliar mais esta questão, já que o uso do solo em cada país depende também da economia local, das restrições políticas regionais, e principalmente do nível de desenvolvimento de cada país (Escobar *et al.*, 2009).

### **2.3.8 ACV de Biocombustíveis**

Os trabalhos recentes realizados de ACV dos biocombustíveis, de uma forma geral, compararam diferentes rotas de produção de combustíveis sob um ponto de vista ambiental e energético. As principais questões são abordadas num estudo de ACV de biocombustíveis (RENEW, 2003):

- Qual rota de produção do biocombustível causa menores impactos ambientais?
- Há diferença na escolha das biomassas, e qual é ecologicamente melhor para os diferentes processos de conversão?
- Qual é a parcela de contribuição de impacto ambiental para cada estágio de produção do biocombustível estudado?
- Quais são os pontos possíveis para melhoria?
- Qual o comportamento do ponto de vista ambiental do biocombustível se houver mudança do cenário estudado?

Alguns biocombustíveis atuais a biomassa são de origem agrícola, logo a primeira etapa do ciclo de vida a ser analisada é o cultivo da biomassa. Assim os estudos de ACV centram-se na quantidade necessária de insumos, como fertilizante, pesticidas, e outros. Como também, procuram determinar as emissões provenientes do cultivo, como ilustra o esquema na Figura 2.20.

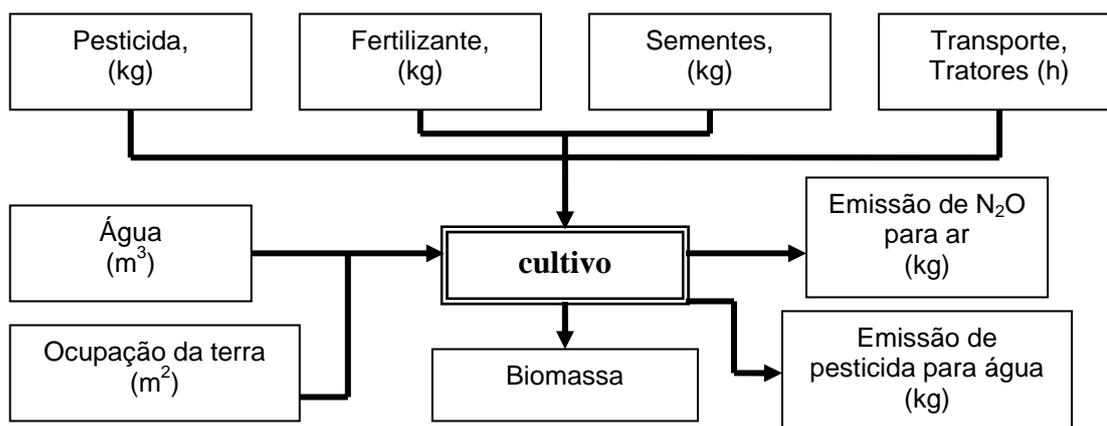


Figura 2.20 – Entradas e saídas do processo de cultivo de biomassa (Adaptada de Renew, 2003).

Também nas ACV têm sido estudadas as diferentes possibilidades tecnológicas da produção de biocombustíveis, sob o ponto de vista energético. Como, a eficiência da conversão da matéria-prima a combustível, como pode ser visto na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Eficiência de conversão do processo de síntese de combustível líquido (TIAX LLC, 2007).

	metanol	Dimetil-éter	Diesel Fischer-Tropsch	Diesel Fischer-Tropsch
Matéria-prima	Gás natural	Gás natural	Carvão	Madeira
Processo de produção	Reforma catalítica	Reforma catalítica	Gaseificação Síntese/catalítica	Gaseificação Síntese/catalítica
Eficiência de conversão	67,5 %	70%	40,5%	57,7%

Podem-se observar na tabela 2.9 as eficiências de conversão maiores para os casos em que a matéria-prima se encontra no estado gasoso, já os processos com matéria-prima sólida (madeira, carvão), as eficiências foram menores, pois esta precisa se converter primeiro em gás (através da gaseificação) e posteriormente em líquido (combustível).

Há outros trabalhos de ACV relacionados ao balanço de emissões de gases de efeito estufa (GEE) durante a produção de biocombustíveis. Um exemplo, foi o estudo de Isaías Macedo (Macedo *et al.*, 2004, Macedo *et al.*, 2008) com o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Outro estudo de balanço de emissões de GEE do etanol brasileiro, está no trabalho Walter *et al.* (2006), no qual pode ser visto as vantagens da produção deste biocombustível através da estimativa das emissões evitadas de GEE devido a substituição da gasolina pelo etanol (Figura 2.21):

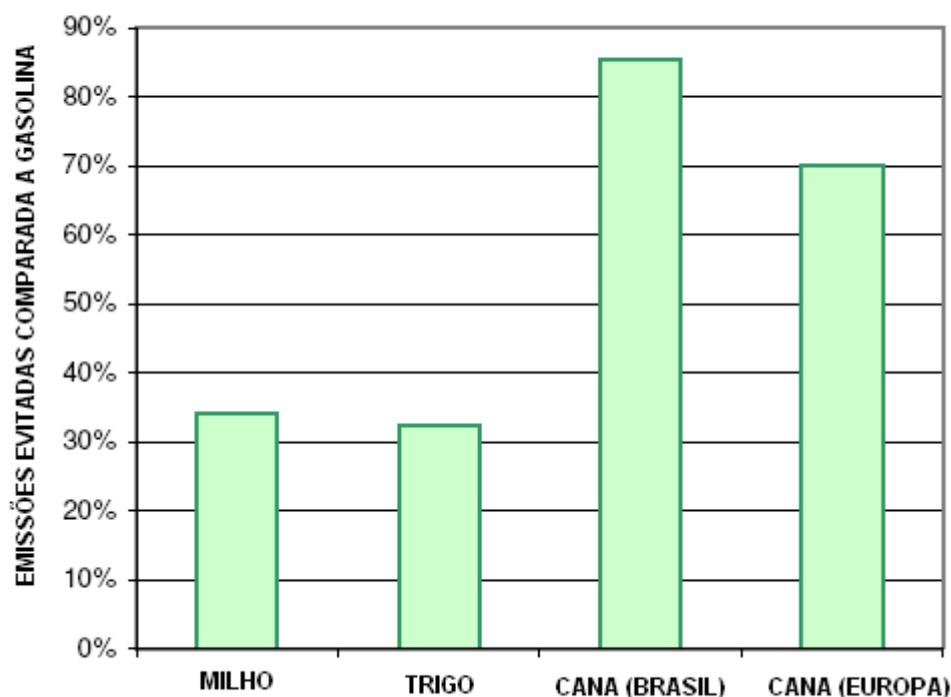


Figure 2.21 – Emissões de GEE evitadas (Walter *et al.*, 2006)

Observa-se da Figura 2.21 que ao analisar o ciclo de vida da gasolina em relação ao ciclo de vida do etanol produzido a partir de cana, milho e trigo, obteve emissões de GEE evitadas em cerca de 86%, para o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar no Brasil. Já o consumo do etanol brasileiro na Europa reduz estas emissões para 70%, devido ao transporte intercontinental e a baixa eficiência dos motores europeus que utilizam etanol. Entretanto estes dois resultados foram melhores que o etanol produzido a partir do trigo e milho, que apresentam um valor máximo de 35% para as emissões de GEE evitadas.

Já com relação ao estudo de balanço energético dos biocombustíveis, a Tabela 2.10 apresenta o resultado de um balanço energético do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, segundo dois trabalhos obtidos na literatura.

Tabela 2.10 – Balanço energético da produção do etanol a partir da cana-de-açúcar

Estágio de produção	Unidade	Oliveira <i>et al.</i> (2005)	Macedo <i>et al.</i> (2008)
Estágio agrícola	GJ/m <sup>3</sup>	5,62	2,44
Estágio industrial	GJ/m <sup>3</sup>	0,57	0,27
Distribuição	GJ/m <sup>3</sup>	0,44	0,68
Balanço (saída/entrada)	GJ/m <sup>3</sup>	3,97	9,34

Da tabela 2.10 o termo “balanço” representa a relação entre a saída energética do sistema, (no caso seria etanol somada à eletricidade produzida pelas destilarias pelo processo de cogeração com bagaço e mais o próprio bagaço excedente que pode ser aplicado como combustível) pela energia fóssil demandada nos diferentes estágios de produção.

Pode ser observado que os valores encontrados são bem distintos, a principal causa para tal são os valores de consumo de diesel assumidos por cada autor. O trabalho Oliveira *et al.* (2005) assumiu que as máquinas agrícolas e caminhões consumiam em torno de 600 l diesel / ha, já o estudo Macedo *et al.* (2008) assumiu 164 l diesel / ha.

Com relação aos demais biocombustíveis, há na literatura trabalhos de ciclo de vida de outro importante biocombustível, o biodiesel. Um exemplo é o trabalho de Yáñez *et al.* (2009) desenvolvido no grupo NEST (Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída) na Universidade Federal de Itajubá. Trata-se de uma ACV da produção de biodiesel a partir do óleo de palma, para as condições brasileiras e colombianas. Neste trabalho estabeleceu-se como sistema de fronteiras desde a etapa agrícola até a produção do biodiesel na planta, como mostra a Figura 2.22, a qual apresenta também as principais entradas e saídas consideradas no estudo.

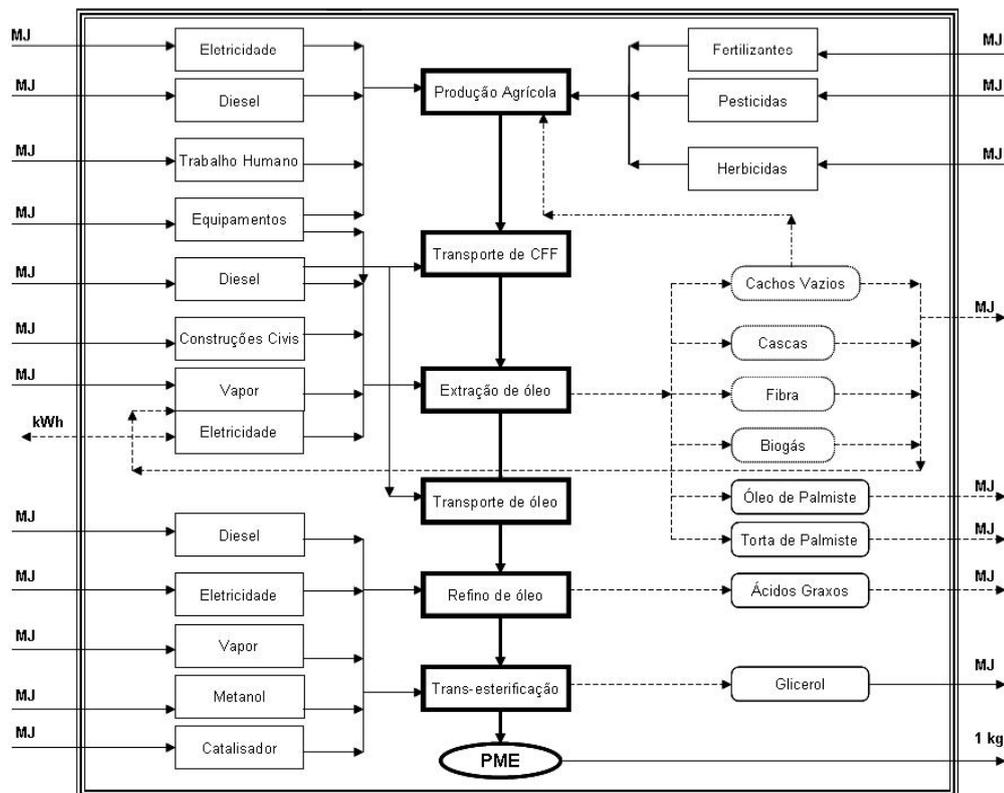


Figura 2.22 – Sistema de fronteiras para realizar a ACV da produção de biodiesel (Yáñez *et al.*, 2009)

Um dos resultados encontrados neste estudo foi a participação das etapas produtivas no consumo energético do ciclo de vida do biodiesel, como mostra a Figura 2.23.

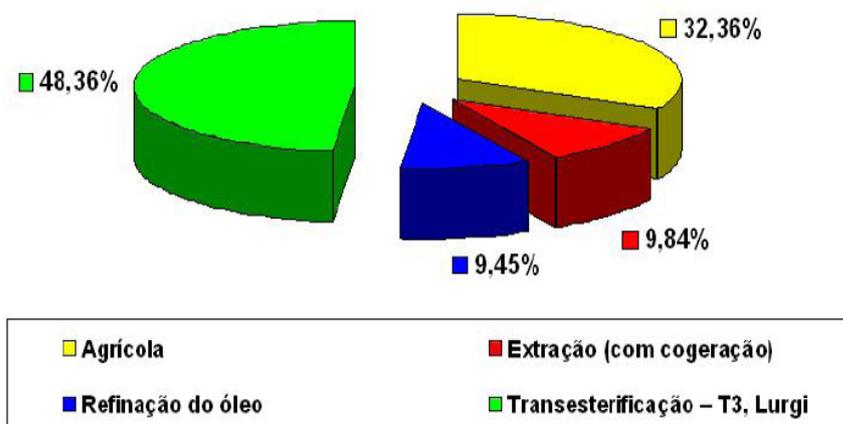


Figura 2.23 – Participação porcentual das etapas produtivas no consumo energético do ciclo de vida no Brasil (Yáñez, 2008)

Já comparando a produção de biodiesel na Colômbia e no Brasil, o estudo apresentou os diferentes valores energéticos consumidos em cada etapa para o biodiesel produzido nestes dois países, como mostra a Figura 2.24.

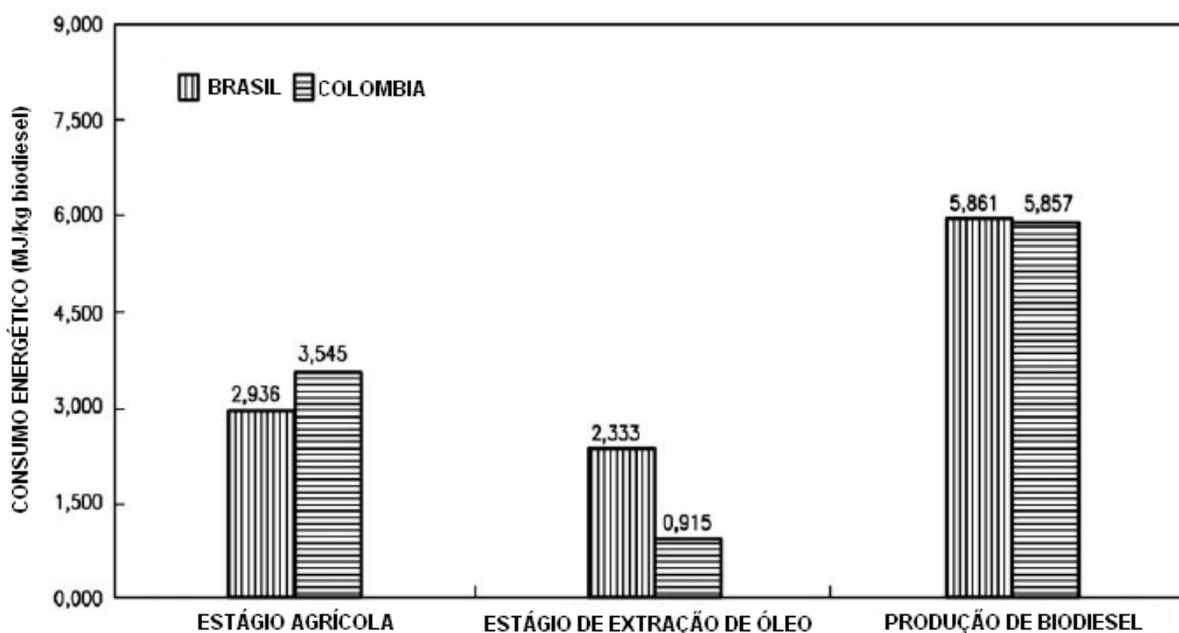
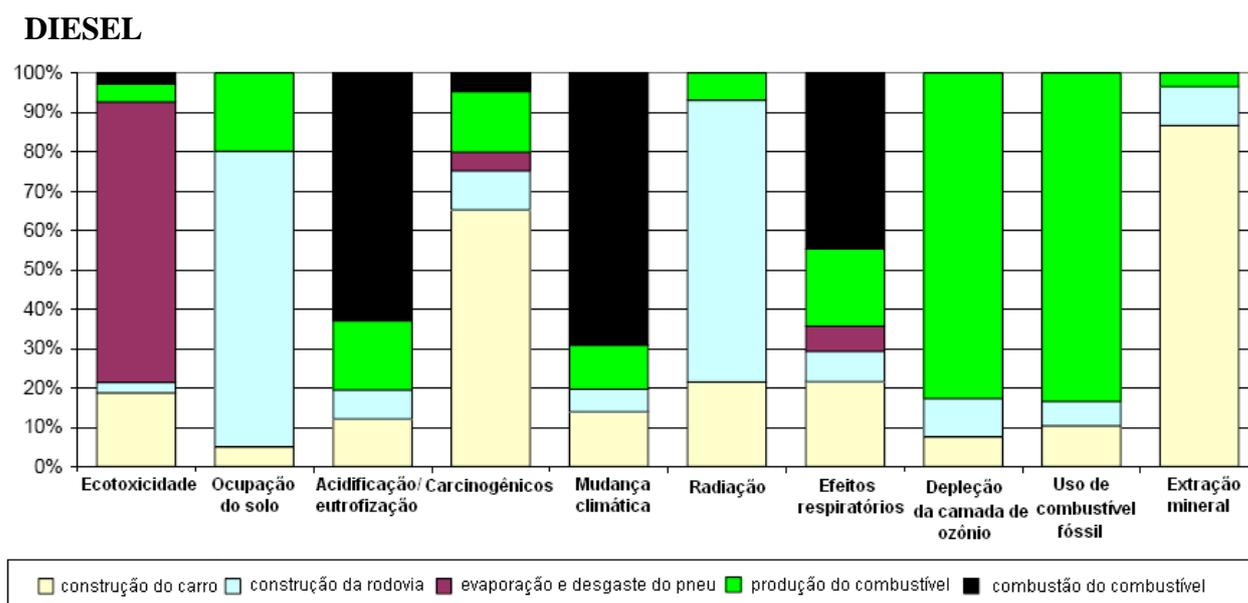


Figura 2.24 – Consumo energético em diferentes etapas da produção do biodiesel (Yáñez *et al.*, 2009)

Nos principais resultados obtidos destacou-se que o uso de fertilizantes no estágio agrícola é o grande responsável pelo consumo energético desta etapa, independente do biodiesel produzido na Colômbia ou no Brasil. Já na etapa de produção de biodiesel, observou que o metanol consumido contribui em maior proporção para o consumo energético desta fase, como também corresponde a 43% do total de energia fóssil consumida em todo processo.

Outro resultado importante foi a análise do balanço energético do biodiesel de óleo de palma com outros tipos de biodiesel (por exemplo, biodiesel produzido a partir de óleo de colza), o resultado do primeiro apresentou melhor eficiência energética.

Outros trabalhos de relevância são os de ACV dos biocombustíveis de segunda geração, como por exemplo, os BTL (*Biomass to Liquid*). O trabalho Jungbluth *et al.* (2008) apresentou a análise do ciclo de vida para estes biocombustíveis, em especial o diesel Fischer-Tropsch (FT), produzido a partir da biomassa pela rota da gaseificação. Os resultados foram comparados com uma ACV do combustível fóssil diesel, como mostra a Figura 2.25:



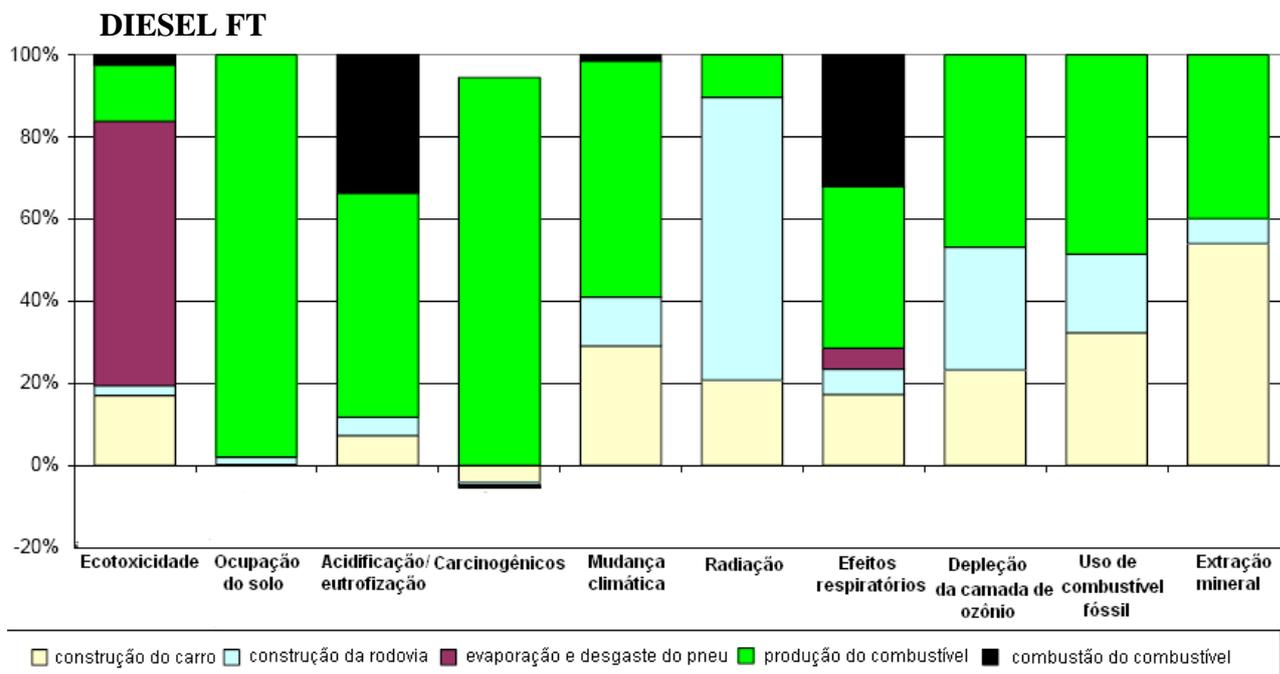


Figura 2.25 – Análise do Ciclo de Vida para os combustíveis diesel FT e diesel fóssil (Jungbluth *et al.*, 2008)

A partir da Figura 2.25 e dos demais resultados obtidos no trabalho, obteve que uma das principais vantagens do uso do diesel FT é a redução em até 60% da emissão dos gases do efeito estufa, comparando com os combustíveis fósseis. Porém existem desvantagens sob o ponto de vista ambiental para os biocombustíveis produzidos a partir de biomassa agrícola, pois estes durante o estágio de cultivo emitem substâncias que contribuirão ao impacto ambiental eutrofização e acidificação.

### 2.3.9 Ocupação do Solo para Produzir Biocombustível

A questão da ocupação do solo pelas culturas agrícolas cujo objetivo é a produção de biocombustível, é um tema muito debatido pela comunidade nacional e internacional. No Brasil, por exemplo, o foco tem sido voltado para a expansão das lavouras de cana-de-açúcar nos últimos anos, principalmente na região centro-sul do país, como mostra a Figura 2.26:

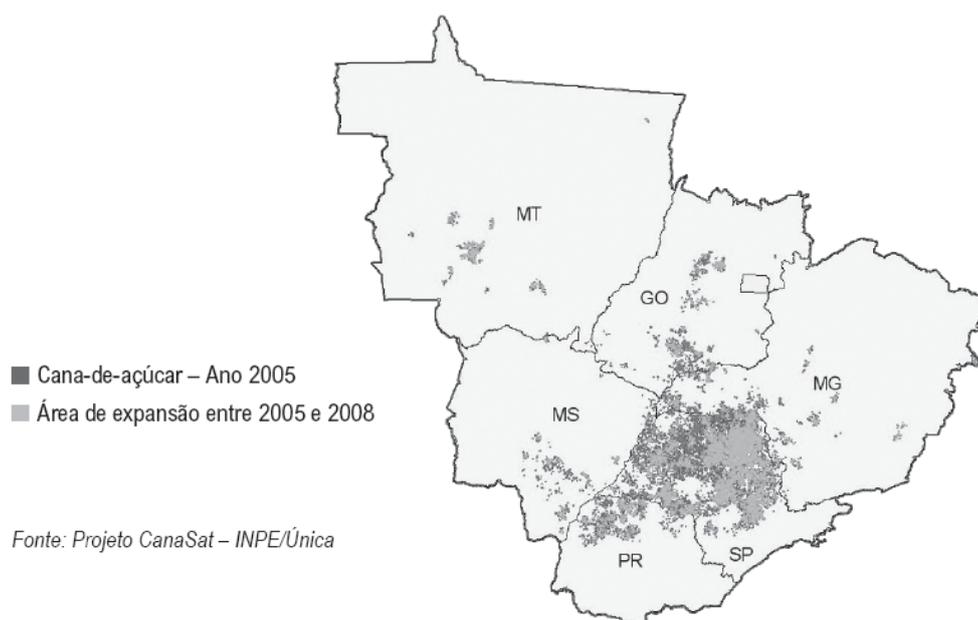


Figura 2.26 - Evolução das áreas plantadas com cana-de-açúcar no Centro-Sul do Brasil (BNDES, 2008)

Na Figura 2.26 pode ser observada a expansão dos canaviais no Brasil principalmente entre os anos de 2005 a 2008. Em termos numéricos, a área ocupada pela cana-de-açúcar no ano de 2008 foi de nove milhões de hectares, 55% maior que em 2005. O grande problema desta expressiva expansão da área ocupada pelos canaviais é os poucos trabalhos de pesquisa voltados para avaliar os impactos ambientais o cultivo de cana-de-açúcar sob o solo, a flora e a fauna da região ocupada por esta cultura.

O que é conhecido atualmente é que a cana-de-açúcar é considerada uma das culturas de produção intensa que consome relativamente poucos recursos naturais no local onde é plantada, mas introduz ao meio ambiente novos elementos e produtos causadores de desequilíbrios ecológicos, como por exemplo, os inseticidas, pesticidas, fertilizantes, sais, etc.

Além da inserção destes elementos sob a cultura de cana-de-açúcar, também é comum a disposição no solo da vinhaça, que consiste num resíduo gerado no processo de destilação do álcool. Este resíduo líquido apresenta temperatura elevada; pH ácido; corrosividade; tem alto teor de potássio; além de certas quantidades significativas de nitrogênio, fósforo, sulfatos e cloretos.

O destino final da vinhaça no solo vem sendo abordados há muitos anos por diversos pesquisadores, na maioria das vezes, sob a ótica de aumento da produtividade da cana-de-açúcar e melhoria da qualidade do solo. Porém o que tem acontecido ao longo dos anos nas operações industriais das usinas de açúcar e álcool é o uso intensivo de soda cáustica, e tal uso provoca o aumento do teor de sódio no solo. Este elemento, por sua vez, pode salinizar e

erodir solos arenosos, logo neste caso a disposição da vinhaça no solo é considerada potencialmente poluidora.

Outro aspecto importante a ser dado à aplicação da vinhaça no solo relaciona-se com a possibilidade deste resíduo contaminar rios e lagos localizados nas proximidades dos canaviais, ocasionando assim o impacto ambiental denominado eutrofização, que pode causar a morte de várias espécies de peixes.

Quanto ao potencial de contaminação das águas subterrâneas situadas sob os canaviais devido à aplicação da vinhaça e dos demais insumos químicos, os trabalhos encontrados na literatura são escassos. Dentre eles está Hassuda (1991), que realizou um estudo na Usina São José da Estiva, em Novo Horizonte. Um dos resultados alcançados indicou a capacidade da aplicação da vinhaça em alterar a qualidade do aquífero Bauru.

Além destes problemas, ainda no Brasil pratica-se a queima da palha para facilitar a colheita da cana-de-açúcar, este método é condenado há mais de um século pelas conseqüências negativas provocadas na produtividade da terra, originando, por exemplo, a desertificação, o aumento das perdas por erosão e redução de substâncias necessárias à nutrição das plantas.

Finalizando a discussão da expansão dos canaviais, têm-se outro agravante relacionado com o terreno considerado ideal para o plantio da cana-de-açúcar no Brasil que é a região onde se situa o cerrado, que consiste num ecossistema composto principalmente por gramíneas, arbustos, árvores esparsas, além de uma diversidade de espécies animais. Assim, para esta região o longo período de permanência das lavouras pode levar a uma recuperação da vegetação quase nula, além da extinção de espécies vegetais e animais.

## **2.4 SISTEMAS DE COGERAÇÃO APLICADOS NAS USINAS SUCROALCOOLEIRAS**

O setor sucroalcooleiro brasileiro desde a década de 70 aplica sistemas de cogeração com bagaço para atender a demanda de vapor de seus processos industriais, como também para atingir a auto-suficiência elétrica.

O interesse pela tecnologia de cogeração tem crescido desde as importantes mudanças na disponibilidade e nos custos da energia, iniciadas em 1973, com o primeiro choque do petróleo. Conseqüentemente foram oferecidos incentivos para racionalizar o uso da energia e dos combustíveis nobres, como também valer-se da tecnologia de cogeração, quando for possível.

Outra vantagem da cogeração está relacionada aos aspectos ambientais, pois a medida que reduz o consumo de combustível fóssil, conseqüentemente reduz os impactos ambientais ocasionado pelo uso do mesmo. Sendo assim a tecnologia da cogeração pode ser considerada uma importante alternativa para políticas energéticas que visam a minimização dos impactos ambientais.

Em termos de definição, a cogeração é a produção seqüencial de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica útil em processos industriais, a partir de uma mesma fonte de energia primária (CONAE, 2007). No setor sucroalcooleiro brasileiro os arranjos usuais de cogeração utilizados são baseados em ciclos a vapor, principalmente no ciclo Rankine, do qual são derivados os sistemas de cogeração baseados em turbinas de contrapressão, turbinas de condensação e extração, descritos nos itens a seguir:

### 2.4.1 Conceito de Ciclo Rankine

O ciclo ideal para as plantas de potência a vapor é o ciclo Rankine, no qual o combustível é queimado numa caldeira para produzir vapor, e este aciona uma turbina para produzir potência. Uma das vantagens deste ciclo é a possibilidade de gerar potência e calor, mediante pequenas alterações do sistema. Um esquema do ciclo Rankine está apresentado na Figura 2.27:

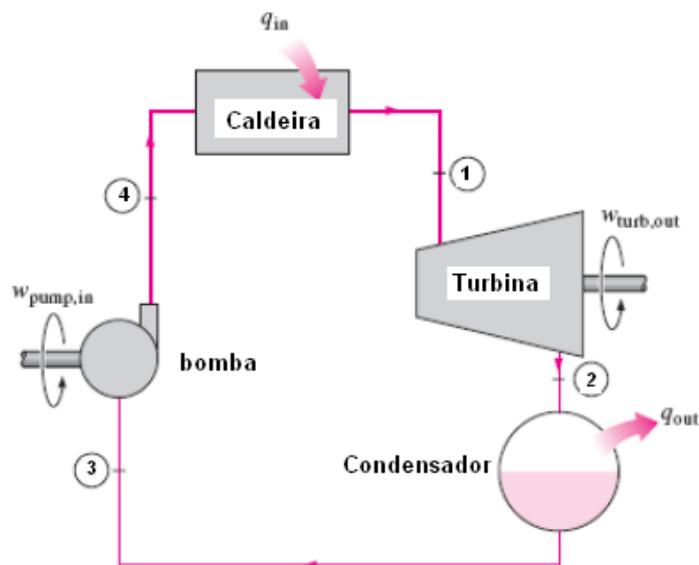


Figura 2.27 – Esquema do Ciclo Rankine

No esquema da Figura 2.26, tem-se os seguintes processos termodinâmicos ocorrendo:

Fase 1 – 2: expansão isentrópica na turbina,

Fase 2 – 3: troca de calor isobárica no condensador,

Fase 3 – 4: compressão isentrópica na bomba e

Fase 4 – 1: troca de calor isobárica na caldeira.

Por ser uma idealização o ciclo Rankine não apresenta irreversibilidades, porém, os ciclos reais normalmente empregados para a geração de potência apresentam alguns desvios em relação ao ciclo teórico como: perdas de pressão nas tubulações do sistema, perdas de calor do sistema para a vizinhança e as irreversibilidades nos processos de expansão e compressão.

## 2.4.2 Sistema de Cogeração com Turbina de Contrapressão

No sistema de cogeração com turbina de contrapressão, o fluxo de vapor exausto que abandona a turbina é enviado diretamente para o processo industrial em condições próximas das que são requeridas.

O termo contrapressão refere-se ao fato do vapor ser rejeitado a pressões da ordem de grandeza da pressão atmosférica. A utilização do vapor a uma pressão relativamente elevada prejudica sensivelmente o rendimento elétrico, mas melhora o rendimento térmico, pois as características do vapor são normalmente mais adequadas aos fins a que se destina.

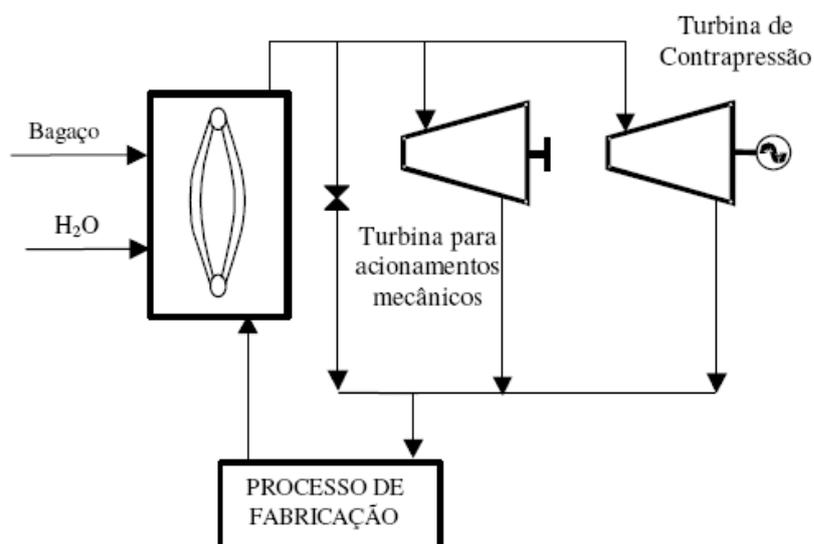


Figura 2.28 – Sistema de cogeração com turbina de contrapressão em uma usina de açúcar e álcool (Zampieri, 2005).

Na Figura 2.28 tem-se um exemplo de sistema de cogeração com turbina contrapressão, pode ser visto uma linha de vapor que segue para acionar equipamentos mecânicos, outra linha para a turbina de contrapressão; além disso, o sistema consta de uma válvula redutora de pressão (não representada na Figura 2.28) que garante a operação do sistema, mantendo a demanda de vapor exigida no processo de fabricação. No Brasil, o sistema de contrapressão normalmente opera com pressão de 21 Bar e temperatura de 300°C.

### **2.4.3 Sistema de Cogeração com Turbina a Vapor de Extração-Condensação**

O sistema de cogeração com mais vantagens técnico-econômicas às usinas de açúcar e álcool é o de Turbina a Vapor de Extração-Condensação (CEST – *Condensing-Extraction Steam Turbine*).

Uma das principais características da tecnologia de ciclo a vapor com condensação e extração é que o vapor, ao final da realização do trabalho na turbina a vapor, é total ou parcialmente condensado. Já a parcela de vapor necessária ao atendimento das demandas mecânicas e térmicas do processo produtivo é fornecida por extração na turbina em um ponto intermediário da expansão.

As diferenças fundamentais deste ciclo para o de contrapressão pura são: existência de um condensador na exaustão da turbina e o pré-aquecimento do combustível que alimenta a caldeira, que é realizado com vapor extraído em vários estágios da turbina. A primeira alteração proporciona uma maior flexibilidade da geração termelétrica que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor de processo, permitindo inclusive a operação em geração elétrica fora da safra e, a segunda, proporciona uma elevação da eficiência global da geração (Koblitz, 2007).

O grau de sofisticação dos sistemas CEST varia bastante, e diversas são as alternativas tecnológicas que complementam os ciclos a vapor tornando-os mais eficientes e elevando a potência gerada. Entre elas, complexos sistemas de geração de vapor que incluem caldeiras com câmaras de combustão de leito fluidizado, diversos trocadores de calor como os pré-aquecedores de ar, os economizadores, os superaquecedores, re-aquecedores, os condensadores e os aquecedores intermediários, entre eles os desaeradores.

O interesse em empregar o sistema CEST no setor sucroalcooleiro se justifica pela sua capacidade de satisfazer a demanda de energia térmica/ elétrica do processo, podendo esta

variando numa ampla faixa. Devido a tais vantagens este foi o sistema de cogeração selecionado para elaboração do presente trabalho.

#### **2.4.4 Sistema de Cogeração com Tecnologias Avançadas**

Tecnologias avançadas para cogeração tem sido desenvolvidas quando almeja principalmente aumentar a eficiência termomecânica do processo, um exemplo é a tecnologia BIG-GT (*Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine*, que pode ser muito atrativa para as usinas açucareiras. Esta tecnologia foi objeto de estudo em vários projetos demonstrativos na Europa, Estados Unidos, e atualmente segue seu processo de desenvolvimento, a fim de que atinja eficiências elétricas aproximadas de 32 – 41% (De Feder e Gielen, 2000).

Os sistemas BIG-GT são capazes de oferecer eficiências superiores aos sistemas a vapor convencionais, dadas as maiores temperaturas de operação obtidas nas turbinas a gás (1200 – 1400°C), em relação às temperaturas de geração de vapor dos sistemas convencionais (~500°C).

Uma análise de integração de um sistema CEST e um sistema BIG-GT em uma usina cubana teve como resultado que o sistema CEST tem uma capacidade de geração de eletricidade excedente da ordem de 120 kWh/tc na safra e 175 kWh/tc na entressafra. Enquanto que o sistema BIG-GT pode produzir eletricidade excedente em até 150 kWh/tc na safra e 200 kWh/tc na entressafra. Em ambos os casos, considerando o uso da palha junto com o bagaço de cana-de-açúcar para abastecer o sistema CEST e BIG-GT (Larson *et al.*, 2001).

Seguindo a mesma linha de integração do sistema CEST com o BIG-GT, Hobson e Dixon (1998) avaliaram esta possibilidade para ser implementada nas condições das usinas açucareiras da Austrália e tiveram como principais conclusões:

- Para um consumo específico de vapor de 520 kg/tc a energia dos gases de escape da turbina não é suficiente para a geração de vapor a ser consumido pelo processo. Para este nível de consumo, 70% do bagaço deve ser desviado do gaseificador e alimentar diretamente os geradores de vapor.

- Para um consumo de vapor de 400 kg/tc, aumenta a potência disponível do sistema BIG-GT de 88 a 148 MW.

- A recuperação da palha de cana (37%) para ser aplicada no sistema BIG-GT junto com o bagaço mostra-se como a melhor tecnologia atualmente disponível quando se almeja produzir vapor e eletricidade excedente.

No trabalho experimental de Hassuani *et al.* (2005) também foi analisada a alternativa BIG-GT ao setor sucroalcooleiro. Realizaram-se então testes de gaseificação em plantas piloto e obtiveram um gás de síntese com poder calorífico inferior de  $4,2 \text{ MJ/Nm}^3$ , para uma mistura de 60% de bagaço e 40% palha. O gás foi aplicado em uma turbina a gás e obteve uma produção média de potência de 30 MW.

Finalmente o trabalho Modesto *et al.* (2006), que aplicou o sistema BIG-GT para uma destilaria autônoma. Neste trabalho foi feita uma simulação computacional, no qual o gás de síntese é fornecido a uma turbina a gás (modelo GE LM 2500) que sofreu previamente modificações na câmara de combustão para poder operar com um fluxo maior de gás. O resultado alcançado foi uma produção de eletricidade excedente de 154,7 kWh/tc.

Com respeito a estrutura física de um sistema BIG – GT, destacam-se os principais componentes: gaseificador, sistema de limpeza de gás, turbina a gás, turbina a vapor e caldeira de recuperação, como ilustra o esquema da Figura 2.29.

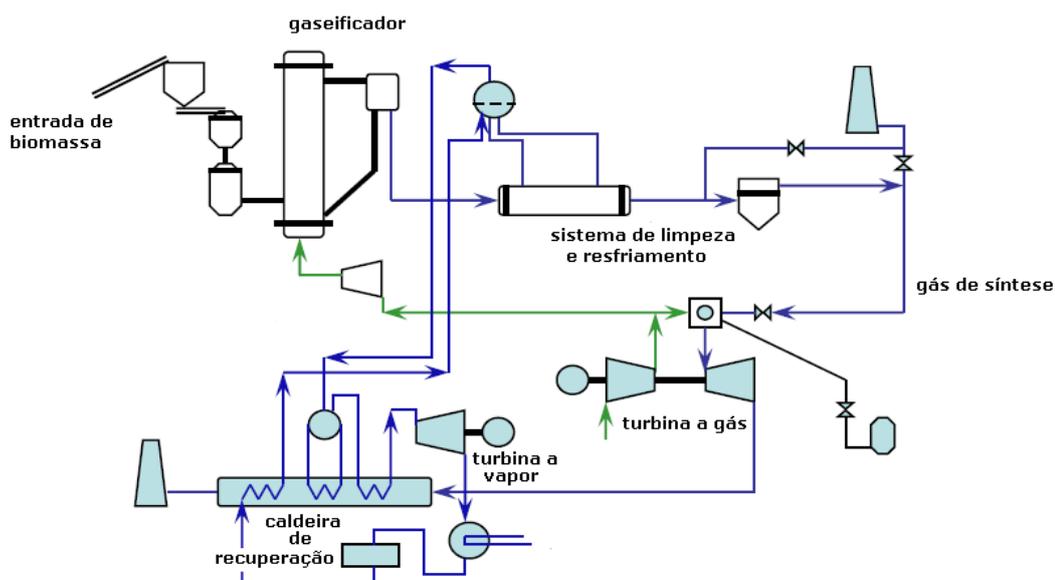


Figura 2.29 – Esquema do Sistema BIG-GT – *Biomass Integrated Gasifier/ Gas Turbine* (Adaptada de Mcmillan e Marriott, 2008)

No esquema da Figura 2.29 a biomassa após sofrer ao processo de pré-tratamento é encaminhada ao gaseificador, o gás de síntese obtido neste processo é resfriado e limpo num sistema de limpeza que pode ser um filtro ou/e lavador de gás. Após a limpeza, comprime-se o gás num compressor e ele é fornecido à câmara de combustão da turbina a gás. Nesta é produzido potência elétrica, como também os gases de exaustão, que são enviados a uma caldeira recuperativa para ocorrer uma transferência de calor e assim produzir vapor que é então fornecido para a turbina a vapor. Esta produz também potência elétrica, como também

pode fornecer vapor ao processo de gaseificação ou algum processo em que o BIG-GT foi acoplado.

Uma das maiores dificuldades encontradas por esta tecnologia refere-se ao processo de gaseificação, que apresenta as seguintes desvantagens (Arrieta, 2000):

- Emissão de partículas: as partículas, mesmo em pequenas quantidades, provocam erosão nas pás da turbina.

- Formação de alcatrão: a condensação do alcatrão nas superfícies frias dos trocadores de calor pode provocar sérios problemas na operação da planta, como redução da seção livre nas tubulações e o entupimento de válvulas e filtros.

- Álcalis metálicos: os álcalis metálicos provocam erosão nas pás da turbina. As especificações podem estabelecer níveis máximos de concentração de álcalis de até 4 ppm (partes por milhão).

Outro fator limitante para a implementação desta tecnologia é o uso na turbina a gás de um combustível de baixo poder calorífico (neste caso o gás de síntese de 5 MJ/kg), o que impõe modificações a serem feitas na turbina, especificamente na câmara de combustão da turbina a gás, a qual tem um custo associado. Outras alterações necessárias são no sistema de injeção, bicos injetores de combustível e fluxo mássico do mesmo (Rodrigues *et al.*, 2007). Além destas, algumas estratégias tem sido proposta para aplicação do gás de síntese numa turbina a gás, como mostra a Tabela 2.11:

Tabela 2.11 – Estratégias para aplicação do gás de síntese numa turbina a gás  
(Rodrigues *et al.*, 2007)

<b>Estratégia</b>	<b>Descrição</b>	<b>Vantagem</b>	<b>Desvantagem</b>
<b>Aumento da relação de pressão</b>	O compressor é operado a alta pressão o que leva a uma pequena redução no fluxo mássico de ar	Esta opção incrementa a potência e a eficiência	Tecnicamente é mais agressiva, pois aumenta a carga térmica e o torque transmitido
<b>Sangria no compressor</b>	Sangria de ar na descarga do compressor	Pequeno aumento na produção de potência	Pode afetar a distribuição do ar quente aos combustores
<b>Reprojetar os expansores</b>	Modificações feitas no design do expansor	Melhor performance da turbina a gás	Modificação permanente torna difícil o uso de outros combustíveis (como o gás natural)

## **Capítulo 3**

### **METODOLOGIA**

Neste capítulo estão descritos as principais etapas e métodos para alcançar os resultados desta tese de doutorado.

#### **3.1 FLUXOGRAMA DO ESTUDO**

Para visualizar como foi alcançado e em que ordem os resultados foram obtidos, foi-se elaborado um fluxograma (Figura 3.1) de todas as fases envolvidas.

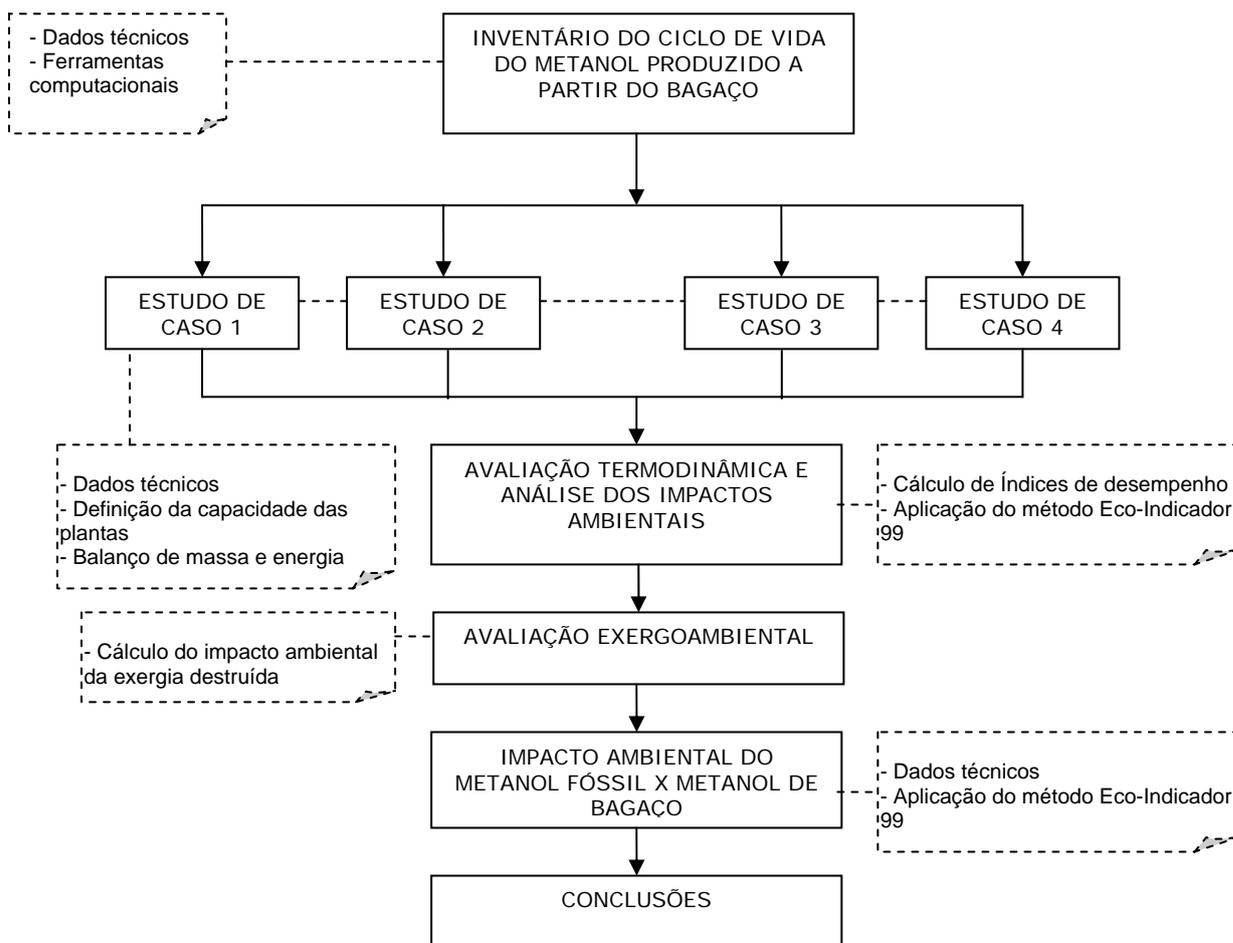


Figura 3.1 – Fluxograma do estudo da tese de doutorado

A fim de detalhar as principais considerações feitas em cada etapa da figura 3.1, os itens a seguir apresentam uma visão geral de cada uma delas:

### 3.1.1 Inventário do Ciclo de Vida do Metanol

Para elaboração do Inventário do Ciclo de Vida estabeleceu primeiramente um sistema de fronteiras que considerou desde a etapa de produção agrícola da cana-de-açúcar, seguida pelo processo de moagem da mesma, depois as fases de pré-tratamento e gaseificação do bagaço, e finalmente a síntese do metanol. Os processos de distribuição, uso e destinação final do produto metanol não foram considerados neste estudo.

Para a execução do levantamento de dados de cada etapa produtiva, foram feitas pesquisas na literatura e simulações computacionais (utilizando o programa CSFMB e GateCycle) para auxiliar na determinação do balanço de massa e energia do processo de produção do metanol.

Em geral focou as informações relacionadas aos fluxos mássicos e energéticos requeridos pelas operações e os principais poluentes gerados. Logo, as informações coletadas para cada etapa estão reunidas a seguir:

#### **Etapa agrícola (produção e transporte da cana-de-açúcar)**

- Área de cultivo para produção
- Rendimento da produção anual
- Tipo, quantidade e frequência de fertilizantes usados
- Forma de transporte da cana
- Rendimento do transporte
- Distância do cultivo a usina de açúcar e álcool
- Emissões geradas

#### **Obtenção do bagaço de cana-de-açúcar (moagem da cana-de-açúcar)**

- Capacidade de extração de bagaço
- Consumo de água na lavagem da cana-de-açúcar
- Consumo de energia térmica
- Consumo de combustível

#### **Pré-tratamento, Gaseificação e Síntese do metanol (conversão do bagaço à gás de síntese e posteriormente a metanol)**

- Capacidade de produção
- Consumo de energia térmica e elétrica
- Emissões e efluentes gerados
- Consumo de combustível

### 3.1.2 Estudos de caso no qual se insere a produção de metanol

Os estudos de caso propostos tiveram a finalidade principal de inserir a produção de metanol nas instalações sucroalcooleiras, analisando desta forma, as possibilidades de diferentes configurações de um sistema constituído por uma destilaria autônoma (ou uma usina de açúcar e álcool), uma planta de cogeração e uma de metanol. Alguns critérios foram seguidos no desenvolvimento dos estudos de casos, alguns deles estão apresentados a seguir:

- Analisar uma planta de grande capacidade de moagem de cana-de-açúcar, pois se relaciona com a economia de escala e a tendência atual das usinas de açúcar e álcool e destilarias autônomas a serem instaladas.

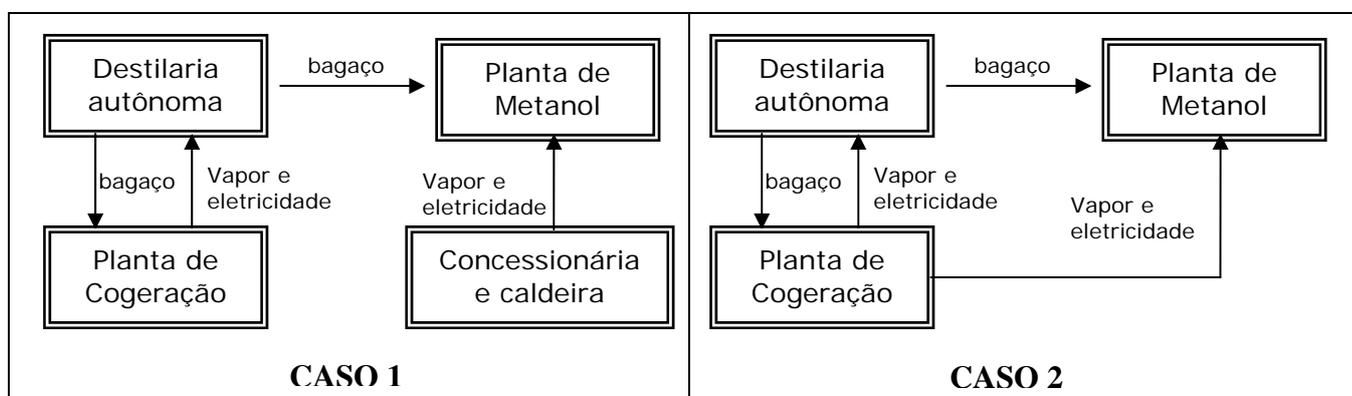
- O sistema de cogeração tem que ser do ponto de vista energético eficiente, pois há venda de eletricidade excedente ao mercado,

- As caldeiras do sistema de cogeração são limitadas à capacidade das caldeiras disponíveis no mercado

- O bagaço produzido pela moagem de cana-de-açúcar deve ser totalmente consumido (tanto pela planta de metanol, como pelo sistema de cogeração).

- A demanda de energia térmica (vapor) e elétrica das unidades produtoras deve ser totalmente atendida.

Além das características anteriormente mencionadas, este trabalho mostra em um dos estudos de caso o aproveitamento dos resíduos da colheita (principalmente a palha) juntamente com o bagaço no sistema de cogeração. Como também, aplica o conceito do sistema BIG-GT (*Biomass Integrated Gasifier / Gas Turbine*), para atender a demanda energética das plantas. A Figura 3.2 apresenta um esquema de cada estudo de caso proposto.



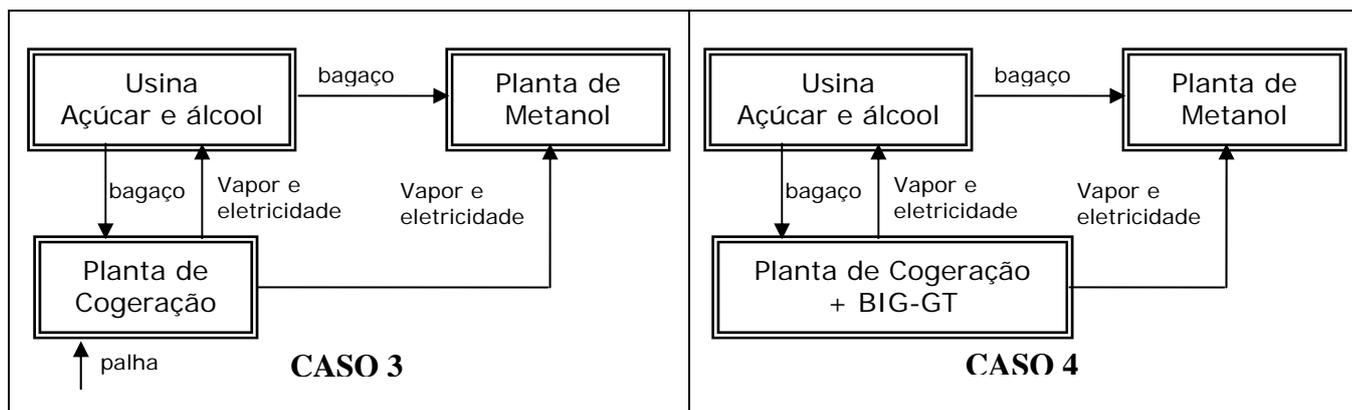


Figura 3.2 – Estudos de caso propostos para análise

Como mostra a Figura 3.2, a planta de metanol está interagindo com a unidade produtora de etanol em todos os estudos de caso, pois ela fornece o bagaço excedente a produção de metanol.

No primeiro estudo de caso considerou uma destilaria autônoma que fornece bagaço à planta de metanol e ao sistema de cogeração, este último supriu a destilaria de vapor e eletricidade, enquanto a planta de metanol é suprida dos mesmos por uma caldeira operando com combustível fóssil e por uma concessionária elétrica local, respectivamente.

Já no segundo estudo de caso, também considerou uma destilaria autônoma, assim como no estudo de caso 1, porém no estudo de caso 2 a planta de cogeração também fornece vapor e eletricidade à planta de metanol, havendo assim uma maior interação entre as duas plantas.

Para o estudo de caso 3, em vez de uma destilaria autônoma, há agora uma usina de açúcar e álcool. Neste caso, em especial houve falta de bagaço ao sistema de cogeração e à planta de metanol, pois o sistema exigia uma capacidade maior de produção de vapor pelas caldeiras, devido ao maior consumo específico de vapor de uma usina de açúcar e álcool. Assim para solucionar este problema foi proposto alimentar as caldeiras com uma mistura de palha e bagaço de cana-de-açúcar.

Já no último estudo de caso (4), há também uma usina de açúcar e álcool, com a mesma capacidade de produção que o estudo de caso 3. Porém no estudo de caso 4 o sistema BIG-GT foi aplicado com o objetivo de aumentar a produção de vapor e eletricidade excedente, e após realizar o balanço de massa e energia deste estudo, verificou que a palha de cana-de-açúcar já não era necessária para ser introduzida ao processo.

Definidos os quatro estudos de casos, estes foram avaliados sob ponto de vista termodinâmico e ambiental (aplicando índices de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica e o método de análise de impacto Eco-Indicador 99,

respectivamente). Por último foi feita uma análise exergoambiental, a qual está descrita no item a seguir:

### 3.1.3 Análise Exergoambiental

Atualmente, os trabalhos de análise de sistemas térmicos apresentados na literatura têm focado os aspectos técnico-econômicos dos sistemas térmicos, mas também ambientais. Dentre estas metodologias destaca-se a análise exergoambiental que consiste na combinação da análise exergética com a Análise do Ciclo de Vida, seguindo os princípios da Termoeconomia (Meyer *et al.*, 2009). Os principais passos desta metodologia estão ilustrados na Figura 3.3.

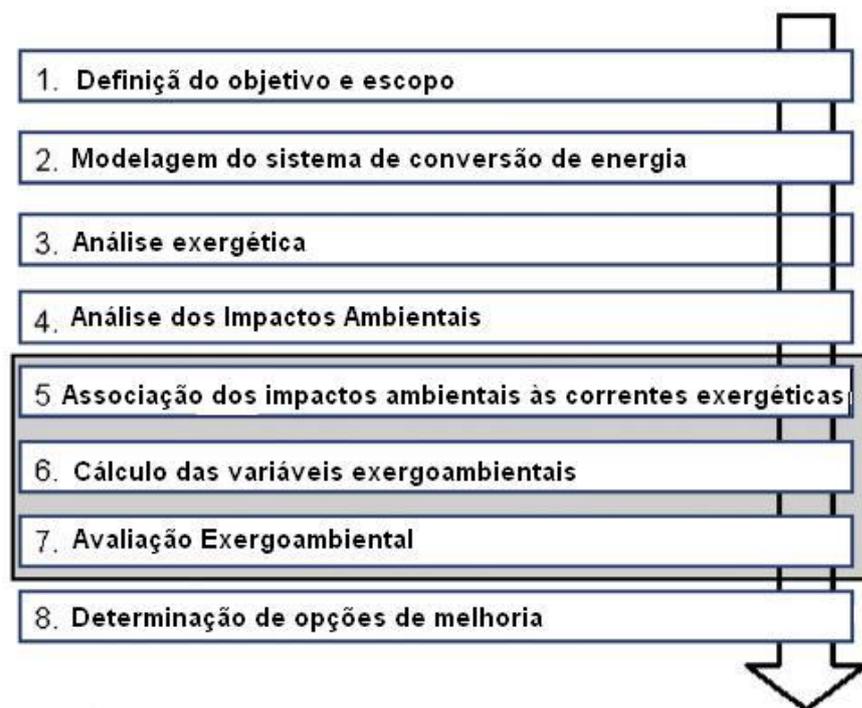


Figura 3.3 – Estrutura do método exergoambiental (Adaptada de Meyer *et al.*, 2009)

No primeiro passo da Figura 3.3 devem ser definidos as fronteiras e os equipamentos envolvidos para a análise exergética, para então determinar os valores exergéticos das correntes presentes no sistema analisado.

Para a realização do passo 4 uma análise do ciclo de vida de todo o sistema deve ser feita, incluindo o ciclo de vida de cada um dos equipamentos, para tal, pode ser aplicado o método Eco-indicador 99 (o mais utilizado na análise exergoambiental).

Determinado os impactos ambientais o próximo passo é associar os impactos ambientais às correntes exergéticas (passo 5), utilizando conceitos de termoeconomia e obtendo assim as variáveis exergoambientais (passo 6 da figura 3.9), necessárias para o passo 7 que consiste em realizar uma avaliação exergoambiental.

Desta maneira pode ser identificado o impacto ambiental correspondente a cada componente incluso no sistema térmico, como também abre a possibilidade de discutir as opções para redução deste impacto (Meyer *et al.*, 2009).

Um exemplo da aplicação desta metodologia está no trabalho Petrakopoulou *et al.* (2010), no qual foi feita uma análise econômica e ambiental de uma planta térmica operando em ciclo combinado, aplicando como ferramenta a termoeconomia e a análise exergoambiental. Os resultados apontaram que os maiores impactos ambientais são causados pelas irreversibilidades dos componentes da planta, durante a fase de operação.

O trabalho Boyano *et al.* (2010) que realizou uma análise exergoambiental numa planta de produção de hidrogênio, a partir do processo de reforma do vapor, obteve também que os impactos ambientais são causados principalmente pelas irreversibilidades do componentes do sistema, especialmente dos reatores e trocadores de calor.

Para este trabalho em específico foi seguido as etapas da Figura 3.9. Assim na etapa 2 foram modelados os estudos de caso descritos no item 3.2.3, e na etapa 4 aplicou o método Eco-Indicador 99. Quanto à etapa 5, o presente trabalho também utilizou como ferramenta a Termoeconomia para associar os impactos ambientais às correntes exergéticas do sistema, calculando assim as variáveis exergoambientais e realizando uma avaliação exergoambiental. Para maiores esclarecimentos segue os principais conceitos envolvidos numa análise Termoeconômica.

- **Termoeconomia**

A Termoeconomia é um termo proposto em 1962 por Tribus e Evans, combina a economia e a termodinâmica, aplicando o conceito de ambas, a fim de fornecer aos projetistas e operadoras informações não disponíveis numa análise energética e econômica convencional, mas que são importantes no projeto e operação de sistemas térmicos (Valero *et al.*, 2006).

A análise Termoeconômica agrega basicamente dois conjuntos de equações aos balanços de massa, energia e exergia: os balanços de custo de cada equipamento/processo e os critérios de participação de custos para os equipamentos/processos em que há mais de um produto. Segundo Tsatsaronis (1993), a análise Termoeconômica completa compreende as seguintes etapas:

- Análise exergética detalhada do sistema;
- Análise econômica detalhada dos equipamentos
- Custeio exergético
- Avaliação exergoeconômica de cada equipamento do sistema

Na Termoeconomia, aplica-se também o conceito de custo exergético ( $E^*$ ) que é definido com a quantidade de exergia requerida ( $E$ ) para produzir um determinado fluxo de massa ou energia. A partir deste conceito define-se o custo exergético unitário ( $c$ ) de uma corrente que representa a quantidade de exergia requerida para obter uma unidade de exergia do produto, podendo ser representado pela seguinte expressão:

$$c = \frac{E^*}{E} \quad (3.1)$$

Já o custo monetário ou exergoeconômico, tem em conta o custo monetário do combustível consumido  $c_F$  (seu preço no mercado R\$/MJ), assim como os custos de instalação e operação da planta,  $Z$  (R\$/s), definindo a quantidade de dinheiro necessário para produzir um determinado fluxo de massa ou energia. As equações do balanço do custo econômico podem ser escritas da forma:

$$\dot{C}_p = c_F \cdot \dot{E}_F + \dot{Z} \quad (3.2)$$

Assim como anteriormente, o custo monetário unitário de um fluxo de massa ou energia é definido como a quantidade de unidades monetárias requeridas para produzir um determinado fluxo ou produto. Podem ser representados pela expressão:

$$c_p = \frac{c_F \dot{E}_F + \dot{Z}}{\dot{E}_p} \quad (3.3)$$

De uma forma geral o balanço de custo global para todo o sistema ou para cada componente do mesmo pode ser realizado utilizando a expressão:

$$\sum_{i=IN} c_i \dot{E}_i + \dot{Z} = \sum_{j=OUT} c_j \dot{E}_j \quad (3.4)$$

Onde  $E_i$  representa a exergia dos fluxos de entrada ao sistema ou componente e  $E_j$  representa a exergia dos fluxos de saída.  $c_i$  representam os custos unitários dos fluxos de entrada e  $c_j$  representa o valor dos fluxos de saída ou produtos. Para a determinação destas variáveis, o presente trabalho utilizou como ferramenta auxiliar a estrutura física e produtiva de cada sistema térmico analisado (estudos de caso). O conceito de estrutura produtiva e física é apresentado na seqüência:

- **Estrutura física e produtiva**

Os conceitos de estrutura produtiva e física são aplicados em alguns modelos termoeconômicos obtidos na Literatura (Valero *et al.*, 2006, Santos, 2009, Escobar, 2010). Sendo que a estrutura física tem como finalidade estabelecer as propriedades características dos fluxos principais (pressão, temperatura, vazão, composição, etc), os quais permitem definir os estados termodinâmicos.

Os componentes reais de uma planta não necessariamente coincidem com os do modelo físico, pois alguns componentes do modelo físico podem englobar vários componentes reais de uma planta. A Figura 3.4 apresenta uma estrutura física de um sistema térmico composto por uma destilaria autônoma e uma planta de cogeração:

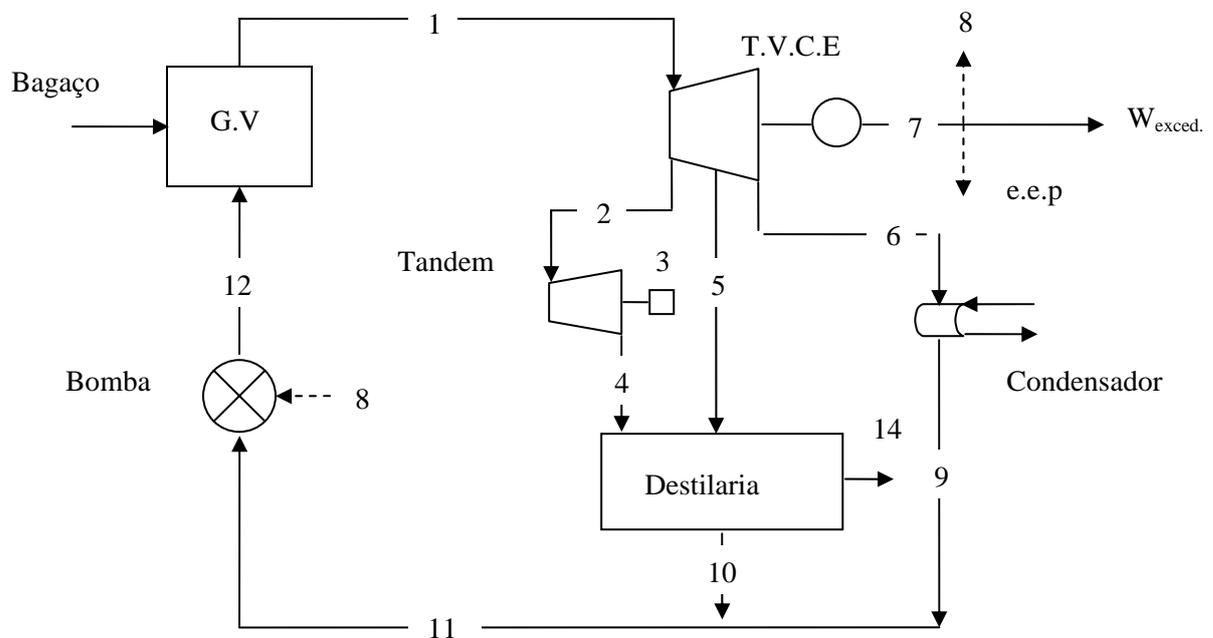


Figura 3.4 – Estrutura física de um sistema térmico (Escobar, 2010)

Determinada a estrutura física dos estudos de caso, o passo seguinte é a determinação da estrutura produtiva dos mesmos. O modelo produtivo estabelece o propósito produtivo de

cada componente do modelo físico (definições insumo-produto e a distribuição de recursos através da planta), podendo ser representado graficamente pelo diagrama da estrutura produtiva. Este é composto por unidades reais (unidades físicas ou combinação delas, representadas por retângulos) e unidades fictícias (junções e separações, representadas por triângulos/losangos e círculos, respectivamente) interligadas entre si e com as seguintes condições:

1 – Cada unidade real tem um único produto e um único insumo;

2 – As junções têm a função de converter produtos de unidades anteriores em insumos para as próximas unidades;

3 – As separações ramificam o produto de uma unidade para ser usado como insumo de duas ou mais outras unidades

Seguindo estas condições, a estrutura produtiva correspondente a estrutura física da Figura 3.4 está apresentada na Figura 3.5.

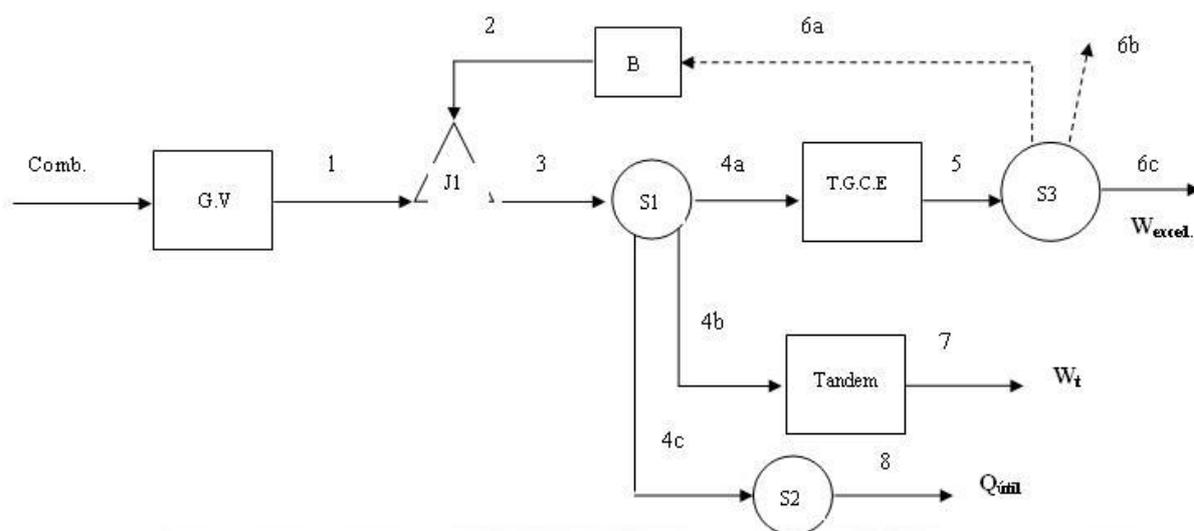


Figura 3.5 – Estrutura produtiva de um sistema térmico (Escobar, 2010)

- **Modelo matemático**

Após a definição das estruturas produtiva, a próxima etapa é formular as equações de balanço de custo monetário em cada subsistema com base nesta última estrutura. Porém como neste trabalho o foco não é alocar custos e sim impacto ambiental, as equações de balanço foram ajustadas para a idéia proposta ao presente trabalho, como mostra a equação 3.6.

$$\sum (b_j \dot{E}_j) = \dot{Y}_K \quad (3.5)$$

Onde  $b_j$  que representa o impacto ambiental associado com a produção da corrente  $j$  por unidade exergética (mPts/kJ), sendo denominado impacto ambiental específico.  $\dot{E}_j$  corresponde a taxa exergética (kJ/s) da corrente  $j$ .

No trabalho de Meyer *et al.* (2009), o termo  $\dot{Y}_K$  representa o impacto ambiental que ocorre durante as fases do ciclo de vida do equipamento ou do subsistema  $k$ , como por exemplo: construção (incluindo manufatura, transporte e instalação), operação e manutenção. Sendo o impacto ambiental determinado pelo método Eco-Indicador 99 e posteriormente dividido pelo tempo de vida útil de cada equipamento ou subsistema.

Como na literatura, existe uma escassez de base de dados para poder calcular os impactos ambientais de todos os equipamentos e subsistemas, considerou que  $\dot{Y}_K$  representa o impacto ambiental (calculado através do método Eco-indicador 99) da produção e colheita da cana-de-açúcar, dividido pelo seu tempo de crescimento (16 meses). Desta forma, o impacto ambiental da produção e colheita da cana-de-açúcar será alocado nas diferentes correntes exergéticas do sistema.

O resultado importante para este trabalho é o cálculo do impacto ambiental da exergia destruída, assumindo que a destruição de exergia é compensada pelo maior consumo de combustível para obter uma determinada quantidade de produto.

Logo, neste caso a taxa de destruição de exergia ( $\dot{E}_{D,k}$ ) é multiplicada com o impacto ambiental específico  $b_{F,k}$  associado com o combustível do equipamento ou sub-sistema  $k$ , resultando o impacto ambiental da exergia destruída (Equação 3.6).

$$\dot{B}_{D,K} = b_{F,K} \cdot \dot{E}_{D,K} \quad (3.6)$$

## 3.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Neste item estão descritas as principais características e funções dos softwares utilizados para auxiliar na elaboração do estudo de avaliação energética e de ciclo de vida pretendido neste trabalho.

### 3.2.1 Software SimaPro

O software lançado em 1990 é uma ferramenta computacional flexível e muito utilizada pelas empresas de consultoria e universidade. Atualmente há cerca de 1000 licenças de usuários em 50 países. O SimaPro segue as normas estabelecidas pela ISO 14040-14041-14042-14043, seguindo os princípios básicos da estrutura do ACV: Objetivo, escopo, inventário, avaliação do impacto e finalmente a interpretação (todos descritos no capítulo 2).

Este software funciona basicamente como uma máquina de calcular que efetua adições e subtrações, e consiste num poderoso instrumento auxiliar na avaliação do impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida.

O programa tem dois componentes principais: uma base de dados de inventário, e uma base de dados de avaliação. Ambas as bases de dados já contêm muita informação, mas podem ser expandidas, modificadas e criadas pelo utilizador, como mostrado na interface gráfica do programa na Figura 3.6:

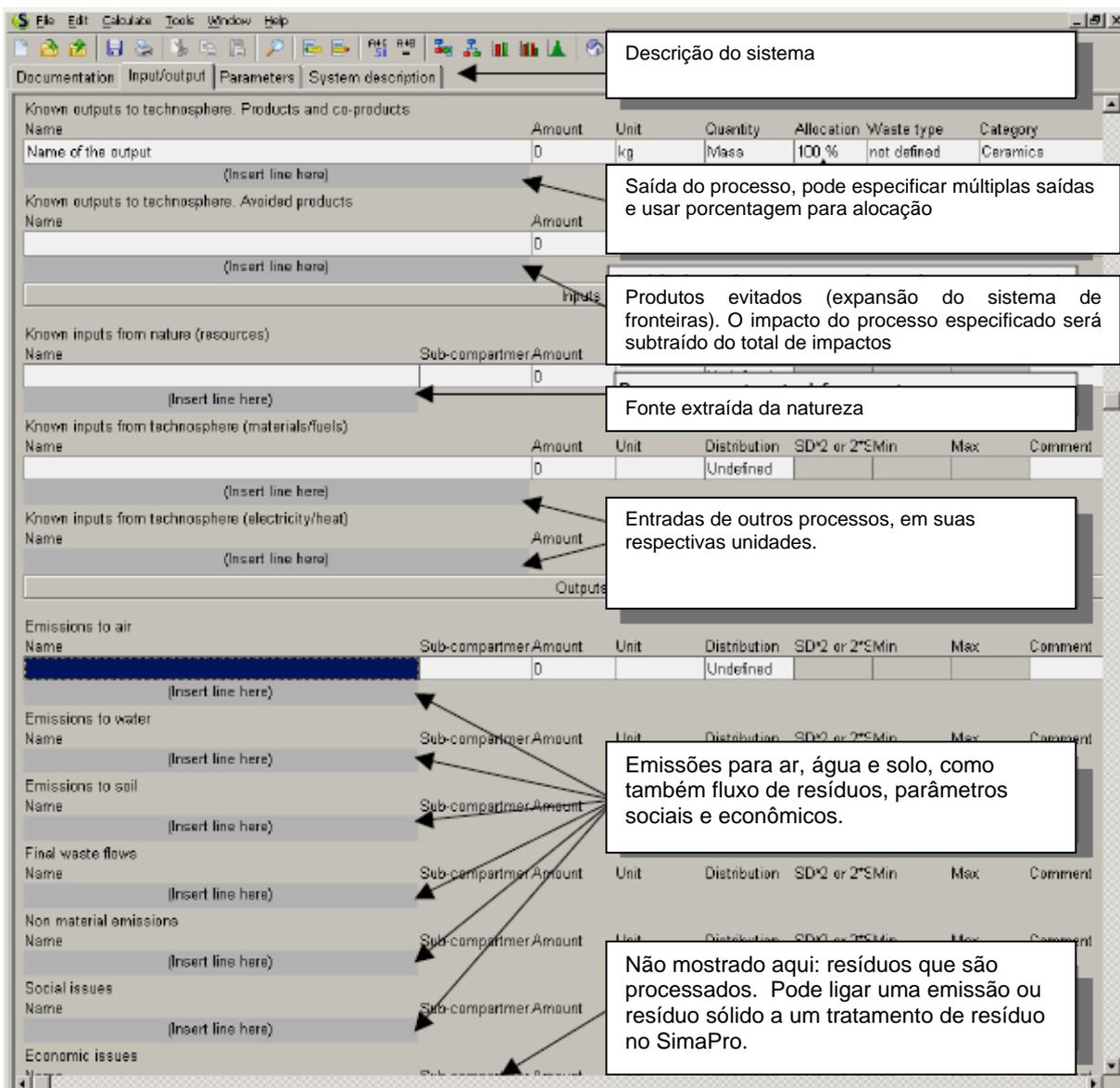


Figura 3.6– Criação de uma base de dados para um determinado processo no SimaPro.

A informação no SimaPro encontra-se organizada em projetos, os quais podem incluir diversos ciclos de vida de um ou vários produtos e cujos processos podem ser extraídos das várias bases de dados disponíveis no programa, que se encontram organizadas em: materiais, energia, transportes, processamento, uso, cenário de resíduos e tratamento de resíduos. A seguir estão listadas algumas bases de dados encontradas no SimaPro 7 (versão utilizada neste trabalho) (SimaPro 7, 2004):

- **ECOINVENT DATA** - Esta base de dados é constituída de aproximadamente 4.000 processos nos seguintes setores industriais: Energia, transporte, construção de materiais, químicos, papel, agricultura e tratamento de resíduos. A autoria da base de dados é do Centro Suíço para Inventário de Ciclo de Vida (*Swiss Centre for Life Cycle Inventories*).

- **BUWAL 250** – Esta base de dados foi desenvolvida pelo BUWAL (Gabinete Suíço de Proteção Ambiental) para apoiar a avaliação do eco-perfil na Suíça. Em 1990 o Instituto Técnico Federal Suíço modernizou e expandiu a base de dados, focando: Materiais de embalagem (plástico, cartão, papel, vidro, folha de flandres e alumínio), energia, transportes e tratamento de resíduos.

- **FRANKLIN US** – Esta base de dados foi desenvolvida pela empresa Franklin Associates, nos Estados Unidos. O foco dela é nos seguintes setores: energia, transportes, aços, plásticos e processos diversos.

Em relação aos métodos de avaliação de impacto ambiental, o software apresenta todos os métodos apresentados no Capítulo 2, além de outros, com uma apresentação dos resultados da avaliação em gráficos, tabelas ou redes como mostrados na Figura 3.7.

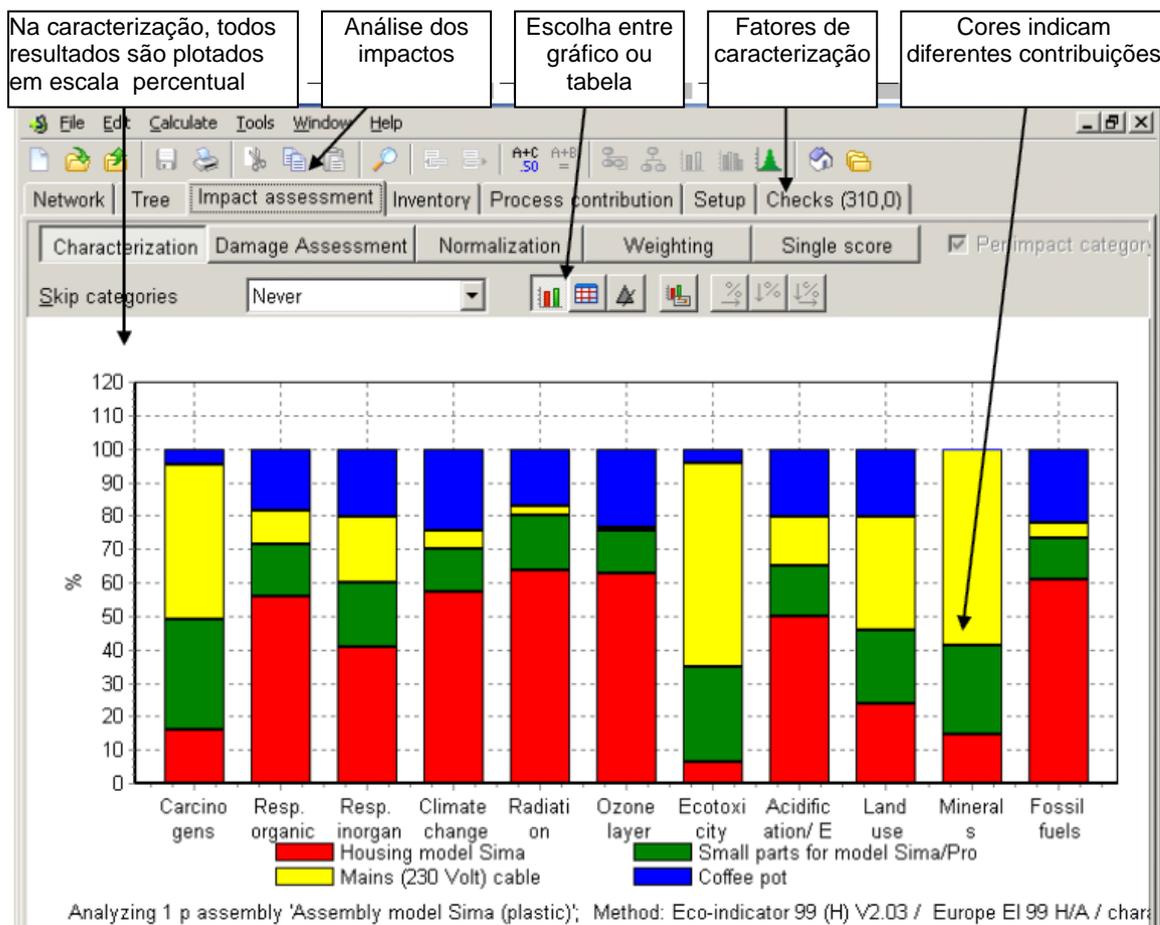


Figura 3.7 – Apresentação dos resultados para avaliação de impactos no SimaPro 7.

### 3.2.2 Software GateCycle

O software GateCycle é uma ferramenta computacional que permite calcular o desempenho termodinâmico para plantas com ciclos combinados, plantas com caldeiras,

sistemas de cogeração, ciclo avançados com turbina a gás e muitos outros sistemas energéticos.

Este software foi desenvolvido pela empresa Enter Software Inc. da GE, e tem a vantagem de interagir com o usuário em uma interface intuitiva e gráfica, com modelos analíticos detalhados para análise de processos termodinâmicos, de transferência de calor e mecânica dos fluídos, para configurações complexas ou não de sistemas térmicos.

Complementando, uma ampla variedade de plantas (ou esquemas térmicos) pode ser modelado usando o software GateCycle, permitindo assim projetar e analisar o rendimento de qualquer esquema térmico que o usuário constrói a partir das ferramentas do ambiente gráfico e dos diferentes ícones de equipamentos disponíveis. O software também permite calcular o efeito de:

- Mudanças no tipo de combustível;
- Variação das condições ambientais;
- Variações nas pressões de operação;
- Operação com carga parcial;
- Perdas de pressão;
- Extração e injeção de vapor no sistema.

Com respeito às ferramentas presentes no ambiente gráfico do software, estão disponíveis: turbina a vapor, turbina a gás, trocadores de calor, caldeiras, economizadores, superaquecedores, condensador, bombas, válvulas, ejetores, tubulações, torres de resfriamento, ventiladores, geradores de energia elétrica e outros equipamentos.

Dois exemplos de como é feita a modelagem de um esquema térmico estão apresentados na Figura 3.8 e 3.9:

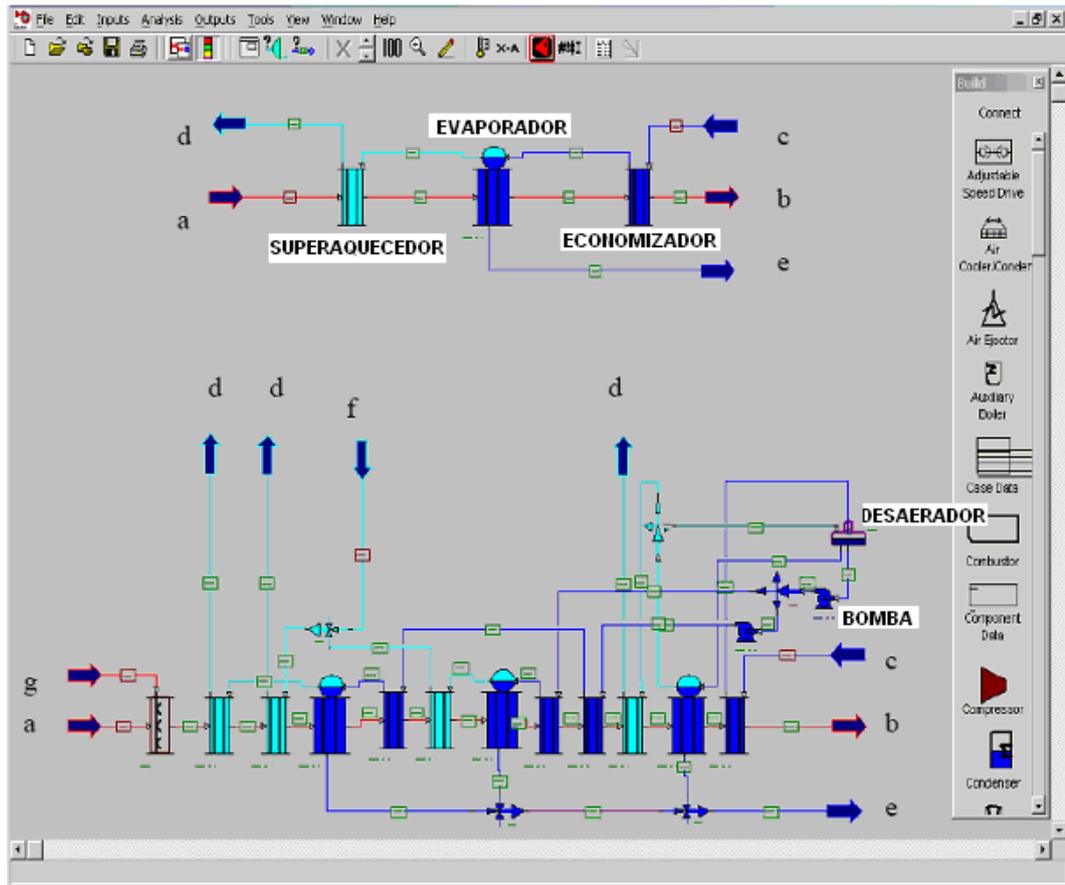


Figura 3.8 – Modelagem de uma caldeira de recuperação utilizando o software GateCycle

Na Figura 3.8 está apresentado um modelo para uma caldeira de recuperação que é composta por trocadores de calor, classificados em: economizadores, evaporadores e superaquecedores, que obedecem a equações de transferência de calor, balanço de energia, balanço de massa e perda de carga. Equipamentos auxiliares também podem estar no modelo de uma caldeira de recuperação como desaerador, bombas, junções, separações, etc.

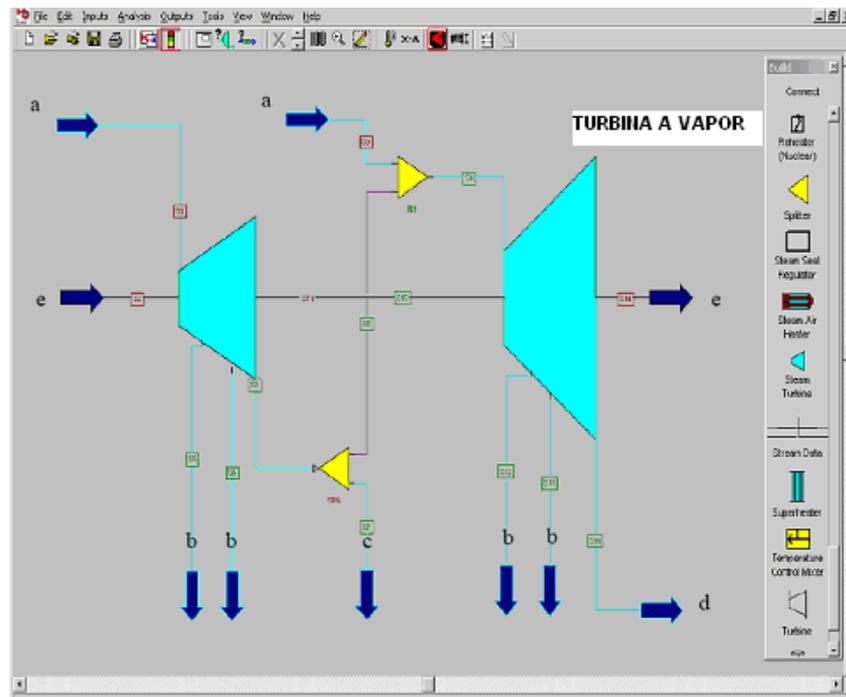


Figura 3.9 – Modelagem das seções de uma turbina a vapor utilizando o software GateCycle

Na Figura 3.9 está apresentada uma modelagem da turbina a vapor no Gate Cycle, pode ser observado que foram utilizadas duas seções conectadas entre si e que podem ser ligadas a um gerador elétrico. O esquema também apresenta extrações de vapor (“b”) que podem ser consumidas em um processo qualquer.

### 3.2.3 Software CSFMB

O software CSFMB (Comprehensive Simulator for Fluidized and Moving Bed Equipment) é um programa de modelagem matemática e de simulação de equipamentos como: fornalha, caldeira, reator e gaseificadores. A tecnologia de cada equipamento pode ser de leito fixo, fluidizado, circulante ou borbulhante (Souza-Santos, 2004).

Quanto à modelagem matemática realizada pelo programa, estão envolvidas as fases físicas, reações químicas, dinâmica de cada fase, transferência de massa e calor, todos ocorridos internamente a um determinado tipo de equipamento.

Assim, o software fornece informações como:

- Concentração e fluxo de massa dos componentes gasosos (Ar, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, alcatrão);
- Concentração, fluxo de massa, distribuição de partículas de todas as espécies de sólidos no leito;

- Temperatura dos gases e dos sólidos produzidos;
- Todos os parâmetros relacionados à fluidização dinâmica em cada ponto do leito, tais como tamanho das bolhas e velocidades, fluxo mássico de cada fase, taxa de circulação de partículas, e outros;
- Perdas de pressão no leito;
- Parâmetros típicos de engenharia, tal como: eficiência, perdas de calor, temperatura adiabática de chama, composição das correntes gasosas e outros.

A seguir está ilustrado na Figura 3.10, a interface gráfica do programa CSFMB, onde são colocadas as principais entradas do processo a ser simulado, e na Figura 3.11 a interface de apresentação dos resultados.

File View Run Window

Input Output OUT Close Exit Run Input... Output...

**Case Identification:**

Title (TITLE)

Subtitle (TITLE2)

**Print Control Parameters**

Print intermediate details (1) or not (0)

**Numerical Convergence Parameters**

Guessed minimum fractional conversion of fixed-carbon in the bed (CCMINP)

Guessed maximum fractional conversion of fixed-carbon in the bed (CCMAXP)

Convergence criterion for the convergence of fixed-carbon in the bed (CCDEVP)

Guessed % conversion of absorbent in the bed (ABSCP)

Guessed % conversion of volatiles in the bed (VOLCP)

Maximum deviation (%) for the convergence of other fractions but fixed-carbon (AVDEVP)

Guessed temperature, K (TGUESS)

Convergence criterion for the numerical integration of mass and energy (TOLMB)

ICONV(1) ICONV(2) ICONV(3) ICONV(4) ICONV(5) ICONV(6)

Auxiliary convergence parameters (ICONV)

DUMP(1) DUMP(2) DUMP(3) DUMP(4) DUMP(5) DUMP(6)

Auxiliary convergence parameters (DUMP)

MAXNIT MAXNCV

Maximum numbers of iterations for carbon and volatile conv.

**Equipment Data - Class Description**

Operating Mode (IGASF)

Equipment type (IEQUIP)

Figura 3.10 – Interface gráfica do programa CSFMB para os dados de entrada

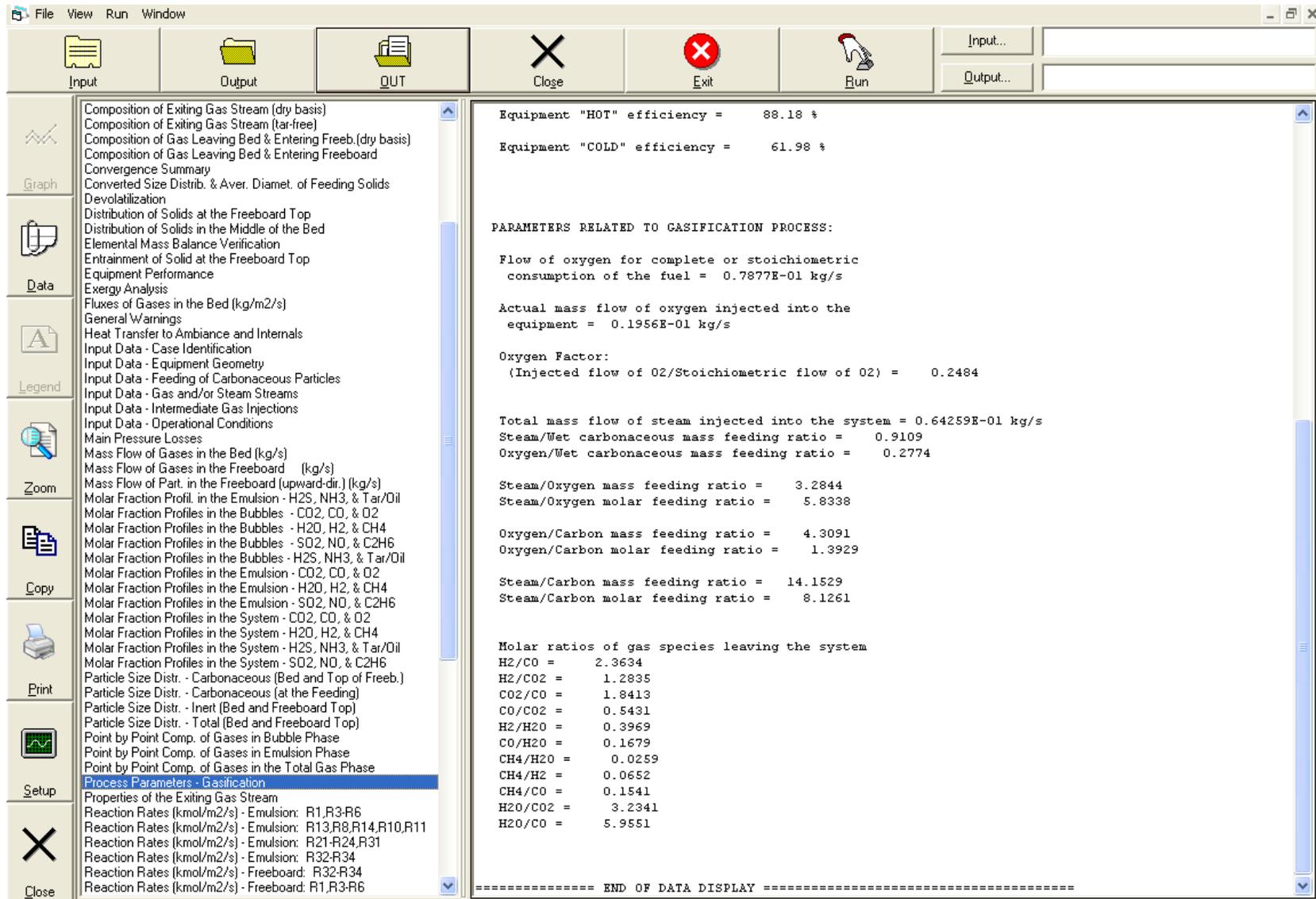


Figura 3.11 – Interface gráfica do programa CSFMB de apresentação dos resultados

## I – Casos de simulação (Souza-Santos, 2004)

O software também apresenta uma biblioteca com vários casos de simulação, que podem ser utilizados não somente para exemplificar os parâmetros de entrada apropriados, mas também apresentar os resultados obtidos. Os principais casos estão listados a seguir:

**Caldeira\_2MW\_ABF**. Esta é uma caldeira piloto de leito fluidizado borbulhante, com uma entrada de combustível média de 2MW e operando a uma pressão atmosférica.

**Caldeira\_1000MW\_PBF**. Esta é uma caldeira de grande escala, de leito fluidizado borbulhante pressurizado. A pressão no leito é de 1,3 MPa, e a entrada de combustível é de 1060 MW. A produção de vapor superaquecido é de aproximadamente 360 kg/s.

**Secador\_ABF\_400**. Este é um teste de simulação de um secador leito fluidizado borbulhante atmosférico que opera sob bagaço de cana-de-açúcar.

**Secador\_ACFB\_400**. Este é o caso de um secador de leito fluidizado circulante atmosférico, no qual o bagaço de cana-de-açúcar é seco com nitrogênio injetado a 400 K.

**Gaseificador\_ACFB\_Biomassa-01**. Esta é uma simulação de um teste real de gaseificação de biomassa de leito fluidizado circulante atmosférico. O teste experimental foi feito na *University of British Columbia* (Canadá), com a colaboração do *National Laboratory of Coal Combustion* (China).

**Gaseificador\_PBF\_madeira-T12-1**. Aqui trata-se de um gaseificador piloto de madeira, que opera com oxigênio e vapor puro. Os dados para o teste foram extraídos da literatura, especificamente do processo RENUGAS<sup>®</sup>.

## Capítulo 4

# INVENTÁRIO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE METANOL

No presente capítulo está apresentado o Inventário do Ciclo de Vida do processo de produção de metanol, a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

### 4.1 CULTIVO E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma planta pertencente ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, composta pelos colmos, nos quais se concentra a sacarose, e pelas pontas e folhas, que constituem a palha da cana, como ilustra a Figura 4.1

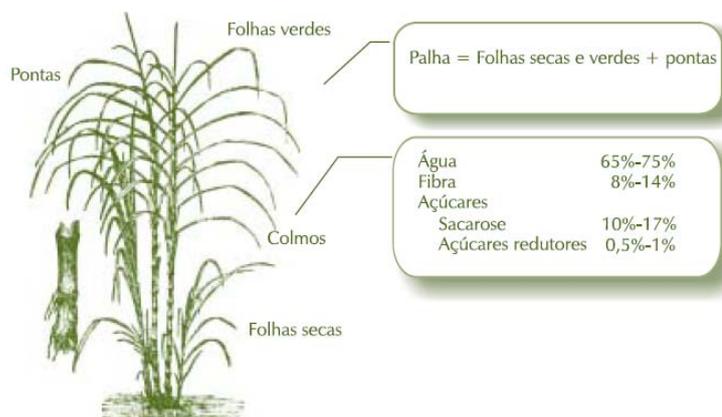


Figura 4.1 – Estrutura típica da biomassa cana-de-açúcar (Nogueira, 2008)

O clima adequado para o cultivo da cana é aquele que apresenta duas estações distintas: uma quente e úmida, para proporcionar a germinação, formação de brotos e o desenvolvimento vegetativo, seguida de outra estação fria e seca que promove a maturação e o acúmulo de sacarose nos colmos.

Quanto ao ciclo completo da cana-de-açúcar, ele é variável, dependendo do clima local e de outras variáveis, como as práticas culturais. O ciclo é geralmente de seis anos, dentro do qual cinco cortes são realizados. O primeiro corte é feito de 12 ou 18 meses após o plantio, colhendo a denominada cana-planta. Os demais cortes, colhe-se a chamada cana-soca resultante da rebrota, realizando este processo uma vez por ano, ao longo dos quatro anos consecutivos. Após este período é mais interessante realizar uma reforma no canavial, no qual a área fica alguns meses em descanso e pode receber outros cultivos de ciclo curto, como leguminosas (Nogueira, 2008). De forma geral, pode-se dividir o cultivo da cana-de-açúcar nas seguintes etapas:

## **1 - Preparo do solo**

O preparo do solo é realizado em 100% do total de área agrícola destinado à produção cana-de-açúcar. Ele visa à melhoria das condições físicas e químicas para garantir a brotação, o crescimento radicular e o estabelecimento da cultura. Por isto, é feita uma correção do solo como calagem, gessagem e fosfatagem, que propiciarão boas condições para o crescimento radicular e o controle das plantas daninhas (EMPRAPA, 2011)

Esta etapa é altamente mecanizada, na qual se aplicam equipamentos mecânicos agrícolas (tratores), os quais apresentam um consumo específico de diesel de 4,49 l/ha (Macedo *et al.*, 2008).

## **2 - Plantio do canavial**

O plantio do canavial é considerado uma extensão do preparo do solo, podendo ser realizado de forma manual ou mecanizado. Apesar de haver uma forte tendência para a mecanização do plantio, atualmente no Brasil predomina o plantio manual.

O plantio manual envolve equipamentos como os caminhões (necessários para transportar a cana a ser plantada), os tratores com sulcadores e aplicadores de agrotóxicos, além dos ônibus para transportar os trabalhadores.

Pelos dados primários do trabalho Ometto (2005), o consumo de diesel pelos tratores é de aproximadamente de 35 l /ha cultivado. Em relação aos caminhões que transportam a cana,

esses consomem em média 43,12 l diesel / ha cultivado. Já com respeito à produtividade atual da cana-de-açúcar, considerou um valor médio calculado de 87 t cana /ha cultivado (Macedo *et al.*, 2008)

Por tais razões o uso do solo é uma variável importante a ser analisada na análise do ciclo de vida do presente trabalho. Assim a ocupação do solo foi considerada como permanente por cinco anos e situada no sudeste do Brasil, estimando que 0,97 % da terra foram convertidas de uma área arbórea, para uma cultura de cana-de-açúcar (Jungbluth, 2007). A tabela 4.1 apresenta os valores considerados de uso do solo para cana-de-açúcar.

Tabela 4.1 – Uso do solo para cultivo da cana-de-açúcar (Jungbluth, 2007).

<b>Uso do solo</b>	<b>Por kg cana</b>
Transformação de solo arável, para solo não irrigado (m <sup>2</sup> )	1,49 x 10 <sup>-1</sup>
Transformação de solo com área arbórea (m <sup>2</sup> )	1,46 x 10 <sup>-3</sup>

A última característica desta etapa, é a quantidade de dióxido de carbono absorvido pela cana durante seu crescimento para a realização da fotossíntese, para tal informação, estabeleceu uma relação que para cada 66 kg de cana-de-açúcar, são absorvidos 41 kg de CO<sub>2</sub>, como em Beeharry (2001).

### **3 – Tratos culturais**

A agricultura brasileira em geral não se caracteriza por um uso intenso de fertilizantes, embora tenha passado por um período de grande expansão nas últimas décadas e atingindo alto nível de competitividade nos mercados externos. Em termos de consumo total, o Brasil apresentava em 2002 um consumo anual de 7,68 Mt, cerca de 5,4 % do total mundial.

Um dos possíveis impactos do uso de fertilizante é afetar a qualidade da água. Porém, isto depende das condições do uso, por exemplo, na adubação com nitrogênio, solos mais arenosos, irrigados e com lençol de água raso são mais vulneráveis à contaminação por nitratos. Já o potencial do nitrogênio para atingir e contaminar a água depende ainda da quantidade usada, da utilização pela planta, do nível de nutrientes no solo e na matéria orgânica e do clima.

No caso da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, uma das características importantes é o reciclo integral dos resíduos para o campo. Com o aumento da produção de etanol, foi necessário dar destino a um resíduo gerado durante a produção do mesmo, que é vinhaça, um

resíduo líquido rico em potássio e matéria orgânica. A solução para tal foi a aplicação dela nas lavouras, o que levou a bons resultados.

Há usinas que já aplicam vinhaça em 70% de sua área de cultivo, e a cada safra o valor desta área aumenta, buscando o uso racional da vinhaça e a maior produtividade agrícola e a redução de fertilizantes químicos. Isto tem levado a aplicação de doses cada vez menores ( $m^3/ha$ ), distanciando-se de valores que poderiam trazer danos (salinização, contaminação do lençol freático) (Macedo, 2007). Os valores médios de fertilizantes químicos, vinhaça e pesticidas aplicados na lavoura de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Insumos aplicados no cultivo da cana-de-açúcar (Jungbluth, 2007)

Insumo	kg/kg cana
Sulfato de Amônio como N	$1,33 \times 10^{-4}$
Uréia como N	$3,98 \times 10^{-4}$
Fosfato nitrato de amônio como N	$1,33 \times 10^{-4}$
Fosfato diamônico como N	$1,58 \times 10^{-4}$
Nitrato de potássio como N	$8,30 \times 10^{-6}$
Fosfato diamônico como $P_2O_5$	$3,46 \times 10^{-4}$
Superfosfato como $P_2O_5$	$2,23 \times 10^{-4}$
Triplo superfosfato como $P_2O_5$	$1,23 \times 10^{-4}$
Fosfato	$3,85 \times 10^{-5}$
Cloreto de potássio como $K_2O$	$1,63 \times 10^{-3}$
Sulfato de potássio como $K_2O$	$1,66 \times 10^{-5}$
Nitrato de potássio como $K_2O$	$1,66 \times 10^{-5}$
Pesticidas	$7,17 \times 10^{-5}$
Vinhaça	1,5083
Cal	$5,20 \times 10^{-3}$

Pode ser observado a partir da Tabela 4.2 que há um consumo alto de Cal, que é necessária para a neutralização do pH do solo. Outro aspecto desta etapa é que a aplicação de alguns dos insumos da Tabela 4.2 é realizada por caminhões-tanque, que consomem em média 25 l diesel/ha cultivado e a unidade estabelecida de caminhões-tanque envolvidos na distribuição é de 343 tkm (toneladas por km)/ha.

#### 4 – Colheita e transporte da cana-de-açúcar

Neste trabalho considerou que o processo de colheita de cana é realizado de forma manual, já que é o predominante no Brasil. Neste processo incluem-se operações simples

como corte da base e o empilhamento dos colmos. A cana pode ser colhida da forma queimada ou crua. A forma queimada é para facilitar o corte manual, pois se eliminam palha e folhas presentes na cana e garante maior rendimento, por isto, a realização das queimadas ocorre em aproximadamente 75% da área cultivada no Brasil (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Exemplo da colheita manual da cana-de-açúcar queimada

Contudo, esta concepção de colheita está sofrendo modificações em função de restrições legais e ambientais ao processo de queima. Perfila-se então um novo conceito de mecanização da colheita da cana, sem queima prévia, que visa o aproveitamento integral da planta, envolvendo operações adicionais para a retirada das folhas e a disposição de colmos para o transporte.

Quanto ao transporte da cana, este é feito predominantemente no Brasil por caminhões de carga pesada (Figura 4.3), cuja capacidade de carga pode alcançar 20 toneladas. Normalmente os canaviais encontram-se a uma distância de 20 km da usina, logo esta é a distância a ser percorrida pelos caminhões que transportam a cana-de-açúcar.

Outra característica é que estes caminhões apresentam baixos rendimentos, percorrendo 1,08 km/l diesel consumido, assim com os valores assumidos anteriormente pode-se dizer que o consumo específico de diesel é de aproximadamente 0,93 l / tonelada de cana transportada, para um trajeto de 20 km.



Figura 4.3 – Exemplo de caminhão para transporte da cana-de-açúcar

## Emissões

O cultivo de cana-de-açúcar produz emissões tanto para a atmosfera quanto para a água, principalmente devido às operações agrícolas realizadas pelos tratores e pelos caminhões de carga pesada que transportam a cana. Os principais poluentes atmosféricos emitidos pelos tratores agrícolas e caminhões de carga pesada estão apresentados na Tabela 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Principais poluentes emitidos pelos tratores agrícolas (Wang *et al.*, 2003).

Poluentes	Valor kg/l diesel consumido
CO <sub>2</sub>	2
HC	0,0065
CO	0,018
NO <sub>x</sub>	0,045
PM10	0,0047
SO <sub>x</sub>	0,0032

Tabela 4.4 – Principais poluentes emitidos por veículos de carga pesada (Lloyd e Cackette, 2003)

Taxas de emissão de um veículo de carga média e pesada (g/km)		
CO <sub>2</sub> (935)	CO (1,76)	
NO <sub>x</sub> (7,69)	Particulados finos (0,185)	
Emissão dos componentes dos particulados finos (g/km)		
Carbono orgânico (0,0364)	Carbono (0,057)	
Nitrato (0,0004)	Amônia (0,0013)	
Silício (0,0012)	Sulfato (0,00185)	
Taxas de emissões de fase gasosa, semi-voláteis, e compostos orgânicos (mg/km)		
Gases orgânicos	Gases orgânicos semi-voláteis	Compostos orgânicos
Alcanos (15,8)	PAHs (hidrocarbonetos aromáticos poli-cíclico) (1,8)	Ácidos alcalóides (0,4)
Olefinas (17,3)	Ácidos aromáticos (2,0)	Carbono (56)
Aromáticos (14,1)		
Formaldeído (22,3)		
Acetaldeído (41,8)		
Propanal (14)		
Acetona (22)		

Nota-se na Tabela 4.4 a quantidade elevada de CO<sub>2</sub> emitida pelo veículo de carga média e pesada, por outro lado, em quantidades menores tem-se uma grande variedade de particulados finos, semi-voláteis e compostos orgânicos.

Outras emissões importantes e consideradas neste trabalho foram às originadas da realização das queimadas, do processo de desnitrificação (fenômeno de transformação de nitratos e outras substâncias em gás nitrogênio (N<sub>2</sub>) pela ação de bactérias desnitrificantes) e da volatilização da amônia, que ocorre pela aplicação de fertilizantes (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Emissões provenientes do cultivo e queimadas (Macedo *et al.*, 2008)

<b>Emissões produzidas pela prática de queimadas</b>	
(kg/ha)	
N <sub>2</sub> O (0,5)	CH <sub>4</sub> (8,4)
NO <sub>x</sub> (31,1)	SO <sub>x</sub> (3,9)
	<sup>(a)</sup> NMVOC (19,1)
<b>Emissões originárias da desnitrificação e volatilização da amônia</b>	
(kg/ha)	
N <sub>2</sub> O (17)	Amônia (4,5)
NO <sub>x</sub> (28,4)	

(a) Compostos Orgânicos Voláteis exceto metano

Quanto os principais poluentes emitidos para água de uma cultura de cana-de-açúcar são fósforo e nitrato. A quantidade aproximada emitida de cada um deles está apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Emissões para água provenientes do cultivo da cana (Nemecek, 2004)

<b>Poluente</b>	<b>kg / kg cana-de-açúcar</b>
Fósforo	4,1 x 10 <sup>-6</sup>
Nitrato	2,1 x 10 <sup>-5</sup>

## 4.2 MANUSEIO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar que chega à unidade industrial é processada o mais rápido possível, pois a cana é uma matéria-prima sujeita a contaminações e conseqüentemente de fácil deterioração. Por isto, a prática de estoque de cana não é recomendada, e além do problema de

contaminação da cana, esta pode sofrer com ressecamento do colmo, inversão da sacarose em glicose e frutose, reduzindo assim o valor do caldo que for destinado à produção de açúcar.

Logo, a descarga da cana-de-açúcar é feita diretamente numa mesa alimentadora da moenda, passando primeiro num processo de lavagem para a retirada da terra proveniente da lavoura. O consumo de água é de aproximadamente  $5,33 \text{ m}^3 / \text{t cana}$  (FIESP, 2001).

Seguida a etapa de lavagem, vem o preparo da cana, com o objetivo de desintegrá-la, de modo a facilitar a extração do caldo. Além disso, o preparo é importante para incrementar a capacidade das moendas, pelo aumento da densidade da cana, que fica mais compacta e homogênea.

Atualmente, na indústria sucroalcooleira, os equipamentos mais utilizados no preparo da cana são as facas rotativas, seguida dos desfibradores. As facas rotativas proporcionam a regularização e uniformização da cana, formando uma massa homogênea e uniforme. Os desfibradores (Figura 4.4) têm por objetivo destruir por completo a estrutura da cana, dando um ganho significativo na extração do caldo.

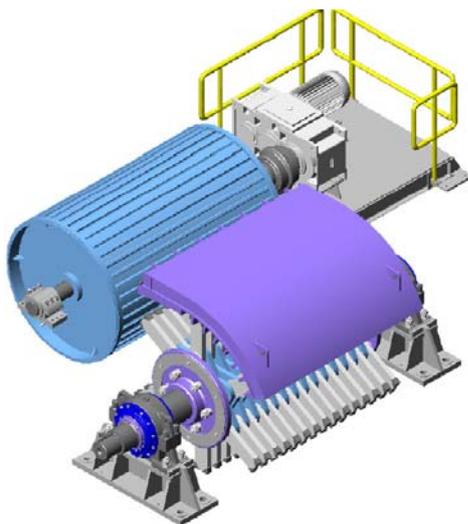


Figura 4.4 – Esquema de um desfibrador (Caltarosso, 2008)

Na Figura 4.4 apresenta um desfibrador composto por um tambor alimentador que força a passagem da cana para a placa desfibrosa que está fixada acima do rotor.

### 4.3 EXTRAÇÃO DO CALDO

A extração do caldo de cana é tradicionalmente realizada pelo processo de moagem, empregando tandens de moendas para extrair o máximo de sacarose da cana. O tandem de

moendas é um equipamento utilizado na moagem, podendo ser composto de 4 até 7 ternos de moenda. A moenda é uma unidade esmagadora constituída, basicamente, por ternos, cada um deste é formado por 3 cilindros dispostos de tal modo que a união de seus centros forma um triângulo isóscele (Figura 4.5).

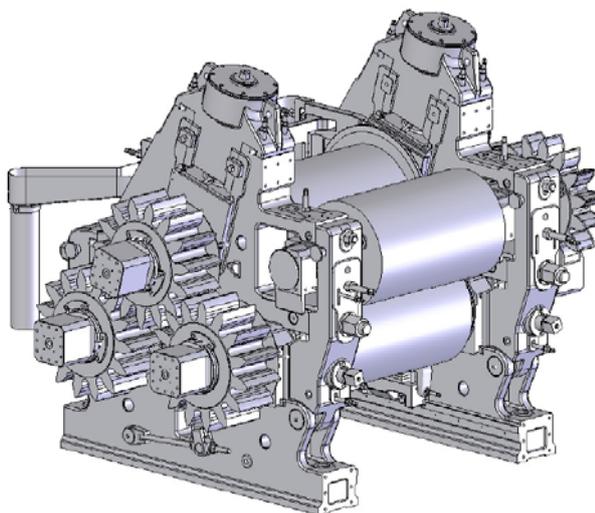


Figura 4.5 – Esquema de um terno de moenda (Caltarosso, 2008)

Para aumentar a extração da sacarose, realiza-se um processo denominado de embebição, no qual adiciona água ao bagaço sob a forma de aspensão, jatos fortes ou lençol de água, com a finalidade de diluir o caldo remanescente no bagaço, aumentando a extração de sacarose que pode alcançar 94 a 97%, com bagaço apresentando uma umidade de 50%. A quantidade de água utilizada na embebição está em função de vários fatores, entre os quais se destacam:

- Fibra da cana: cana com alto teor de fibra requer uma taxa de embebição maior
- Açúcar na cana: Cana rica em açúcar é bem aproveitada utilizando maiores volumes de água.

De forma geral a extração do caldo na moagem apresenta um consumo médio de energia mecânica de 16 kWh/ t cana e de 250 kg vapor/ t cana (Camargo, 1990 e Nogueira, 2008).

O resultado da moagem da cana é a obtenção do bagaço e do caldo de cana, sendo que o primeiro é destinado à cogeração e à produção de metanol, enquanto o segundo é encaminhado para a produção de açúcar e etanol.

Quanto a quantidade obtida de cada produto, estima que o índice de produção de bagaço pode chegar a 280 kg por tonelada de cana moída, já o caldo de cana alcança a uma taxa de

produção de 1020 kg / t cana, incluindo uma quantidade de 300 kg de água de embebição (Bassetto, 2006, Macedo *et al.*, 2008).

## 4.4 PRÉ-TRATAMENTO E GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO

A etapa de pré-tratamento é importante para que o bagaço esteja em condições adequadas ao processo de gaseificação. Segundo Rocha (2008), o processo mais apropriado é o denominado peletização, que constitui a densificação energética da biomassa.

A densificação é importante para homogeneizar os resíduos vegetais, secar e condensar a energia dos resíduos; formando assim os *pelletes*, apresentados na Figura 4.6, que estão livres de pó (reduzindo os riscos de explosão); são uniformes (permite melhor controle da combustão); e facilitam o transporte e estocagem.



Figura 4.6 – *Pelletes* de biomassa (Rocha, 2008)

Para alcançar a densificação energética do bagaço, operações como picagem, moagem e peneiração são necessárias. A última operação é de compactação, na qual aumenta a densidade aparente do material e uniformiza o tamanho da partícula. O principal consumo deste processo é de eletricidade, aproximadamente 85 kWh / t bagaço (Rocha, 2008). Já os resíduos produzidos nesta etapa e demais consumos não são significativos, logo não foram considerados neste trabalho.

Finalizada a etapa de pré-tratamento, o bagaço está em condições de passar pelo processo de gaseificação. Este apresenta algumas características específicas, como por exemplo, o tipo de gaseificador (pressurizado de leito fluidizado borbulhante) e o agente gaseificante (vapor e oxigênio). A justificativa da escolha de ambos se deve à composição química do gás de síntese produzido, considerada adequada à síntese de metanol.

Para obter os principais dados de entrada e saída do processo de gaseificação, foi feita uma simulação computacional no software CSFMB do processo de gaseificação pressurizada

do bagaço em leito fluidizado borbulhante, operando com os agentes: oxigênio e vapor. Os princípios de funcionamento e aplicações do software estão descritos no capítulo 3, e os principais dados de entrada do processo estão apresentados na Tabela 4.7. Já as principais características do bagaço utilizado na simulação computacional estão apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Dados de entrada do processo de gaseificação do bagaço

<b>Fluxo de bagaço (kg/s)</b>	0,071
<b>Vapor (kg/kg de bagaço)</b> (temperatura 435°C e pressão 2,27 MPa)	0,91
<b>Oxigênio (kg/kg de bagaço)</b> (temperatura 372°C e pressão 2,27 MPa)	0,28

Tabela 4.8 – Características do bagaço de cana-de-açúcar (Mendoza, 2009)

<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	485
<b>PCI (MJ/kg) – base seca</b>	7,56
<b>Composição do bagaço (base úmida)</b> (% massa)	
Umidade	20
Voláteis	65,24
Carbono Fixo	12,11
Cinzas	2,50
<b>Composição química do bagaço (base seca)</b> (% massa)	
Carbono	49,66
Hidrogênio	5,71
Nitrogênio	0,21
Oxigênio	41,08
Enxofre	0,03
Cinzas	3,31

Outros dados de entrada do processo referem-se ao consumo energético do sistema de limpeza de gases, neste caso composto por ciclone e filtros. Além do sistema de fornecimento de oxigênio, constituído por uma planta que produz oxigênio pelo processo de criogenia.

Quanto ao sistema de limpeza, segundo Quaack *et al.* (1999) o consumo de eletricidade do mesmo, composto por filtros e ciclones é de 0,3 kWh / 1000 m<sup>3</sup> gás e 0,2 kWh / 1000 m<sup>3</sup> gás, respectivamente. Já o processo de produção de oxigênio por criogenia, o qual consiste em etapas de compressão e refrigeração do mesmo, apresenta um consumo elétrico de 1,1 kWh / kg de oxigênio produzido.

Já os dados de saída do processo de gaseificação do bagaço têm-se principalmente os relacionados com as emissões provenientes de fugas do próprio processo, o gás de síntese produzido, o alcatrão gerado, como também as cinzas, conforme estão apresentados na Tabela 4.9. E na Tabela 4.10 estão mostradas as principais características e composições do gás de síntese produzido pela gaseificação do bagaço. Ambas foram baseadas nos resultados do simulador CSFMB e complementadas com as referências bibliográficas.

Tabela 4.9 – Principais saídas produzidas durante a gaseificação do bagaço (Gabra *et al.*, 2009 e Baker *et al.*, 1986)

Fluxo de gás de síntese (m <sup>3</sup> /s)	0,024
Cinzas (kg/ kg de gás de síntese)	0,0097
Alcatrão (kg/ kg de gás de síntese)	0,004
Partículas (mg/ kg de gás de síntese)	996
Álcalis (mg/ kg de gás de síntese)	156
SO <sub>x</sub> (PPM)	5
NO <sub>x</sub> (PPM)	58
TOC <sup>a</sup> (PPM)	400

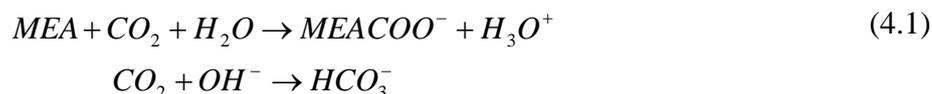
a - Concentração de Compostos Orgânicos

Tabela 4.10 – Características e composição do gás de síntese produzido

Densidade do gás de síntese (kg/m <sup>3</sup> )	6,39
Pressão do gás de síntese (MPa)	2,24
Temperatura do gás produzido (°C)	914
<b>Composição do gás de síntese produzido (base seca) (% molar)</b>	
H <sub>2</sub>	35,34
H <sub>2</sub> S	0,0084
NH <sub>3</sub>	0,1165
N <sub>2</sub>	19,64
SO <sub>2</sub>	0,0029
CO	15
CO <sub>2</sub>	27,54
HCN	0,0003
CH <sub>4</sub>	2,30
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,0349
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0192
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,016
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,0155
<b>PCI do gás de síntese (MJ/kg)</b>	<b>5,41</b>
<b>Relação molar dos componentes do gás de síntese</b>	
H <sub>2</sub> /CO	2,3
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	1,28
CO <sub>2</sub> /CO	1,84
CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	0,0652

Na Tabela 4.9 pode ser observado que a porcentagem molar de CO<sub>2</sub> no gás de síntese é relativamente alta (27,54%), correspondendo a uma porcentagem mássica de CO<sub>2</sub> no gás de síntese de 52,8 %. Este valor é inadequado para a síntese de metanol, pois deveria estar entre 2 a 10 %, como já foi mencionado no Capítulo 2, logo é necessário realizar uma remoção de parte deste gás.

Uma forma de realizar tal remoção é fazer o gás de síntese passar por um processo de absorção química, que consiste na reação do CO<sub>2</sub> com um solvente químico, formando assim um composto intermediário. Tais solventes têm como base a amina ou carbonatos, como o MEA (Mono-etanol-amina) e carbonato de potássio, sendo o MEA um dos mais aplicados. As principais reações químicas do processo com este solvente estão mostradas na equação 4.1 (Kothandaraman *et al.*, 2009).



Este processo de remoção de CO<sub>2</sub> é dividido em 3 etapas:

- 1 – Resfriamento e compressão do gás de síntese,
- 2 – Absorção do CO<sub>2</sub> e regeneração do solvente,
- 3 – Compressão do CO<sub>2</sub>.

Um esquema do processo está apresentado na Figura 4.7.

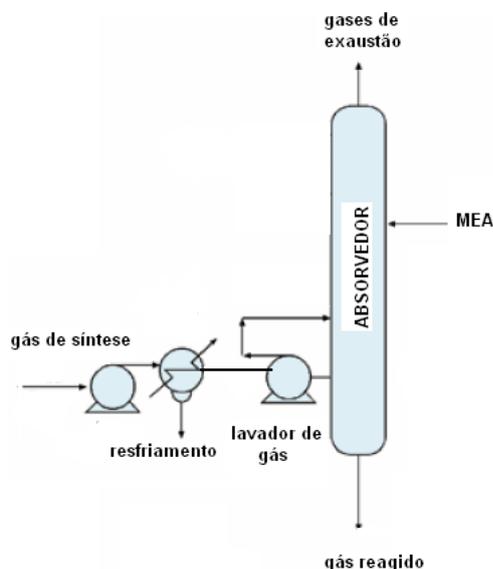


Figura 4.7 – Esquema de um processo de absorção química

Na Figura 4.7, o absorvedor opera a uma temperatura de aproximadamente de 40°C, logo a temperatura de entrada do gás de síntese no mesmo deve estar na faixa de 40 a 50°C, logo um sistema de resfriamento é requerido, e pode ser, por exemplo, uma torre de resfriamento.

Após o gás ser resfriado é enviado para um lavador de gases, para remoção de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> e outras impurezas que podem prejudicar o desempenho do solvente, e finalmente o gás entra no absorvedor, onde ocorre a absorção química com MEA. O CO<sub>2</sub> que é removido é posteriormente seco e comprimido para ser armazenado.

O consumo global de eletricidade do processo de absorção química é de aproximadamente 0,013 kWh / mol CO<sub>2</sub> removido (Kothandaraman *et al.*, 2009).

## 4.5 CONVERSÃO DO GÁS DE SÍNTESE A METANOL

As tecnologias desenvolvidas para a conversão do gás de síntese a metanol foram apresentadas no Capítulo 2, e a selecionada para este trabalho foi a tecnologia Metanol Fase-Líquida, por ser considerada uma das mais eficientes existentes.

Assim, para a obtenção dos principais dados de entrada e saída deste processo, foi feita uma pesquisa bibliográfica do mesmo, e dentre os trabalhos existentes, o trabalho Vaswani (2000) foi o que apresentou uma melhor disponibilidade de dados e resultados relacionados ao processo de produção de metanol utilizando a tecnologia Metanol Fase-Líquida.

Os principais dados de entrada deste processo estão listados na Tabela 4.11, já os dados de saídas estão na Tabela 4.12.

Tabela 4.11 – Dados de entrada do processo de síntese de metanol (Vaswani, 2000)

Gás de síntese (kg/ kg metanol)	4,2
Vapor (kg/ kg metanol) (temperatura 165°C e pressão 0,68 MPa)	0,78
Eletricidade (kWh/ kg metanol)	0,093

Tabela 4.12 – Dados de saída do processo de síntese de metanol (Vaswani, 2000 e Xiao *et al.*, 2009)

	Valor (g/ kg metanol)
Gás residual	90
CO	1,12
CH <sub>3</sub> OH (VOC)	0,0649
Outros VOC (Composto Orgânico Volátil)	0,0248
CH <sub>4</sub>	0,234
CO <sub>2</sub>	1830
NO <sub>x</sub>	0,928
PM10	0,93
SO <sub>2</sub>	0,524
Óleo mineral	0,00018
Escória	410

Como pode ser observado na Tabela 4.12, as emissões provenientes da síntese do metanol são relativamente baixas, um aspecto positivo do ponto de vista ambiental da tecnologia Metanol Fase-Líquida.

## **4.6 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA**

Feita uma descrição de todas as etapas envolvidas no processo de metanol, bem como um apontamento dos principais insumos e emissões geradas em cada uma delas, já é possível elaborar um inventário do ciclo de vida. Para facilitar os cálculos, foi estabelecida uma unidade funcional de 1 kg de metanol. Um diagrama do Inventário do Ciclo de Vida da produção do metanol a partir do bagaço, com as principais entradas e saídas consideradas neste trabalho estão apresentadas na Figura 4.8.

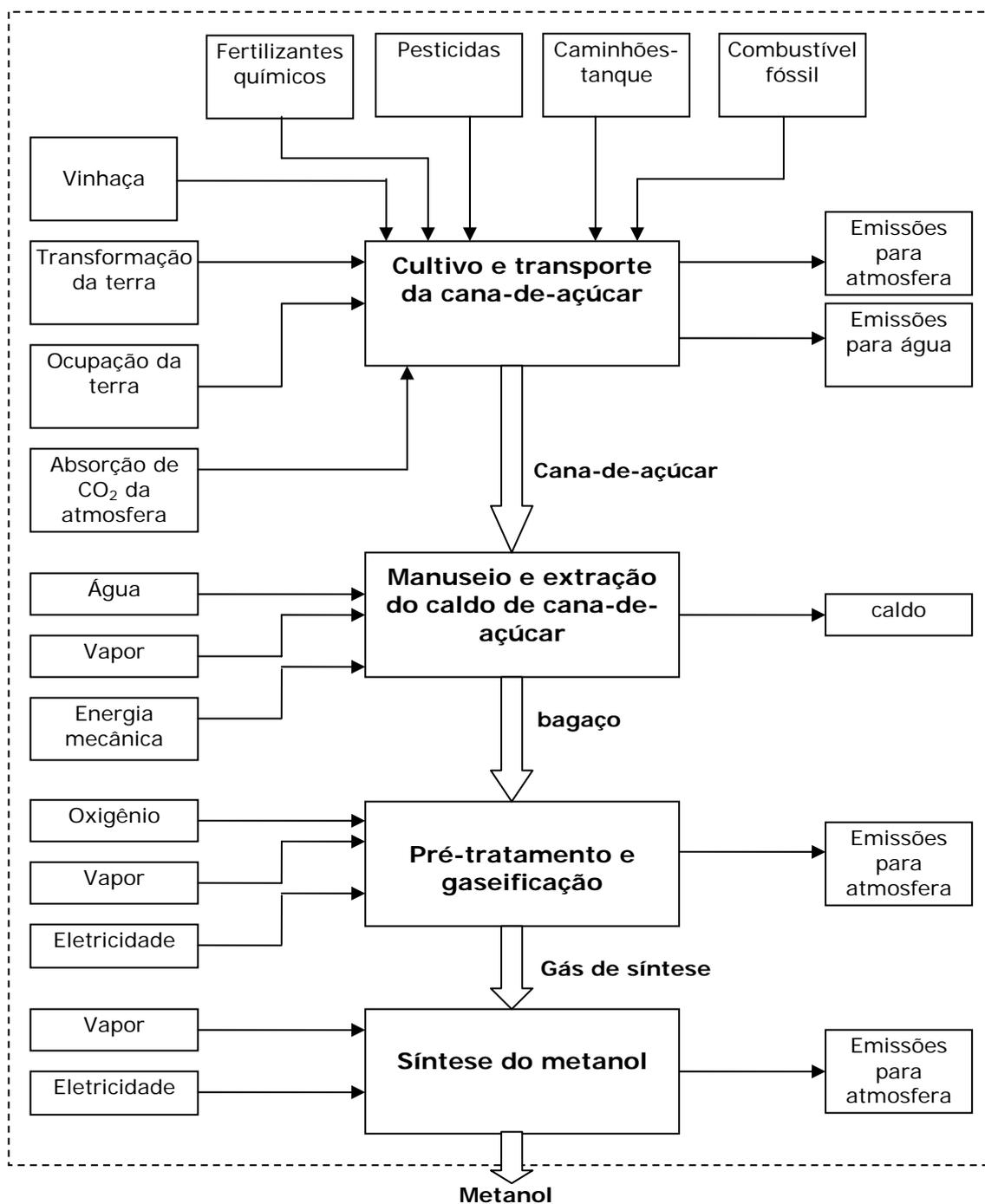


Figura 4.8 – Diagrama do inventário do ciclo de vida da produção de metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar

Para obtenção do Inventário do Ciclo de Vida do metanol a partir do bagaço, os principais insumos e emissões, apresentados anteriormente, das etapas envolvidas no processo de produção de metanol, precisam ser ajustados de acordo com a unidade funcional selecionada neste trabalho (1 kg de metanol). O resultado de tal ajuste dos dados está apresentado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Principais dados de entrada e saída do processo de produção de metanol

<b>Unidade funcional: 1 kg metanol</b>	
<b>Cultivo e transporte da cana-de-açúcar</b>	
<b>Cultivo</b>	
Consumo de Cana (kg)	7,04
Transformação de solo arável (m <sup>2</sup> )	1,05
Transformação de solo com área arbórea (m <sup>2</sup> )	0,010
<b>Combustível e transporte</b>	
Caminhão (tkm)	0,028
diesel (l)	0,015
<b>Emissões do trator agrícola e caminhão</b>	
HC (kg)	9,92 x10 <sup>-5</sup>
CO (kg)	0,00027
NO <sub>x</sub> (kg)	0,00069
PM10 (kg)	7,17 x10 <sup>-5</sup>
SO <sub>x</sub> (kg)	4,88 x10 <sup>-5</sup>
CO <sub>2</sub> (g)	6,58
Particulados finos (g)	0,0013
Carbono orgânico (g)	0,00025
Nitrato (g)	2,81 x10 <sup>-6</sup>
Silício (g)	8,45 x10 <sup>-6</sup>
Amônia (g)	9,16 x10 <sup>-6</sup>
Sulfato (g)	1,30 x10 <sup>-5</sup>
Alcanos (g)	0,00011
Olefinas (g)	1,26 x10 <sup>-5</sup>
Aromáticos (g)	9,86 x10 <sup>-5</sup>
Formaldeído (g)	0,00015
Acetaldeído (g)	0,00029
Propanal (g)	9,86 x10 <sup>-5</sup>
Acetona (g)	0,00015
<b>Insumos (kg)</b>	
Absorção de CO <sub>2</sub>	4,22
Sulfato de amônio	9,37 x10 <sup>-4</sup>
Uréia	2,8x10 <sup>-3</sup>
Fosfato nitrato	9,37 x10 <sup>-4</sup>
Fosfato diamônico	1,11 x10 <sup>-3</sup>
Nitrato de potássio	5,85 x10 <sup>-5</sup>
Fosfato diamônico	2,44 x10 <sup>-3</sup>
Superfosfato	1,57 x10 <sup>-3</sup>
Triplo superfosfato	8,66 x10 <sup>-4</sup>
Fosfato	2,71 x10 <sup>-4</sup>
Cloreto de potássio	1,15 x10 <sup>-2</sup>
Sulfato de potássio	1,17 x10 <sup>-4</sup>
Nitrato de potássio	1,17 x10 <sup>-4</sup>
Vinhaça	10,6
Cal	0,0366
<b>Emissões da queimada (kg)</b>	
Metano	0,00068
N <sub>2</sub> O	0,00004
NO <sub>x</sub>	0,0025
SO <sub>x</sub>	0,00031
NMVOC	0,0015
<b>Emissões para água (kg)</b>	
Fósforo	2,89 x10 <sup>-5</sup>
Nitrato	1,48 x10 <sup>-4</sup>
<b>Emissões do cultivo (kg)</b>	
N <sub>2</sub> O	0,0013
NO <sub>x</sub>	0,0022
Amônia	0,00036
<b>Manuseio e extração do caldo de cana-de-açúcar</b>	
<b>Lavagem da cana-de-açúcar</b>	
Água (m <sup>3</sup> )	0,037
<b>Sistema de Moagem</b>	
Energia mecânica (kWh)	0,11
Vapor (kg)	1,76
<b>Produtos</b>	
bagaço (kg)	2,0
Caldo (kg)	7,18

---

### Pré-tratamento e gaseificação

---

Insumos	
Bagaço (kg)	2,0
Oxigênio (kg)	0,55
Vapor (kg)	1,79
Eletricidade (kWh)	0,98
Produto	
Gás de síntese (kg)	4,2
Emissões	
Cinzas (kg)	0,040
Alcatrão (kg)	0,017
Partículas (g)	4,18
Álcalis (g)	0,65
NO <sub>x</sub> (ppm)	5
TOC (ppm)	58
SO <sub>x</sub> (ppm)	400

---

### Síntese do metanol

---

Insumos	
Gás de síntese (kg)	4,2
Eletricidade (kWh)	0,093
Vapor (kg)	1,73

Emissões	
Gás residual (kg)	0,09
CO (g)	1,12
CH <sub>3</sub> OH (g)	0,0649
VOC (g)	0,0248
CH <sub>4</sub>	0,234
CO <sub>2</sub> (g)	1830
NO <sub>x</sub> (g)	0,928
PM10 (g)	0,93
SO <sub>2</sub> (g)	0,524
Óleo mineral (g)	0,00018
Escória (g)	410

---

## **Capítulo 5**

### **ESTUDOS DE CASO**

Neste capítulo estão descritos os estudos de casos avaliados neste trabalho, como também, é feita uma análise de desempenho energético de cada um deles, utilizando para tal índices de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Para finalizar é feita uma análise exergética simples de cada um deles para determinar qual apresentou melhor desempenho exergético.

#### **5.1 DESTILARIA AUTÔNOMA, PLANTA DE COGERAÇÃO E PLANTA DE METANOL AUTÔNOMA (ESTUDO DE CASO 1)**

O primeiro estudo de caso foi realizado com o objetivo de ser uma referência para os demais estudos, podendo ser chamado de caso base. Considera uma planta de produção de metanol independente da unidade produtora de etanol. Assim, a função desta passa a ser somente em fornecer bagaço excedente à planta de metanol. Além desta característica, abaixo são apresentadas as demais características:

1. A capacidade de moagem de cana-de-açúcar é de 1700 t cana/hora.
2. A planta de metanol está localizada próxima a uma destilaria autônoma

3. A destilaria produz 2594 m<sup>3</sup>/dia de etanol, enquanto a planta de metanol produz com a capacidade limitada à produção de bagaço excedente, neste estudo de caso foi de 136 t/h.

4. Uma planta de cogeração que opera com bagaço de cana-de-açúcar fornece vapor e eletricidade à destilaria, enquanto a planta de metanol é suprida dos mesmos por uma caldeira que opera com combustível fóssil e por uma rede elétrica de uma concessionária local.

Além das características mencionadas, a seguir estão listados alguns parâmetros que foram seguidos neste estudo de caso. Eles foram baseados em instalações reais e referências bibliográficas. Na Tabela 5.1 estão listados os principais deles.

Tabela 5.1 – Principais parâmetros para o estudo de caso 1 (Sparati *et al.*, 2005; MAPA, 2009; Nogueira, 2008; UDOP, 2009; Foran e Mardon, 1999; Camargo, 1990; Minteer, 2006)

<b>Sistema de moagem da cana-de-açúcar</b>	
Capacidade de moagem (t cana/h)	1700
% de bagaço na cana-de-açúcar (base úmida)	28
Umidade do bagaço (%)	50
PCI do bagaço (kJ/kg)	7560
<b>Planta de cogeração</b>	
Eficiência isentrópica das bombas (%)	85
Eficiência das caldeiras PCI (%)	80
Eficiência isentrópica das turbinas a vapor (%)	80
<b>Destilaria autônoma</b>	
Consumo específico de vapor (kg/t cana-de-açúcar)	380
Consumo de eletricidade (kWh/t cana-de-açúcar)	12
Rendimento do etanol (l/t cana)	78
<b>Planta de metanol</b>	
Consumo específico de vapor (kg/kg metanol)	1,76
Consumo de eletricidade (kWh/kg metanol)	1,52
Rendimento do metanol (l/kg bagaço)	0,38

A partir da Tabela 5.1, pode ser determinado a quantidade total de bagaço produzida, que é de 476 t bagaço/h, sendo que 340 t/h deste bagaço é destinada para atender a demanda da planta de cogeração e outra parte para a planta de metanol (136 t/h).

Ressalta-se aqui que o sistema de cogeração do presente estudo de caso foi equipado com turbinas a vapor de condensação/extração (CEST), que opera com altos parâmetros de pressão e temperatura: 6 MPa e 480°C.

Na Figura 5.1 apresenta-se um balanço energético e mássico para o primeiro estudo de caso. Já na Figura 5.2 apresentam-se os principais equipamentos do sistema de cogeração considerados na simulação realizada no software GateCycle.

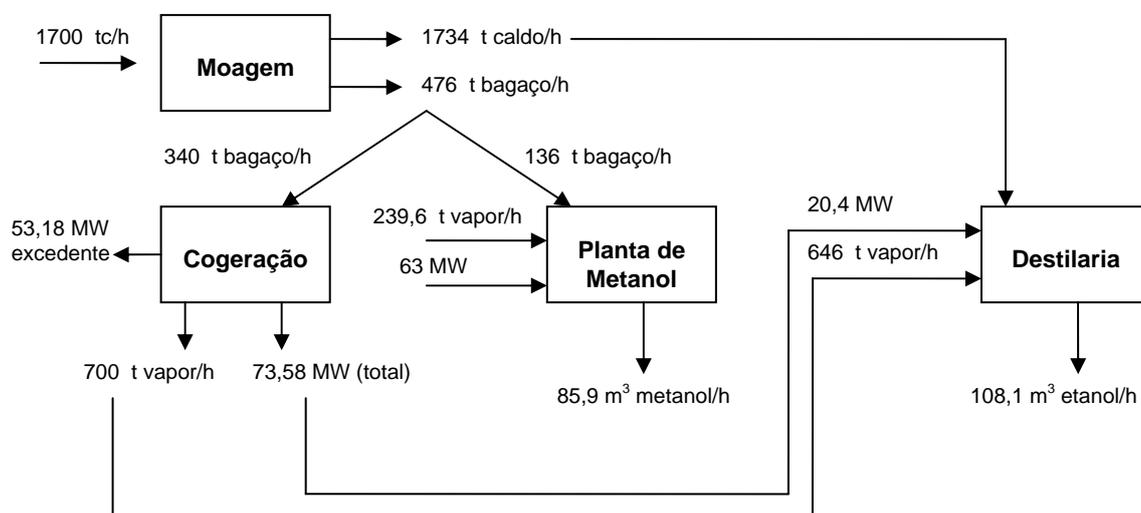


Figura 5.1 – Balanço mássico e energético para o estudo de caso 1

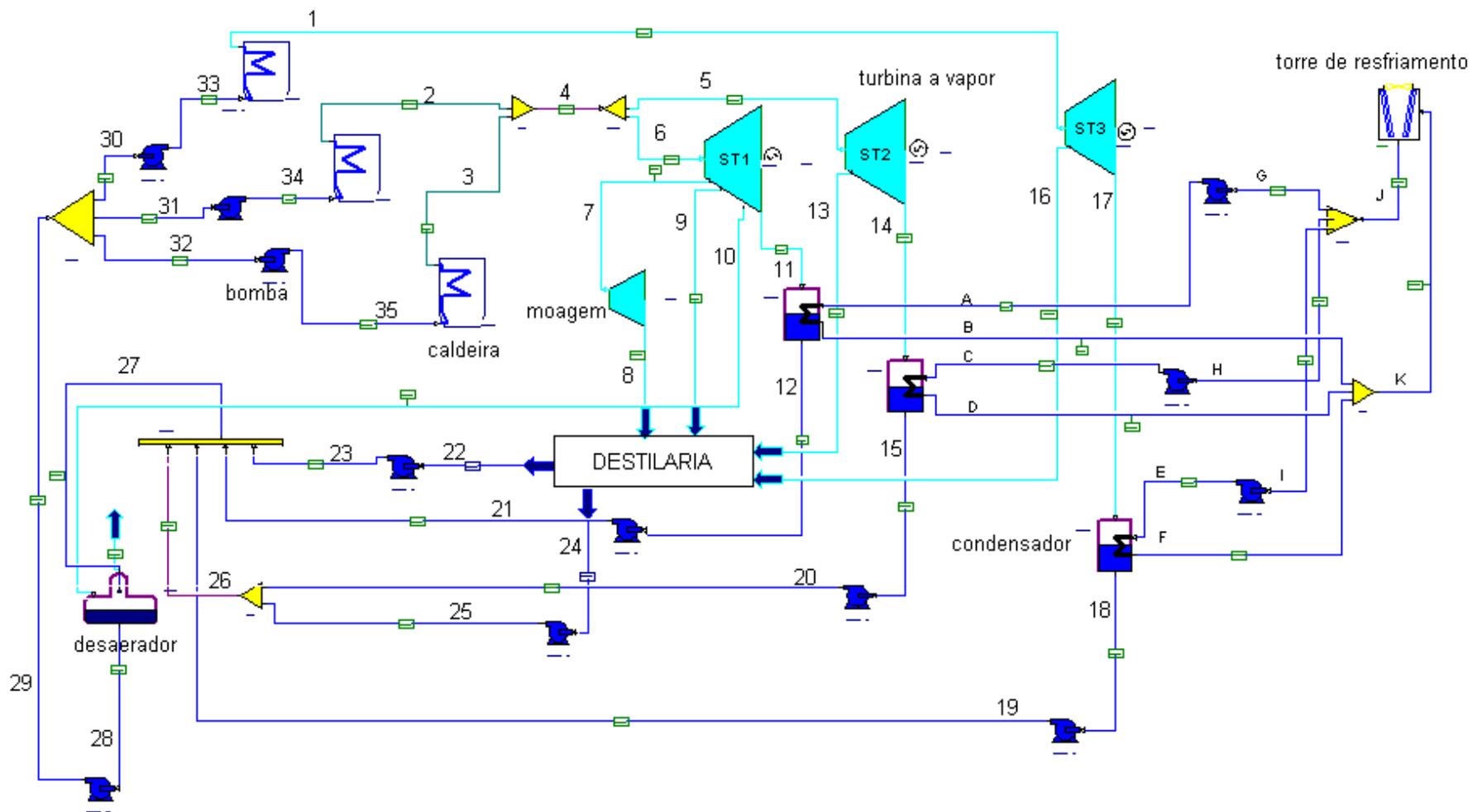


Figura 5.2 – Esquema do sistema de cogeração para o estudo de caso 1

Da Figura 5.2 pode-se observar que o sistema de cogeração é composto por três caldeiras de alta-pressão operando com parâmetros de vapor de 6 MPa e 480°C. Uma caldeira produz 100 t vapor/h, e outras duas apresentam a mesma capacidade de produção, que é de 300 t vapor/h.

Uma parcela deste vapor é consumida pelo sistema de moagem da cana (ponto 7), a outra é destinada as turbinas a vapor (pontos 6, 5 e 1), para produção de eletricidade. Nas turbinas a vapor também são realizadas extrações de vapor para ser consumido pelo processo de produção de etanol (pontos 9 e 13).

A eletricidade produzida pelas turbinas a vapor ST1, ST2, ST3 é de 30,6; 41,5; 34,6 MW, respectivamente. A eletricidade gerada é destinada ao processo de produção de etanol, bem como ao consumo intrínseco aos equipamentos do sistema de cogeração, como por exemplo, as bombas, torre de resfriamento, iluminação, etc.

A diferença entre a eletricidade produzida e a consumida por todo sistema corresponde a um valor de 53,18 MW, denominado de eletricidade excedente, esta eletricidade é vendida às redes concessionárias locais

Quanto à planta de metanol, foi mencionado anteriormente que seu suprimento de vapor é feito por uma caldeira que opera com combustível fóssil e a eletricidade é fornecida pela rede elétrica local.

Logo, para analisar do ponto de vista ambiental esta planta, foi necessário buscar trabalhos de Análise do Ciclo de Vida relacionados à produção de vapor por uma caldeira fóssil e à eletricidade produzida numa concessionária. Como a eletricidade no Brasil é gerada em maior escala pelas usinas hidrelétricas, os inventários referentes a esse processo foram pesquisados nas referências bibliográficas atuais.

Dentre os trabalhos pesquisados, o estudo em Ribeiro (2003) foi um dos mais completos encontrados, e está relacionada à produção hidrelétrica da usina ITAIPU. Para maiores conhecimentos sobre este trabalho, o inventário da produção de eletricidade está apresentado na Tabela A.1 do Apêndice A.

Já a produção de vapor por uma caldeira que opera com combustíveis fósseis, selecionou-se o trabalho Vaswani (2000), que também pode ser visto, no Apêndice A, Tabela A.2.

## 5.2 DESTILARIA AUTÔNOMA, PLANTA DE COGERAÇÃO E PLANTA DE METANOL ANEXA (ESTUDO DE CASO 2)

Para o segundo estudo de caso proposto nesta tese de doutorado, existe uma maior integração entre a destilaria e a planta de metanol, no que se refere ao suprimento de vapor e eletricidade. Pois, neste caso a planta de cogeração fornece vapor e eletricidade para ambas as unidades produtivas. Além disso, os parâmetros apresentados na Tabela 5.1, também foram usados na elaboração deste segundo estudo de caso.

Um balanço de massa e energia do presente estudo de caso pode ser visto na Figura 5.3, já na Figura 5.4 estão os equipamentos considerados na simulação do software GateCycle.

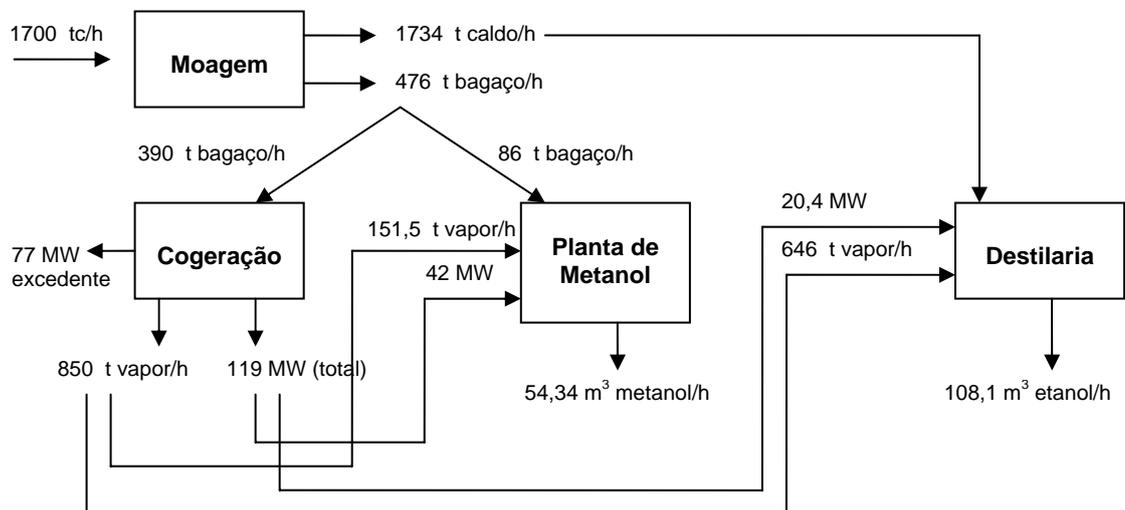


Figura 5.3 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 2

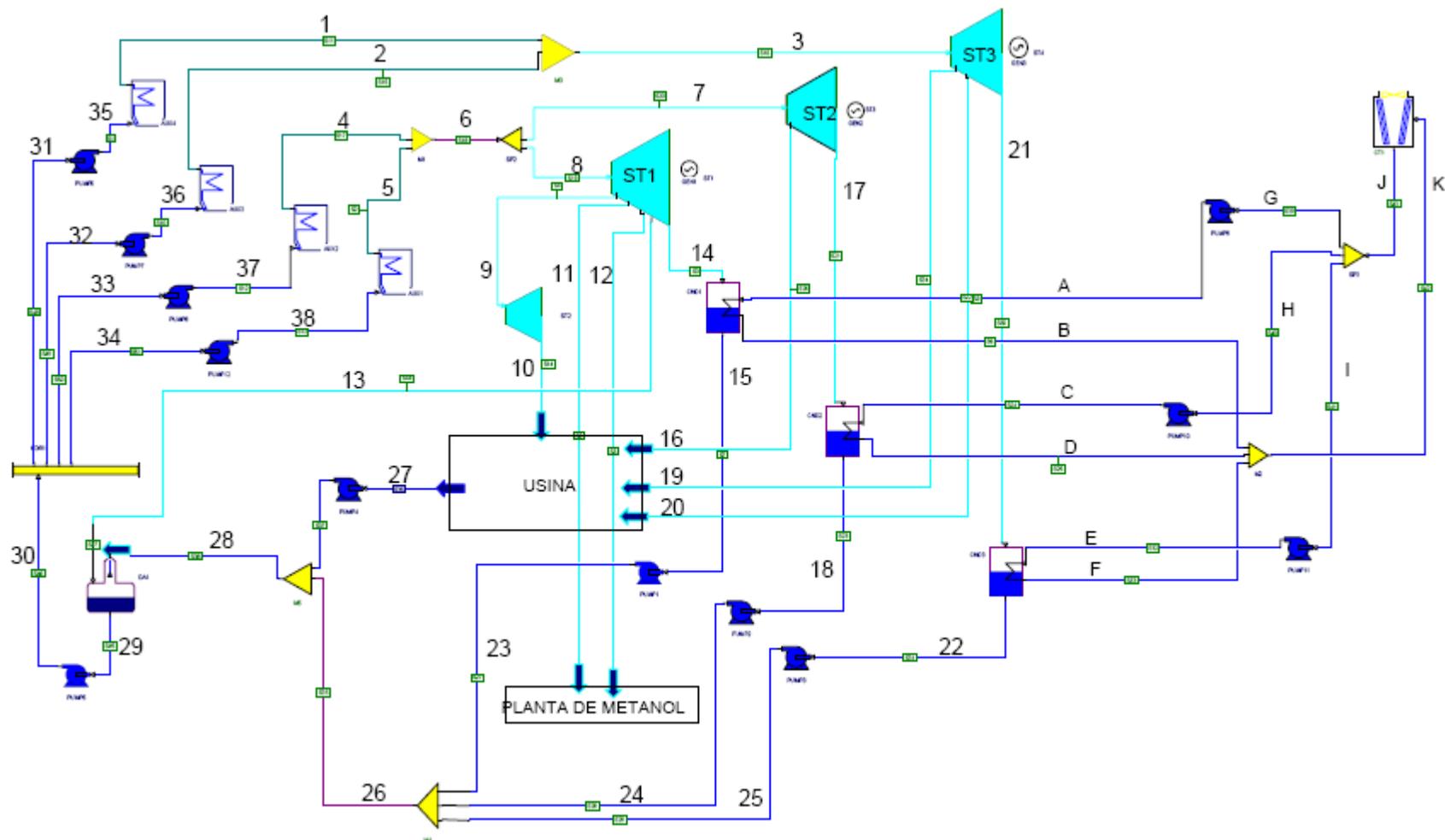


Figura 5.4 – Esquema do sistema de cogeração para o estudo de caso 2

Para este estudo também considerou o sistema baseado em turbinas de extração e condensação, operando com altos parâmetros de pressão e temperatura (6 MPa e 480°C). Da Figura 5.4 pode-se observar que o sistema de cogeração é composto por quatro caldeiras de alta-pressão, duas apresentam a mesma capacidade de produção 250 t vapor/h, as outras duas têm a capacidade produtiva de 150 t vapor/h e 200 t vapor/h.

Parte do vapor é consumida pelo sistema de moagem da cana (ponto 9), como também pelas turbinas a vapor (pontos 8,7,3). O restante é consumido pelo processo de produção de etanol (pontos 16,19,20) e metanol (pontos 11,12).

A eletricidade obtida pelas turbinas a vapor ST1, ST2 e ST3 corresponde respectivamente aos seguintes valores 33,55; 33,23 e 52,82 MW. A eletricidade gerada é destinada ao processo de produção de etanol e metanol, bem como aos equipamentos do sistema de cogeração. A diferença entre a eletricidade produzida e a consumida por todo sistema corresponde a um valor de 77 MW.

Comparando este estudo de caso com o anterior, nota-se que ao suprir a produção de metanol com vapor e eletricidade proveniente do sistema de cogeração, aumentou a demanda de bagaço do mesmo em 14,7 %. Conseqüentemente diminui a quantidade de bagaço excedente destinado a produção de metanol, que teve sua produção reduzida em 36,7%.

Outra característica, também relacionada ao sistema de cogeração, é que o mesmo provoca emissões de poluentes ao queimar bagaço nas caldeiras, logo é necessário determinar quais são essas emissões e as quantidades das mesmas, para serem consideradas na avaliação ambiental realizada posteriormente.

Os principais poluentes gerados da combustão do bagaço são CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, e outros, conforme está apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Principais emissões provenientes da combustão do bagaço (Janghathaikul e Gheewala, 2004)

<b>Poluente</b>	<b>Valor (kg / MWh)</b>
CO <sub>2</sub>	7.264,21
CO	44,64
SO <sub>2</sub>	0,33
NO <sub>2</sub>	2,68
TSP (partículas totais suspensas)	29,43

Na tabela 5.2, pode ser observado que as emissões de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> são menores comparadas a combustão dos combustíveis fósseis devido ao baixo teor de enxofre do bagaço. Já a emissão de CO<sub>2</sub> é relativamente alta (7.264,21 kg/MWh), porém deve ser considerado

que dióxido de carbono foi previamente absorvido durante o cultivo da cana-de-açúcar pelo processo de fotossíntese (Janghathaikul e Gheewala, 2004).

### 5.3 USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL, PLANTA DE COGERAÇÃO E PLANTA DE METANOL ANEXA (ESTUDO DE CASO 3)

O terceiro estudo de caso deste trabalho se refere a uma usina de açúcar e álcool, logo o novo sistema apresenta diferentes parâmetros ao sistema anterior, principalmente no que se refere ao consumo específico de vapor, eletricidade consumida e rendimento de etanol. A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros para o presente estudo de caso.

Tabela 5.3 – Principais parâmetros para o estudo de caso 3 (Sparati *et al.*, 2005; MAPA, 2009; Nogueira, 2008; UDOP, 2009; Foran e Mardon, 1999; Camargo, 1990; Minter, 2006)

<b>Sistema de moagem da cana-de-açúcar</b>	
Capacidade de moagem (t cana/h)	1700
% de bagaço na cana-de-açúcar (base úmida)	28
Umidade do bagaço (%)	50
PCI do bagaço (kJ/kg)	7560
<b>Planta de cogeração</b>	
Eficiência isentrópica das bombas (%)	85
Eficiência das caldeiras PCI (%)	80
Eficiência isentrópica das turbinas a vapor (%)	80
<b>Usina de açúcar e álcool</b>	
Consumo específico de vapor (kg/t cana-de-açúcar)	465
Consumo de eletricidade (kWh/t cana-de-açúcar)	14
Rendimento do açúcar (kg/t cana)	60
Rendimento do etanol (l/t cana)	50
<b>Planta de metanol</b>	
Consumo específico de vapor (kg/kg metanol)	1,76
Consumo de eletricidade (kWh/kg metanol)	1,52
Rendimento do metanol (l/kg bagaço)	0,38

Nota-se da Tabela 5.3 que o consumo de eletricidade teve um incremento de 16,6%, visto que há a produção de mais um produto (açúcar) pelo sistema, já o rendimento do etanol

diminui 35,9%, um dos fatores para tal é que aproximadamente 40% dos carboidratos presente no caldo de cana são destinados a produção de açúcar, o restante (60%) são encaminhados a produção de etanol (Camargo, 1991)

Outro parâmetro foi o consumo específico de vapor, que aumentou em 22%. A principal consequência deste aumento foi o déficit de bagaço para o sistema de cogeração, ou seja, a produção de vapor pelo mesmo, não foi suficiente para atender a demanda de vapor da usina e da planta de metanol. Em termos numéricos, a quantidade de bagaço disponível é de 476 t/h, e a quantidade necessária à planta de cogeração é de 487 t/h.

Logo uma alternativa para solucionar este problema é considerar o aproveitamento dos resíduos da colheita da cana-de-açúcar, em especial a palha, para ser usada como combustível no sistema de cogeração.

Assim, com a inserção da palha no sistema de cogeração, algumas considerações precisam ser feitas. A primeira delas é a determinação da quantidade de palha disponível e recuperada.

Estudos realizados apontam que para cada tonelada de cana-de-açúcar são produzidos 165 kg de palha, mas em média apenas 16 % desta podem ser recuperadas e aplicadas no processo de cogeração (Hassuani *et al.*, 2005). Considerando estes dados para o estudo de caso presente, tem-se que para uma usina com uma capacidade de moagem de 1700 t cana/h pode ser obtida uma quantidade de palha de 45 t/h a ser disponibilizada para a cogeração.

Assim, o próximo passo é misturar a palha ao bagaço, e assim alimentar o sistema de cogeração. Este agora precisou aumentar sua capacidade de produção de vapor para 1025 t /h, para atender satisfatoriamente à usina de açúcar e álcool e à planta de metanol. Conseqüentemente, o consumo de combustível (palha + bagaço) resultou em 466 t/h (42 t/h de palha e 424 t/h de bagaço), com um PCI da mistura em 8103 kJ/kg (observa-se aqui que o PCI obtido é superior ao bagaço).

O bagaço excedente (52 t/h) foi destinado à produção de metanol. Com estas considerações chega-se ao balanço mássico e energético do terceiro estudo de caso, que está apresentado na Figura 5.5.

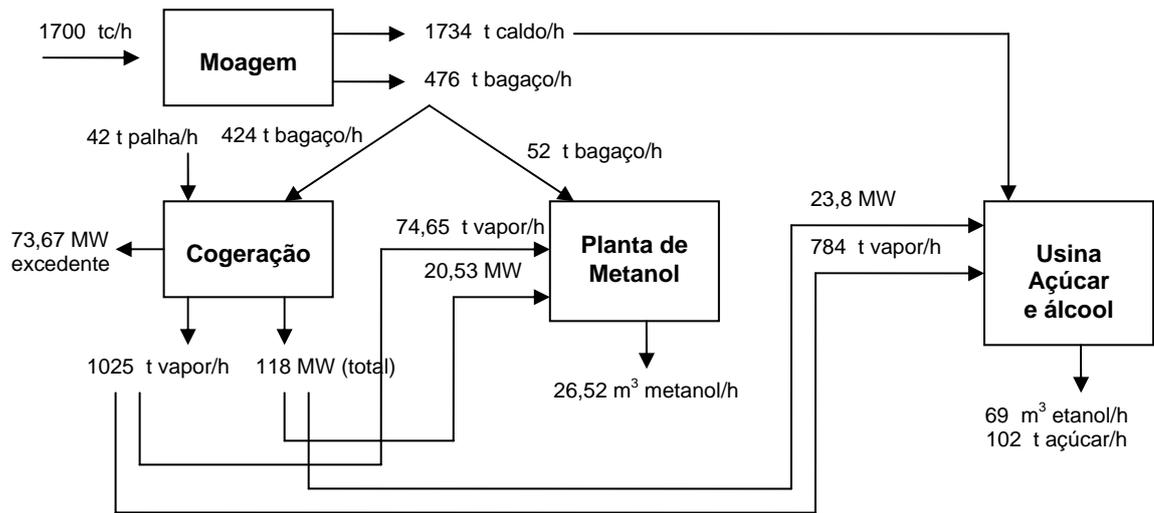


Figura 5.5 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 3

Na Figura 5.6 estão os equipamentos usados na simulação do software GateCycle e que constituem o terceiro estudo de caso.



Da Figura 5.6, tem-se um sistema de cogeração composto por quatro caldeiras de alta-pressão, uma com capacidade de produção de 200 t vapor/h, outra com capacidade de 225 t vapor/h. As demais caldeiras produzem vapor com a mesma capacidade de 300 t/h. Todas estão operando com altos parâmetros de pressão e temperatura (6MPa e 480°C).

Também neste estudo de caso uma parte do vapor é consumido pelo sistema de moagem (ponto 9), e pelas turbinas a vapor (pontos 3, 7 e 8). Como também pela usina de açúcar e álcool (pontos 10,16,19 e 20) e pela planta de metanol (ponto 11 e 12). A eletricidade produzida pelas turbinas a vapor ST1, ST2 e ST3 corresponde respectivamente aos seguintes valores 32,5; 26,5; 59,8 MW.

## **5.4 USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL, PLANTA DE COGERAÇÃO COM SISTEMA BIG-GT E PLANTA DE METANOL ANEXA (ESTUDO DE CASO 4)**

O quarto estudo de caso utiliza os conceitos avançados de cogeração, em especial a tecnologia BIG-GT (descrita no capítulo 2) com o objetivo de fornecer eletricidade e vapor à planta de metanol e à usina de açúcar e álcool. Os parâmetros considerados para o presente estudo de caso foram os mesmos da Tabela 5.3. Já os parâmetros usados para a simulação do sistema BIG-GT foram baseados nos trabalhos Arrieta (2000) e Zampieri (2005). Dentre eles destacam-se:

- Tipo de gaseificador: Atmosférico (agente gaseificante: ar)
- Capacidade de alimentação do gaseificador: 16,74 t/h
- Fabricante da turbina a gás: *Westinghouse*

O resultado obtido para o balanço de massa e energia do estudo de caso 4 pode ser visto na Figura 5.7. Já os equipamentos envolvidos na simulação do estudo de caso 4, utilizando o software GateCycle está apresentado na Figura 5.8.

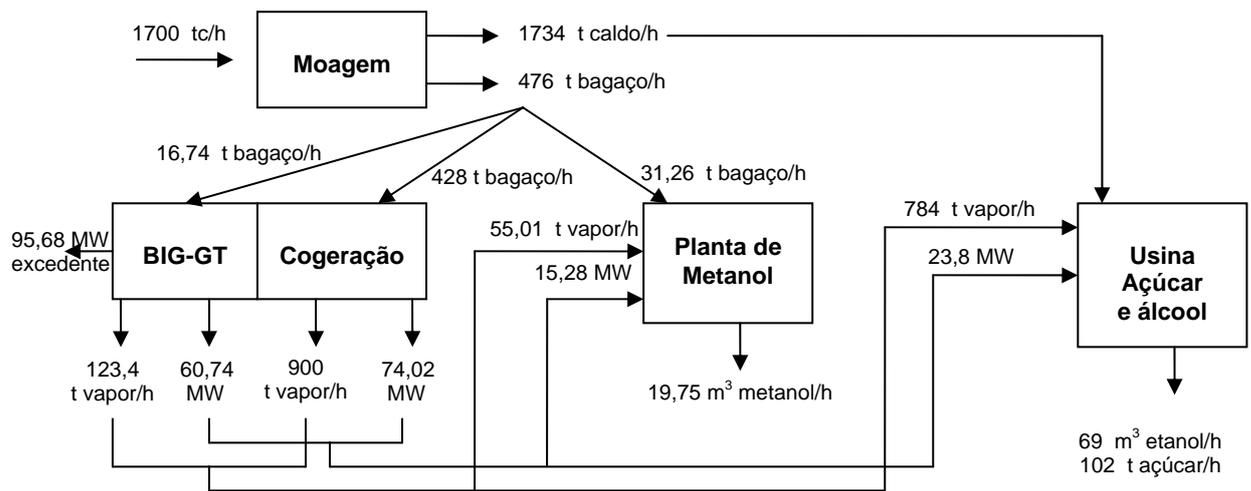


Figura 5.7 – Balanço de massa e energia para o estudo de caso 4

Observa da Figura 5.7 que parte do bagaço foi destinada ao sistema BIG-GT (16,74 t/h), com a finalidade de suprir o gaseificador que forma parte do mesmo. Outra parte (428 t/h) foi encaminhada às caldeiras para produção de vapor. O restante (31,26 t/h) foi destinado à produção de metanol.

Também da Figura 5.7 nota-se uma produção de vapor de 123,4 t/h proveniente da caldeira de recuperação do sistema BIG-GT. Este vapor, junto ao produzido pelas caldeiras (900 t/h) é destinado ao suprimento térmico da planta de metanol e usina de açúcar e álcool.

Uma grande vantagem da implantação de um sistema BIG-GT é que os gases de exaustão gerados pela turbina a gás são encaminhados a uma caldeira de recuperação para a produção de vapor (123,4 t/h), atendendo assim parte da demanda do processo, e não havendo assim a necessidade de adicionar palha ao sistema de cogeração.

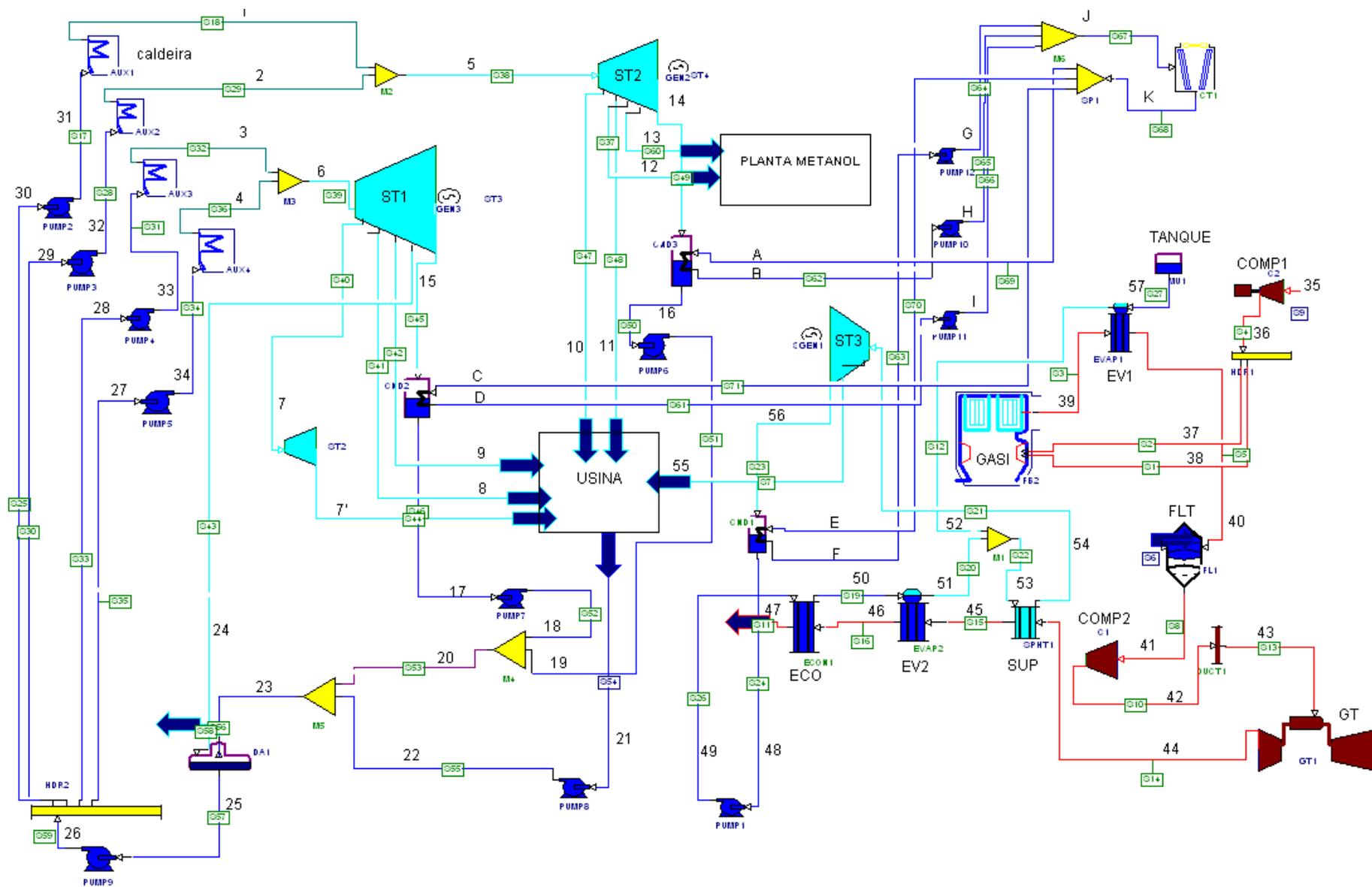


Figura 5.8 – esquema do sistema de cogeração + BIG/GT para o estudo de caso 4

Da Figura 5.8, tem-se um sistema de cogeração que da mesma forma que o estudo de caso 3 é composto por quatro caldeiras de alta-pressão, apresentando as seguintes capacidades de produção: 100, 250, 250, 300 t vapor/h, com altas condições de pressão e temperatura (6MPa e 480 °C).

Parte do vapor é consumida pelo sistema de moagem (ponto 7), e pelas turbinas a vapor ST1 e ST2 (pontos 5 e 6), e também pela usina de açúcar e álcool (pontos 7, 8, 9, 10,11) e pela planta de metanol (12,13). A eletricidade obtida pelas turbinas ST1 e ST2 corresponde respectivamente aos seguintes valores 53,81 e 20,22 MW.

O sistema BIG/GT é composto por um gaseificador atmosférico, no esquema apresentado como “GASI”, que opera com bagaço e com o agente gaseificante ar (ponto 35), que passa previamente por um compressor “COMP1”, a fim de que o ar atinja uma pressão da ordem de 200 kPa, que é uma das mais utilizadas para o processo de gaseificação atmosférica.

O gás resultante da gaseificação (gás de síntese) é apresentado na Figura 5.8 pelo ponto 39, este gás está a uma alta temperatura (1330°C) e é enviado a um evaporador “EV1”, este é um trocador de calor que tem a função de extrair energia térmica da corrente quente de gás de síntese e enviá-la para uma corrente de água a fim de produzir vapor. O fornecimento de água é apresentado na Figura como “TANQUE”, que fornece a quantidade de água necessária para produção de vapor.

O gás de síntese resfriado passa então por um tanque “flash” (FLT) que tem a função de extrair a máxima quantidade possível de umidade presente no gás de síntese e poderiam prejudicar o desempenho da turbina a gás.

Após a passagem pelo tanque o gás é comprimido num compressor “COMP2” antes de entrar na câmara de combustão da turbina a gás (GT), o fabricante de turbina a gás selecionado foi da “*Westinghouse*”, pois estas turbinas vêm sendo desenvolvidas para operar com gás de baixo poder calorífico inferior (neste caso em torno de 5 MJ/kg).

O gás de síntese entra na câmara de combustão a uma temperatura 653°C e pressão de 1,5 MPa, já o gás de exaustão sai a uma temperatura de 600°C e pressão de 104 kPa, como resultado tem-se uma potência produzida de 49,78 MW.

O gás de exaustão é então enviado a um sistema chamado de caldeira de recuperação, composto neste caso por um economizador, evaporador e superaquecedor, que aparece no esquema com os seguintes símbolos respectivamente: ECO, EV e SUP.

O economizador é responsável pelo pré-aquecimento da água antes da entrada no evaporador. A água é admitida no estado de líquido comprimido, no nível de pressão correspondente ao ciclo de potência, acrescido dos valores de perda de carga que ocorrem até a entrada da turbina a vapor.

O evaporador é um trocador de calor que aquece e vaporiza a água. A condição de saída desse equipamento é vapor saturado. No modelo simulado usou-se como especificação o valor *pinch point*, definido como a diferença mínima de temperaturas entre a corrente de gás de síntese e da água na caldeira de recuperação, especificamente o *pinch point* corresponde a diferença de temperatura entre o gás de síntese que sai do evaporador e a temperatura de saturação da água à pressão de operação do evaporador. O valor adotado para o *pinch point* neste estudo de caso foi o valor padrão de 11 °C.

Já o superaquecedor, tem a função de aquecer o vapor proveniente do evaporador até uma condição especificada. O vapor saturado é superaquecido até a temperatura de entrada da turbina a vapor (ST3), neste modelo a turbina opera com os seguintes parâmetros de pressão e temperatura: 3,5 MPa e 450°C, produzindo 10,97 MW.

Nota-se no esquema que as duas correntes de vapor saturado (pontos 51 e 52) proveniente dos dois evaporadores (EV1 e EV2) unem-se num misturador antes de entrar no superaquecedor, o objetivo é aumentar assim a quantidade de vapor a ser enviada a turbina a vapor ST3 (ponto 54), o valor deste fluxo de vapor corresponde a 123,4 t/h.

## **5.5 AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DOS ESTUDOS DE CASO**

Para realizar uma avaliação de desempenho nos estudos de caso elaborados, foram considerados índices de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. da Primeira Lei tem-se que a energia não pode ser destruída. Assim, a energia que ingressa em um sistema térmico que opera em regime permanente estará presente nos produtos, subprodutos e rejeitos desse sistema, na mesma quantidade que entrou (conservação da energia).

A Segunda Lei mostra que a transferência de energia através de calor é acompanhada de acréscimo de entropia, o que não ocorre com a transferência de energia via trabalho. Com isto, a Segunda Lei preconiza que a energia pode existir com diversas qualidades e que a qualidade da energia pode ser degradada como resultado de irreversibilidades. A seguir são apresentados e definidos alguns índices baseados na Primeira Lei da Termodinâmica (Feng *et al.*, 2008):

**Fator de Utilização de Energia (FUE):** Conhecido também como eficiência energética ou eficiência da Primeira Lei, é um indicador baseado no princípio físico da conservação de energia.

$$FUE = \frac{W + Q_{util}}{m_{comb} \times PCI} \quad (5.1)$$

Onde:

$W$  – potência elétrica produzida pelo sistema [kW]

$Q_{util}$  – fluxo de calor útil do sistema para processo [kW]

$m_{comb}$  – fluxo total de bagaço consumido pelas caldeiras [kg/s]

PCI – Poder Calorífico Inferior do bagaço [7560 kJ/kg]

O calor útil total do sistema empregado no processo. Esse é composto pelo somatório dos fluxos de entalpia do vapor destinado às plantas (destilaria ou usina de açúcar e álcool e planta de metanol, menos o fluxo de entalpia do condensado de retorno).

**Índice de eletricidade excedente ( $I_{exced}$ ):** é a razão do excedente de energia elétrica ( $W_{exced}$ ) pela quantidade de cana moída (tc) em toneladas por hora [kWh/tc]:

$$I_{exced} = \frac{W_{exced}}{tc} \quad (5.2)$$

Definido os índices baseados na Primeira Lei, segue agora os índices baseados na Segunda Lei:

**Eficiência exergética da cogeração ( $\eta_{exerg}$ ):** Este índice se refere à eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica. Trata-se da soma de potência elétrica produzida pelo sistema ( $W$ ) com a exergia produzida pelo processo ( $B_p$ ), e posteriormente a divisão pela exergia do combustível ( $B_f$ ), neste caso é o bagaço.

$$\eta_{exerg} = \frac{W + B_p}{B_f} \quad (5.3)$$

**Eficiência global da planta ( $\eta_{global}$ ):** A fim de analisar a função produtividade de obtenção de energia e combustíveis a partir da cana-de-açúcar propõe-se dividir o somatório da energia do etanol, do açúcar, da eletricidade excedente e do metanol, pela energia contida

na cana-de-açúcar, como mostra a equação a seguir:

$$\eta_{global} = \frac{E_{e\text{tan ol}} + W_{exced} + E_{me\text{tan ol}} + E_{açúcar}}{E_{cana}} \quad (5.4)$$

Para a determinação dos índices anteriormente mencionados é necessário primeiramente determinar algumas variáveis envolvidas, como a exergia específica do bagaço, cana-de-açúcar, metanol e cana-de-açúcar.

Partindo então do cálculo da exergia do caldo e do bagaço, considerando a exergia específica da cana é a soma dos dois, e que estes e a cana-de-açúcar estão em condições ideais de pressão e temperatura, 25° C e 0,1 MPa. Desta forma a parcela da exergia física é nula para os produtos. Consequentemente, a exergia passa ser igual a exergia química.

Desta forma, para determinar a exergia química do bagaço foi seguida a equação sugerida por Szagurt (1998) (equação 5.5), considerando o bagaço como combustível sólido úmido.

$$b_{bagaço} = \beta \cdot (PCI + L \cdot Z_w) + b_w \cdot Z_w \quad (5.5)$$

Onde:

$b_{bagaço}$  = exergia química específica do bagaço [kJ/kg]

$L$  = entalpia de vaporização da água [2442 kJ/kg]

$b_w$  = exergia química da água líquida [50 kJ/kg]

$Z_w$  = fração em massa da água presente no bagaço úmido [50%]

$PCI$  = 7560 kJ/kg

$\beta$  = coeficiente em massa de hidrogênio, carbono, oxigênio e nitrogênio presentes no bagaço, calculado conforme a equação 5.6:

$$\beta = \frac{\left( 1,0412 + 0,2160 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} - 0,2499 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C} \left[ 1 + 0,7884 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} \right] + 0,045 \cdot \frac{Z_{N_2}}{Z_C} \right)}{\left( 1 - 0,3035 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C} \right)} \quad (5.6)$$

Onde  $Z_{H_2}$ ,  $Z_C$ ,  $Z_{O_2}$ ,  $Z_{N_2}$  são as frações em massa dos diferentes elementos químicos presentes no bagaço. O valor de cada um estão apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Fração mássica dos elementos químicos do bagaço

$Z_{H_2}$	$Z_C$	$Z_{O_2}$	$Z_{N_2}$
0,0571	0,4966	0,4108	0,0021

Substituindo nas equações 5.7 e 5.8, tem-se a seguinte exergia específica do bagaço:

$$b_{bagaço} = 10094,26 \text{ kJ / kg} \quad (5.7)$$

Já para a determinação da exergia do caldo de cana-de-açúcar, este trabalho baseou-se na equação de Parra (2003), que determinou a exergia química do caldo pela seguinte expressão matemática:

$$b_{caldo} = \frac{(y_{sac} ex_{q,sac} MM_{sac} + y_{ag} ex_{q,ag} MM_{ag}) + RT_o (y_{sac} \ln(\gamma_{sac} y_{sac}) + y_{ag} \ln(\gamma_{ag} y_{ag}))}{MM_{ssa}} \quad (5.8)$$

Onde:

$b_{caldo}$  = exergia química específica do caldo [kJ/kg]

$y_{sac}$  = fração molar da sacarose

$ex_{q,sac}$  = exergia química padrão da sacarose [kJ/kmol]

$MM_{sac}$  = Massa molecular da sacarose [kg/kmol]

$y_{ag}$  = fração molar da água

$ex_{q,ag}$  = exergia química padrão da água [kJ/kmol]

$MM_{ag}$  = Massa molecular da água [kg/kmol]

$R$  = Constante universal dos gases [kJ/kmol K]

$T_o$  = Temperatura padrão [298 K]

$\gamma_{sac}$  = coeficiente de atividade da sacarose

$\gamma_{ag}$  = coeficiente de atividade da água

$MM_{ssa}$  = Massa molecular da solução água + sacarose [kg/kmol]

Fazendo as substituições na equação (5.8), determina-se o valor da exergia química do caldo de cana, conforme está apresentado na equação (5.9).

$$b_{caldo} = 2670 \text{ kJ / kg} \quad (5.9)$$

Como neste trabalho considerou que 1 t da cana-de-açúcar é extraído 280 kg de bagaço e 1020 kg de caldo, chega-se aos valores exergéticos do caldo e bagaço para uma tonelada de cana-de-açúcar, apresentado no esquema a seguir:

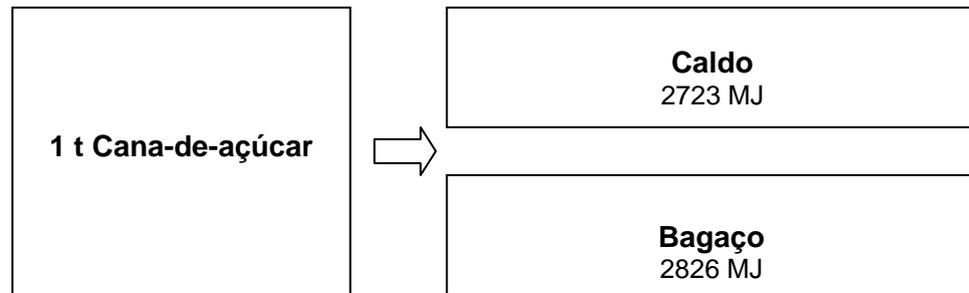


Figura 5.9 – Representação da distribuição da exergia da cana-de-açúcar

Logo, para a cana-de-açúcar, tem-se que sua exergia específica é de 5549 kJ/kg. Quanto à exergia química do etanol e metanol, estas apresentam respectivamente os seguintes valores: 29,6 MJ/kg e 22,437 MJ/kg (Hermann, 2006 e Ptasinski, 2002). Quanto a sua exergia física, considerou-se que ambos os combustíveis estão em condições padrão de temperatura e pressão, logo suas exergia físicas podem ser consideradas nulas. O mesmo foi considerado para o açúcar, que possui uma exergia química de 17,48 MJ/kg (Arredondo, 2009).

Determinada estas variáveis, os índices que indicam o desempenho do processo foram calculados, e estão apresentados na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Índices de desempenho calculados para os estudos de caso

	<b>FUE (%)</b>	<b>I<sub>exced</sub> (kWh/t cana)</b>	<b>η<sub>exerg</sub> (%)</b>	<b>η<sub>global</sub> (%)</b>
<b>Caso 1</b>	70,48	31,53	20,9	29
<b>Caso 2</b>	77,31	45,65	24,0	48
<b>Caso 3</b>	86,24	43,68	25,4	45
<b>Caso 4</b>	88,55	56,73	25,5	51

Comparando os valores do índice FUE da Tabela 5.5 em relação ao caso base (estudo de caso 1), todos apresentaram uma melhor eficiência energética. O estudo de caso 2 foi 9,69% maior que o caso base, enquanto o estudo de caso 3 e 4, o FUE foi 22,3% e 25,6 % superiores ao caso base respectivamente.

Já o índice  $I_{\text{exced}}$ , o estudo de caso 2 apresentou um valor 44,8% maior em relação ao estudo de caso base, enquanto o estudo de caso 3 teve um valor 38,5%. Esta diferença se deve principalmente pelo fato que o estudo de caso 3 apresenta uma usina de açúcar e álcool, que consome mais eletricidade que uma destilaria, assim a eletricidade excedente tende a ser menor. Porém, quando utiliza sistemas avançados de cogeração, BIG-GT, como no estudo de caso 4, o resultado obtido foi 80% maior em comparação ao caso base, comprovando uma das vantagens do sistema BIG-GT do ponto de vista da eficiência elétrica.

Quanto aos índices baseados na Segunda Lei, estes mostram resultados melhores para os estudos de caso onde houve melhor aproveitamento exergético da cana-de-açúcar (estudo 2,3 e 4), obtendo valores para a  $\eta_{\text{exerg}}$  14,8%, 21,5% e 22% maiores ao estudo de caso 1, respectivamente. Os casos 3 e 4, em especial foram melhores porque se obtém quatro produtos a partir da cana-de-açúcar (etanol, açúcar, metanol e eletricidade excedente).

O aproveitamento maior do valor exergético da cana-de-açúcar também influenciou os resultados da eficiência global, obtida nos quatro estudos de caso foram maiores nos estudos 2, 3 e 4, com valores 65,5%, 55,1%, 75,8% maiores ao estudo de caso 1, respectivamente. Tendo em conta que o estudo de caso 4 produziu a mesma quantidade de etanol e açúcar que o caso 3, porém a geração de eletricidade excedente foi maior, contribuindo assim pela obtenção de um melhor valor para a  $\eta_{\text{global}}$ .

Analisando agora os estudos de caso, sob o ponto de vista exergético e suas irreversibilidades, foram calculadas a exergia destruída dos componentes envolvidos em cada estudo de caso, utilizando a seguinte equação (Moran e Shapiro, 2006):

$$\dot{E}_d = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_i \dot{m}_i e_e - \sum_e \dot{m}_e e_s \quad (5.10)$$

Onde:

$\sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j$  = exergia transferida por unidade de tempo devido a transferência de

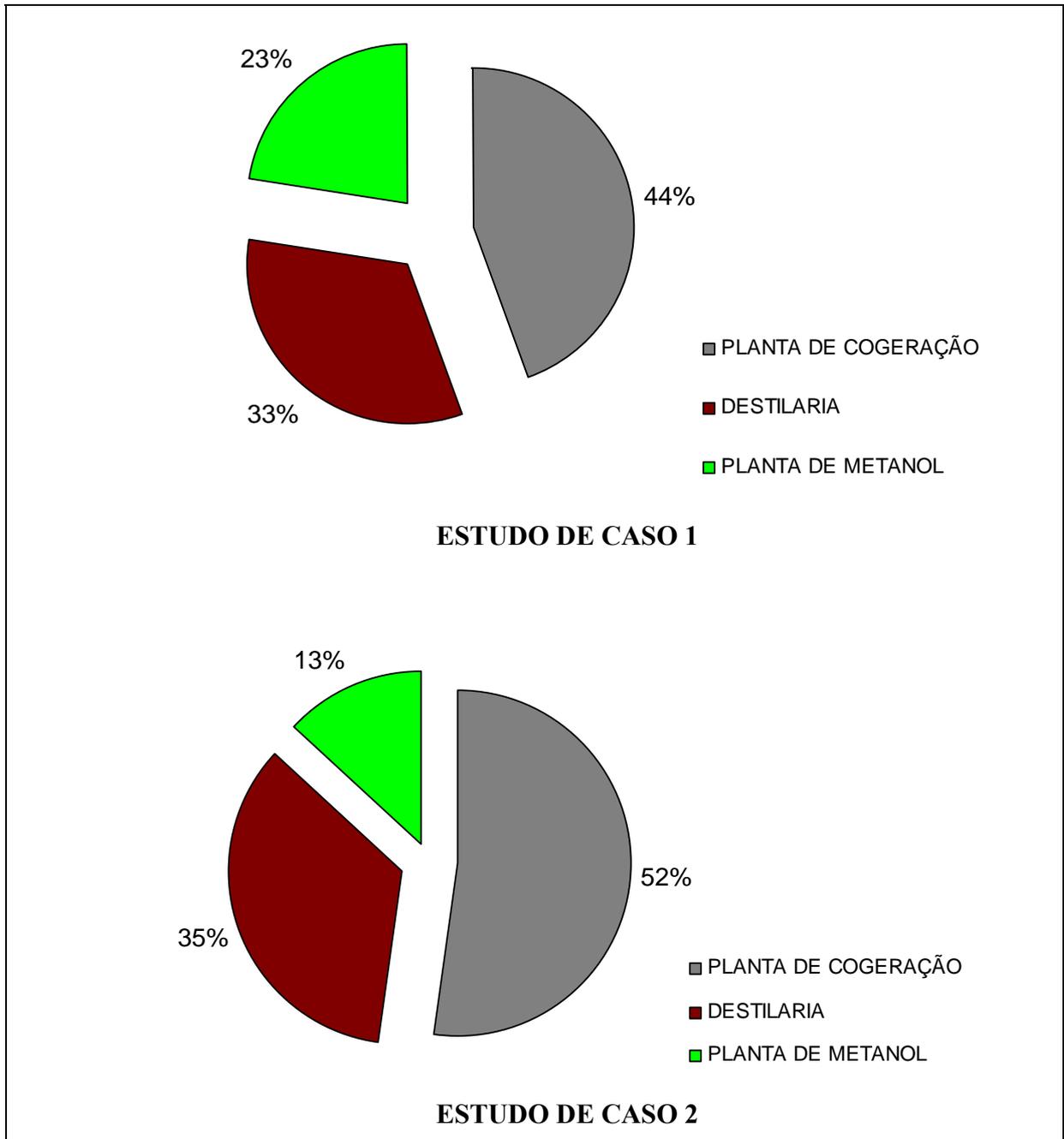
calor entre o volume de controle estabelecido que apresenta temperatura instantânea  $T_j$  (este termo foi desconsiderado nos cálculos)

$\dot{W}_{vc}$  = fluxo temporal de trabalho

$\sum_i \dot{m}_i e_e$  = Soma da transferência temporal exergética entrando no sistema.

$\sum_e \dot{m}_e e_s$  = Soma da transferência temporal exergética saindo do sistema.

Dos resultados calculados foi obtida a contribuição porcentual que cada unidade do sistema (planta de cogeração, planta de metanol e planta de açúcar e álcool) tem sob a exergia total destruída. Os resultados estão apresentados na Figura 5.10:



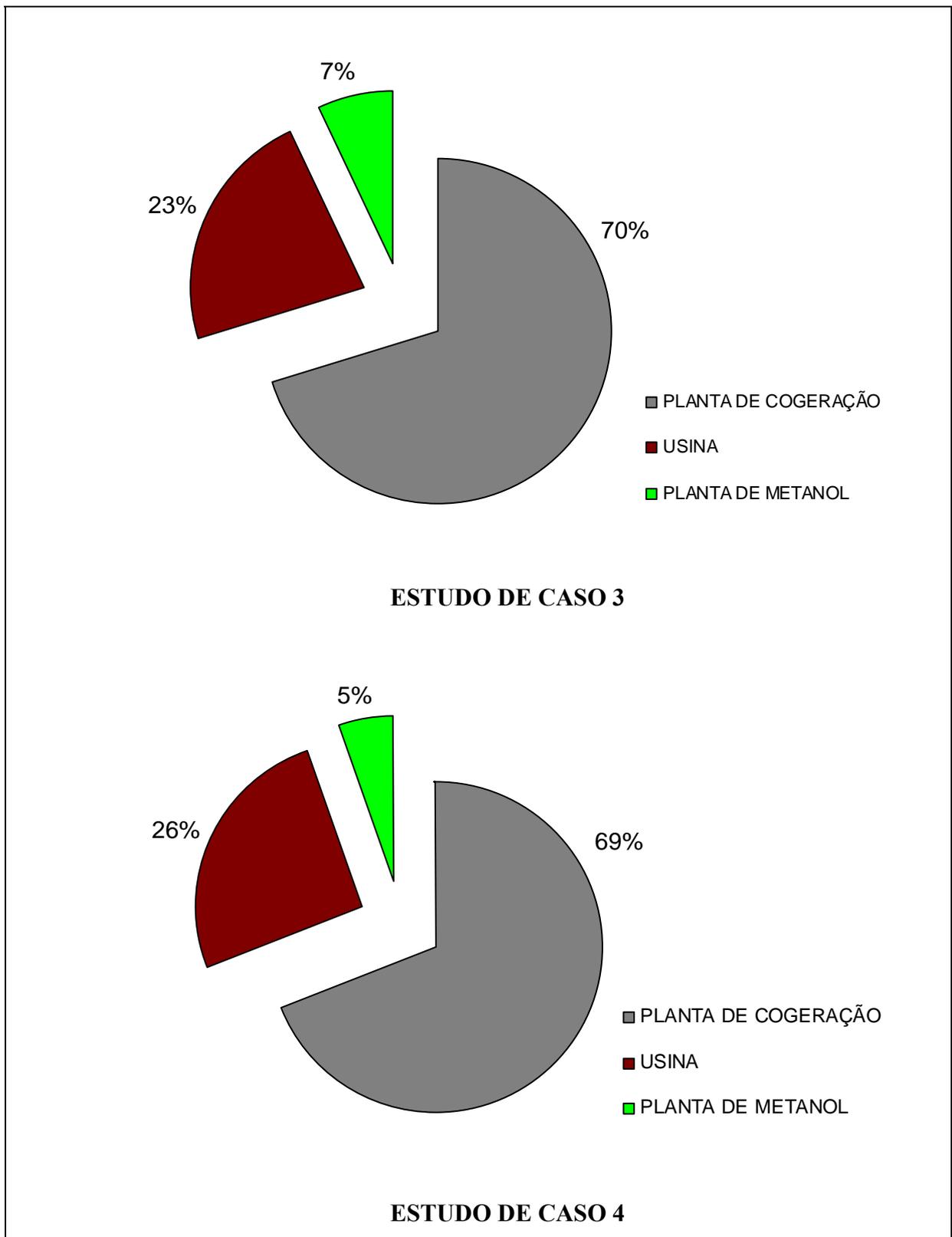


Figura 5.10 – Contribuição de cada unidade produtora sob a exergia total destruída

Na Figura 5.10 pode ser visto a expressiva participação do sistema de cogeração sob a exergia destruída total em cada estudo de caso. Uma fonte importante das irreversibilidades é a perda de calor do vapor para a vizinhança, à medida que o escoamento ocorre através dos diversos componentes.

No entanto, grande parte das irreversibilidades de um sistema de cogeração é proveniente das caldeiras, cerca de 80 a 90%. Isto se deve principalmente à troca de calor entre os gases de combustão e a água, cuja diferença de temperatura é elevada.

Em termos de valores numéricos o estudo de caso 4 foi o que apresentou um menor valor da exergia destruída para o sistema de cogeração (40% menor em relação ao estudo de caso 1). Tal fato deve-se principalmente a alta eficiência energética deste estudo de caso no qual foi aplicada a tecnologia BIG-GT, que resultou um alto índice de produção de eletricidade excedente (56 kWh/t cana).

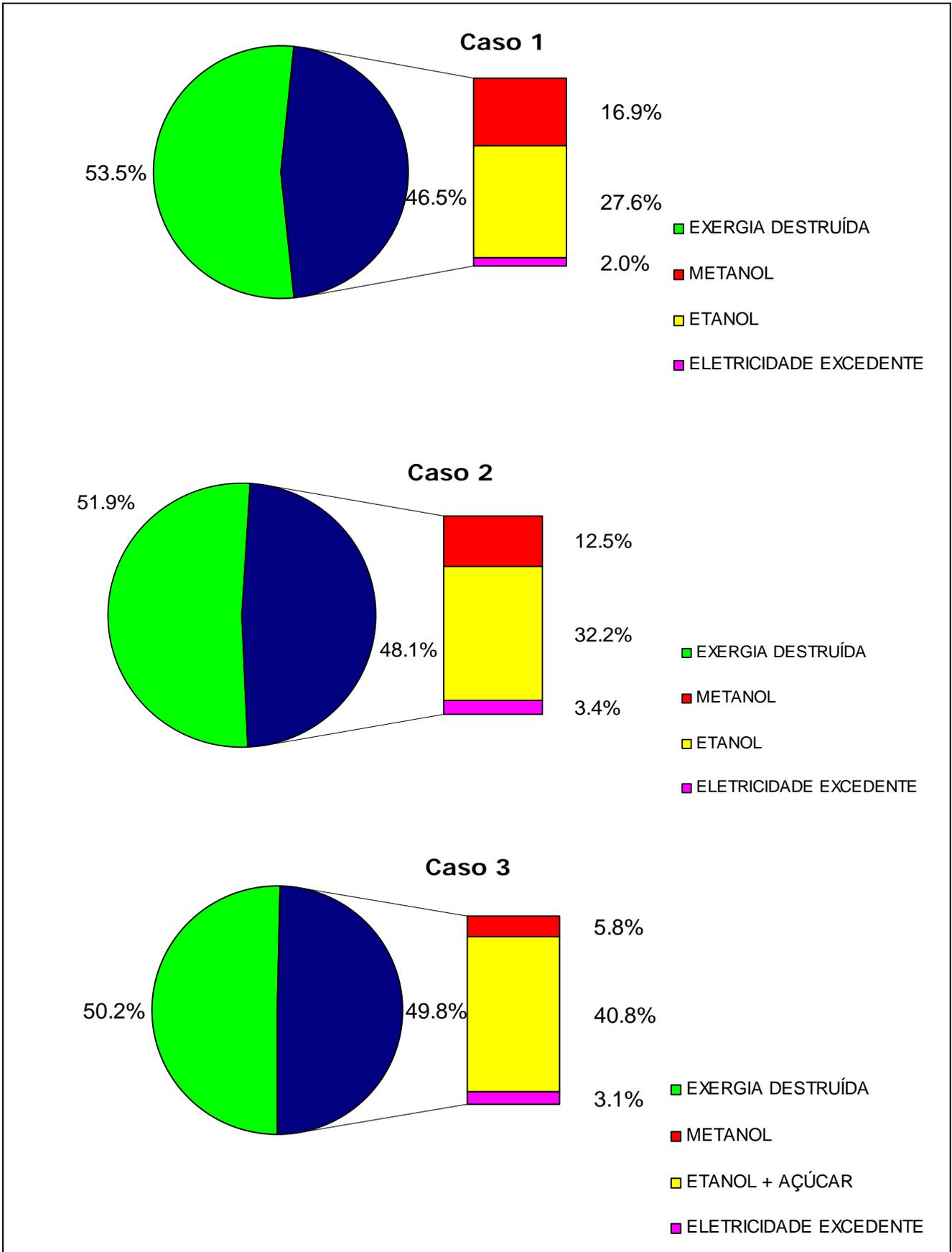
Além dos sistemas de cogeração, as usinas de açúcar e álcool e destilarias autônomas também são fontes de irreversibilidades, como mostra a Figura 5.10. As principais fontes destas irreversibilidades estão no processo de aquecimento de caldo e filtração, cada uma desta etapa contribui em 50 e 40 %, respectivamente sob valor da exergia destruída obtido nas usinas de açúcar e álcool e destilarias autônomas (Pellegrini, 2009).

Outro fator que influencia nas irreversibilidades dos estudos de caso analisados é o aproveitamento exergético da cana-de-açúcar. Enquanto no estudo de caso 1 e 2 somente produzia etanol a partir do caldo de cana, o estudo de caso 3 e 4 produzia etanol e açúcar a partir do mesmo. Como resultado os dois primeiros estudos obtiveram um valor numérico para a exergia destruída de aproximadamente 70% maior aos estudos 3 e 4.

Em relação à exergia destruída obtida nas plantas que produzem metanol a partir do bagaço, é o resultado de uma série de fatores. Dentre eles destaca-se a umidade da biomassa, pois quanto maior for o teor de água no processo indica que mais energia será usada para vaporização, e assim menos energia estará disponível para as reações endotérmicas responsáveis pela produção de  $H_2$  e CO. Por isto é recomendado uma umidade entre 10 a 20%.

Também o fato da síntese do metanol ser favorecida pela alta pressão do gás de síntese, resulta num consumo específico elevado de eletricidade (0,093 kWh/kg e metanol), já que o gás de síntese precisará passar por um processo de compressão para alcançar a pressão necessária ao processo, contribuindo assim com as irreversibilidades do processo.

Agora, analisando o aproveitamento exergético da cana-de-açúcar em cada estudo de caso, os gráficos da Figura 5.11, representa a exergia destruída, ou a parcela exergética da cana que não foi aproveitada, como também apresenta a exergia disponível (exergia dos produtos).



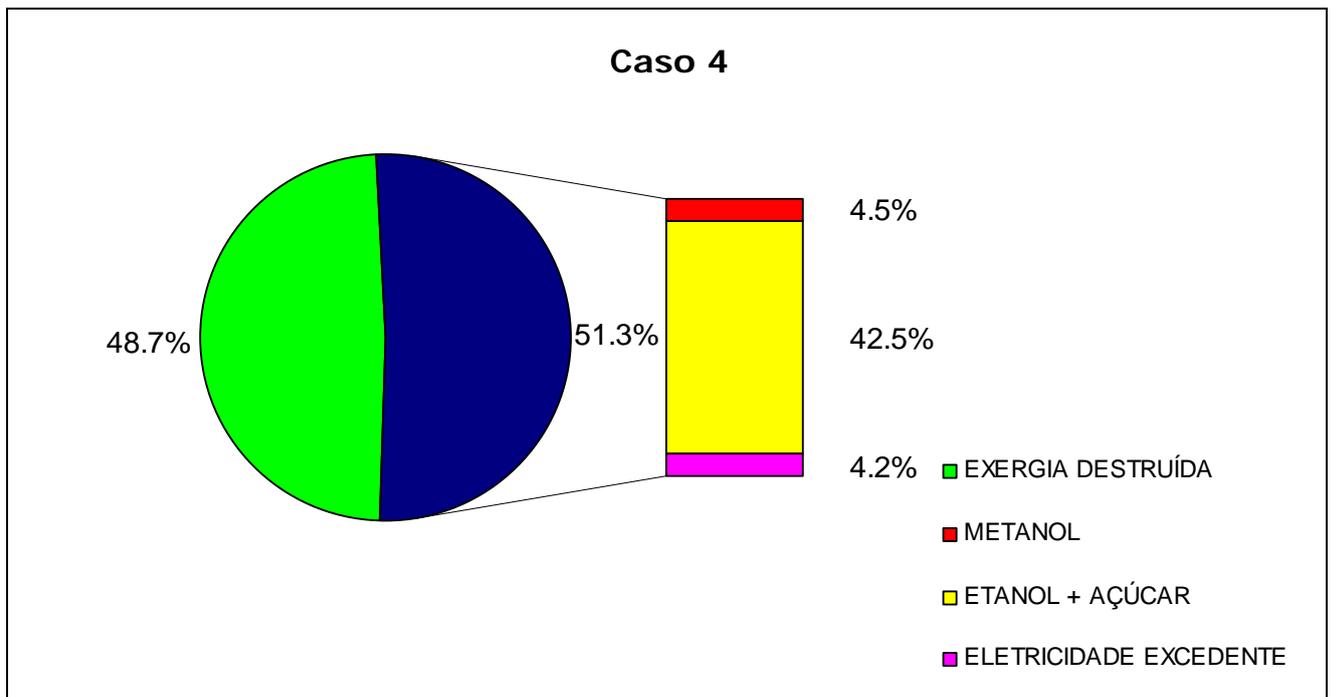


Figura 5.11 – Aproveitamento exerético da cana-de-açúcar

Os gráficos apresentados na Figura 5.11, mostra que a exergia destruída da cana-de-açúcar seguiu uma tendência decrescente desde o primeiro ao último estudo de caso. Do caso 1 para o caso 2 houve uma redução de 1,6%, isto ocorreu porque no primeiro estudo de caso a planta de metanol não foi suprida de vapor e eletricidade produzidos pelo sistema de cogeração com bagaço, mas sim por uma caldeira operando com combustível fóssil e pela rede elétrica local, respectivamente.

Em relação ao estudo de caso 1 para e o 3, a redução da exergia destruída foi de 3,1%. O principal motivo para tal foi o melhor aproveitamento exerético da cana-de-açúcar ao adicionar entre os produtos o açúcar. Assim, quando somam os valores exerético dos produtos obtém uma exergia disponível mais expressiva.

Quanto ao estudo de caso 3 e o 4, ambos produzem etanol, açúcar, metanol e eletricidade excedente. Porém, a capacidade de produção de metanol foi 34 % maior no estudo de caso 3 em relação ao estudo de caso 4, pois havia maior disponibilidade de bagaço, já que a palha de cana estava sendo usada como combustível no processo de cogeração.

Contudo, a produção de eletricidade excedente foi 35 % maior no estudo 4 em comparação ao estudo 3, devido principalmente a aplicação do sistema BIG-GT. Isto resultou que o primeiro tivesse um aproveitamento exerético 1,5 % maior da cana-de-açúcar em relação ao segundo.

## **Capítulo 6**

# **RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE METANOL**

No presente capítulo estão apresentados os resultados referentes aos impactos ambientais originados na produção de metanol, para atingir tais resultados foi aplicado a Análise do Ciclo de Vida.

A análise exergoambiental também foi realizada no presente capítulo para determinar o impacto ambiental causado pela exergia destruída dos equipamentos envolvidos no sistema de cogeração, como também pela planta de metanol e destilaria autônoma (ou usina para caso 3 e 4).

Finalmente foram determinados os indicadores de “eficiência energética do ciclo de vida” e “relação de energia fóssil”, como também foi feita uma comparação do ponto de vista ambiental entre a produção do metanol produzido a partir do gás natural e o metanol produzido a partir do bagaço.

## **6.1 ALOCAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS**

O procedimento de alocação dos impactos ambientais foi necessário neste trabalho porque em cada estudo de caso proposto, há a produção de mais de um produto. Nos estudo de caso 1 e 2 são produzidos metanol, etanol, eletricidade excedente, e no caso 3 e 4

acrescenta-se a produção de açúcar. Sendo que todos os produtos são provenientes da mesma fonte primária que neste caso é a cana-de-açúcar.

Assim, seguindo as recomendações para alocação de impactos ambientais da Norma ISO14040, este trabalho realizou a alocação com base nas propriedades físicas dos produtos. Especificamente no valor exergético dos produtos, que é mais vantajoso em relação ao valor energético. A vantagem do valor exergético se baseia no conceito de Szagurt (1988), de que a exergia é “a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, através de processos reversíveis, envolvendo apenas interação com os componentes do meio ambiente”.

Explicado o uso do valor exergético dos produtos para realizar a alocação dos impactos, o cálculo foi então inicializado com a determinação da quantidade dos produtos obtidos nos quatro estudos de caso, sendo referenciados a 1 tonelada de cana, para facilitar o cálculo. O resultado obtido está apresentado na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Produtos dos diferentes estudos de caso para a referência de 1 tonelada de cana-de-açúcar

<b>Produto</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>	<b>Unidade</b>
Eletricidade excedente	112,6	163,06	156,00	202,62	MJ
Metanol	50,52	31,96	15,60	11,62	l
Etanol	63,57	63,57	40,59	40,59	l
Açúcar	-	-	60	60	kg

Com os dados da Tabela 6.1, é possível determinar o valor exergético dos produtos. Para o presente trabalho não foi considerada a parcela física da exergia, pois considerou que os produtos estavam na condição padrão de temperatura e pressão.

Assim, o valor exergético dos produtos limitou à parcela da exergia química dos mesmos: metanol, etanol e açúcar. Quanto à eletricidade, o valor apresentado na Tabela 6.1 representa o valor exergético da eletricidade. O resultado da exergia calculada para cada produto está apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valores exergéticos dos produtos obtidos a partir de 1 tonelada de cana-de-açúcar

Produto	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Unidade
Eletricidade excedente	112,6	163,06	156,00	202,62	MJ
Metanol	942	596	291	217	MJ
Etanol	1543	1543	985	985	MJ
Açúcar	-	-	1049	1049	MJ

Agora, para determinar os fatores de alocação, divide-se cada valor exergético dos produtos em relação à soma dos valores exergéticos dos mesmos em cada estudo de caso. O resultado está apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Fatores de alocação para os impactos ambientais para cada estudo de caso

Produto	Caso 1 (%)	Caso 2 (%)	Caso 3 (%)	Caso 4 (%)
Eletricidade excedente	4,3	7,1	6,3	8,3
Metanol	36,3	25,9	11,7	8,8
Etanol	59,4	67,0	39,7	40,2
Açúcar	-	-	42,3	42,8

A partir dos fatores de alocação da Tabela 6.3, pode ser distribuído o impacto ambiental do cultivo e transporte da cana-de-açúcar entre os produtos obtidos a partir da cana-de-açúcar. Por exemplo, no estudo de caso 1 o impacto mencionado distribui-se na seguinte proporção:

Metanol: 36,3 %

Etanol: 59,4 %

Eletricidade excedente: 4,3 %

Realizada a etapa de alocação, pode-se dar continuidade para a determinação dos impactos ambientais da produção de metanol, como está apresentado no próximo item deste capítulo.

## 6.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS PARA OS ESTUDOS DE CASO

Nesta etapa do trabalho foram determinados os impactos ambientais da produção do metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar, utilizando o método Eco-Indicador 99 e como ferramenta computacional o software SimaPro 7. O resultado obtido para cada estudo de caso está apresentado na Tabela 6.4 e na Figura 6.1.

Tabela 6.4 – Impactos ambientais na produção de 1 kg de metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar obtidos com o método Eco-indicador 99

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Caso 1 (mPt)</b>	<b>Caso 2 (mPt)</b>	<b>Caso 3 (mPt)</b>	<b>Caso 4 (mPt)</b>
Carcinogênicos	2,79	0,201	0,099	0,079
Efeitos Respiratórios orgânicos	0,138	$2,84 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$	$1,22 \times 10^{-2}$
Efeitos Respiratórios inorgânicos	49,3	26,8	26,3	26,2
Mudança climática	28,5	7,77	13,5	14,7
Radiação	$2,01 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-3}$
Depleção da camada de ozônio	$2,41 \times 10^{-2}$	$5,84 \times 10^{-4}$	$5,49 \times 10^{-4}$	$5,42 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidade	0,986	$2,54 \times 10^{-2}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-2}$
Acidificação/eutrofização	4,81	4,52	4,05	3,96
Uso do solo	41,9	30,1	13,7	10,2
Uso de recursos minerais	2,13	1,64	0,81	0,63

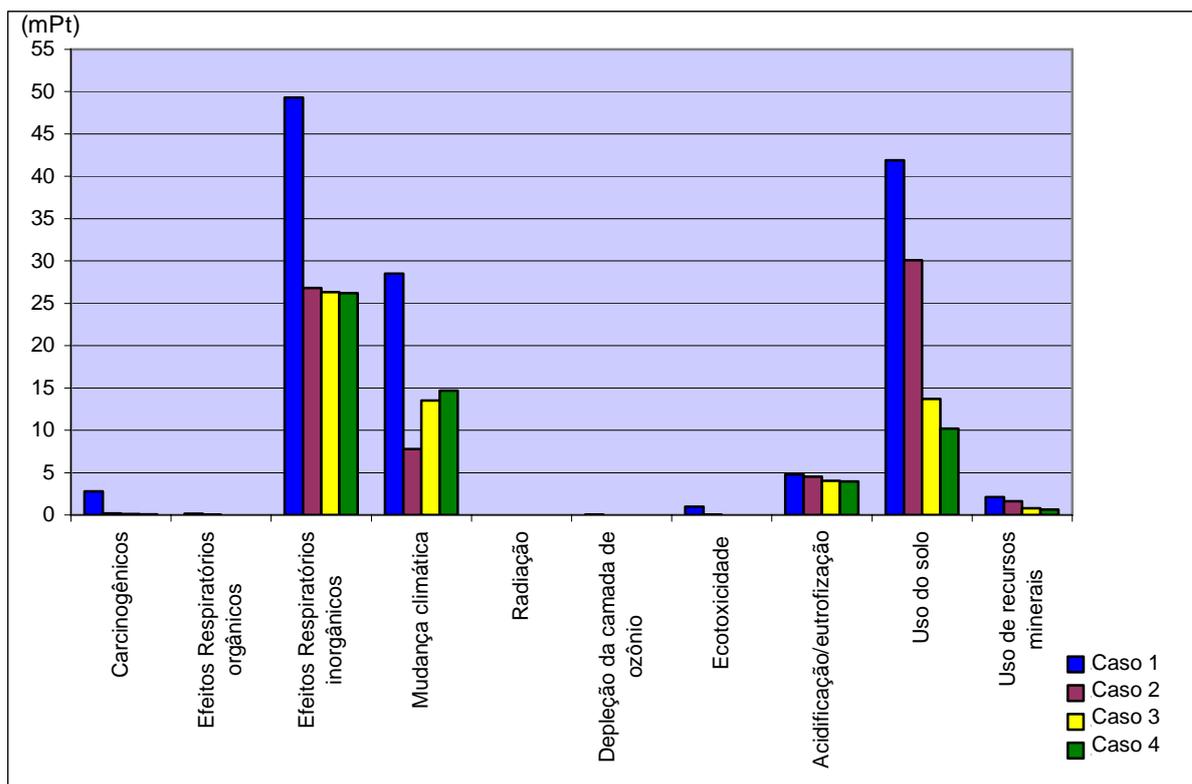


Figura 6.1 – Resultados dos impactos ambientais da produção do metanol a partir do bagaço

A partir da Figura 6.1, os resultados foram estratificados de acordo com a contribuição de cada etapa da produção de metanol sob os impactos ambientais. Para ilustrar esta contribuição, os gráficos da Figura 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 apresenta detalhadamente

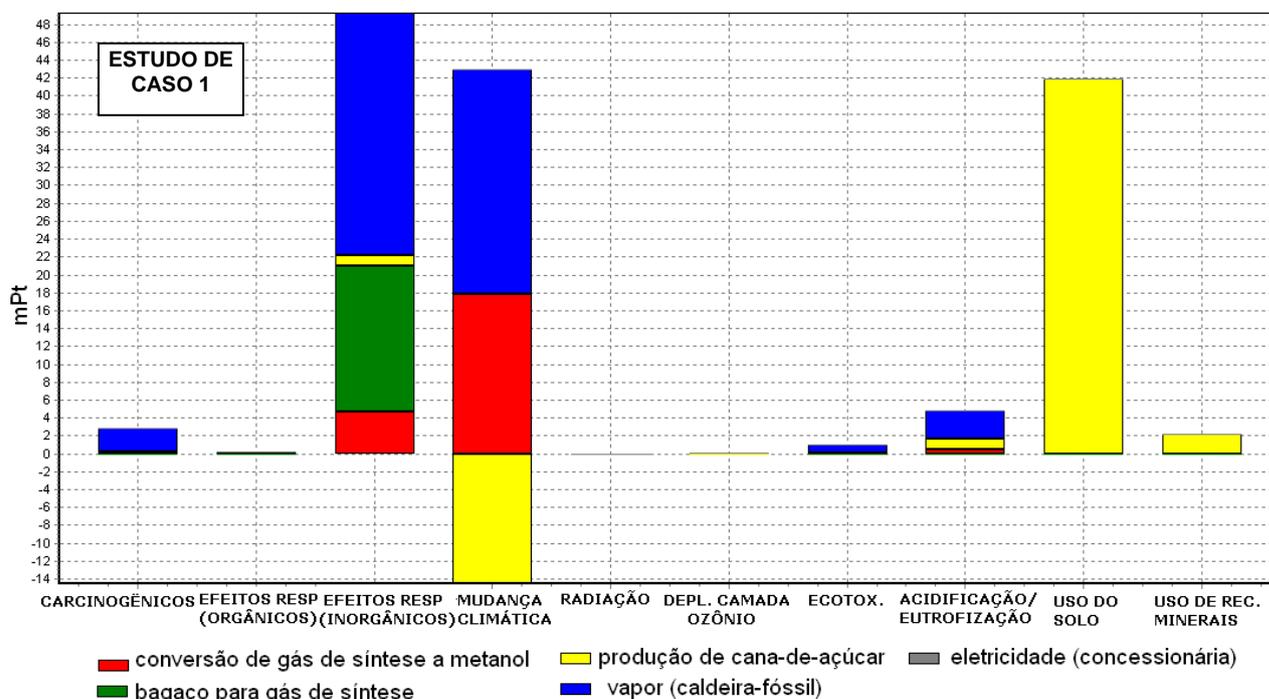


Figura 6.2 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 1

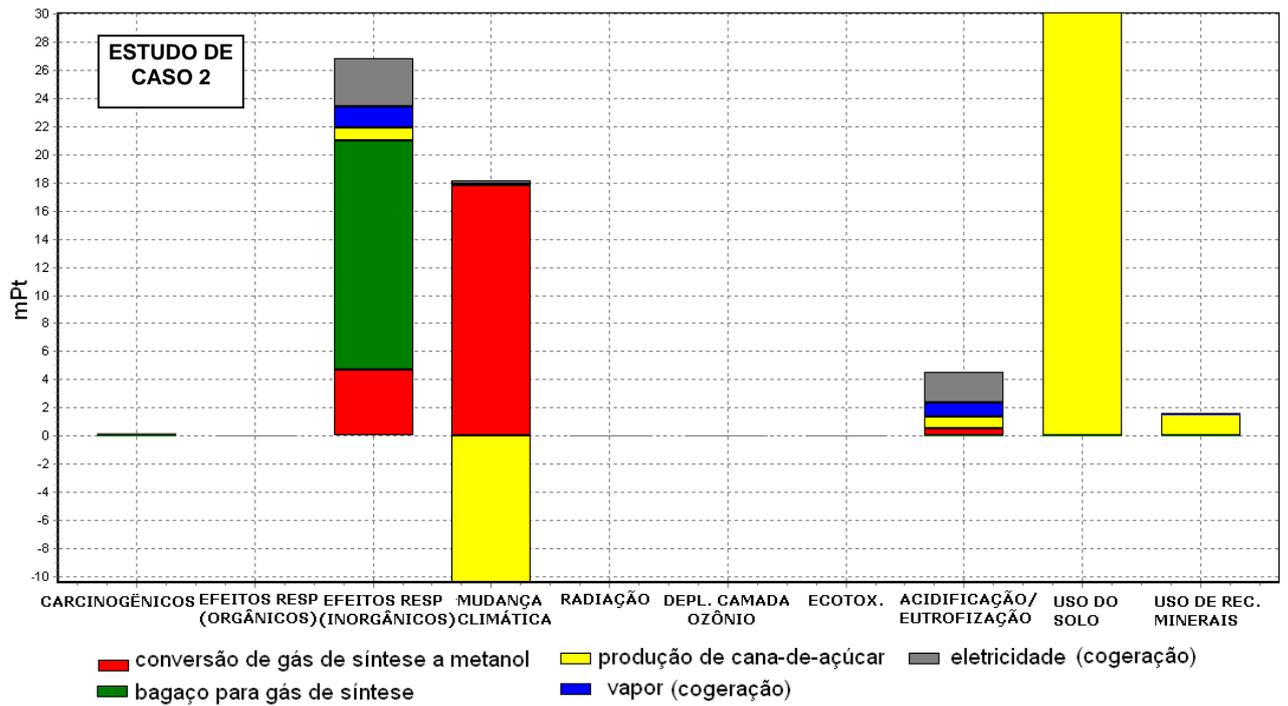


Figura 6.3 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 2

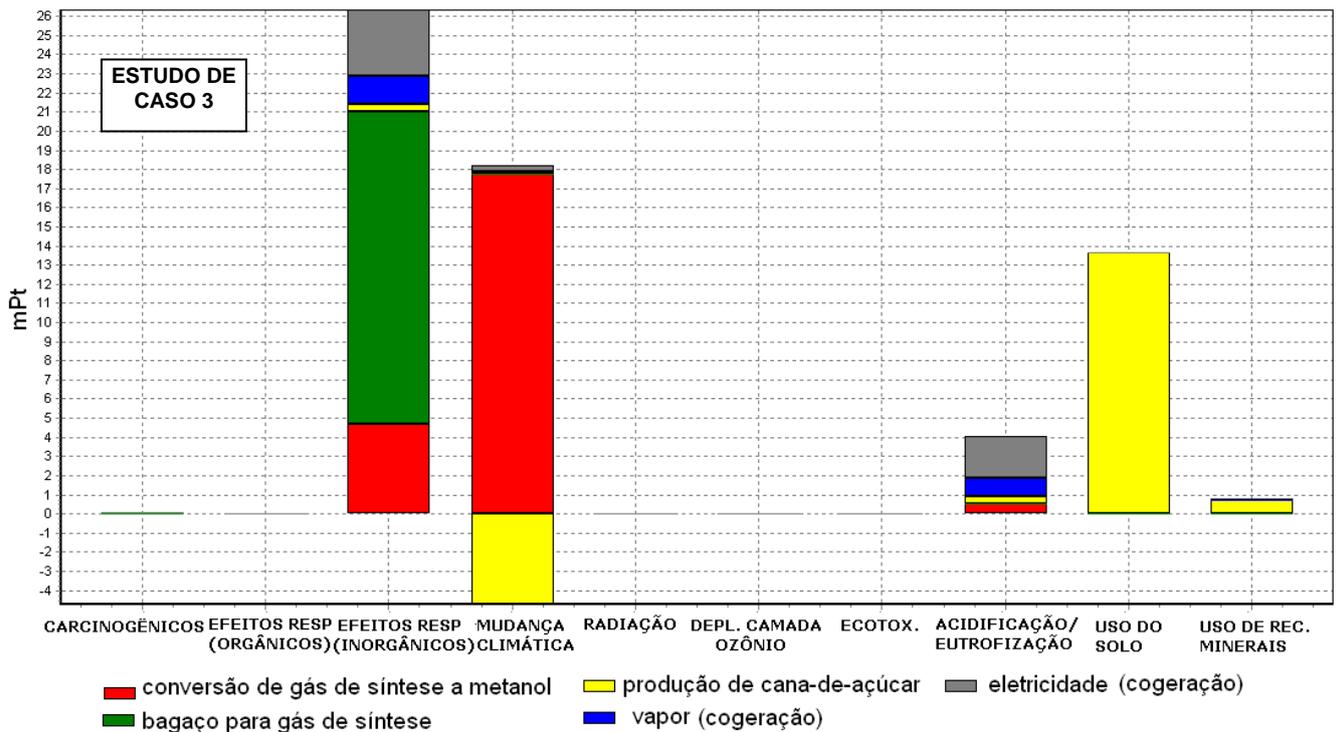


Figura 6.4 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 3

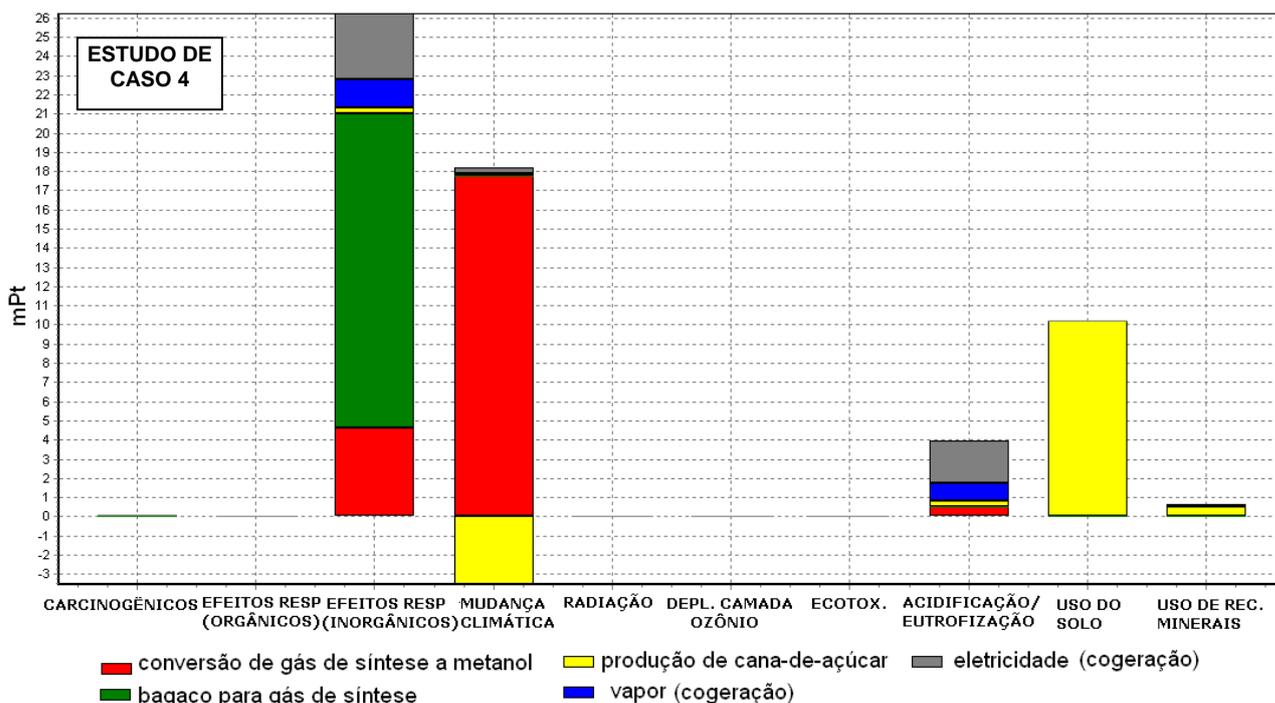


Figura 6.5 – Contribuição aos impactos ambientais de cada etapa da produção de metanol para o estudo de caso 4

Da Tabela 6.4 e Figuras 6.1, 6.2, 6.4, 6.5 foram discutidos os resultados para cada categoria de impacto, como mostra a seguir:

### Carcinogênicos

O impacto ambiental carcinogênico se relaciona com as substâncias cancerígenas emitidas e ligadas diretamente às causas do câncer, dentre as principais destacam: Arsênio, Amianto, Benzeno, Cádmio, Níquel e outros. Dentre os estudos de caso, o primeiro foi o mais expressivo para este impacto, conforme mostra a Tabela 6.4.

A principal causa foi o maior consumo de combustível fóssil (principalmente o gás natural para produção de vapor: 0,56 MJ de gás natural são consumidos para a produção de 1 MJ de metanol) neste estudo de caso em relação aos demais, provocando maiores emissões, dentre as quais estão os metais pesados, como mostra a Tabela A.2, do anexo A.

### Efeito respiratório orgânico

Este impacto se caracteriza pela formação do ozônio troposférico (gás bastante tóxico para os seres humanos que provoca irritações e danos nos olhos, na pele e nos pulmões) durante o verão. Este ozônio troposférico é fruto da reação dos óxidos de azoto com os compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar.

Como no inventário da produção do metanol determinado, as emissões foram baixas de compostos orgânicos voláteis (aproximadamente 0,08 g / kg metanol), o valor numérico deste impacto ambiental também resultou um valor baixo.

### **Efeito respiratório inorgânico**

Ao contrário do efeito respiratório orgânico, o impacto efeito respiratório inorgânico foi mais expressivo, como é visto na Tabela 6.4. Este impacto se relaciona principalmente às emissões de partículas, enxofre e óxidos de nitrogênio à atmosfera.

Na Figura 6.1 observa que o caso 1 foi muito mais expressivo para este impacto ambiental que os demais casos, cerca de duas vezes maior. Da Figura 6.2 pode ser visto que a produção de vapor pela caldeira fóssil é o maior contribuinte a este impacto, pois há emissões maiores de  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_x$ , fruto da combustão do combustível fóssil.

Também da Figura 6.2 nota-se a significativa contribuição do processo de conversão de bagaço a gás de síntese neste impacto, tal fato se deve as partículas emitidas pelo processo de gaseificação e que não foram capturadas pelo sistema de limpeza dos gases.

### **Mudança climática**

O impacto ambiental mudança climática é provocada pelas emissões de gases do efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e outros), sendo que grande parte destas emissões é decorrente da queima de combustíveis fósseis. Assim, devido ao maior consumo de combustível fóssil no estudo de caso 1, este apresentou maior valor numérico a este impacto ambiental.

Quanto aos outros estudos de casos, nota-se nos gráficos da Figura 6.2 que o processo de conversão de síntese de metanol é o maior contribuinte a este impacto, pois esta etapa emite quantidades altas de  $\text{CO}_2$ , como pode ser visto na Tabela 4.12 do Capítulo 4.

De qualquer forma, é importante dizer que o  $\text{CO}_2$  que está sendo emitido pelo processo de síntese do metanol, foi previamente absorvido pela cana-de-açúcar durante o seu crescimento pelo processo da fotossíntese, logo esta passa a ser uma das grandes vantagens dos biocombustíveis em relação aos fósseis.

### **Radiação**

O impacto ambiental radiação teve sua contribuição mínima, conforme mostra a Tabela 6.4, pois ao longo do processo a emissão de componentes radioativos ao meio ambiente são praticamente nulos.

### **Depleção da camada de ozônio**

A depleção da camada de ozônio em todos os casos foram valores relativamente pequenos. Isto porque este impacto relaciona-se com as emissões de compostos de cloro e brometo, e estas ocorrem não diretamente no processo e sim de forma indireta, como por exemplo, no processo de produção de diesel que é usado nos caminhões e tratores, como combustível.

### **Ecotoxicidade**

A categoria de impacto por ecotoxicidade compreende os impactos devido às emissões de substâncias tóxicas nos ecossistemas: aquático ou terrestre. Como mostra a Tabela 6.4, este impacto foi relativamente expressivo no estudo de Caso 1, devido aos efluentes líquidos produzidos, como estão apresentados na Tabela A.1, do anexo A.

### **Acidificação/eutrofização**

Os impactos ambientais acidificação/eutrofização são causados pela deposição de substâncias inorgânicas tais como sulfatos, nitratos e fosfatos. Estas deposições ocorrem principalmente através de emissões atmosféricas ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NH}_3$ ) ou diretamente na água, alterando assim o nível de acidez e de nutrientes do ecossistema. Pode ser observado da Figura 6.2 que a fase de produção de vapor pelas caldeiras operando com combustível fóssil ou com bagaço, como também a produção de eletricidade pelo sistema de cogeração são os maiores responsáveis por tal impacto, estando na faixa de contribuição entre 70 a 80%.

### **Uso do solo**

Já o impacto uso do solo é diretamente influenciado pelo cultivo da cana-de-açúcar que ocupa uma determinada área. Os resultados mostram que os estudos de caso 1 e 2 foram os que apresentaram valores numéricos maiores para tal impacto, principalmente o primeiro.

Tal fato relaciona-se com o fator de alocação do metanol nestes dois estudos de caso, o primeiro estudo apresentou um fator de alocação 40% maior ao estudo de caso 2, e obteve assim um impacto ambiental de uso do solo 30% maior em relação ao estudo de caso 2.

Já os estudos 3 e 4 apresentaram fatores de alocação 67% e 76% menores ao estudo de caso 1, conseqüentemente o impacto uso do solo neste estudo de caso foi cerca de 3 vezes maior em relação ao estudo de caso 3, e 4 vezes maior em relação ao estudo de caso 4.

### **Uso de Recursos minerais**

Este impacto ambiental está relacionado à extração de recursos minerais da natureza, nos estudos de casos analisados este impacto é afetado pelo uso de transporte na produção da cana-de-açúcar, pois ele consome minerais como o ferro, cobre, e outros. O resultado obtido em todos os estudos de caso foi pouco expressivo em termos de valores numéricos.

## **Normalização**

A Normalização realizada nos resultados teve como objetivo compreender melhor a magnitude relativa de cada resultado obtido aplicando o Eco-Indicador 99, em relação a um

sistema de referência. Provendo informação numa significância relativa do resultado dos indicadores.

Alguns exemplos de valores de referência são as emissões totais ou utilização de recursos para uma dada área, a qual pode ser global, regional, nacional ou local; as emissões totais ou utilização de recursos para uma dada área numa base *per capita* ou medição similar. A estrutura matemática da fase de normalização é a seguinte (Heijungs, 1996):

$$N_j = \frac{S_j}{A_j} \quad (6.1)$$

Onde:

$N_j$  – representa o resultado normalizado do impacto ambiental na categoria  $j$

$S_j$  – representa o resultado do impacto ambiental na categoria  $j$

$A_j$  – representa o fator de normalização que é a extensão do impacto ambiental na categoria  $j$  num determinado período de tempo (normalmente um ano) e numa dada área.

O resultado da normalização representa a contribuição específica da unidade funcional para as diferentes categorias de impacto agrupadas em danos. Porém existem algumas limitações ligadas a normalização, especialmente relacionadas com a escolha da área de referência e incerteza adicional relacionada com a falta de dados apropriados. Uma das formas de ultrapassar essas limitações é escolher uma área do mundo para todas as categorias. Outra possibilidade é escolher a região menor e transferir estes dados para o nível mundial na base da razão do PIB desse país e do PIB mundial, ou na base da razão do consumo de energia desse país e do consumo de energia mundial.

No método Eco-Indicador 99 os dados para a normalização foram coletados baseados nas intervenções ambientais resultante da produção europeia entre 1990 – 1994. Os valores normalizados aplicados neste método nas três categorias de danos estão listados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Valores normalizados no método Eco-Indicador 99 (SimaPro 7, 2004)

Danos	Valor Normalizado
Saúde humana	64,7
Qualidade do ecossistema	$1,95 \times 10^{-4}$
Recursos	$1,68 \times 10^{-4}$

O resultado da normalização para os quatro estudos de caso nas três categorias de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos, como pode ser visto nas figuras a seguir:

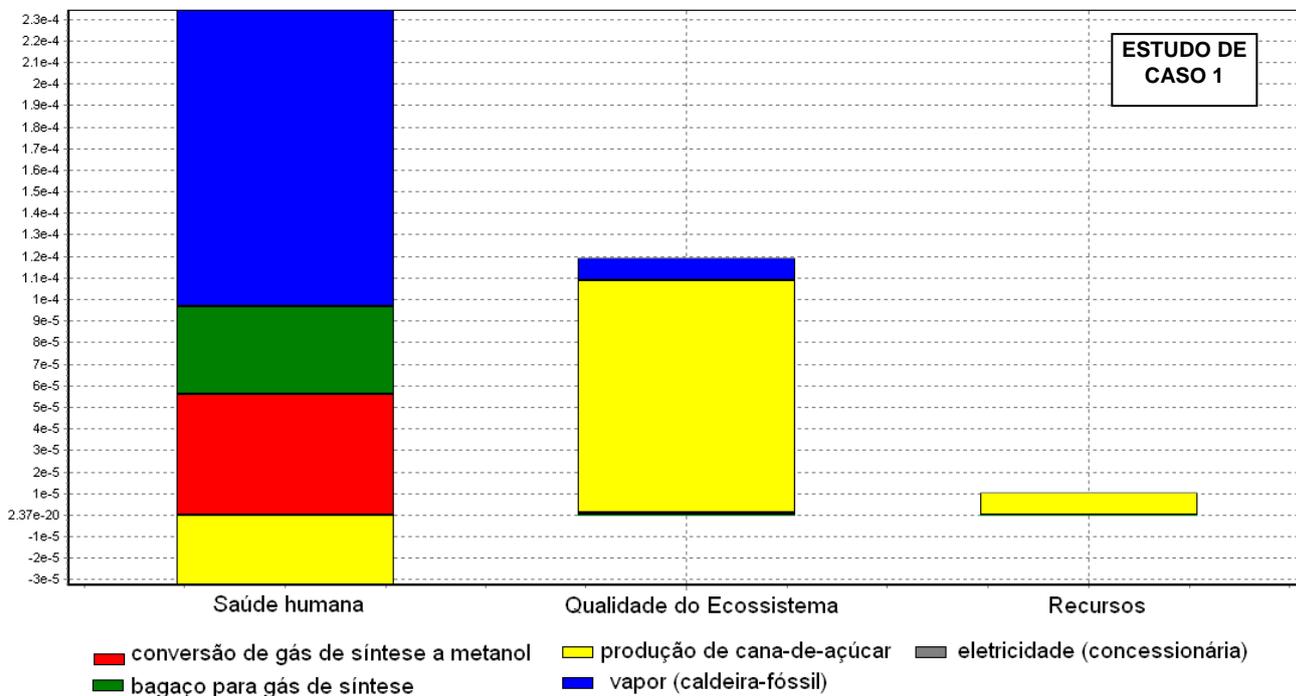


Figura 6.6 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 1

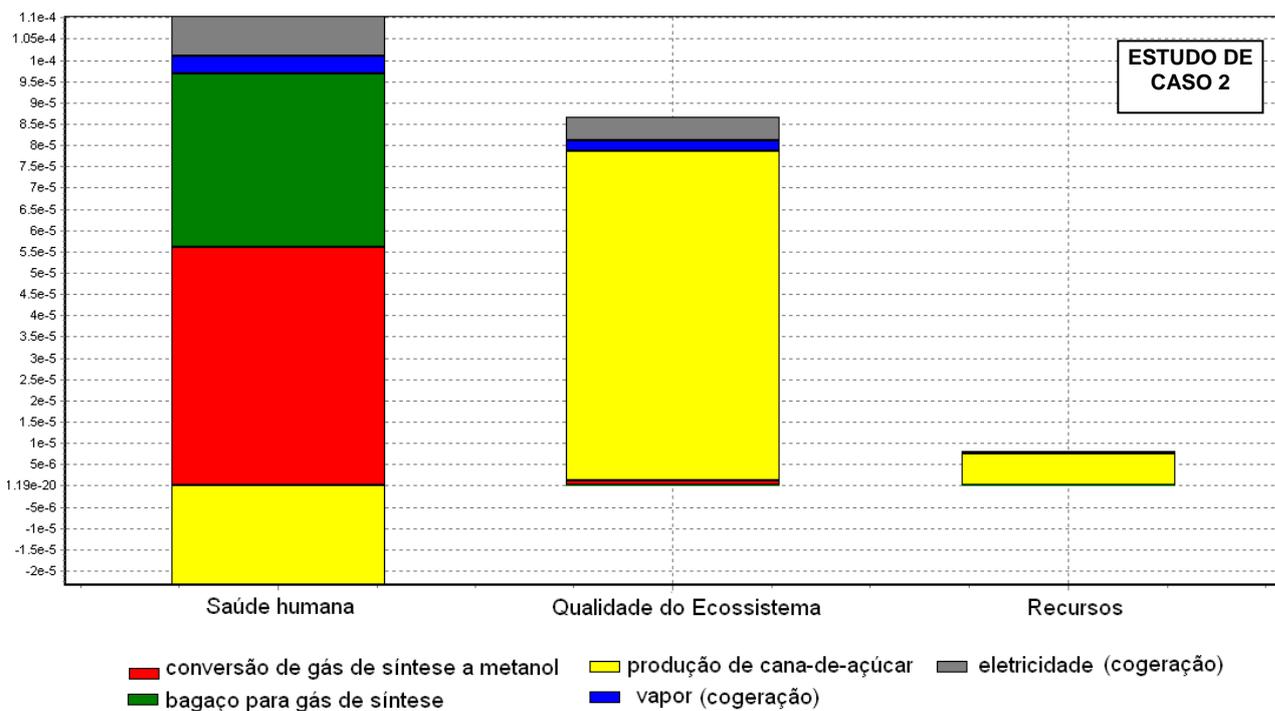


Figura 6.7 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 2

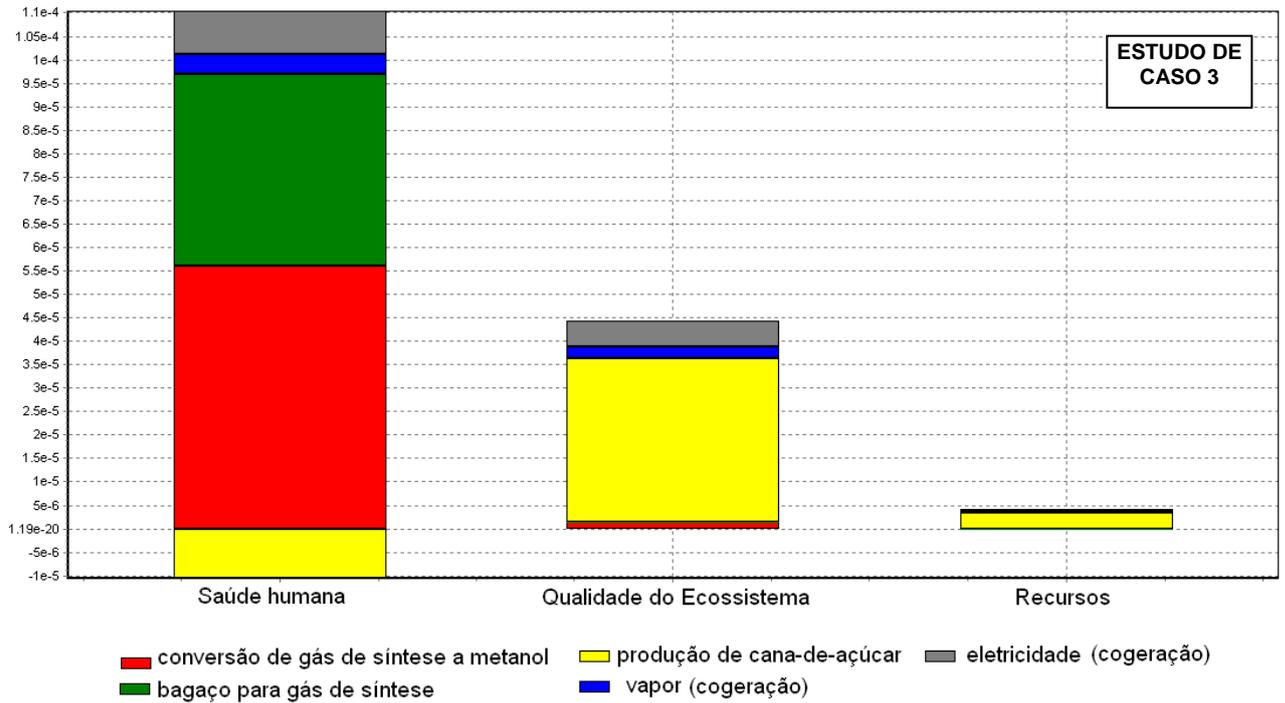


Figura 6.8 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 3

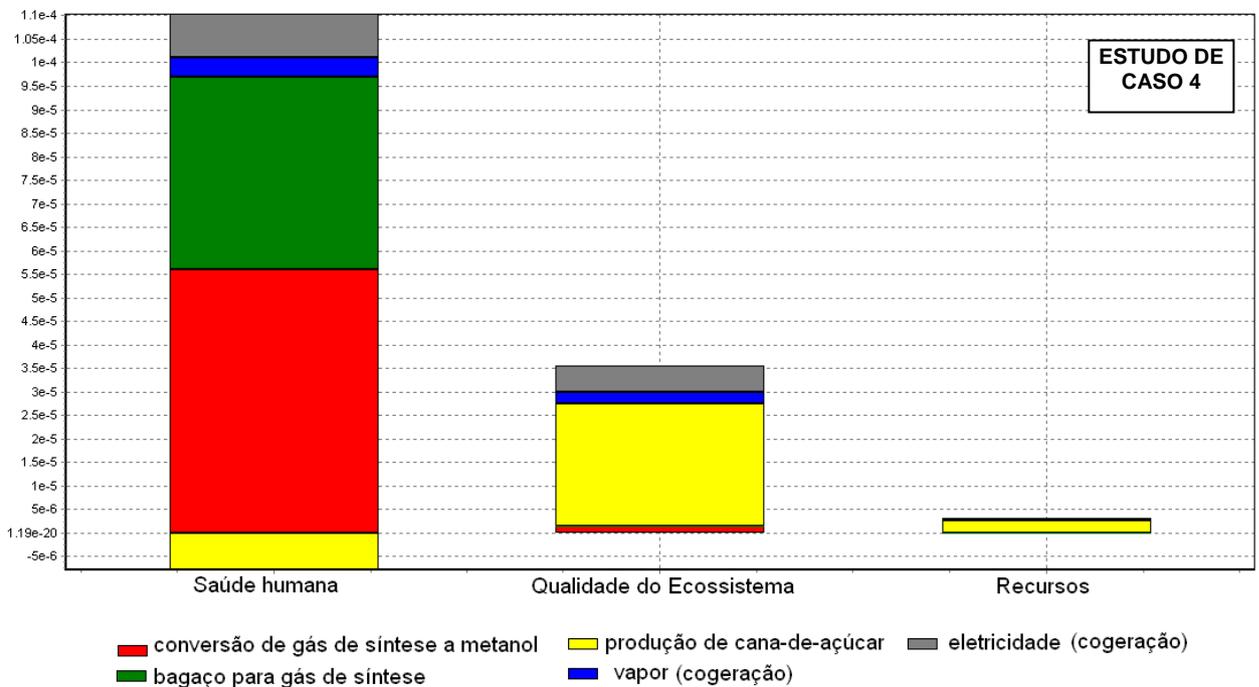


Figura 6.9 – Resultado normalizado para os diferentes danos ambientais para o estudo de caso 4

Nos resultados apresentados pode ser visto claramente que o dano à saúde humana foi o de maior magnitude para todos os estudos de caso, isto se deve principalmente aos poluentes emitidos durante a gaseificação do bagaço, no processo de síntese do metanol.

Uma ressalta para o estudo de caso 1 que apresentou uma magnitude de aproximadamente duas vezes maior aos demais para o dano à saúde humana, principalmente devido ao uso de combustível fóssil para produzir vapor na caldeira, ocasionando emissões maiores de poluentes, por isto esta etapa contribui com 68% ao dano à saúde humana neste estudo de caso. Aos demais estudos de caso, as contribuições maiores foram do estágio de gaseificação e síntese de metanol nas respectivas porcentagens aproximadamente: 37% e 51%, respectivamente.

Quanto ao dano à qualidade do ecossistema, os resultados mostram a maior contribuição da etapa de produção de cana-de-açúcar, já que esta etapa causa o impacto ambiental uso do solo, contribuindo assim para os estudos de caso 1, 2, 3 e 4 em 90, 89, 79 e 74%, respectivamente.

Finalmente o uso de recursos, que apresentaram valores numéricos baixos em relação aos demais, sendo a etapa de produção de cana-de-açúcar responsável em aproximadamente 90% por este dano em todos os estudos de casos, por consumir combustível fóssil no transporte da cana-de-açúcar e também utiliza recursos minerais na construção das máquinas agrícolas.

## **6.3 AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL**

Para realizar a avaliação exergoambiental partiu-se primeiramente das estruturas físicas de cada estudo de caso, que estão apresentadas na Figura 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, para os estudos de caso 1,2,3 e 4 respectivamente.

Em seguida foi elaborada a estrutura produtiva de cada estrutura física, para assim elaborar o modelo matemático. As estruturas produtivas estão apresentadas nas Figuras na seqüência:



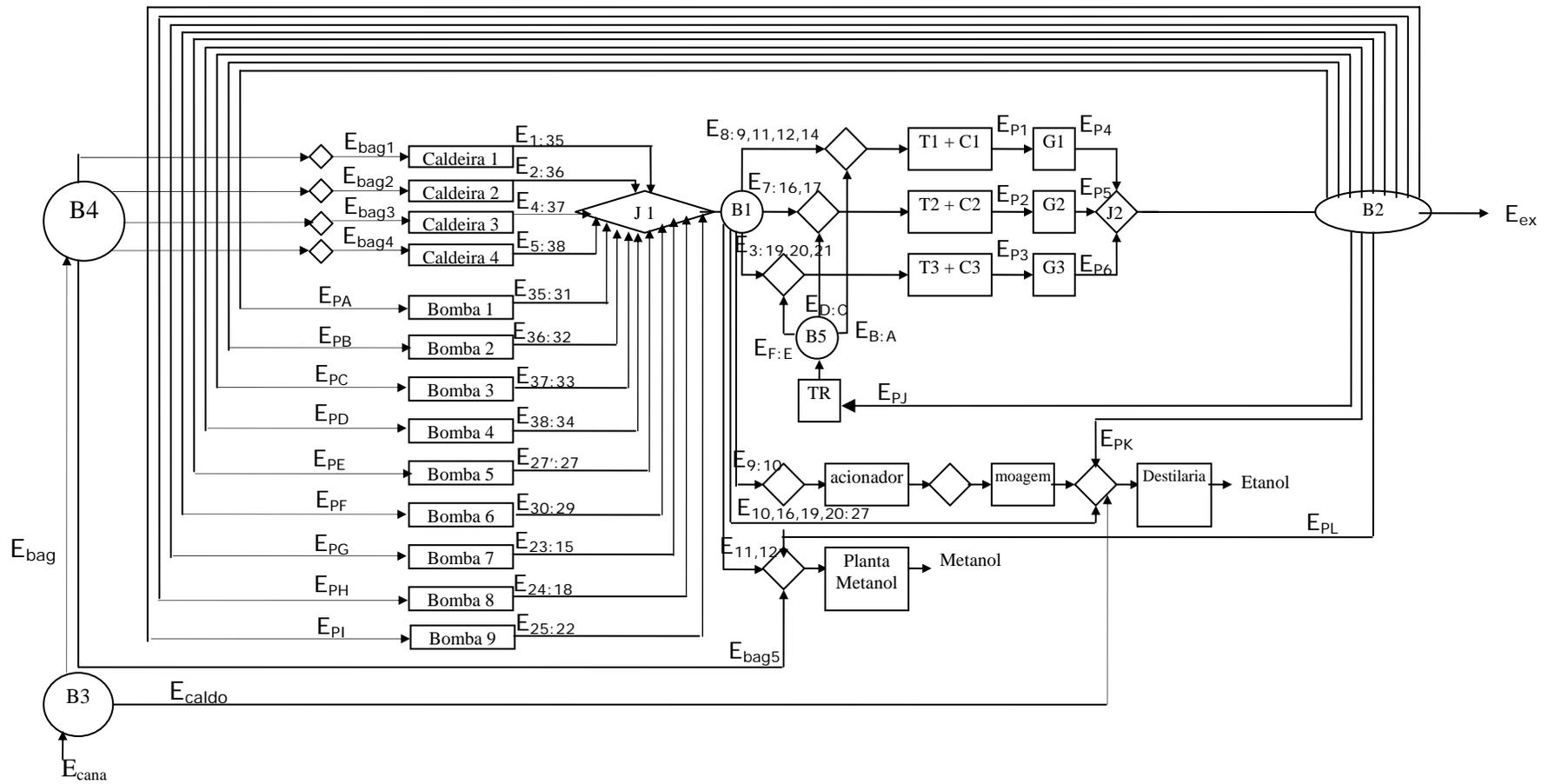


Figura 6.11 – Estrutura produtiva do estudo de caso 2

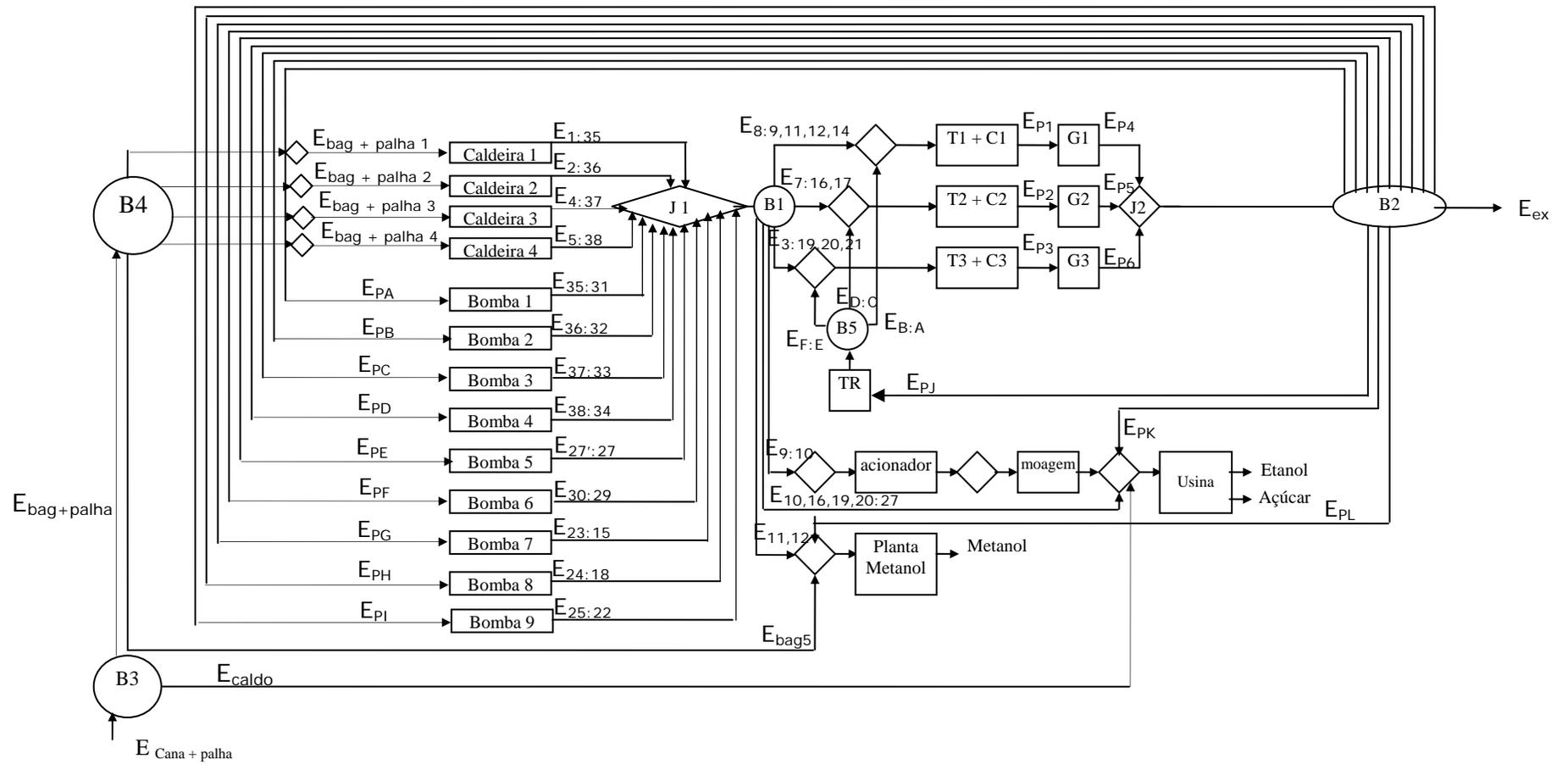


Figura 6.12 – Estrutura produtiva do estudo de caso 3

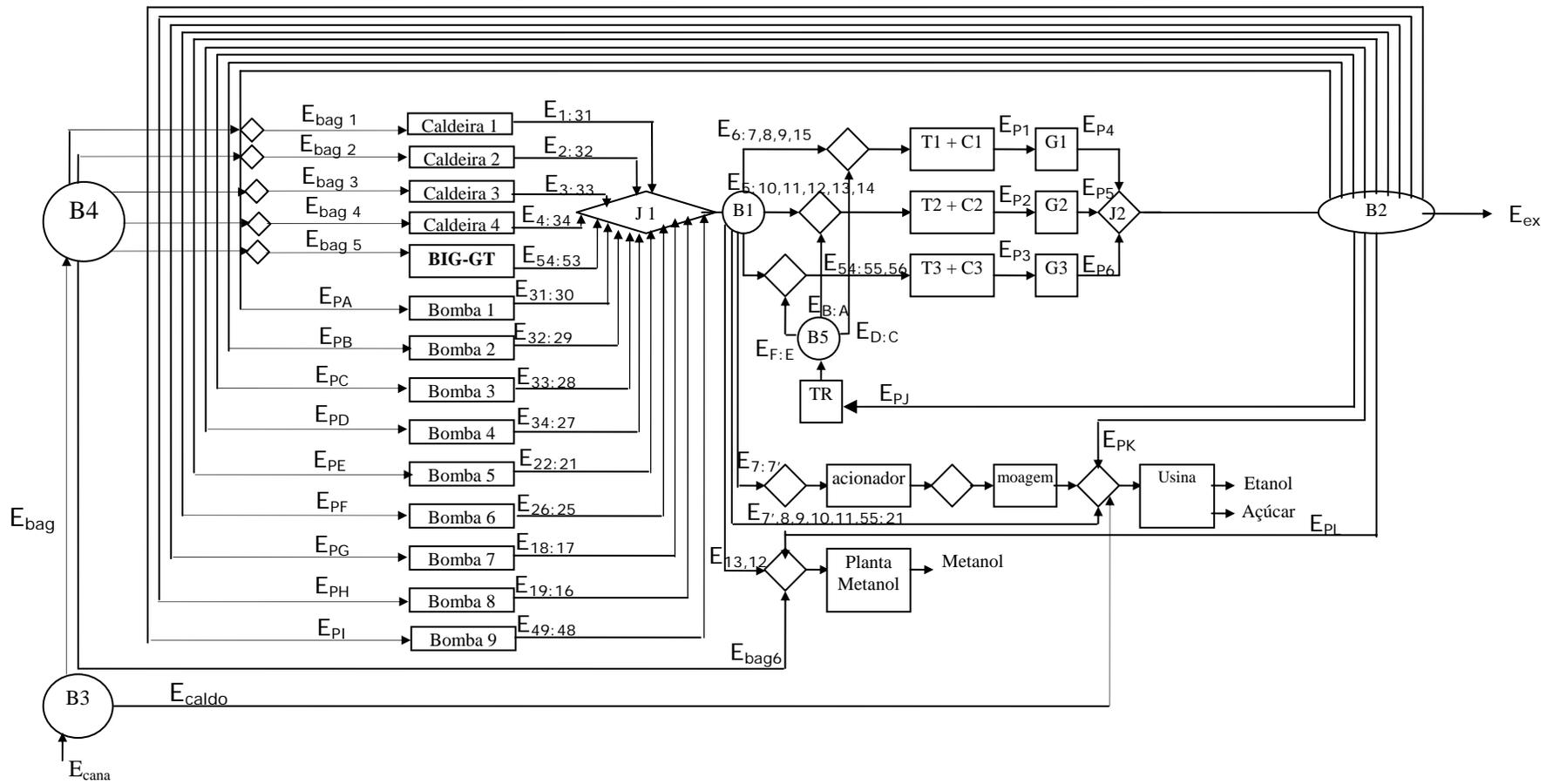


Figura 6.13 – Estrutura produtiva do estudo de caso 4

Para elaborar as equações matemáticas baseadas nas estruturas produtivas, assumiu por convenção que os fluxos de entrada exergéticos em cada componente da estrutura produtiva apresentam um valor negativo, e os de saída são positivos. As equações obtidas para o estudo de caso 1 estão apresentadas na Tabela 6.6:

Tabela 6.6 – Equacionamento matemático para o sistema do estudo de caso 1

<b>ESTUDO DE CASO 1</b>	
<b>Estrutura produtiva</b>	<b>Equação</b>
<b>B3</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} + b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} - b_{cana} \cdot \dot{E}_{cana} = \dot{Y}_{cana}$
<b>B4</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} = 0$
<b>Caldeira 1</b>	$b_{1:33} \cdot \dot{E}_{1:33} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} = 0$
<b>Caldeira 2</b>	$b_{2:34} \cdot \dot{E}_{2:34} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} = 0$
<b>Caldeira 3</b>	$b_{3:35} \cdot \dot{E}_{3:35} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} = 0$
<b>Bomba 1</b>	$b_{33:30} \cdot \dot{E}_{3:30} - b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} = 0$
<b>Bomba 2</b>	$b_{34:31} \cdot \dot{E}_{34:31} - b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} = 0$
<b>Bomba 3</b>	$b_{35:32} \cdot \dot{E}_{35:32} - b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} = 0$
<b>Bomba 4</b>	$b_{29:28} \cdot \dot{E}_{29:28} - b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} = 0$
<b>Bomba 5</b>	$b_{23:22} \cdot \dot{E}_{23:22} - b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} = 0$
<b>Bomba 6</b>	$b_{25:24} \cdot \dot{E}_{25:24} - b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} = 0$
<b>Bomba 7</b>	$b_{20:15} \cdot \dot{E}_{20:15} - b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} = 0$
<b>Bomba 8</b>	$b_{19:18} \cdot \dot{E}_{19:18} - b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} = 0$
<b>Bomba 9</b>	$b_{21:12} \cdot \dot{E}_{21:12} - b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} = 0$
<b>T1 + C1</b>	$b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} - b_{6:7,9,10,11} \cdot \dot{E}_{6:7,9,10,11} - b_{B:A} \cdot E_{B:A} = 0$
<b>T2 + C2</b>	$b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} - b_{5:13,14} \cdot \dot{E}_{5:13,14} - b_{D:C} \cdot E_{D:C} = 0$
<b>T3 + C3</b>	$b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} - b_{1:16,17} \cdot \dot{E}_{1:16,17} - b_{F:E} \cdot E_{F:E} = 0$
<b>G1</b>	$b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} = 0$
<b>G2</b>	$b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} = 0$
<b>G3</b>	$b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} - b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} = 0$
<b>Torre Resfriamento (TR)</b>	$b_{F:E} \cdot \dot{E}_{F:E} + b_{D:C} \cdot \dot{E}_{D:C} + b_{B:A} \cdot \dot{E}_{B:A} - b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} = 0$
<b>J2 + B2</b>	$b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} + b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} + b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} + b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} + b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} + b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} + b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} + b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} + b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} + b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} + b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} + b_{EX} \cdot \dot{E}_{EX} - b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} = 0$

<b>J1 + B1</b>	$b_{6:7,9,10,11} \cdot \dot{E}_{6:7,9,10,11} + b_{5:13,14} \cdot \dot{E}_{5:13,14} + b_{1:16,17} \cdot \dot{E}_{1:16,17} + b_{7:8} \cdot \dot{E}_{7:8}$ $+ b_{8,9,13,16:22,24} \cdot \dot{E}_{8,9,13,16:22,24} - b_{1:33} \cdot \dot{E}_{1:33} - b_{2:34} \cdot \dot{E}_{2:34} - b_{3:35} \cdot \dot{E}_{3:35}$ $- b_{33:30} \cdot \dot{E}_{33:30} - b_{34:31} \cdot \dot{E}_{34:31} - b_{35:32} \cdot \dot{E}_{35:32} - b_{29:28} \cdot \dot{E}_{29:28} - b_{23:22} \cdot \dot{E}_{23:22}$ $- b_{25:24} \cdot \dot{E}_{25:24} - b_{20:15} \cdot \dot{E}_{20:15} - b_{19:18} \cdot \dot{E}_{19:18} - b_{21:12} \cdot \dot{E}_{21:12} = 0$
<b>Destilaria</b>	$b_{etanol} \cdot \dot{E}_{etanol} - b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} - b_{8,9,13,16:22,24} \cdot \dot{E}_{8,9,13,16:22,24}$ $- b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} = 0$
<b>Acionador mecânico</b>	$b_{PM} \cdot \dot{E}_{PM} - b_{7:8} \cdot \dot{E}_{7:8} = 0$
<b>Planta de metanol</b>	$b_{metanol} \cdot \dot{E}_{metanol} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4} = 0$

O mesmo equacionamento foi feito para os demais estudos de caso (caso 2, caso 3 e caso 4), que estão apresentados abaixo na Tabela 6.7:

Tabela 6.7 – Equacionamento matemático para o sistema do estudo de caso 2,3,4

<b>ESTUDO DE CASO 2</b>	
<b>Estrutura produtiva</b>	<b>Equação</b>
<b>B3</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} + b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} - b_{cana} \cdot \dot{E}_{cana} = \dot{Y}_{cana}$
<b>B4</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4}$ $+ b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} = 0$
<b>Caldeira 1</b>	$b_{1:35} \cdot \dot{E}_{1:35} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} = 0$
<b>Caldeira 2</b>	$b_{2:36} \cdot \dot{E}_{2:36} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} = 0$
<b>Caldeira 3</b>	$b_{4:37} \cdot \dot{E}_{4:37} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} = 0$
<b>Caldeira 4</b>	$b_{5:38} \cdot \dot{E}_{5:38} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4} = 0$
<b>Bomba 1</b>	$b_{35:31} \cdot \dot{E}_{35:31} - b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} = 0$
<b>Bomba 2</b>	$b_{36:32} \cdot \dot{E}_{36:32} - b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} = 0$
<b>Bomba 3</b>	$b_{37:33} \cdot \dot{E}_{37:33} - b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} = 0$
<b>Bomba 4</b>	$b_{38:34} \cdot \dot{E}_{38:34} - b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} = 0$
<b>Bomba 5</b>	$b_{27:27} \cdot \dot{E}_{27:27} - b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} = 0$
<b>Bomba 6</b>	$b_{30:29} \cdot \dot{E}_{30:29} - b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} = 0$
<b>Bomba 7</b>	$b_{23:15} \cdot \dot{E}_{23:15} - b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} = 0$
<b>Bomba 8</b>	$b_{24:18} \cdot \dot{E}_{24:18} - b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} = 0$
<b>Bomba 9</b>	$b_{25:22} \cdot \dot{E}_{25:22} - b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} = 0$
<b>T1 + C1</b>	$b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} - b_{8,9,11,12,14} \cdot \dot{E}_{8,9,11,12,14} - b_{B:A} \cdot E_{B:A} = 0$
<b>T2 + C2</b>	$b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} - b_{7:16,17} \cdot \dot{E}_{7:16,17} - b_{D:C} \cdot E_{D:C} = 0$

<b>T3 + C3</b>	$b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} - b_{3:19,20,21} \cdot \dot{E}_{3:19,20,21} - b_{F:E} \cdot E_{F:E} = 0$
<b>G1</b>	$b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} = 0$
<b>G2</b>	$b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} = 0$
<b>G3</b>	$b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} - b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} = 0$
<b>Torre Resfriamento (TR)</b>	$b_{F:E} \cdot \dot{E}_{F:E} + b_{D:C} \cdot \dot{E}_{D:C} + b_{B:A} \cdot \dot{E}_{B:A} - b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} = 0$
<b>J2 + B2</b>	$b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} + b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} + b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} + b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} + b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} + b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} + b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} + b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} + b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} + b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} + b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} + b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} + b_{EX} \cdot \dot{E}_{EX} - b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} = 0$
<b>J1 + B1</b>	$b_{8:9,11,12,14} \cdot \dot{E}_{8:9,11,12,14} + b_{7:16,17} \cdot \dot{E}_{7:16,17} + b_{3:19,20,21} \cdot \dot{E}_{3:19,20,21} + b_{9:10} \cdot \dot{E}_{9:10} + b_{10,16,19,20:27} \cdot \dot{E}_{10,16,19,20:27} + b_{11,12} \cdot \dot{E}_{11,12} - b_{1:35} \cdot \dot{E}_{1:35} - b_{2:36} \cdot \dot{E}_{2:36} - b_{4:37} \cdot \dot{E}_{4:37} - b_{5:38} \cdot \dot{E}_{5:38} - b_{35:31} \cdot \dot{E}_{35:31} - b_{36:32} \cdot \dot{E}_{36:32} - b_{37:33} \cdot \dot{E}_{37:33} - b_{38:34} \cdot \dot{E}_{38:34} - b_{27:27} \cdot \dot{E}_{27:27} - b_{30:29} \cdot \dot{E}_{30:29} - b_{23:15} \cdot \dot{E}_{23:15} - b_{24:18} \cdot \dot{E}_{24:18} - b_{25:22} \cdot \dot{E}_{25:22} = 0$
<b>Destilaria</b>	$b_{etanol} \cdot \dot{E}_{etanol} - b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} - b_{10,16,19,20:27} \cdot \dot{E}_{10,16,19,20:27} - b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} = 0$
<b>Acionador mecânico</b>	$b_{PM} \cdot \dot{E}_{PM} - b_{9:10} \cdot \dot{E}_{9:10} = 0$
<b>Planta de metanol</b>	$b_{metanol} \cdot \dot{E}_{metanol} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} - b_{11,12} \cdot \dot{E}_{11,12} - b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} = 0$

### ESTUDO DE CASO 3

<b>Estrutura produtiva</b>	<b>Equação</b>
<b>B3</b>	$b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha} + b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} - b_{cana} \cdot \dot{E}_{cana} = \dot{Y}_{cana}$
<b>B4</b>	$b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha1} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag+palha2} + b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha3} + b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha4} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha} = 0$
<b>Caldeira 1</b>	$b_{1:35} \cdot \dot{E}_{1:35} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha1} = 0$
<b>Caldeira 2</b>	$b_{2:36} \cdot \dot{E}_{2:36} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha2} = 0$
<b>Caldeira 3</b>	$b_{4:37} \cdot \dot{E}_{4:37} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha3} = 0$
<b>Caldeira 4</b>	$b_{5:38} \cdot \dot{E}_{5:38} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha4} = 0$
<b>Bomba 1</b>	$b_{35:31} \cdot \dot{E}_{35:31} - b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} = 0$
<b>Bomba 2</b>	$b_{36:32} \cdot \dot{E}_{36:32} - b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} = 0$
<b>Bomba 3</b>	$b_{37:33} \cdot \dot{E}_{37:33} - b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} = 0$
<b>Bomba 4</b>	$b_{38:34} \cdot \dot{E}_{38:34} - b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} = 0$
<b>Bomba 5</b>	$b_{27:27} \cdot \dot{E}_{27:27} - b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} = 0$
<b>Bomba 6</b>	$b_{30:29} \cdot \dot{E}_{30:29} - b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} = 0$
<b>Bomba 7</b>	$b_{23:15} \cdot \dot{E}_{23:15} - b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} = 0$
<b>Bomba 8</b>	$b_{24:18} \cdot \dot{E}_{24:18} - b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} = 0$

<b>Bomba 9</b>	$b_{25:22} \cdot \dot{E}_{25:22} - b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} = 0$
<b>T1 + C1</b>	$b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} - b_{8:9,11,12,14} \cdot \dot{E}_{8:9,11,12,14} - b_{B:A} \cdot E_{B:A} = 0$
<b>T2 + C2</b>	$b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} - b_{7:16,17} \cdot \dot{E}_{7:16,17} - b_{D:C} \cdot E_{D:C} = 0$
<b>T3 + C3</b>	$b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} - b_{3:19,20,21} \cdot \dot{E}_{3:19,20,21} - b_{F:E} \cdot E_{F:E} = 0$
<b>G1</b>	$b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} = 0$
<b>G2</b>	$b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} = 0$
<b>G3</b>	$b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} - b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} = 0$
<b>Torre Resfriamento (TR)</b>	$b_{F:E} \cdot \dot{E}_{F:E} + b_{D:C} \cdot \dot{E}_{D:C} + b_{B:A} \cdot \dot{E}_{B:A} - b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} = 0$
<b>J2 + B2</b>	$b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} + b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} + b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} + b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} + b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} + b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} + b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} + b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} + b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} + b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} + b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} + b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} + b_{EX} \cdot \dot{E}_{EX} - b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} = 0$
<b>J1 + B1</b>	$b_{8:9,11,12,14} \cdot \dot{E}_{8:9,11,12,14} + b_{7:16,17} \cdot \dot{E}_{7:16,17} + b_{3:19,20,21} \cdot \dot{E}_{3:19,20,21} + b_{9:10} \cdot \dot{E}_{9:10} + b_{10,16,19,20:27} \cdot \dot{E}_{10,16,19,20:27} + b_{11,12} \cdot \dot{E}_{11,12} - b_{1:35} \cdot \dot{E}_{1:35} - b_{2:36} \cdot \dot{E}_{2:36} - b_{4:37} \cdot \dot{E}_{4:37} - b_{5:38} \cdot \dot{E}_{5:38} - b_{35:31} \cdot \dot{E}_{35:31} - b_{36:32} \cdot \dot{E}_{36:32} - b_{37:33} \cdot \dot{E}_{37:33} - b_{38:34} \cdot \dot{E}_{38:34} - b_{27:27} \cdot \dot{E}_{27:27} - b_{30:29} \cdot \dot{E}_{30:29} - b_{23:15} \cdot \dot{E}_{23:15} - b_{24:18} \cdot \dot{E}_{24:18} - b_{25:22} \cdot \dot{E}_{25:22} = 0$
<b>Usina</b>	$b_{etanol} \cdot \dot{E}_{etanol} + b_{açúcar} \cdot \dot{E}_{açúcar} - b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} - b_{10,16,19,20:27} \cdot \dot{E}_{10,16,19,20:27} - b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} = 0$
<b>Accionador mecânico</b>	$b_{PM} \cdot \dot{E}_{PM} - b_{9:10} \cdot \dot{E}_{9:10} = 0$
<b>Planta de metanol</b>	$b_{metanol} \cdot \dot{E}_{metanol} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} - b_{11,12} \cdot \dot{E}_{11,12} - b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} = 0$

#### ESTUDO DE CASO 4

Estrutura produtiva	Equação
<b>B3</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} + b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} - b_{cana} \cdot \dot{E}_{cana} = \dot{Y}_{cana}$
<b>B4</b>	$b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4} + b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag} = 0$
<b>Caldeira 1</b>	$b_{1:31} \cdot \dot{E}_{1:31} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag1} = 0$
<b>Caldeira 2</b>	$b_{2:32} \cdot \dot{E}_{2:32} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag2} = 0$
<b>Caldeira 3</b>	$b_{3:33} \cdot \dot{E}_{3:33} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag3} = 0$
<b>Caldeira 4</b>	$b_{4:34} \cdot \dot{E}_{4:34} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag4} = 0$
<b>Caldeira 4</b>	$b_{5:38} \cdot \dot{E}_{5:38} - b_{bag+palha} \cdot \dot{E}_{bag+palha4} = 0$
<b>BIG-GT</b>	$b_{54:53} \cdot \dot{E}_{54:53} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag5} = 0$
<b>Bomba 1</b>	$b_{31:30} \cdot \dot{E}_{31:30} - b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} = 0$
<b>Bomba 2</b>	$b_{32:29} \cdot \dot{E}_{32:29} - b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} = 0$

<b>Bomba 3</b>	$b_{33:28} \cdot \dot{E}_{33:28} - b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} = 0$
<b>Bomba 4</b>	$b_{34:27} \cdot \dot{E}_{34:27} - b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} = 0$
<b>Bomba 5</b>	$b_{22:21} \cdot \dot{E}_{22:21} - b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} = 0$
<b>Bomba 6</b>	$b_{26:25} \cdot \dot{E}_{26:25} - b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} = 0$
<b>Bomba 7</b>	$b_{18:17} \cdot \dot{E}_{18:17} - b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} = 0$
<b>Bomba 8</b>	$b_{19:16} \cdot \dot{E}_{19:16} - b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} = 0$
<b>Bomba 9</b>	$b_{49:48} \cdot \dot{E}_{49:48} - b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} = 0$
<b>T1 + C1</b>	$b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} - b_{6:7,8,9,15} \cdot \dot{E}_{6:7,8,9,15} - b_{D:C} \cdot \dot{E}_{D:C} = 0$
<b>T2 + C2</b>	$b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} - b_{5:10,11,12,13,14} \cdot \dot{E}_{5:10,11,12,13,14} - b_{B:A} \cdot \dot{E}_{B:A} = 0$
<b>T3 + C3</b>	$b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} - b_{54:55,56} \cdot \dot{E}_{54:55,56} - b_{F:E} \cdot \dot{E}_{F:E} = 0$
<b>G1</b>	$b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P1} \cdot \dot{E}_{P1} = 0$
<b>G2</b>	$b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P2} \cdot \dot{E}_{P2} = 0$
<b>G3</b>	$b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} - b_{P3} \cdot \dot{E}_{P3} = 0$
<b>Torre Resfriamento (TR)</b>	$b_{F:E} \cdot \dot{E}_{F:E} + b_{D:C} \cdot \dot{E}_{D:C} + b_{B:A} \cdot \dot{E}_{B:A} - b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} = 0$
<b>J2 + B2</b>	$b_{PA} \cdot \dot{E}_{PA} + b_{PB} \cdot \dot{E}_{PB} + b_{PC} \cdot \dot{E}_{PC} + b_{PD} \cdot \dot{E}_{PD} + b_{PE} \cdot \dot{E}_{PE} + b_{PF} \cdot \dot{E}_{PF} + b_{PG} \cdot \dot{E}_{PG} + b_{PH} \cdot \dot{E}_{PH} + b_{PI} \cdot \dot{E}_{PI} + b_{PJ} \cdot \dot{E}_{PJ} + b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} + b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} + b_{EX} \cdot \dot{E}_{EX} - b_{P4} \cdot \dot{E}_{P4} - b_{P5} \cdot \dot{E}_{P5} - b_{P6} \cdot \dot{E}_{P6} = 0$
<b>J1 + B1</b>	$b_{6:7,8,9,15} \cdot \dot{E}_{6:7,8,9,15} + b_{5:10,11,12,13,14} \cdot \dot{E}_{5:10,11,12,13,14} + b_{54:55,56} \cdot \dot{E}_{54:55,56} + b_{7:7'} \cdot \dot{E}_{7:7'} + b_{7',8,9,10,11,55:21} \cdot \dot{E}_{7',8,9,10,11,55:21} + b_{13,12} \cdot \dot{E}_{13,12} - b_{1:31} \cdot \dot{E}_{1:31} - b_{2:32} \cdot \dot{E}_{2:32} - b_{3:33} \cdot \dot{E}_{3:33} - b_{4:34} \cdot \dot{E}_{4:34} - b_{54:53} \cdot \dot{E}_{54:53} - b_{31:30} \cdot \dot{E}_{31:30} - b_{32:29} \cdot \dot{E}_{32:29} - b_{33:28} \cdot \dot{E}_{33:28} - b_{34:27} \cdot \dot{E}_{34:27} - b_{22:21} \cdot \dot{E}_{22:21} - b_{26:25} \cdot \dot{E}_{26:25} - b_{18:17} \cdot \dot{E}_{18:17} - b_{19:16} \cdot \dot{E}_{19:16} - b_{49:48} \cdot \dot{E}_{49:48} = 0$
<b>Usina</b>	$b_{etanol} \cdot \dot{E}_{etanol} + b_{açúcar} \cdot \dot{E}_{açúcar} - b_{PK} \cdot \dot{E}_{PK} - b_{7',8,9,10,11,55:21} \cdot \dot{E}_{7',8,9,10,11,55:21} - b_{caldo} \cdot \dot{E}_{caldo} = 0$
<b>Acionador mecânico</b>	$b_{PM} \cdot \dot{E}_{PM} - b_{7:7'} \cdot \dot{E}_{7:7'} = 0$
<b>Planta de metanol</b>	$b_{metanol} \cdot \dot{E}_{metanol} - b_{bag} \cdot \dot{E}_{bag6} - b_{13,12} \cdot \dot{E}_{13,12} - b_{PL} \cdot \dot{E}_{PL} = 0$

Com a solução dos sistemas lineares de equações foi possível calcular a variável impacto ambiental específico  $b_{F,k}$  (mPts/kJ) associado com o combustível de cada componente dos sistemas e determinar posteriormente o impacto ambiental da exergia destruída ( $\dot{B}_{D,K}$ ) referentes aos principais equipamentos e à planta de metanol e destilaria (e

também usina de açúcar e álcool). O resultado do cálculo do impacto ambiental da exergia destruída está apresentado na Tabela 6.8:

Tabela 6.8 – Impacto ambiental da exergia destruída para os estudos de caso

<b>Unidade física</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>CASO 4</b>
	$\dot{B}_{D,K}$ (mPts/s)	$\dot{B}_{D,K}$ (mPts/s)	$\dot{B}_{D,K}$ (mPts/s)	$\dot{B}_{D,K}$ (mPts/s)
BOMBA 1	$7,71 \times 10^{-8}$	$5,42 \times 10^{-8}$	$1,21 \times 10^{-7}$	$4,88 \times 10^{-8}$
BOMBA 2	$2,31 \times 10^{-7}$	$5,42 \times 10^{-8}$	$1,07 \times 10^{-7}$	$1,31 \times 10^{-7}$
BOMBA 3	$2,31 \times 10^{-7}$	$9,03 \times 10^{-8}$	$1,61 \times 10^{-7}$	$5,05 \times 10^{-6}$
BOMBA 4	$9,77 \times 10^{-8}$	$9,03 \times 10^{-8}$	$1,61 \times 10^{-7}$	$1,58 \times 10^{-7}$
BOMBA 5	$8,55 \times 10^{-7}$	$1,62 \times 10^{-7}$	$1,31 \times 10^{-8}$	$1,09 \times 10^{-6}$
BOMBA 6	$4,87 \times 10^{-7}$	$2,47 \times 10^{-8}$	$4,01 \times 10^{-9}$	$2,83 \times 10^{-7}$
BOMBA 7	$5,04 \times 10^{-10}$	$1,94 \times 10^{-10}$	$3,95 \times 10^{-10}$	$3,88 \times 10^{-10}$
BOMBA 8	$1,14 \times 10^{-9}$	$2,30 \times 10^{-10}$	$6,00 \times 10^{-10}$	$2,75 \times 10^{-9}$
BOMBA 9	$5,52 \times 10^{-10}$	$1,95 \times 10^{-10}$	$5,35 \times 10^{-8}$	$3,22 \times 10^{-10}$
SISTEMA BIG-GT	-	-	-	$1,02 \times 10^{-6}$
TORRE DE RESFRIAMENTO	$4,96 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-7}$	$6,22 \times 10^{-7}$	$1,42 \times 10^{-5}$
CALDEIRA 1	$3,91 \times 10^{-5}$	$5,90 \times 10^{-5}$	$7,59 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-6}$
CALDEIRA 2	$1,17 \times 10^{-4}$	$5,90 \times 10^{-5}$	$6,74 \times 10^{-5}$	$9,27 \times 10^{-5}$
CALDEIRA 3	$1,17 \times 10^{-4}$	$9,84 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-4}$	$9,22 \times 10^{-5}$
CALDEIRA 4	-	$9,84 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
TURBINA 1	$5,42 \times 10^{-6}$	$4,62 \times 10^{-6}$	$1,22 \times 10^{-5}$	$5,06 \times 10^{-7}$
TURBINA 2	$5,33 \times 10^{-6}$	$1,68 \times 10^{-6}$	$8,72 \times 10^{-7}$	$4,71 \times 10^{-6}$
TURBINA 3	$8,00 \times 10^{-6}$	$2,45 \times 10^{-6}$	$5,36 \times 10^{-6}$	$2,93 \times 10^{-6}$
TURBINA 4	$8,77 \times 10^{-7}$	$4,12 \times 10^{-6}$	$2,33 \times 10^{-5}$	-
DESTILARIA	$2,07 \times 10^{-4}$	$1,8269 \times 10^{-4}$	-	-
USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	-	-	$8,99 \times 10^{-5}$	$9,46 \times 10^{-5}$
PLANTA DE METANOL	$3,35 \times 10^{-5}$	$5,41673 \times 10^{-5}$	$3,31 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-5}$

Na Tabela 6.8 mostra que os impactos ambientais da exergia destruída foram maiores nas caldeiras, isto se deve às altas irreversibilidades encontradas nestes equipamentos. No estudo de caso 1 a soma da exergia destruída das caldeiras representa 30% do total da exergia destruída do sistema analisado, enquanto que no estudo de caso 2 este percentual foi de 50% e no estudo de caso 3 e 4 foram 66% e 65%, respectivamente.

Já as bombas, a parcela de contribuição sobre a exergia destruída total do sistema foi bem menor em comparação às caldeiras, por exemplo, no estudo de caso 1 foi somente 0,01% e nos estudos de caso 2, 3 e 4 foram 0,02%, 0,03% e 0,03%, respectivamente.

Quanto às turbinas, estas tiveram sua parcela de contribuição sob a exergia destruída total maior ao ser comparada ao das bombas, representando 1,6% tanto no estudo de caso 1, como também no estudo de caso 2, enquanto no estudo de caso 3 e 4 as contribuições foram de 4% e 1,4%, respectivamente.

No entanto, uma ressalva deve ser feita com respeito à posição relativa de cada equipamento do sistema em relação ao insumo principal (cana-de-açúcar), pois isto afeta a variável  $b_{F,k}$  (impacto ambiental específico).

Um exemplo são as caldeiras que tem como insumo principal o bagaço que foi originado da moagem da cana-de-açúcar, já as turbinas a vapor têm como principal insumo o vapor produzido pelas caldeiras, logo ao obter o  $b_{F,k}$  da turbina a vapor este terá a contribuição das irreversibilidades provenientes das caldeiras. Por isto, nos resultados alcançados o impacto ambiental específico  $b_{F,k}$  das turbinas foi em média 10 vezes maior em comparação aos das caldeiras.

Analisando agora todos os equipamentos mencionados anteriormente, e que constituem a planta de cogeração, uma possibilidade de melhoria seria aumentar os parâmetros de operação do vapor que os estudos de caso trabalham. Atualmente o valor máximo para pressão, indicado para operar as caldeiras e não prejudicar financeiramente é de 8 MPa (Escobar *et al.*, 2010).

Quanto às unidades produtoras de combustível, destaca-se a usina de açúcar e álcool que apresentou um valor de aproximadamente 2 vezes menor de  $\dot{B}_{D,K}$  em relação ao da destilaria autônoma, uma das principais razões é que a primeira tem a produção de 2 produtos a partir do caldo de cana-de-açúcar (açúcar e etanol), já a segunda produz somente o etanol. Logo, o valor exergético dos produtos da usina de açúcar e álcool é maior que o da destilaria, como consequência a exergia destruída daquela foi 40% menor em relação à desta.

Outra observação relacionada com as unidades produtoras mencionadas no parágrafo anterior foi o valor representativo que a usina de açúcar e álcool e destilaria autônoma tiveram

de  $\dot{B}_{D,K}$  com relação ao valor total deste em cada estudo de caso. No primeiro estudo, representou 38,6% do total e nos estudos de caso 2,3 e 4 foram 32%, 17% e 21%.

Entre as principais causas é o baixo rendimento da produção de etanol e o alto consumo específico de vapor pelo processo, sendo que numa destilaria o rendimento da produção de etanol é de 78 l/t cana com um consumo específico de vapor de 380 kg/t cana. Já uma usina de açúcar e álcool o rendimento da produção de etanol é de 50 l/t cana-de-açúcar, para um consumo específico de vapor de 465 kg/t cana.

Contudo, existem tecnologias disponíveis capazes de reduzir os impactos ambientais associados com a exergia destruída, como a eletrificação das moendas. Outra possibilidade é a integração térmica entre os diferentes estágios da produção de etanol, ou um adequado controle do processo de fermentação, a fim de reduzir o consumo de vapor.

Com respeito a produção de metanol, o valor de  $\dot{B}_{D,K}$  em relação ao valor total deste em cada estudo de caso também foi significativo, no estudo de caso 1 foi de 6%, nos estudos de caso 2,3 e 4 foram 9,5%, 6% e 5%, respectivamente. Uma das possibilidades para reduzir estes valores é realizar um controle adequado da relação  $H_2 - CO_2 / CO + CO_2$  no processo de gaseificação do bagaço, considerando que quanto maior for a necessidade de remoção de  $CO_2$  do gás de síntese para estar nas condições ideais de síntese de metanol, resultará uma maior exergia destruída.

Outra forma de reduzir a exergia destruída causada pela produção do metanol é estabelecendo novas configurações que aumente a eficiência exérgica do mesmo. Tem-se como o exemplo o trabalho Kumabe *et al.* (2008), no qual propõe uma nova configuração para a síntese do metanol, como está ilustrada a seguir:

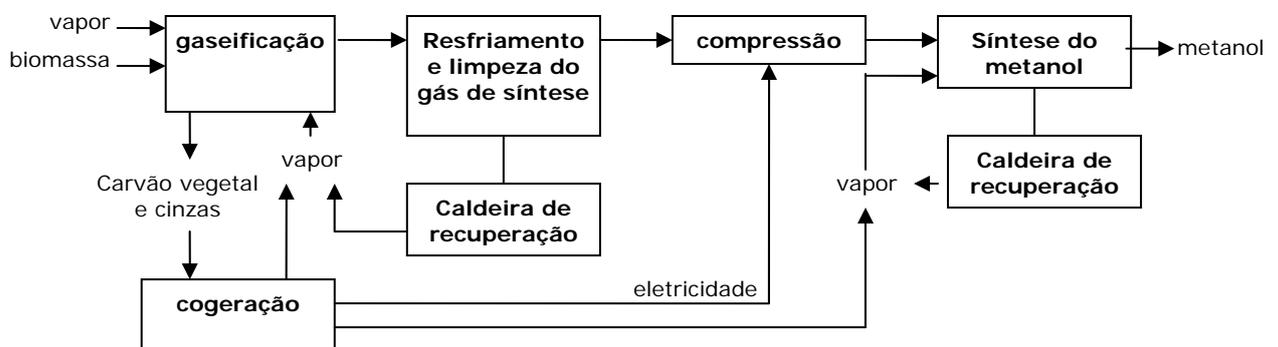


Figura 6.14 – Configuração para produzir metanol de forma mais eficiente (Adaptada de Kumabe *et al.*, 2008)

A partir da configuração da Figura 6.14, pode ser observado que as caldeiras de recuperação aproveitam tanto o calor liberado durante o resfriamento do gás de síntese, como também o calor liberado durante a síntese do metanol, com o objetivo de produzir vapor e fornecê-lo ao processo de produção de metanol e à gaseificação.

Os resíduos gerados do processo de gaseificação de biomassa (carvão vegetal e cinzas) são enviados a um sistema de cogeração, com o objetivo de contribuir com o fornecimento de vapor e eletricidade consumidos pelo processo, contribuindo assim com a melhoria da eficiência energética global.

## 6.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO CICLO DE VIDA

Na literatura existem alguns indicadores que podem auxiliar na viabilidade técnico-econômica e ambiental quando diferentes matérias-primas para a produção dos biocombustíveis são analisadas ou comparadas, como também auxiliar na escolha da biomassa para produzir metanol, num cenário geográfico e econômico específico

Um deles refere-se à eficiência global, sendo chamado de “eficiência energética do ciclo de vida” (*Life Cycle Energy Efficiency-LCEE*). Outro é o denominado “relação de energia fóssil” (*Fossil Energy Ratio - FER*) (Spath e Dayton, 2003).

Para calcular a eficiência energética do ciclo de vida, basta dividir a energia total do produto analisado no ciclo de vida, pela soma desta energia com a energia primária total consumida para produzir o produto (Equação 6.2)

$$LCEE = \frac{E_{produto}}{E_{produto} + E_{primaria}} \quad (6.2)$$

A relação de energia fóssil é definida pela razão entre a energia final do produto em relação à energia fóssil requerida para produzir o produto (Equação 6.3).

$$FER = \frac{E_{produto}}{E_{fossil}} \quad (6.3)$$

Para realizar estes dois cálculos considerou que a energia de todos os produtos obtidos em cada estudo de caso, e calculando o valor energético com base no Poder Calorífico

Inferior (PCI) do metanol, etanol e açúcar. Já o produto eletricidade excedente representa o próprio valor obtido nas simulações.

Uma demonstração da determinação destes dois índices para o estudo de caso 1 está apresentada nas equações a seguir:

$$LCEE = \frac{E_{metanol} + E_{etanol} + E_{eletricidade} + E_{açúcar}}{E_{metanol} + E_{etanol} + E_{eletricidade} + E_{açúcar} + E_{cana}} \quad (6.4)$$

Sendo que  $E_{cana}$  representa a quantidade de cana-de-açúcar moída (1700 t/h), equivalente a 12228100 MJ/h. Para a determinação dos valores dos produtos baseou-se no balanço energético e mássico da Figura 5.1. Já o índice  $FER$ , este foi determinado de acordo com a equação 6.4:

$$FER = \frac{E_{metanol} + E_{etanol} + E_{eletricidade} + E_{açúcar}}{E_{fossil}} \quad (6.5)$$

No estudo de caso 1 a energia fóssil consumida ( $E_{fossil}$ ) corresponde ao gás natural consumido pelas caldeiras que fornecem vapor ao processo de produção de metanol, como também o diesel consumido pelos maquinários agrícolas e caminhões que transportam a cana-de-açúcar. Os resultados obtidos para os índices  $LCEE$  e  $FER$  para todos os estudos de caso estão apresentados na Tabela 6.9

Tabela 6.9 – Relação energética do sistema de produção de metanol

	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>CASO 4</b>
LCEE	0,22	0,20	0,23	0,23
FER	4,3	12,46	14,4	14,5

Com respeito ao índice  $FER$ , já era esperado que o estudo de caso 1 apresentasse menor valor para  $FER$ , pois o sistema que fornece vapor ao mesmo utiliza fontes energéticas fósseis. Ao contrário dos demais, que utiliza o sistema de cogeração com bagaço, por isto apresentou um valor maior (13), destaca-se que este valor está na faixa dos valores encontrados na literatura. Como por exemplo, em Spath e Dayton (2003), os valores de  $FER$  obtidos para metanol a partir da biomassa estão na faixa de 12 – 26.

Contudo, o índice  $FER$  de forma geral foi vantajoso do ponto de vista ambiental e energético, pois em todos os estudos de caso foram maiores que 1, visto que na literatura

classificam os índices menores que 1, como combustíveis não renováveis. A explicação para esta classificação se deve ao fato da quantidade de energia fóssil requerida para produzir um combustível ser maior que a energia disponível no mesmo. O contrário ocorre no caso dos biocombustíveis, no qual o processo de produção tem sua principal fonte energética de origem renovável, logo este índice tende a ser maior que 1.

Quanto ao índice *LCEE* o valor médio encontrado foi relativamente baixo, o principal motivo para tal são as tecnologias disponíveis e atuais de conversão de biomassa a combustível líquido que ainda apresentam rendimentos baixos, logo aumenta a demanda energética de biomassa pelo processo.

## **6.5 CICLO DE VIDA DO METANOL FÓSSIL X METANOL RENOVÁVEL**

No presente item é feito uma comparação entre o metanol fóssil, obtido a partir do gás natural e o metanol produzido a partir do bagaço, utilizando para tal a ferramenta da análise do ciclo de vida.

Os resultados do ciclo de vida do metanol fóssil foram obtidos a partir do trabalho Camargo (2007), no qual realizou um inventário do ciclo de vida do metanol produzido a partir do gás natural para as conduções brasileiras. O sistema de fronteiras deste estudo está compreendido desde o processamento do gás natural numa refinaria, sua distribuição até as indústrias de transformação e, finalmente, a produção propriamente dita do metanol nestas instalações. Inclui-se o subsistema de importação do metanol no Brasil. A Figura 6.15 ilustra as etapas envolvidas na elaboração deste estudo de ciclo de vida realizado.

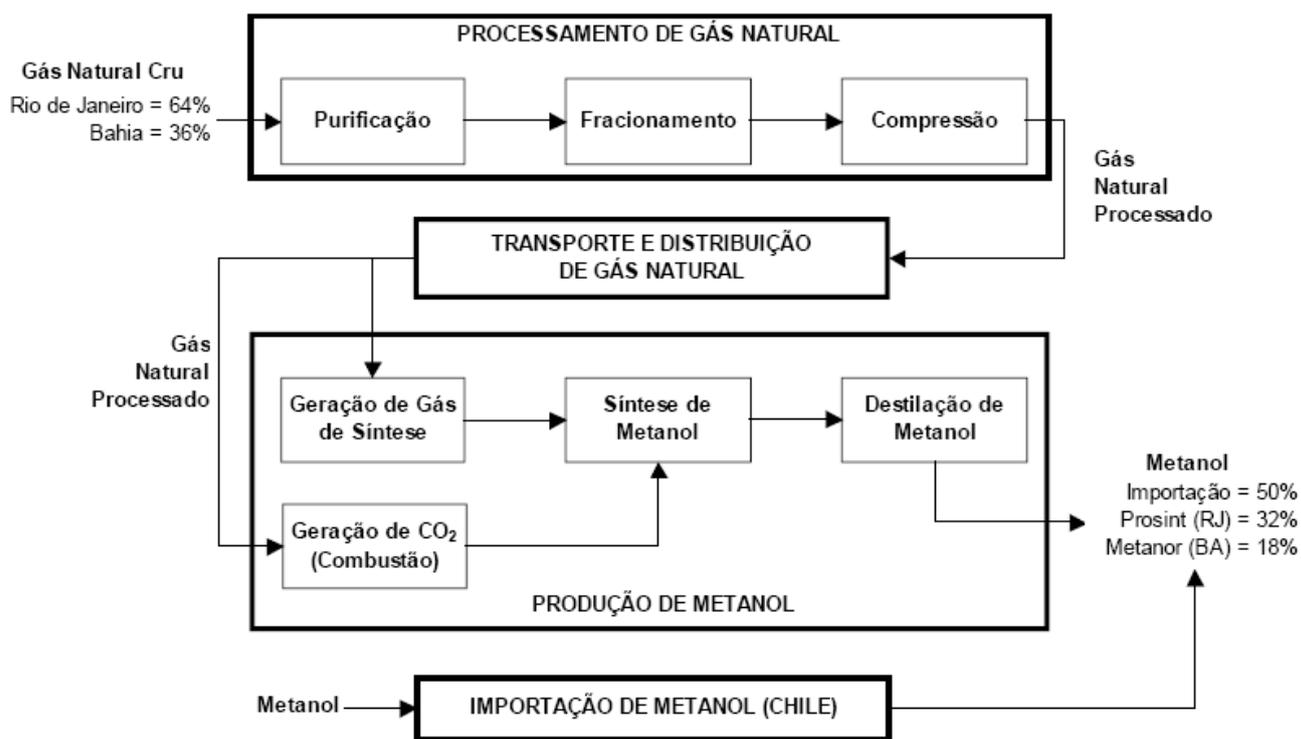


Figura 6.15 – Etapas envolvidas na elaboração do inventário do ciclo de vida do metanol fóssil (Camargo, 2007)

Pode notar a partir da Figura 6.9 que a etapa de exploração e produção do gás natural foi excluída deste estudo, focando assim o estudo nacional de processamento do gás natural. Logo, o sistema de fronteiras deste trabalho abrangiu menos etapas comparado ao processo de metanol a partir do bagaço, o qual considerou desde a produção da matéria-prima (produção de cana-de-açúcar).

O resultado final consolidado para o inventário do ciclo de vida do metanol fóssil para as condições brasileiras está apresentado na Tabela 6.10, para unidade funcional de 1000 kg de metanol (unidade funcional selecionada no trabalho de Camargo (2007)).

Tabela 6.10 – Inventário final da produção do metanol fóssil (Camargo, 2007)

	Unidade	Entrada	Saída	Descrição
Energia total	GJ	544,94		Energia consumida
Gás natural cru	m <sup>3</sup>	563,12		Matérias-primas
Metano	m <sup>3</sup>	475,84		
Etano	m <sup>3</sup>	45,05		
Propano	m <sup>3</sup>	16,89		
C4 +	m <sup>3</sup>	19,71		
CO <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	5,63		
Enxofre	g	1,97		

Diesel combustível	kg	2,42		
Metanol	kg		1000	Produto
Líquido de gás natural	m <sup>3</sup>		53,10	Subprodutos
Etano	m <sup>3</sup>		21,74	
Propano	m <sup>3</sup>		14,12	
C4 +	m <sup>3</sup>		17,23	
DME	kg		10	
Ar (O <sub>2</sub> )	m <sup>3</sup>		2836,91	Recurso natural
Água	m <sup>3</sup>		392,18	Emissões atmosféricas
CH <sub>4</sub>	m <sup>3</sup>		36,43	
CO	m <sup>3</sup>		3,24	
CO <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>		894,97	
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	m <sup>3</sup>		5,22	
NO <sub>x</sub>	m <sup>3</sup>		1,23	
SO <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>		3,43	
Material particulado	kg		0,27	
Metanol	kg		4,24 x 10 <sup>-4</sup>	
Compostos orgânicos	l		14,14	Efluentes líquidos
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	m <sup>3</sup>		7,38	
DBO	g		24,01	
DQO	g		170,52	
Enxofre	g		0,02	
Sólidos suspensos	g		165,13	
Enxofre	g		1,91	Resíduo sólido

Baseando-se no inventário da Tabela 6.10 e aplicando o método Eco-indicador 99, pode-se determinar as categorias de impacto ambientais e assim chegar a um resultado final (após a etapa de normalização e ponderação).

Na Figura 6.16 e 6.17 estão apresentadas as principais categorias de impacto e a pontuação final do impacto ambiental ao processo de produção de metanol a partir do gás natural, ambos comparados com os resultados obtidos com o metanol produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

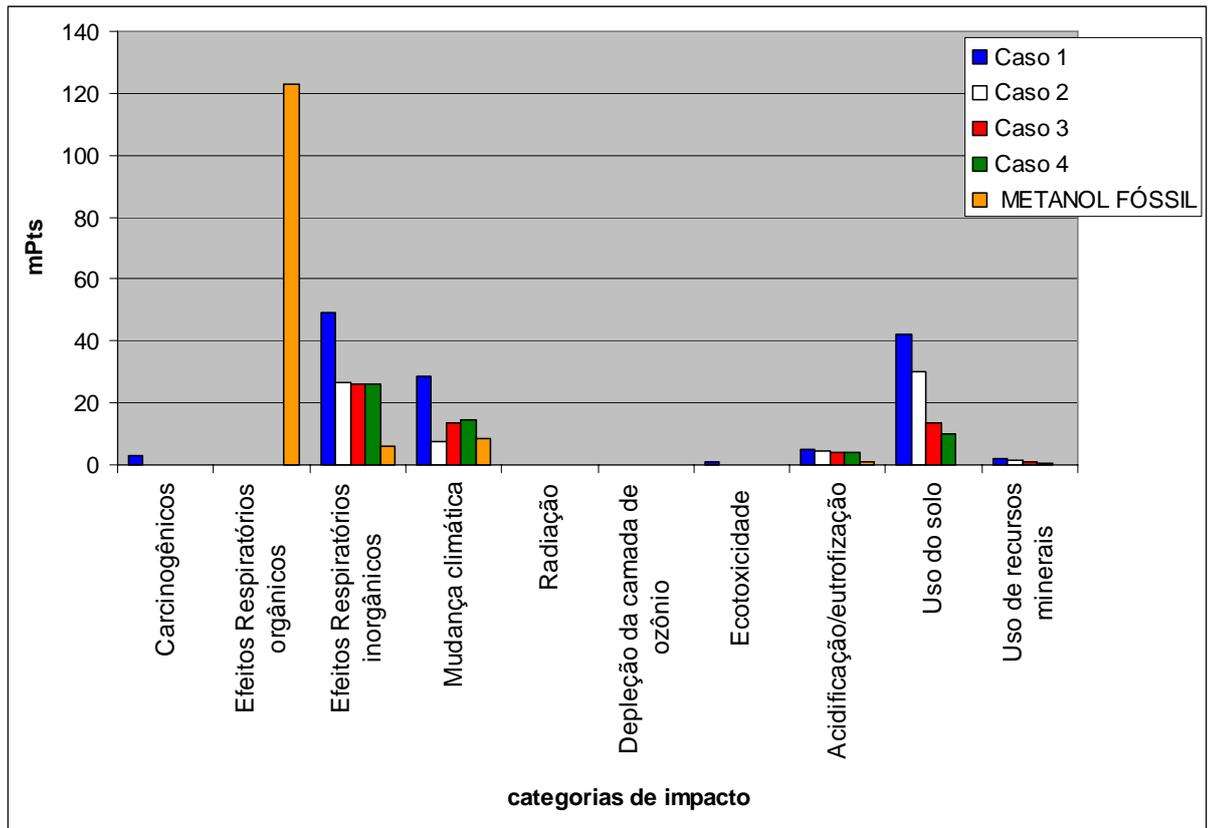


Figura 6.16 – Impacto ambiental por categoria de impacto da produção do metanol fósil e metanol de bagaço

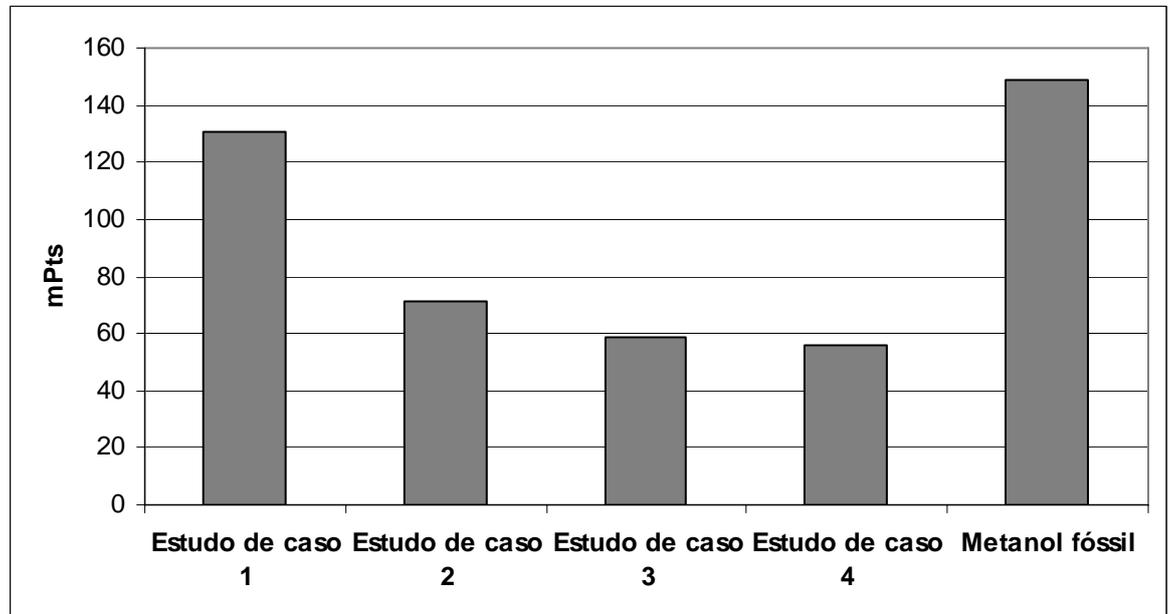


Figura 6.17 – Impacto ambiental total da produção do metanol

Nos resultados apresentados na Figura 6.17, os impactos ambientais do processo de produção de metanol fósil foi 14% maior em relação ao estudo de caso 1, e cerca de duas

vezes maior em comparação ao estudo de caso 2. Para os demais estudos de caso (3 e 4), o impacto ambiental para produzir metanol fóssil foi de 2,5 vezes maior aproximadamente em relação aos mesmos.

Destaca-se nestes resultados, que mesmo tendo considerado um sistema de fronteiras com uma menor quantidade de etapas ao processo de produção de metanol a partir do gás natural (não incluía a extração e produção do gás natural), os impactos ambientais do mesmo foram superiores.

Já em relação as categorias de impacto (Figura 6.16) pode ser observado o valor alto obtido desta para o impacto efeitos respiratórios orgânicos (123 mPts), este por sua vez são causados pelas altas emissões de  $C_xH_y$  durante o processo de produção do metanol a partir do gás natural.

Para finalizar esta análise foi determinado os índices de “eficiência energética do ciclo de vida” e “relação de energia fóssil” para o processo de produção de metanol a partir do gás natural (Tabela 6.11).

Tabela 6.11 – Relação energética do sistema de produção de metanol fóssil

	<b>METANOL FÓSSIL</b>
LCEE	0,45
FER	0,8

Da tabela 6.11 nota-se que o índice LCEE foi cerca de duas vezes maior em comparação aos estudos de caso 1,2,3 e 4. Isto mostra que o metanol a partir do gás natural é mais eficiente do ponto de vista energético em relação aos biocombustíveis. Uma das principais causas para tal característica é o desenvolvimento tecnológico mais avançado e maduro, e até mesmo a produção em escala de combustíveis líquidos a partir do gás natural, enquadrando-se na chamada rota GTL (*Gas to Liquids*). Citando exemplos, atualmente quatro grandes empresas produzem combustíveis GTL, são elas: Shell, Exxon Mobil, Syntroleum e Sasol, todas com operação efetiva de plantas.

Já no Brasil, a produção de metanol a partir do gás natural concentra-se em duas empresas, a Metanor S.A. – Metanol do Nordeste, localizada no Pólo Petroquímico de Camaçari, com uma capacidade instalada de aproximadamente de 90 mil toneladas por ano.

Apesar da melhor eficiência energética, o metanol fóssil apresentou desvantagens sob o ponto de vista ambiental, uma delas comprovada através do índice determinado FER, que foi cerca de 5 vezes menor em comparação ao metanol produzido do bagaço, para o estudo de caso 1, e aproximadamente 17 vezes menor em relação aos demais estudos de caso.

## Capítulo 7

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho focalizou em realizar uma avaliação ambiental e energética da produção de um combustível de segunda geração (metanol a partir do bagaço de cana-de-açúcar) aplicando como ferramenta a Análise do Ciclo de Vida e indicadores de desempenho baseados na Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica.

A finalidade desta avaliação foi abrir a possibilidade de inserir na cadeia produtiva do setor sucroalcooleiro a produção de metanol a partir do bagaço. Para tal foram traçadas algumas metas, das quais se concluem:

- O levantamento bibliográfico indicou que dentre as tecnologias atuais para produzir metanol a partir de biomassa, o processo Metanol Fase-Líquida é considerado um dos mais eficientes do ponto de vista energético.
- A partir do Inventário do Ciclo de Vida elaborado, observou-se que as emissões são mais significativas no processo de transporte de cana-de-açúcar (pois há consumo de combustível fóssil), como também no processo de gaseificação que emite partículas, alcatrão e cinzas. Contudo o consumo de energia fóssil foi baixo em relação ao consumo de energia renovável (cana-de-açúcar), este é de aproximadamente nove vezes maior em relação àquele.
- Os quatro estudos de casos estabelecidos apontaram a tecnologia integrada de gaseificação e turbina a gás (BIG-GT) como atrativo para as indústrias açucareiras, porém tal tecnologia ainda apresenta limitações relacionadas ao custo de implementação e problemas operacionais.

- Os índices de desempenho determinados para cada estudo de caso comprovou a vantagem de obter uma maior quantidade de produtos a partir da cana-de-açúcar, já que resulta num aproveitamento exergetico da cana-de-açúcar de até 2,5% maior.
- Os impactos ambientais determinados através do método Eco-Indicador 99 indicaram que a categoria de impactos relacionados a danos a saúde (Carcinogênicos, efeito respiratório orgânico e inorgânico, mudança climática) foi o de maior magnitude, e estes estão relacionados às emissões de poluentes provenientes da queima de combustível fóssil. Logo a possibilidade de usar uma caldeira operando com combustível fóssil para suprir vapor à planta de metanol deve ser descartada quando deseja alcançar impactos ambientais reduzidos.
- A etapa agrícola da cana-de-açúcar analisada mostrou ser uma consumidora de combustíveis fósseis (devido ao uso de caminhões que transportam cana-de-açúcar e tratores agrícolas), assim diante da forte mecanização e expansão que vem ocorrendo nos canaviais, o uso crescente de veículos de carga pesada e tratores agrícolas parece inevitável o aumento do consumo destes combustíveis nesta etapa. Logo, formas de reduzir o impacto proveniente dos poluentes gerados pela queima de combustíveis fósseis, seria o uso de veículos mais eficientes ou que utilizem biocombustíveis.
- A cana-de-açúcar cultivada no Brasil merece uma certa atenção quanto ao impacto ambiental uso do solo, devido à expansão dos canaviais ao longo dos anos. Assim para a época atual de crescimento da demanda de etanol, é necessário assegurar, através de uma política regulamentada, a ocupação da cana-de-açúcar, afim de não ser uma ameaça a produção de alimentos, nem à diversidade botânica.
- Quanto à eficiência energética do ciclo de vida, os resultados em todos os estudos de caso apresentaram um alto consumo de energia primária (cana-de-açúcar) na produção de metanol. Isto demonstra que o processo de conversão de biomassa a combustível líquido ainda precisa de maior investimento tecnológico.
- Na análise exergoambiental realizada, pode-se comprovar que o impacto ambiental da exergia destruída é influenciado tanto pelas irreversibilidades de cada equipamento, como também pela posição relativa deste em relação ao insumo principal do sistema (cana-de-açúcar). Desta maneira os resultados providenciam informações importantes que podem ser usadas na elaboração de

um projeto de sistema térmico, cujo objetivo seja reduzir os impactos ambientais.

- A comparação entre os impactos ambientais gerados pelo metanol fóssil (proveniente do gás natural) e o metanol produzido a partir do bagaço. Os resultados mostraram um impacto ambiental de aproximadamente 2,5 vezes maior do metanol fóssil em relação ao metanol produzido a partir do bagaço nas condições do estudo de caso 4. Porém do ponto de vista energético o metanol fóssil apresentou melhor desempenho, com uma “eficiência energética do ciclo de vida” superior, em aproximadamente duas vezes, em relação ao metanol de bagaço.

Logo, a hipótese da tese levantada foi satisfeita no aspecto ambiental, ou seja o metanol produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar é vantajoso em relação ao metanol produzido do gás natural, porém do ponto de vista energético o processo de gaseificação e conversão de gás de síntese em combustível líquido ainda precisa alcançar rendimentos energéticos superiores, para que possa concorrer no mercado com o metanol fóssil.

- **Trabalhos Futuros**

Para seguir a linha de pesquisa deste trabalho, há dentre as alternativas:

- 1 – Complementar os estudos de casos com uma análise econômica, para determinar os principais fatores técnicos e econômicos que mais contribuem para a viabilidade econômica de cada estudo de caso
- 2 – Aplicar técnicas de otimização aos estudos de caso para determinar configurações que resultarão um melhor desempenho energético e ambiental
- 3 – Analisar os possíveis impactos sociais gerados no processo de produção dos biocombustíveis de segunda geração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ANEEL (2000)**, “Resolução ANEEL nº 21, de 20 de janeiro de 2000”, Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br) , Acesso em 20 de fevereiro de 2009

**ARREDONDO, H. I. V. (2003)**, “Avaliação Exergética e Exergoambiental da Produção de Biocombustíveis”. *Tese de Doutorado*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**ARRIETA, F. R. P. (2000)**, “Utilização do Gás natural como Combustível Complementar em Sistemas BIG-GT para Cogeração no Setor Sucro-alcooleiro”. Universidade Federal de Itajubá, *Dissertação de Mestrado*, Engenharia Mecânica.

**ASME PTC 4.1 (1974)**, “Performance Test Code Steam Generating Units PTC 4.1. ASME PTC 4.1 - 1964”, *American Society of Mechanical Engineers*, New York.

**BAIN, R. (2004)**, “Biomass Gasification Overview”, Disponível em: [www.msenergy.ms](http://www.msenergy.ms) , Acesso em 20 de Dezembro de 2007.

**BAKER, E. G. (1986)**, “Engineering Analysis of Biomass Gasifier Product Gas Cleaning Technology”, *Prepared for the Biomass Energy Technology Division U.S. Department of Energy under contract DE-AC06-76RLO 1830*.

**BASSETO, N. Z. (2006)**: “SEPPA – Sistema Especialista para Planta de Produção de Álcool”. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

**BEEHARRY, R. P. (2001)**, “Carbon Balance of Sugarcane Bioenergy Systems”, *Biomass and Bioenergy*, v. 20, pp 361 - 370.

**BNDES (2008)**, “Impactos da Indústria Canavieira no Brasil”, disponível em: [www.plataformabndes.org.br](http://www.plataformabndes.org.br) , Acesso em 10 de fevereiro de 2011.

**CALTAROSSO, F. (2008)**, “Análise de Tensões em Equipamentos de Moagem da Cana-de-açúcar Usando o Método dos Elementos Finitos”, *Dissertação de Mestrado*, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

**CAMARGO, C. A. (1990)**, “Conservação de energia na indústria de açúcar e álcool”. IPT – São Paulo: Manual de Recomendações

**CAMARGO, A. M. (2007)**, “Inventário do Ciclo de Vida do Metanol para as Condições Brasileiras”, *Dissertação de Mestrado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**CHEHEBE, J. R. B. (2002)**, “Análise do Ciclo de Vida de Produtos”, *Qualitymark Editora*, Rio de Janeiro

**CIFERNO, P., MARANO, J. (2002)**, “Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production”, *Prepared for U.S. Department of Energy National and Energy Technology Laboratory*

**CIFRE, P. G., BRAD, O. (2007)**, “Renewable Hydrogen Utilization for the Production of Methanol”, *Energy Conversion and Management*, v. 48, pp 519 – 527.

**CONAE (2007)**, “Comisión Nacional para El Ahorro de Energia”, Disponível em: <http://www.conae.gob.mx/> , Acesso em 20 de Outubro de 2009.

**CYBULSKI, A. (1994)**, “Liquid Phase Methanol Synthesis: Catalysts, Mechanism, Kinetics, Chemical Equilibrium, Vapor-Liquid Equilibrium, and Modeling”, *Science Engineering*, v. 36, pp 557 - 615.

**DE FEBER, M.A.P.C., GIELEN D.J. (2000)**, “Biomass for greenhouse gas Emission reduction - Task 7: Energy Technology Characterization”. Disponível em: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/1999/c99078.pdf>. Acesso em 22 Janeiro de 2008

**DIRETIVA 2003/30/CE (2003)**, “Directiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu do Conselho de 8 de Maio de 2003”, Disponível em: [www.diramb.gov.pt](http://www.diramb.gov.pt) , Acesso em 14 de Janeiro de 2008.

**DOE – U. S. Department of Energy and Air Products Liquid Phase Conversion Company (1999)**, “Commercial-scale Demonstration of the Liquid Phase Methanol (LPMEOHTM) Process”, *Topical Report Number 11*.

**ECOTRAFFIC R&D AB (1997)**, “Feasibility Phase Project for Biomass-Derived Alcohols for Automotive and Industrial Uses Altener”, *Bal-Fuels Project Final Report*, Nykomb Synergetic AB

**ALAKANGAS, E., HEIKKINEN, A., LENSU, T., VESTERINEN, P. (2007)**, “Biomass Fuel Trade in Europe Summary Report VTTR0350807”, *EUBIONET II EIE/04/065/S07.38628*

**EMBRAPA (2011)**, “Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária”, Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/> , Acesso em 10 de fevereiro de 2011.

**ESCOBAR, J. C. P., LORA, E. S., VENTURINI, O. J., SANTOS, J. J. S. (2010)**, "An update of Cogeneration Efficiency and Economic Indicators Using Modern Commercial Technologies" *Proceedings of the XXVII Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*.

**ESCOBAR, J.C., LORA, E.E.S., VENTURINI, O., YÁÑEZ, E.E., ALMAZAN, O.C., (2009)**, “Biofuels: Environment, Technology and Food Security”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, pp. 1275 - 1287.

**FENG, X.; CAI, Y.; QIAN, L. (1998)**, "A New Performance Criterion for Cogeneration System" *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1607-1609

**FERREIRA, J. R. (2004)**, “Análise de Ciclo de Vida dos Produtos”, Disponível em: [www.estv.ipv.pt](http://www.estv.ipv.pt), Acesso em 8 de Março de 2008.

**FIASCHI, A., AUDI, R. (2005)**, “Projeto Raudi-Metanol”, *Apresentação*, Disponível em: [www.iar-pole.com/presentationbrazil/raudi.pdf](http://www.iar-pole.com/presentationbrazil/raudi.pdf), Acesso em 15 de Dezembro de 2007.

**FIESP (2001)**, “Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa – FIESP/CIESP”, disponível em: [www.fiesp.com.br/publicacoes](http://www.fiesp.com.br/publicacoes), Acesso em 20 de maio de 2008.

**FORAN, B.; MARDON, C. (1999)** “Beyond 2025: transitions to a biomass-alcohol economy using ethanol and methanol”. *A consultancy report for the National Dryland Salinity Program of the Land and Water Resources Research and Development Corporation*.

**FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N. (2007)**, “Overview and Methodology”, *Ecoinvent Report n°1*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories

**GABRA, M., PETTERSSON, E., BACKMAN, R., KJELLSTRÖM, B. (2001)**, “Evaluation of Cyclone Gasifier Performance for Gasification of Sugar Cane Residue”, *Biomass and Bioenergy*, v. 21, pp 351 - 369.

**GATECYCLE 5.51 (2003)**, “Getting Started & Installation Guide”, *GE Energy Services*.

**GOEDKOOP, M., SPRIENSMA, R. (2000)**, “The Eco-indicator 99 – A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment”, *Methodology Report*, Second Edition.

**GONZÁLEZ, A., et al. (2003)**, “Application of Thermoconomics to the Allocation of Environmental in the Life Cycle Assessment of Cogeneration Plants”, *Energy*, v. 28, pp. 557 - 574.

**HAMELINCK, C. N., FAAIJ, A. C. (2001)**, “Future Prospects for Production of Methanol and Hydrogen from Biomass”, *Report NWS-E-2001-49*, Utrecht University

**HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. (ED.) (2005)**, “Biomass Power Generation: Sugarcane Bagasse and Trash”. Piracicaba: *United Nations Development Programme (UNDP)*, Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), 2005. 217 p.

**HASSUDA, S. et al. (1991)**, “Impactos da Infiltração da Vinhaça de Cana no Aquífero Bauru”, *Boletim IG-USP*, pp. 169 – 171.

**HAUKLAND, E. (2004)**, “Trade and Environment – Emissions Intensity of Norway’s Imports and Exports”, *Master Thesis*, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science.

**HEIJUNGS, R. (1996)**, “Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life-cycle assessments”, *journal of Cleaner production*, v. 4, pp 159 - 166.

**HERMANN, W. (2006)**, “Earth's Exergy Resources Energy Quality, Flow, and Accumulation in the Natural World”; Disponível em: <http://gcep.stanford.edu>. Acessado em 12 setembro 2010

**HEYDORN, E. C., DIAMOND, B. W., LILLY, R. D. (2003)**, “Commercial-scale Demonstration of the Liquid Phase Methanol (LPMEOHTM) Process”, *Air Products and Chemicals Inc. and Eastman Chemical Company*, Allentown

**HIRANO, A., HON-NAMI, K., KUNITO, S., HADA, M., OGUSHI, Y. (1998)**, “Temperature Effect on Continuous gasification of Microalgal Biomass: Theoretical Yield of Methanol Production and its Energy Balance”, *Catalysis Today*, v. 45, pp 399 - 404.

**HOBSON, P. A., DIXON, T. F. (1998)**, "Gasification Technology – Prospects for Large-scale High-efficiency Cogeneration in the Australian Sugar Industry" *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, vol. 20, pp. 1-9.

**IEA (1996)**, “International Energy Agency – Automotive Fuel Survey 2: Distribution and Use”, *Innas*, Breda.

**INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO (2006)**, “Environmental Management – Life Cycle Assessment”, *European Standard EN ISO 14040 and 14044*, Geneva.

**JANGHATHAIKUL, D., GHEEWALA, S. H. (2004)**, “Bagasse – A Sustainable Energy Resource from Sugar Mills”. *The Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE)*, Hua Hin, Thailand.

**JOLLIET, et al. (2003)**, “IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 10, n. 6.

- JUNGBLUTH, N. (2007)**, “Life Cycle Inventories of Bioenergy”, *Ecoinvent Report N° 17*.
- JUNGBLUTH, N., BÜSSER, S., FRISCHKNECHT, R., TUCHSCHMID, M. (2008)**, “Life Cycle Assessment of Biomass to Liquid Fuels”, *Final Report*, SEU-services Ltd., Uster.
- KALOV, B., PETEVES, S. D. (2005)**, “Status and Perspectives of Biomass to Liquid Fuels in the European Union”, Disponível em: [www.irc.ee](http://www.irc.ee), Acesso em 8 de fevereiro de 2008.
- KOBLITZ (2007)**, “Resíduos Agrícolas Energéticos no Brasil”, Disponível em: [www.inee.org.br](http://www.inee.org.br) , Acesso em 30 de julho de 2009
- KOTAS, T.J. (1985)**, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”. Anchor Brendon Ltda.
- KOTHANDARAMAN, A., et al. (2009)**, “Comparison of Solvents for Post-combustion Capture of CO<sub>2</sub> by Chemical Absorption”, *Energy Procedia*, v. 1, pp 1373 - 1380.
- KUMABE, K., FUJIMOTO, S., YANAGIDA, T., OGATA, M., FUKUDA, T., YABE, A., MINOWA, T. (2008)**, “Environmental and economic analysis of methanol production process via biomass gasification”, *Fuel*, v. 87, pp 1422 - 1427.
- LARSON, E. D., WILLIAMS, R. H., LEAL, M.R.L.V. (2001)**, “A Review of Biomass Integrated-Gasifier/Gas Turbine Combined Cycle Technology and its Application in Sugarcane Industries, with an Analysis for Cuba”, *Energy for Sustainable Development*, v. 5, pp. 54 - 75.
- LINDHOLM, E. L. (2006)**, “Energy Use in Swedish Forestry and its Environmental Impact”, *Licentiate Thesis*, Institutionen för biometri och teknik
- LLOYD, A. C., CACKETTE, T. A. (2001)**, “Diesel Engines: Environmental Impact and Control”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, v. 51, pp 809 - 847.
- LORA, E.E.S., ESCOBAR, J.C., ROCHA, M. H., RENÓ, M.L.G., VENTURINI, O., ALMAZAN, O.C. (2010)**, “Issues to Consider, Existing Tools and Constraints in Biofuels Sustainability Assessments”, *Energy*, v. 36, pp 2097 – 2110.

**LUO, L., VOET, E., HUPPES, G. (2008)**, “Life Cycle Assessment and Life Costing of Bioethanol from Sugarcane in Brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, pp 1613 – 1619.

**MACEDO, I. (2007)**, “A Energia da Cana-de-açúcar: Doze Estudos sobre Agroindústria da Cana-de-açúcar no Brasil e a sua Sustentabilidade”, *Berlendis & Vertecchia*, São Paulo: UNICA.

**MACEDO, I. C., SEABRA, J. A., SILVA, J. R. (2008)**, “Green House Gases Emissions in the Production and use of Ethanol from Sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020”, *Biomass and Bioenergy*, v. 32, pp 582 - 595.

**MACEDO, I.C., LEAL, MRLV, SILVA, JEAR (2004)**, “Assessment of Greenhouse Gas Emissions in the Production and Use of Fuel Ethanol in Brazil”, *Secretaria do meio ambiente*, Estado de São Paulo.

**MAIYA, P. S., ANDERSON, T. J., MIEVILLE, R. L., DUSEK, J. T., PICCIOLO, J. J., BALACHANDRAN, U. (2000)**, “Maximizing H<sub>2</sub> Production by Combined Partial Oxidation of CH<sub>4</sub> and Water Gas Shift Reaction”, *Applied Catalysis A: General*, v. 196, pp 65 – 72

**MAPA (2009)**, “Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento”; Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acessado em 07 setembro de 2010.

**MCKENDRY, P. (2002)**, “Energy Production from Biomass: Overview of Biomass”, *Bioresource Technology*, v. 83, pp 37-46

**MCMILLAN, R., MARRIOTT, D. (2008)**, “Fuel-Flexible Gas Turbine Cogeneration”. *The Power-Gen Asia 2008*, Kuala Lumpur, Malaysia.

**MENDOZA, M. A. (2009)**, “Projeto e Avaliação Computacional do Desempenho de um Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante para Obtenção de Gás de Síntese a partir da Gaseificação de Bagaço de Cana-de-Açúcar”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Itajubá.

**MINTEER, S. (2006)**, “Alcoholic fuels”. New York: Taylor & Francis Group;.

**MODESTO, M., NASCIMENTO, M.A.R., NEBRA, S.A. (2006)**, “Proposals for BIGCC Cycle Utilization in an Ethanol Production Plant from Sugarcane”, *Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization*, Greece.

**MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. (2006)**, “Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes”; 5<sup>a</sup> edição, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.

**NEMECEK, et al. (2004)**, “Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems”, *Final report ecoinvent 2000 N° 15.*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

**NOGUEIRA, L. A. H. (2008)**, “Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável”. Rio de Janeiro: BNDES and CGEE Organização

**NOGUEIRA, L. A. H. (2008)**, “Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável”. Rio de Janeiro: BNDES and CGEE Organização

**NREL – National Renewable Energy Laboratory (2008)**, “From Biomass to Biofuels”, disponível em: <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/39436.pdf>, Acesso em 15 de agosto de 2008.

**OLIVEIRA, M. E., VAUGHAN, B.E., RYKIEL, E.J.J. (2005)**, “Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances and Ecological Footprint ”, *BioScience*, v. 55, pp. 593 - 602.

**OLOFSSON, I., NORDIN, A., SÖDERLINDU, U. (2005)**, “Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels”, *Report 05-02*. Umeå University and Mid Swedish University

**OMETTO, A. R. (2005)**: “Avaliação do Ciclo de Vida do Álcool Etilico Hidratado Combustível pelos Métodos EDIP, EXERGIA E EMERGIA”. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

**OUELLETTE, N., ROGNER, H. H., SCOTT, D. S. (1995)**, “Hydrogen from Remote Excess Hydroelectricity. Part II: Hydrogen Peroxide of Biomethanol”, *In. J. Hydrogen Energy*, v. 20, pp 873 – 880

**OWENS, J. W. (1997)**, “Life-Cycle Assessment: Constraints on Moving from Inventory to Impact Assessment”, *Journal of Industrial Ecology*, v. 1, n 1, MIT Press.

**PARRA, M. I. F. (2003)**, “Metodologia de Análise Exergoeconômica do Processo de Produção de Açúcar”. *Tese de Doutorado*. Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas.

**PELLEGRINI, L. F. (2009)**, “Análise Termo-Econômica-Ambiental aplicada à Produção Combinada de Açúcar, Álcool e Eletricidade”, *Tese de Doutorado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**PTASINKI, K. J., HAMELINCK, C., KERKHOF, P. J. A. M. (2002)**, "Exergy Analysis of Methanol from Sewage Sludge Process" *Energy Conversion and Management*, vol. 43, pp. 1445-1457.

**QUAAK, P., KNOEF, H., STASSEN, H. (1999)**, “Energy from Biomass – A Review of Combustion and Gasification Technologies”, *World Bank Technical Papers n° 422*, Energy series, Washington.

**RAJVANSHI, A. (1986)**, “Biomass Gasification”, *Published as Chapter 4, in Book: “Alternative Energy in Agriculture”*. Edited by Yogi Goswami

**RAUCH, R. (2002)**, “Biomass Gasification to Produce Synthesis Gas for Fuel Cells, Liquid Fuels and Chemicals”, *IEA Bioenergy Agreement*.

**RENEW (2003)**, “Renewable Fuels for Advanced Powertrains Integrated Project Sustainable Energy Systems”, Disponível em: [www.renew-fuel.com](http://www.renew-fuel.com), Acesso em 12 de Outubro de 2008.

**RENÓ, M.L.G, LORA, E.E.S., ESCOBAR, J.C., RENÓ, M.L.G., VENTURINI, O., BUCHGEISTER, J., ALMAZAN, O.C., (2010)**, “A LCA (Life Cycle Assessment) of the Methanol Production from Sugarcane Bagasse”, *Energy*, pp. 1 – 11, article in press.

**RENOUF, M. A., WEGENER, M. K., NIELSEN, L. K. (2008)**, “An Environmental Life Cycle Assessment Comparing Australian Sugarcane with US Corn and UK Sugar Beet as Producers of Sugars for Fermentation”, *Biomass and Bioenergy*, v. 32, pp 1144 - 1155.

**RIBEIRO, F. M. (2003)**, “Inventário do Ciclo de Vida da Geração Hidroelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: Primeira Aproximação”. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

**RIEDACKER, A. (2009)**, “Pour quoi passer des ACV aux EPI?”, *In : Conférence Internationale e Évaluation Environnementale et Énergie*, Quebec, Canada, comunicação pessoal

**ROCHA, J. D. (2008)**, “Pré-tratamento da Biomassa”, *Workshop de Tecnologias BTL*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo.

**ROCHA, M. H. (2009)**, “Uso da Análise do Ciclo de Vida para a Comparação do Desempenho Ambiental de Quatro Alternativas para Tratamento da Vinhaça”, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Itajubá.

**RODRIGUES, M., WALTER, A., FAAIJ, A. (2007)**, “Performance Evaluation of Atmospheric Biomass Integrated Gasifier Combined Cycle Systems under Different Strategies for the use of Low Calorific Gases”, *Energy Conversion and Management*, v. 48, pp. 1289 - 1301.

**ROYAL SOCIETY (2008)**, “Sustainable Biofuels : Prospects and Challenges”, Disponível em: <http://www.royalsociety.org/> , Acesso em 20 de Outubro de 2008.

**RUDLOFF, M. (2008)**, “The Choren BTL Process Status – Progress – Future Prospects”, Disponível em: [www.renew-fuel.com](http://www.renew-fuel.com), Acesso em 06 de Maio de 2009.

**SAIC – Scientific Applications International Corporation (2006)**, “Life Cycle Assessment: principles and Practice”, *EPA/600/R-06/060*.

**SEPPÄLÄ, J. et al. (1998)**, “Forest Industry and the Environment: a Life Cycle Assessment Study from Finland”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 23, pp 87 - 105.

**SILALERTRUKSA, T., GHEEWALA S. H. (2009)**, “Environmental Sustainability Assessment of Bioethanol Production in Thailand”, *Energy*, v. 34, pp 1933 – 1946

**SILVA, V. G. (2003)**, “Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Escritórios Brasileiros: Diretrizes e Base Metodológica”, *Tese de Doutorado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**SIMAPRO 7 (2004)**, “Database Manual”, Disponível em: [www.pre.nl](http://www.pre.nl), Acesso em 20 de fevereiro de 2009

**SOARES, S. R. (2009)**, “ENS 5125 – Gestão Ambiental – Análise do Ciclo de Vida”, *Apresentação*, Disponível em: [www.ens.ufsc.br/~soares](http://www.ens.ufsc.br/~soares), Acesso em 12 de Dezembro de 2009.

**SONODA, T. et al. (2004)**, “Development of M701F Gas Turbine for Integrated VR Gasification Combined Cycle Plants”, *Technical Review*, v. 41, nº 1.

**SOUZA-SANTOS, M. L. (2004)**, “Solid Fuels Combustion and Gasification”, *Marcel Dekker, Inc.*, New York.

**SPARATI S., ZHANG Y., MACLEAN H. (2005)** “Life cycle assessment of switchgrass and corn stover- derived ethanol-fueled automobiles”. *Environ. Sci. Technol.*; v. 39, pp 9750 – 9758

**SPATH, P. L., DAYTON, D. C. (2003)**, “Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-derived Syngas”, disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf> , Acesso em 20 de maio de 2009.

**SPATH, P. L., DAYTON, D. C. (2003)**, “Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-derived Syngas”, *NREL/TP – 510 - 34929*

**SZAGURT, J., MORRIS, D.R., STEWARD, F.R. (1988)**, “Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process”. New York: Hemisphere.

**SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. (1988)**, “Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes”; Hemisphere, New York

**THUIJL, E., ROOS, C. J., BEURSKENS, L. M. (2003)**, “An Overview of Biofuels Technologies, markets and Policies in Europe”, Disponível em: [www.ecn.nl](http://www.ecn.nl), Acesso em 10 de Janeiro de 2009.

**TIAX LLC (2007)**, “Full Fuel Cycle Assessment Well to Tank Energy Inputs, Emissions, and Water Impacts”, *Consultant Report (Draft)*

**TUCHSCHMID, M., JUNGBLUTH, N. (2007)**, “Results of the Life Cycle Assessment of Different Biomass Fuels”, *Renewable Fuels for Advanced Power Train Summer School*, Switzerland

**UDOP (2009)**, “Associação profissional da indústria da fabricação de álcool, açúcar, similares e conexos”, Disponível em: <http://www.udop.com.br>. Acessado em 09 setembro de 2010

**UNNASCH, S. (2005)**, “Alcohol Fuels from Biomass: Well-to-Wheel Energy Balance”, Disponível em: <http://www.eri.ucr.edu>, Acesso em 23 de Setembro de 2007.

**VASWANI, S. (2000)**, “Development of Models for Calculating the Life Cycle Inventory of Methanol by Liquid Phase and Conventional Production Processes”, *Master Thesis*, North Carolina State University

**WALDHEIM, L. (2005)**, “Overview of Gasification of Biomass”, *TPS – Termiska Processer Piracicaba*. São Paulo

**WANG, M., SARICKS, C., LEE, H. (2003)**, “Fuel-cycle Energy and Emission Impacts of Ethanol-Diesel Blends in Urban Buses and Farming Tractors.” Prepared for Illinois Department of Commerce and Economic Opportunity Project Manager: David Loos, USA.

**WORLD HEALTH ORGANIZATION (2007)**, “Health Statistics Health Information Systems”, Disponível em: <http://www.who.int/healthinfo/boddaly/en/> , Acesso em 7 de Outubro de 2008.

**XIAO, J., SHEN, L., ZHANG, Y., GU, J. (2009)**, “Integrated Analysis of Energy, economic, and Environmental Performance of Biomethanol from Rice Straw in China”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 48, pp. 9999 - 10007.

**YÁÑEZ, E.E. (2009)**, “Avaliação do Impacto Energético e Ambiental da Cogeração no Balanço Energético e no Ciclo de Vida do Biodiesel de Óleo de Palma Africana”, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Itajubá.

**YÁÑEZ, E.E., LORA, E.E.S., COSTA, R.E.C., TORRES, E.A. (2009)**, “The Energy Balance in the palm Oil-derived Methyl Ester (PME) Life Cycle for the Cases in Brazil and Colombia”, *Renewable Energy*, v. 34, pp. 2905 - 2913.

**ZAMPIERI, M (2005)**, “Avaliação Termodinâmica da Produção de Eletricidade e Etanol a partir da Cana-de-açúcar”. *Dissertação de Mestrado*. Engenharia da Energia. Universidade Federal de Itajubá.

**ZINOVIEV, S., ARUMUGAM, S., MIERTUS, S. (2007)**, “Biofuel Production Technologies”, *Working Document*, ICS-UNIDO (International Centre for Science and High Technology)

## Apêndice A

# INVENTÁRIOS

Neste apêndice foram colocadas as tabelas dos inventários de Ribeiro (2003) e Vaswani (2000). Estes estão apresentados na Tabela A.1 e A.2 respectivamente.

Tabela A.1 – Inventário da Usina Itaipu para 1 MWh de energia elétrica (Ribeiro, 2003)

	Unidade (/MWh)	Operação Usina (100 anos)
<b>Consumo de recursos energéticos</b>		
Energia do carvão	MJ	$1,04 \times 10^{-4}$
Energia do gás natural	MJ	$2,75 \times 10^{-2}$
Energia do petróleo	MJ	$6,63 \times 10^{-3}$
Energia do urânio	MJ	$1,04 \times 10^{-4}$
Energia hidrelétrica	MJ	$9,61 \times 10^{-2}$
<b>Emissões atmosféricas</b>		
1,3 Butadieno	kg	$1,17 \times 10^{-8}$
Aldeídos	kg	-
Amônia	kg	$8,06 \times 10^{-8}$
Benzeno	kg	$4,17 \times 10^{-7}$
Benzopireno	kg	$9,00 \times 10^{-10}$
CaO	kg	$4,45 \times 10^{-4}$
CH <sub>4</sub>	kg	$1,32 \times 10^{-1}$
Chumbo	kg	$6,10 \times 10^{-12}$
CO	kg	$4,08 \times 10^{-2}$
CO <sub>2</sub>	kg	$1,12 \times 10^0$
COV	kg	$8,66 \times 10^{-5}$
Etano	kg	$1,36 \times 10^{-5}$
F <sub>2</sub>	kg	$2,85 \times 10^{-8}$
FeO	kg	$3,00 \times 10^{-4}$

Fluoreteno	kg	9,00 x 10 <sup>-9</sup>
Fluoreto	kg	6,19 x 10 <sup>-7</sup>
Fuligem	kg	6,73 x 10 <sup>-6</sup>
H <sub>2</sub>	kg	6,7 x 10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> S	kg	4,07 x 10 <sup>-6</sup>
HCl	kg	5,42 x 10 <sup>-9</sup>
Hidrocarbonetos	kg	4,33 x 10 <sup>-5</sup>
Hidroc. Alifáticos	kg	3,75 x 10 <sup>-6</sup>
Hidroc. Aromáticos	kg	1,22 x 10 <sup>-7</sup>
Material particulado	kg	4,96 x 10 <sup>-3</sup>
Mercúrio	kg	3,05 x 10 <sup>-15</sup>
Metais pesados	kg	1,04 x 10 <sup>-8</sup>
Metil-mercaptano	kg	1,47 x 10 <sup>-10</sup>
N <sub>2</sub> O	kg	1,21 x 10 <sup>-8</sup>
NO <sub>2</sub>	kg	3,2 x 10 <sup>-6</sup>
NO <sub>x</sub>	kg	2,67 x 10 <sup>-4</sup>
Petróleo	kg	1,95 x 10 <sup>-6</sup>
PM10	kg	7,62 x 10 <sup>-7</sup>
Poeira (SPM)	kg	3,59 x 10 <sup>-4</sup>
SO <sub>2</sub>	kg	1,64 x 10 <sup>-3</sup>
SO <sub>x</sub>	kg	1,76 x 10 <sup>-5</sup>
Tolueno	kg	3,90 x 10 <sup>-8</sup>
Xileno	kg	4,20 x 10 <sup>-8</sup>

---

#### Efluentes líquidos

---

Ac. Acético	kg	2,13 x 10 <sup>-3</sup>
Acetaldeído	kg	2,96 x 10 <sup>-5</sup>
Acetona	kg	5,51 x 10 <sup>-5</sup>
Ácido	kg	3,11 x 10 <sup>-7</sup>
Alcatrão	kg	5,08 x 10 <sup>-3</sup>
Amoníaco	kg	1,90 x 10 <sup>-8</sup>
Chumbo	kg	1,50 x 10 <sup>-9</sup>
Cianeto	kg	1,17 x 10 <sup>-7</sup>
Cl <sup>-</sup>	kg	4,09 x 10 <sup>-7</sup>
Cobre	kg	4,50 x 10 <sup>-10</sup>
Cromo 3+	kg	5,39 x 10 <sup>-10</sup>
DQO	kg	2,68 x 10 <sup>-8</sup>
Fenol	kg	1,95 x 10 <sup>-7</sup>
Ferro	kg	1,97 x 10 <sup>-6</sup>
Fluoreto	kg	8,16 x 10 <sup>-7</sup>
H <sub>2</sub>	kg	1,68 x 10 <sup>-8</sup>
Hexano	kg	1,97 x 10 <sup>-8</sup>
Hidrocarbonetos	kg	2,82 x 10 <sup>-7</sup>
Inorgânicos gerais	kg	4,63 x 10 <sup>-3</sup>
Íons metálicos	kg	5,45 x 10 <sup>-8</sup>
Manganês	kg	4,21 x 10 <sup>-8</sup>
Mercúrio	kg	9,00 x 10 <sup>-11</sup>
Metanol	kg	7,71 x 10 <sup>-4</sup>
Metil acetato	kg	6,78 x 10 <sup>-5</sup>
N total	kg	1,50 x 10 <sup>-8</sup>
NH <sub>3</sub>	kg	1,75 x 10 <sup>-6</sup>
Nitrato	kg	1,74 x 10 <sup>-6</sup>
Óleo	kg	4,69 x 10 <sup>-6</sup>

Orgânicos dissolvidos	kg	$2,07 \times 10^{-7}$
PAH	kg	$1,50 \times 10^{-10}$
Petróleo	kg	$2,43 \times 10^{-7}$
Sódio	kg	$2,05 \times 10^{-7}$
Sólidos dissolvidos	kg	$2,31 \times 10^{-6}$
Sólidos suspensos	kg	$7,03 \times 10^{-6}$
Substâncias dissolvidas	kg	$1,04 \times 10^{-7}$
Substâncias suspensas	kg	$7,26 \times 10^{-7}$
Sulfito	kg	$1,30 \times 10^{-7}$
Zinco	kg	$6,53 \times 10^{-6}$

O capítulo também apresenta o modelo de cogeração com bagaço que foi selecionado para este trabalho, bem como suas principais características e justificativa de tal escolha.

Tabela A.2 – Inventário da produção de 1 MJ de vapor por uma caldeira operando com combustível fóssil (Vaswani, 2000)

	Unidade (kg/MJ)
<b>Emissões atmosféricas</b>	
Material particulado	$3,03 \times 10^{-6}$
SO <sub>2</sub>	$6,23 \times 10^{-5}$
NOx	$6,44 \times 10^{-5}$
CO	$6,41 \times 10^{-5}$
CO <sub>2</sub> (fóssil)	$8,21 \times 10^{-2}$
CH <sub>4</sub>	$3,88 \times 10^{-6}$
HCl	$1,59 \times 10^{-7}$
VOC	$1,30 \times 10^{-6}$
<b>Metais</b>	
Antimônio	$5,83 \times 10^{-11}$
Arsênico	$1,75 \times 10^{-9}$
Berílio	$9,00 \times 10^{-11}$
Cádmio	$2,24 \times 10^{-10}$
Cromo	$1,11 \times 10^{-9}$
Cobalto	$2,65 \times 10^{-10}$
Cobre	$1,96 \times 10^{-11}$
Chumbo	$1,80 \times 10^{-9}$
Mercúrio	$3,54 \times 10^{-10}$
Níquel	$2,13 \times 10^{-9}$
Selênio	$5,51 \times 10^{-9}$
Zinco	$3,23 \times 10^{-10}$