



**COPPE/UFRJ**

POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL COM  
RESÍDUOS DE BIOMASSA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO

Rachel Martins Henriques

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa  
Neilton Fidélis da Silva

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2009

POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL COM  
RESÍDUOS DE BIOMASSA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO

Rachel Martins Henriques

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Aprovada por:

---

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

---

Prof. Neilton Fidélis da Silva, D. Sc.

---

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Silvia Muylaert de Araújo, D.Sc.

---

Dr. Luciano Basto Oliveira, D.Sc.

---

Dr. Amaro Olímpio Pereira Jr., D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JANEIRO DE 2009

Henriques, Rachel Martins

Potencial para Geração de Energia Elétrica no Brasil com Resíduos de biomassa através da Gaseificação / Rachel Martins Henriques. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVI, 207 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Neilton Fidélis da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 190-205.

1. Gaseificação. 2. Energia. 3. Biomassa. I. Rosa, Luiz Pinguelli, et al.. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético.

III. Título.

“A mentira é uma verdade que se esqueceu de acontecer.

O tempo é um ponto de vista dos relógios.

A curva é o caminho mais agradável entre dois pontos.

Se eu acredito em Deus? Mas que valor poderia ter minha resposta, afirmativa ou não? O que importa é saber se Deus acredita em mim.

O despertador é um acidente de trânsito do sono.

Nem todos podem estar na flor da idade, é claro! Mas cada um está na flor da sua idade.

Não, o provérbio não está bem certo. O raio é que enquanto há esperança, há vida. Jamais foi encontrado no bolso de um suicida um bilhete de loteria que estivesse para correr no dia seguinte.

A rua é um rio de passos e vozes.

A matemática é o pensamento sem dor.

Sonhar é acordar pra dentro.

O mais feroz dos animais domésticos é o relógio de parede: conheço um que já devorou três gerações da minha família.

A eternidade é um relógio sem ponteiros.

O bom da chuva é que parece que não tem fim.

Quem inventa fica mais perto da realidade.

Quem faz um poema abre uma janela.

Os nossos olhos também precisam de alimento.

Se ninguém é tão bom quanto imagina, também não é tão mau como parece.

Os verdadeiros analfabetos são os que aprenderam a ler e não lêem.

Deus é mais simples que as religiões.

São os passos que fazem os caminhos.

Todos estes que aí estão / Atravancando o meu caminho, / Eles passarão... / Eu passarinho.

O que faz as coisas pararem no tempo é a saudade.

AMIZADE: Quando o silêncio a dois não se torna incômodo

AMOR: Quando o silêncio a dois se torna cômodo.”

(Para viver com poesia)

# Dedicatória

Dedico esta tese à minha família,  
a todos os meus amigos e  
àqueles que de alguma forma  
me deram o apoio necessário para chegar até aqui.

# Agradecimentos

Ao Prof. Luiz Pinguelli Rosa, que me acompanha desde o mestrado, e com quem pude muito aprender;

Ao meu orientador belga, Hervé Jeanmart, que me recepcionou na Bélgica, contribuindo para esta frutífera e importante experiência;

Ao meu querido e escolhido Xris, por todas as sugestões e gargalhadas, por todo apoio e amor;

À minha família co-sanguínea, meus pais e irmãos, sempre presentes e acreditando no meu potencial;

Aos meus amigos, a família que escolhi: Ana Paula Amorim, Ederson Gonçalves, Fernando Braga, Jorge Costa, Juliana Tadros, Lívia Luz, Luciana Fortunato, Manuela Barros, Mariana Pereira, Nivia Belchior, Raphaela Matos e Vanessa Barbosa;

À Dayanne Dutra de Menezes, amizade amadurecida ao longo dos anos, com quem muito aprendi e tanto compartilhei;

À Ana Cláudia Nioac de Salles, por todos os papos, sonhos compartilhados, aos acasos da vida e almoços acadêmicos;

À Angela Oliveira da Costa, por estar por perto (e agora ainda mais perto), por ser minha crítica e sincera amiga;

À Sylvia Meimaridou Rola, por todas as receitas da vida, com todos os ingredientes da amizade;

À Neilton Fidélis da Silva, responsável por uma parte importante do meu crescimento profissional, e com quem se tem sempre uma ótima conversa;

Aos amigos “Braso-belgas” Marie, Rodrigo, Valtinho e Paulo; uruguaio: Nazarena, Federico, Marcela, Matteo, Vicente e Fernanda, belgas: Vinciane, Rachel, Xavier e Antoine, tchecos: Ivan e Veronika, italianos: Simone e Valentina, poloneses: Voitek, Chris, Olla, Ursula, Thomaz, inglês: Ben, e todos os outros brasileiros e estrangeiras que fizeram da minha estada belga aprazível e produtiva;

Aos membros do IVIG sem o qual este trabalho não seria possível, destacando o Prof. Marcos Aurélio Vasconcellos de Freitas e os colegas Luiz Guilherme Marques, Anamélia Medeiros, Cícero Pimenteira, Beatrix Pinto, Rodrigo Ribas e Cristina Bastin;

Meu especial agradecimento à Dona Fátima Paschoal, pela simpatia, por regar as plantas e por ter sido uma pessoa especial durante o tempo em que estive conosco;

À Fátima Alexandre, pela eficiência e simpatia;

Pelos membros do IVIG (- GARTA): Sônia, Biano, Fabiana e Leonardo.

Aos demais colegas do IVIG-CETS que viabilizaram o dia a dia e enriqueceram a convivência: Aurélio Murta, Ana Beatriz, Claudia Daza, Veloni Vicentini, José Luiz Cardoso, Victor, Luis Carlos, Juliane, José Antonio Sena, Leandro, Ednaldo Santos, Ednaldo Pereira, Tatiana Valle, Daniel Stilpen e Riane Nunes, Bárbara...

Ao Programa de Planejamento Energético - PPE, cujo corpo de professores foi fundamental na formação que hoje levo para a vida. Também de suma importância as Secretárias Sandra e Simone, os auxiliares Paulo e Fernando e as Bibliotecárias Rita e Mônica;

Aos meus afilhados (Júlia, Luiza e João Roberto) e sobrinhos (Thomaz, Júlia e Bryan), por alegrarem meus dias e darem continuidade à vida (*“Triste de quem não conserva nenhum vestígio da infância...”* Mário Quintana);

Ao CNPq, órgão de fomento à pesquisa que me proporcionou apoio financeiro para execução deste trabalho;

A CAPES, responsável pela minha bolsa no exterior, momento de crescimento pessoal e profissional;

E por fim, aos demais personagens que de alguma forma tiveram importância neste trabalho:

A todos o meu mais sincero agradecimento.

Com carinho, sempre,

Rachel Martins Henriques

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL COM  
RESÍDUOS DE BIOMASSA ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO

Rachel Martins Henriques

Janeiro/2009

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa  
Neilton Fidélis da Silva

Programa: Planejamento Energético

A adoção de novas tecnologias para geração de energia elétrica é feita com base em análise técnicas, econômicas e ambientais. Um fator importante para a escolha da tecnologia a ser adotada é o insumo disponível para este fim. Face ao aproveitamento energético aquém do potencial existente dos resíduos agrícolas e sólidos urbanos, da demanda crescente por energia e às preocupações ambientais existentes, esta tese visa dar ênfase a tecnologia de gaseificação como alternativa para aproveitamento energético de alguns resíduos agrícolas e sólidos urbanos. Destarte, é analisado o estado da arte da tecnologia, seu amadurecimento e melhorias. Para melhor compreensão deste processo, adiciona-se as conclusões advindas da experiência na planta piloto de gaseificação na Universidade de Louvain La Neuve, Bélgica. Considerando os resíduos selecionados, a quantidade disponível e a tecnologia eleita, calcula-se o potencial de energia elétrica que poderia ser gerado caso esses insumos fossem gaseificados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

POTENCIAL ELECTRICAL ENERGY GENERATION IN BRAZIL WITH BIOMASS  
WASTE BY GASIFICATION PROCESS

Rachel Martins Henriques

January/2009

Advisors: Luiz Pinguelli Rosa  
Neilton Fidélis da Silva

Department: Energy Planning

The adoption of new technologies for generating electricity is based on technical, economic and environmental analysis. An important factor for choose the technology to be adopted is the raw material available for this purpose. Given the energy application below the potential of agricultural and urban solid waste, the growing demand for energy and the existence of environmental concerns, this thesis aims to emphasize the technology of gasification as an alternative for energy use of agricultural and urban solid waste. Thus, it describes the technology's state of the art, its maturity and improvement. Of great importance for understanding this process, it is needed to add the conclusions derived from experience in the gasification pilot plant at the University of Louvain la Neuve, Belgium. Considering the waste selected, the quantity available and the technology chosen, it is estimated the potential for electric energy that could be generated if the inputs were gasified.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO.....</u></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><u>ENERGIA ELÉTRICA E GASEIFICAÇÃO.....</u></b>	<b>9</b>
2.1	A EVOLUÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO MUNDO.....	9
2.2	A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL .....	12
2.3	PANORAMA DA ENERGIA NO MUNDO .....	15
2.3.1	CENÁRIO DE EVOLUÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA .....	16
2.3.2	DEMANDA CRESCENTE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	16
2.3.3	O CARVÃO NA MATRIZ MUNDIAL.....	20
2.4	CONTEXTO ATUAL PARA FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA.....	25
2.4.1	BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA .....	26
2.5	AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DE GASEIFICAÇÃO.....	27
2.5.1	GASEIFICAÇÃO X COMBUSTÃO.....	29
2.6	LEGISLAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE .....	30
2.6.1	ASPECTOS RELEVANTES ACERCA DO DESENVOLVIMENTO.....	31
2.6.2	ASPECTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA.....	34
2.6.3	ASPECTO LEGAL NO BRASIL .....	39
2.7	CONCLUSÕES PRELIMINARES .....	44
<b>3</b>	<b><u>ESTADO DA ARTE DA GASEIFICAÇÃO .....</u></b>	<b>47</b>
3.1	GÊNESE.....	47
3.2	REAÇÕES QUÍMICAS DO PROCESSO .....	50
3.3	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS.....	53
3.3.1	LEITO FIXO .....	54
3.3.1.1	Contracorrente .....	55
3.3.1.2	Co- corrente .....	57
3.3.2	LEITO FLUIDIZADO .....	61
3.3.2.1	Gaseificadores Pressurizados e Atmosféricos.....	65
3.4	TENDÊNCIAS MUNDIAIS .....	66
3.5	GASEIFICADORES NO BRASIL .....	69
3.6	TERMELETRICIDADE .....	75
3.6.1	TURBINAS A VAPOR .....	76
3.6.2	TURBINAS DE COMBUSTÃO.....	78

3.6.3	Ciclo Combinado.....	82
3.6.4	EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO .....	83
3.6.4.1	PROCESSOS DE CONVERSÃO .....	84
<b>3.7</b>	<b>CONCLUSÕES PRELIMINARES .....</b>	<b>91</b>

#### **4 ANÁLISE EXPERIMENTAL – PRODUÇÃO DE ALCATRÃO E TAMANHO DE PARTÍCULA NA GASEIFICAÇÃO.....93**

<b>4.1</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO ALCATRÃO .....</b>	<b>95</b>
4.1.1	ANÁLISE DO TAMANHO DA PARTÍCULA E GERAÇÃO DE ALCATRÃO.....	96
<b>4.2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO GASEIFICADOR DA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE LOUVAIN – UCL. 101</b>	
<b>4.3</b>	<b>EXPERIMENTO..... 102</b>	
4.3.1	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA COLETA DE ALCATRÃO.....	105
4.3.2	DETALHES DO EXPERIMENTO .....	109
<b>4.4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DO EXPERIMENTO .....</b>	<b>112</b>
4.4.1	PERDA DE CARGA .....	112
4.4.2	PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	113
4.4.3	METANO.....	114
4.4.4	COMPOSIÇÃO DO GÁS.....	115
4.4.5	QUANTIDADE DE ALCATRÃO .....	116
<b>4.5</b>	<b>CONCLUSÕES PRELIMINARES .....</b>	<b>121</b>

#### **5 POTENCIAL NACIONAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA .....123**

<b>5.1</b>	<b>COMBUSTÍVEIS PARA GASEIFICAÇÃO .....</b>	<b>124</b>
5.1.1	CAVACO DE MADEIRA.....	125
5.1.2	BAGAÇO DE CANA.....	134
5.1.2.1	Os resíduos da indústria canavieira.....	136
5.1.3	RESÍDUOS DO DENDÊ .....	142
5.1.4	TORTA DE MAMONA .....	149
5.1.5	CASCA DE ARROZ.....	157
5.1.6	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	163
5.1.6.1	Quantidade de Resíduos no Brasil .....	169
<b>5.2</b>	<b>GERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOMASSA .....</b>	<b>171</b>
5.2.1	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA COM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA .....	180
<b>5.3</b>	<b>CONCLUSÕES PRELIMINARES .....</b>	<b>185</b>

<b><u>6</u></b>	<b><u>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u></b>	<b><u>186</u></b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>BIBLIOGRAFIA .....</u></b>	<b><u>190</u></b>
<b><u>8</u></b>	<b><u>ANEXO I .....</u></b>	<b><u>206</u></b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de Energia no Brasil .....	14
Figura 2 – Mercado Mundial do Consumo de Energia por região, 2004 – 2030 .....	17
Figura 3 – Localização das Maiores Reservas de Combustíveis Fósseis do Mundo (GigaTon de carvão equivalente). Dados de 2005. ....	22
Figura 4 – Reservas provadas de carvão no fim de 2007. bilhões de toneladas (antracito e carvão betumino em parênteses) .....	23
Figura 5 – Preços do Petróleo entre 1861 e 2007.....	24
Figura 6 – Preços Históricos do carvão.....	24
Figura 7 – Distribuição de Energia elétrica e IDH no Brasil .....	32
Figura 8 – Mapa da distribuição de consumo de eletricidade no mundo .....	33
Figura 9 – Mapa da distribuição de IDH ao redor do mundo .....	33
Figura 10 – Veículos movidos a gaseificadores .....	49
Figura 11 – Esquema das regiões de um gaseificador de leito fixo contracorrente .....	55
Figura 12 – Gaseificador Contracorrente .....	57
Figura 13 – Gaseificador contracorrente pressurizado, Lurgi .....	57
Figura 14 – Regiões normalmente encontradas em gaseificadores co-corrente .....	58
Figura 15 – Gaseificador co-corrente .....	60
Figura 16 – Desenho esquemático do Gaseificador Imbert.....	60
Figura 17 – Evolução da pressão na base de um leito de material particulado com o aumento da vazão de ar .....	63
Figura 18 – Sistema de Gaseificação com Ciclo Combinado e captura de CO <sub>2</sub> .....	69
Figura 19 – Ciclo Rankine convencional .....	78
Figura 20 – Turbina a gás com fluxo numérico de energia.....	80
Figura 21 – Ciclo Combinado Simplificado com fluxo numérico de energia .....	83
Figura 22 – Eficiência de plantas de energia elétrica .....	87
Figura 23 – Interface computacional da Planta piloto Belga.....	90
Figura 24 Secagem da madeira .....	103
Figura 25 – Esquema do dispositivo de triagem.....	104
Figura 26 – Imagem do dispositivo de triagem em operação .....	105
Figura 27 – Posicionamento do Ponto de Coleta na Instalação .....	106
Figura 28- Esquema do Sistema de Coleta.....	107
Figura 29 – Sistema de coleta .....	109
Figura 30 – Porta filtro com o filtro de fuligem .....	109
Figura 31 – O estoque de filtro      Figura 32 – O filtro de alcatrão .....	111
Figura 33 – Exemplos de B combustíveis de madeira.....	130

Figura 34 – Produção de Madeira, Brasil 2006 .....	134
Figura 35 – Produção de Cana de Açúcar, Brasil 2006.....	140
Figura 36 – Relação entre composição elementar e imediata de um combustível ....	141
Figura 37 – Zonas aptas para o cultivo do dendê .....	144
Figura 38 – Produção de Dendê, Brasil 2006.....	149
Figura 39 – Produção de Mamona no Brasil 2006 .....	152
Figura 40 – Estrutura do óleo de Mamona .....	154
Figura 41 – Produção de Arroz Brasil 2006 .....	163
Figura 42 – Concentração de resíduos sólidos no Brasil .....	171

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos ambientais provocados pelo uso da energia .....	35
Tabela 2 - Composição típica do gás produzido pela gaseificação de biomassa .....	53
Tabela 3 – Características dos Gaseificadores .....	54
Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens dos Gaseificadores de Leito Fixo .....	61
Tabela 5 – Comparação entre Gaseificadores de leito fixo e leito fluidizado .....	66
Tabela 6 – Sumário da Performance do IGCC com Captura de CO <sub>2</sub> .....	67
Tabela 7 – Propriedades dos Gases obtidos – IPT .....	71
Tabela 8 – Diferentes Biomassas e Poder calorífico do gás .....	88
Tabela 9– Quantidade de oxigênio e Processos de Oxidação .....	94
Tabela 10– Propriedades Térmicas da Biomassa Típica .....	95
Tabela 11 – Granulometria da Madeira Misturada .....	105
Tabela 12 – Valores dos parâmetros de acordo com o tamanho das partículas .....	113
Tabela 13 – Influencia da Granulometria da Madeira na composição do gás.....	115
Tabela 14 – Tamanho dos cavacos, série executada, concentração de alcatrão e número de amostras.....	119
Tabela 15 – Grupos de cavacos, concentração de alcatrão e número de amostras..	119
Tabela 16 – Cobertura Florestal Brasileira.....	126
Tabela 17 – Taxa de crescimento do eucalipto no Brasil comparado a outros países. ....	127
Tabela 18 – Áreas com Florestas Plantadas de Pinus e Eucalipto no Brasil.....	128
Tabela 19 – Produtividade e Produção sustentada de Florestas Plantadas no Brasil (2006) .....	129
Tabela 20 – Características do Cavaco de Madeira.....	131
Tabela 21 – Características físico-químicas da lenha seca de <i>Eucalyptus Grandis</i> ..	132
Tabela 22 – Produção de Madeira, Brasil 2006 .....	133
Tabela 23 – Disponibilidade de Resíduos de Cana de Açúcar.....	137
Tabela 24– Características da Cana-de-açúcar por Região.....	137
Tabela 25 – Produção de Cana de Açúcar, Brasil 2006.....	139
Tabela 26 - Composição média da fibra do bagaço (%).....	141
Tabela 27 – Composição Imediata, elementar e Poder Calorífico do Bagaço de Cana .....	141
Tabela 28 – Média da Composição Imediata e Poder Calorífico Superior da Cana de açúcar.....	142
Tabela 29 – Áreas de Cultivo de Dendê por Estado.....	145
Tabela 30 – Característica das Principais oleaginosas no Brasil.....	146

Tabela 31 – Produtos e Subprodutos do dendê.....	147
Tabela 32 – Quantidade de produtos e subprodutos gerados em 2006 .....	148
Tabela 33 – Produção dendê Brasil 2006 .....	149
Tabela 34 – Produção de Mamona no Brasil (t).....	152
Tabela 35 – Aplicação industrial de derivados de óleo de mamona .....	155
Tabela 36 – Teor (%) de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio na casca e na torta da mamona.....	156
Tabela 37 – Produção de arroz no mundo em 2006 .....	159
Tabela 38 – Produção de Arroz no Brasil em 2006.....	160
Tabela 39 – Produção de Arroz no Brasil.....	162
Tabela 40 – Produção média de Resíduos Sólidos Urbanos <i>per capita</i> em alguns países e cidades em 1990 .....	165
Tabela 41 – Combustíveis, poder calorífico e composições.....	173
Tabela 42 – Custo da Tecnologia .....	175
Tabela 43 – Geração Específica de Energia elétrica a partir da Biomassa (Excedente exportável para o sistema elétrico segundo o modo de operação).....	176
Tabela 44 – Potencial de Conteúdo Energético de algumas biomassas em 2005 ....	177
Tabela 45 – Potencial de Geração de Energia (TWh/ano) .....	178
Tabela 46 – Energia Disponível para Gaseificação com Resíduos de Biomassa.....	180
Tabela 47 – Tipos de Gaseificadores e Aplicações.....	181
Tabela 48 – Geração de energia com resíduos de biomassa através da gaseificação .....	182

# 1 Introdução

Os diálogos sobre a dimensão do meio ambiente na agenda internacional iniciaram-se em Estocolmo no ano de 1972, na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano. No encontro dos organizadores desta conferência em Founex, no ano anterior, discutiu-se pela primeira vez as relações entre desenvolvimento e meio ambiente. Serviram como base para esta discussão os debates sobre os riscos de degradação do meio ambiente que, de forma esparsa, começaram nos anos 1960 e ganharam força no fim desta década e no início dos anos 1970. Uma série de encontros, vários relatórios internacionais e vinte anos depois, sucedeu no Rio de Janeiro o Encontro da Terra, ou Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a “Rio-92” (SACHS, 2000; FERREIRA, VIOLA, 1996).

O despertar da humanidade para este tema pode ser explicado por uma série de acontecimentos históricos, fundamentais para a trajetória do homem no planeta. A idéia de desenvolvimento e direitos humanos ecoou com mais força na segunda metade do século XX, com o objetivo de exorcizar as lembranças da grande depressão e os horrores da Segunda Guerra Mundial. O surgimento de uma consciência ambiental pode ser atribuído ao choque produzido pelo lançamento da bomba atômica em Hiroshima, uma vez que essa foi uma demonstração de que a humanidade tinha alcançado capacidade técnica suficiente para destruir a vida no planeta. Assim, a opinião pública se tornou gradativamente mais consciente, tanto da limitação do capital da natureza, quanto dos perigos decorrentes das agressões ao meio ambiente (SACHS, 2000).

Esta revolução intelectual teve conseqüências éticas e epistemológicas de longo alcance, as quais influenciaram o pensamento sobre o desenvolvimento. Surge então a ética de responsabilidade para com o futuro de todas as espécies vivas. Deste pensamento emerge um caminho intermediário entre o economicismo arrogante e o fundamentalismo ecológico. Este “caminho do meio” inspirou a Declaração de Cocoyoc em 1975 e o influente relatório “*What Now*” em 1975. Trata-se de outro desenvolvimento, endógeno, auto-suficiente, orientado para as necessidades, em harmonia com a natureza e aberto às mudanças institucionais. Este “caminho do meio” passou a ser denominado ecodesenvolvimento ou desenvolvimento sustentável, cuja abordagem é fundamentada na harmonização de objetivos sociais, ambientais e econômicos, estando presente desde a Conferência de Estocolmo, passando pela Conferência do Rio e ainda continua válida.

Houve então uma intensa reflexão sobre o uso dos recursos naturais para atender as demandas humanas e a possibilidade de sua utilização via atividades direcionadas para a ecoeficiência. Mas o conceito de desenvolvimento sustentável, embora já existente, porém em construção, não ecoava de forma equânime e por isso carecia de um esclarecimento semântico. De acordo com alguns entendimentos, ele é incompatível com o jogo sem restrições das forças de mercado, que com sua visão míope impedem que se veja claramente, a longo prazo, com olhos somente para o que é lucro no momento.

O termo desenvolvimento sustentável procura vincular estreitamente a temática do crescimento econômico com meio ambiente. Este novo conceito passa uma imagem extremamente positiva, que marca uma nova filosofia de desenvolvimento que combina eficiência econômica com justiça social e prudência ecológica. E assim, sinaliza uma alternativa às teorias e aos modelos tradicionais de desenvolvimento, já desgastadas.

Cabe aqui ressaltar que, embora expresso como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem arriscar que futuras gerações não possam satisfazer as necessidades delas” (FERREIRA, VIOLA, 1996), sua definição ainda é precária. José Eli da Veiga (2008) tenta dissecar o que seria exatamente desenvolvimento sustentável, visto que este termo é disseminado mundialmente, com entendimentos diversos.

Analizados separadamente, o termo “desenvolvimento” pode ser entendido não somente pelo seu viés econômico – o que acontece na maior parte das vezes – uma vez que este termo não se define somente como evolução da atividade econômica. Uma leitura mais abrangente do que se entende por desenvolvimento inclui que este remova as principais fontes de privação de liberdade: pobreza, tirania, carência de oportunidades econômicas e destituição social sistemática, negligência dos serviços públicos e intolerância ou interferência de Estados repressivos. Além disso, influências culturais têm impactos diferenciados no desempenho das nações. Deve-se perceber basicamente que o desenvolvimento não é uma coleção de coisas, mas sim um processo que produz coisas. Em suma, pode-se entender como desenvolvimento o processo capaz de permitir que cada indivíduo revele suas capacidades, seus talentos e sua imaginação na busca da auto-realização e da felicidade, mediante esforços coletivos e individuais, combinação de trabalho autônomo e heterônomo, e de tempo gasto em atividades não econômicas. Segundo o PNUD<sup>1</sup>, desenvolvimento está relacionado com a possibilidade de as pessoas viverem o tipo de vida que escolheram, e com a provisão dos instrumentos e das oportunidades para

---

<sup>1</sup> PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

fazerem as suas escolhas. O Relatório de Desenvolvimento Humano insiste que esta definição é mais política do que econômica, e abrange desde a proteção dos direitos humanos até o aprofundamento da democracia. No entanto uma definição mais clara do que vem a ser desenvolvimento surge através de Celso Furtado (VEIGA, 2008):

*“O crescimento econômico, tal qual o conhecemos, vem se fundando na preservação dos privilégios das elites que satisfazem seu afã de modernização; já o desenvolvimento se caracteriza pelo seu projeto social subjacente. Dispor de recursos para investir está longe de ser condição suficiente para preparar um melhor futuro para a massa da população. Mas quando o projeto social prioriza a efetiva melhoria das condições de vida dessa população, o crescimento se metamorfoseia em desenvolvimento.”*

Seguindo esta discussão, o conceito de sustentabilidade também carece de reflexão. Este conceito é definido resumidamente por Sachs (2000) em um tripé que envolve oito dimensões (social, cultural, ecológica, ambiental, territorial, econômica, política nacional e política internacional): (1) preservação do potencial da natureza para a produção de recursos renováveis; (2) limitação do uso de recursos não renováveis; e (3) respeito e realce para a capacidade de autodepuração dos ecossistemas naturais. A sustentabilidade é baseada na solidariedade ética com a geração atual e com as gerações futuras. Esta sustentabilidade impede que se busque soluções triplamente vencedoras (em termos sociais, econômicos e ecológicos), eliminando o crescimento selvagem obtido ao custo de elevadas externalidades negativas, tanto sociais quanto ambientais.

Embora a definição de sustentabilidade não encontre tanta retórica quanto a relacionada ao desenvolvimento, ela também merece destaque. Para que a sustentabilidade exista, uma das linhas de pensamento defende a necessidade da compatibilidade entre o crescimento e a conservação da natureza. Destaca-se que o crescimento está sempre relacionado à depleção e, portanto, encurtamento da expectativa de vida da espécie humana – que não abre mão de seu conforto em prol dos que viverão aqui no futuro. No entanto, seguindo esta definição de sustentabilidade, pode haver a preservação da capacidade produtiva para um futuro indefinido, pela ilimitada substituição dos recursos não renováveis. Dentro deste

contexto, surge o conceito de “sustentabilidade fraca”, cujas bases encontram-se na idéia de que, no limite, o estoque de recursos naturais pode até ser exaurido, desde que o declínio seja contrabalançado por acréscimo de outros dois fatores-chaves: trabalho e capital traduzido – ou capital reprodutível. Ou seja, segundo esta perspectiva, a sustentabilidade está relacionada à habilidade de manter a capacidade de produção no futuro, e não manter qualquer outro componente mais específico da economia, apostando assim fortemente na tecnologia. Em contrapartida está o conceito de “sustentabilidade forte”, entendendo que deve haver a manutenção de uma parte do capital não reprodutível – capital natural. E por não ignorar que parte deste capital natural é exaurível, propõem que os danos ambientais provocados por certas atividades sejam compensados de alguma forma por outras atividades. A noção de sustentabilidade passa pela crença de que surgirão, em tempo, os novos mercados e as inovações tecnológicas capazes de evitar, ou contornar, as catástrofes ambientais. Além disso, esta expressão passou a exprimir a necessidade de um uso mais responsável dos recursos ambientais. A sustentabilidade não é, e não será, uma noção de natureza precisa, discreta analítica ou aritmética; ela sempre será contraditória, pois nunca poderá ser encontrada no seu estado puro. Para Gell-Mann (VEIGA, 2008) dentre os muitos desafios enfrentados pela humanidade destaca-se a realização de um conjunto de ações interligadas para um horizonte mais sustentável no século XXI. São elas:

- Estabilização da população, globalmente e na maioria das regiões;
- Práticas econômicas que encorajem a cobrança de custos reais – a vida através dos dividendos da natureza e não do seu capital;
- Tecnologia com baixo impacto ambiental;
- Distribuição das riquezas;
- Instituições globais e transnacionais mais fortes para lidar com problemas globais urgentes;
- Informação ao público sobre os desafios múltiplos e interligados do futuro; e
- O maior desafio: predomínio de atitudes que favoreçam a unidade na diversidade, i.e., cooperação e competição não violenta entre tradições culturais diferentes e nações-Estados.

Em seu livro “Caminhos para o desenvolvimento sustentável” Sachs (2000) cita o pensador indiano M.S.Swaminathan que diz :

*“Uma nova forma de civilização fundamentada no aproveitamento sustentável dos recursos renováveis, não é apenas possível, mas essencial.”*

Para Sachs (2000), as civilizações do passado foram fundamentadas pela biomassa, pois nela baseavam sua vida material, usando-a para alimentação, ração animal, combustível, vestimentas, madeira para construção de abrigos, mobiliário, etc. O objetivo, no entanto, não é retroceder aos modos ancestrais de vida, mas transformar o conhecimento dos povos como ponto de partida para uma nova e moderna civilização de biomassa, i.e., onde o uso desta seria a base desta nova civilização, porém mais moderna e eficiente. Sachs (2000) identifica o desafio do uso e aproveitamento dos recursos naturais como sendo a possibilidade da conservação e utilização racional dos recursos naturais andarem juntos.

Neste contexto, ele reconhece os países de clima tropical como os que possuem uma duradoura vantagem comparativa natural, por permitir produtividades maiores que as apresentadas nas zonas temperadas, embora por muito tempo este clima tenha sido classificado como uma deficiência. Acreditava-se que os recursos naturais perderiam importância diante dos recursos humanos e do conhecimento, dominante em zonas temperadas. No entanto, esta é uma verdade parcial, pois uma boa combinação de recursos naturais abundantes e baratos, força de trabalho qualificada e conhecimento moderno resultam em uma vantagem comparativa inigualável.

As relações entre recursos naturais e modelo de desenvolvimento real retomaram força à medida que se evidenciavam a intensificação do efeito estufa, fenômeno natural que permite a vida de seres humanos na terra devido a manutenção da temperatura média da terra em torno de 15°C. As mudanças globais do clima, responsáveis pela elevação média da temperatura na superfície da Terra, impulsionaram a aceitação de que o desenvolvimento deve ser feito de forma sustentável. A perspectiva de implantação deste como política de desenvolvimento global foi reforçada com a confirmação da intensificação do efeito estufa por atividades antropogênicas.

As primeiras máquinas desenvolvidas na Revolução Industrial não tinham como objetivo minimizar o impacto ambiental e sim ampliar a escala de produção que antes era efetuada pelo conjunto trabalhador/ferramenta. (SILVA, 2006, GONÇALVES JUNIOR, 2002). Desta forma esta revolução não ocorreu com base na hoje denominada tecnologia limpa. O desdobramento em termos ambientais desta evolução pôde ser avaliado no AR4 – Quarto Relatório sobre Mudanças do Clima elaborado pelo IPCC<sup>2</sup>, onde se evidencia que as atividades humanas são responsáveis pela intensificação do efeito estufa. Assim, uma mudança no padrão de desenvolvimento é desejável para que as próximas gerações não sejam vítimas de um modelo pautado em usufruir intensamente o presente sem se preocupar com as gerações futuras. Uma vez que o setor de energia é o que mais contribui com a intensificação deste efeito, por ser o maior emissor de gases de efeito estufa, a adoção de novas (ou antigas) alternativas para geração de energia encontra respaldo no atual cenário sócio – econômico – ambiental mundial, pois é maior o conhecimento das ações dos gases de efeito estufa e da responsabilidade do homem.

Aprofundando esta análise, observa-se que , em outubro de 2006, foi lançado na Inglaterra um relatório encomendado pelo governo britânico sobre os impactos econômicos do aquecimento global. Este estudo, que ficou conhecido como Relatório Stern (STERN, 2006), ganhou destaque pela forma com a qual se apresentou e, dentre outras conclusões, prega que um investimento de apenas 1% do PIB Mundial pode-se evitar a perda de 20% do mesmo PIB num prazo de simulação de 50 anos. Este relatório provocou grande impacto na sociedade, uma vez que as medidas tomadas até o momento – para adaptação do planeta às mudanças globais do clima e investimentos em mitigação de gases de efeito estufa – estão aquém do necessário para evitar que os impactos advindos das mudanças globais causem as perdas de riquezas projetadas. No entanto, mesmo merecendo refinamento, espera-se repercussões positivas decorrentes de suas conclusões.

Mesmo não tendo o investimento esperado, tecnologias ambientalmente amigáveis ganham espaço no mercado. As empresas enxergaram no desenvolvimento sustentável maneiras de aumentar sua produtividade e reduzir custos a médio prazo, com investimento em tecnologias e procedimentos processuais ecologicamente amigáveis. Além disso, sua imagem frente ao consumidor passa a ser de uma organização preocupada com o futuro coletivo. Assim, as empresas podem continuar incentivando o consumo de bens e fazendo o

---

<sup>2</sup> IPCC – International Panel on Climate Change (Painel Integovernamental da Mudança da Clima da Organização das Nações Unidas)

consumidor acreditar que se são feitos de forma sustentável não há mal em continuar consumindo.

Esta lógica não tem como objetivo final a diminuição do consumo nem uma reflexão sobre o modelo de desenvolvimento adotado. Mantém-se consumindo da mesma forma, mas com a ilusão de medidas ecologicamente amigáveis são suficientes para que o consumo seja feito sem “dano ambiental”. Como a energia, que a melhor é a não usada, a melhor emissão não é a seqüestrada, mas a não emitida.

Dentro deste contexto de estímulo de consumo, ocorre aumento da demanda de energia e necessidade de crescimento com tecnologias ambientalmente amigáveis, e assim surge a oportunidade da utilização de fontes alternativas de energia que possam suprir esta demanda crescente e atuar dentro da perspectiva de desenvolvimento sustentável. Neste contexto, encaixa-se a tecnologia de gaseificação de biomassa. Seu surgimento derivou-se da demanda por uma alternativa aos transportes que utilizavam petróleo e desenvolve-se baseada nas enormes reservas de carvão existentes no mundo, principalmente China e Estados Unidos.

Esta tese tem, como objetivo principal, vislumbrar quanto de energia elétrica pode ser ofertada ao sistema de distribuição de energia elétrica nacional através do uso de resíduos de biomassa em gaseificadores, considerando as melhorias processuais experimentadas na Universidade de Louvain, na Bélgica.

Assim, após a introdução feita neste Capítulo 1, o Capítulo 2 desta tese contextualiza o cenário onde encaixa-se a gaseificação mundialmente, considerando a necessidade crescente de energia mundial, a localização e tamanho das reservas de carvão, as questões ambientais, a demanda por energias alternativas ao petróleo e como comportam-se a combustão e a gaseificação.

No capítulo 3 apresenta-se o estado da arte da gaseificação; o surgimento dos primeiros gaseificadores, o desenvolvimento da tecnologia e sua maturidade com a indústria carvoeira. Além disso, faz-se uma análise do funcionamento das turbinas utilizadas para a termoelectricidade e a eficiência dos ciclos de gaseificação.

Uma vez entendido o funcionamento do gaseificador, o capítulo seguinte descreve o experimento realizado na Universidade de Louvain La Neuve, Bélgica. Neste estudo observou-se a relação entre o tamanho da partícula de insumo que está a montante do

gaseificador, e a quantidade de alcatrão gerada durante o processo. Neste estudo de caso, vivenciou-se as dificuldades que podem ser encontradas quando da aplicação desta tecnologia. Desta forma, inovou-se ao relacionar esta experiência prática com o cálculo de potenciais energéticos.

Ciente das relações existentes entre as partículas e os resíduos gerados com a gaseificação, bem como dos processos relativos à gaseificação, o quinto capítulo apresenta um levantamento do potencial de energia elétrica que pode ser gerada com os resíduos da madeira, da cana de açúcar, do dendê, da mamona, do arroz e os resíduos sólidos urbanos. Calcula-se o potencial energético de cada resíduo gerado e a energia elétrica que pode ser gerada caso algumas das tecnologias de gaseificação fossem empregadas.

O capítulo final é o conclusivo, onde se faz um compêndio das conclusões de cada capítulo.

## **2 Energia Elétrica e Gaseificação**

Este capítulo tem como objetivo descrever o cenário no qual a gaseificação surge como alternativa para a geração de energia elétrica. Assim, em um primeiro momento descreve-se o desenvolvimento da energia, como esta foi usada pelo homem e depois de dominada por ele, passou a integrar sua realidade, alterando seu modo de vida. Dada sua importância, a demanda é crescente: em 2007 houve crescimento da demanda nos EUA e na China, além de aumento de consumo de petróleo nas regiões exportadoras (Oriente Médio, América do Sul, América Central e África), e aumento de cerca de 20% do consumo de gás natural na China. Entretanto, a participação das energias de fontes renováveis ainda encontra-se incipiente, com menos de 10% da matriz mundial.

Esta demanda crescente de energia necessita de insumos energéticos, e dentre os insumos que podem atendê-la destaca-se o carvão, distribuído mais uniformemente no mundo e com maiores reservas do que o petróleo. Seu preço também se mostrou mais estável que o do petróleo ao longo do tempo. Assim, este passa a ser empregado não só na gaseificação, mas em outros processos para a obtenção de energia, e desta forma esta tecnologia sofreu um impulso tecnológico. Mas não há geração de energia sem impactos ambientais e estes também são levados em conta neste capítulo, bem como a legislação existente que poderia servir de incentivo para a expansão desta tecnologia no Brasil.

### ***2.1 A Evolução da Energia Elétrica no Mundo***

Dentre os caminhos evolutivos que permearam o uso da energia feito pelo homem, diversos passos foram tomados desde o primeiro contato até o estabelecimento de sistemas complexos de geração e distribuição de energia (SILVA, 2006).

A utilização dos fluxos naturais de energia (utilização da energia do sol, do vento, da água) foram os primeiros usos energéticos feitos pelo homem de forma direta. Não havia usos de equipamentos de conversão ou técnica para tal. Outra parte da energia utilizada estava relacionada ao conteúdo energético dos alimentos ingeridos. Assim o homem se exterioriza, aprimorando o uso da sua força muscular e do calor existente no próprio ser humano.

O passo seguinte desta evolução deu-se com o domínio das técnicas e controle do fogo, permitindo que o homem tivesse pela primeira vez o controle da energia acumulada, i.e., a

lenha é vista como energia solar estocada. Assim, o homem passa a ter uma fonte de energia adicional, utilizando-se desta como fonte de calor, iluminação e cocção. Neste mesmo período, o surgimento da roda e da alavanca, a utilização dos ventos para navegação e moinhos de água para energia hidráulica permitem ao homem melhorar sua capacidade de aproveitamento dos fluxos energéticos e por consequência incrementar seu consumo de energia.

A evolução deste processo é marcada pelo surgimento da máquina a vapor, que modificou simultaneamente as condições de oferta e demanda de energia. Neste novo processo de exteriorização do corpo humano, o homem dispõe, pela primeira vez, de forma externa e independente das suas capacidades físicas, de uma força motriz possível de modulação quanto à potência, controle de movimentos e disponibilidade temporal e local. O emprego da máquina a vapor favoreceu a ampliação das atividades minerais, tornando-se o símbolo energético da revolução industrial. O carvão passou a ser o vetor energético dominante neste processo e o uso massivo dos combustíveis fósseis pela humanidade passa a ser um novo marco no aproveitamento dos processos naturais de acumulação e concentração de energia. A máquina a vapor, inicialmente desenvolvida no fim do século XVII e início do século XVIII tinha o rendimento muito baixo (algo em torno de 1%) e somente após ajustes elaborados por James Watt, já na segunda metade do século XVIII, é que essa se torna um motor de uso universal e promovendo assim uma significativa ruptura nos sistemas energéticos existentes, possibilitando desagregar espacialmente o conversor de sua fonte de energia (SILVA, 2006).

Em função deste novo domínio tecnológico, várias mudanças ocorreram, tais como o desenvolvimento do motor Otto a carvão em 1867 e do motor Diesel, patenteado em 1892. O insumo mais usado à época já era derivado de petróleo. Entretanto, a utilização do gás natural foi retardada quando comparada com a dos outros derivados de petróleo, mas ao ser dominada foi de grande importância para humanidade.

A evolução iniciada com a máquina a vapor impulsionou outros avanços tecnológicos, aprimorando o uso da energia e associando seu uso à eletricidade. Dando prosseguimento aos desencadeamentos já efetuados, alguns processos desenvolvidos no final do século XIX e início do século XX foram importantes para a difusão do uso da eletricidade. Dentre elas pode-se citar (SILVA, 2006; GONÇALVES JUNIOR, 2002):

- Teoria da indução eletromagnética – Faraday, 1831

- Gerador Manual – Pisere, 1832
- Fornecimento de energia elétrica a um material que tenha propriedades elétricas e este pode interagir com um material que tenha propriedades magnéticas, de forma a manifestar neste material uma energia mecânica – Primeiro motor elétrico – Davenport, 1834
- Turbina hidráulica moderna – Francis, 1849
- Fornecimento de energia mecânica a um material magnético que pode ser transferida para um segundo material, que tenha propriedades elétricas, na forma de energia elétrica – Gerador elétrico – Ányos Jedlik – Siemens, 1861 – 1866
- Transferência de energia elétrica de um circuito para outro circuito elétrico por meio de um acoplamento magnético, sem a existência de ligação elétrica direta entre os circuitos elétricos – Transformador – Nikolas Tesla, 1888
- O americano Thomas Edison inventou a lâmpada incandescente e, dois anos depois, construiu, na cidade de Nova York, a primeira central de energia elétrica com sistema de distribuição. A eletricidade já tinha aplicação, então, no campo das comunicações, com o telégrafo e o telefone elétricos e, pouco a pouco, o saber teórico acumulado foi introduzido nas fábricas e residências. Invenção da lâmpada incandescente (1879) e primeira central elétrica pública em Nova Iorque (1881) – Thomas Edison
- O descobrimento do elétron por Joseph John Thomson na década de 1890 pode ser considerado o marco da passagem da ciência da eletricidade para a da eletrônica, que proporcionou um avanço tecnológico ainda mais acelerado.

Todas essas descobertas permitiram a utilização simultânea de diversas fontes de energia (lenha, carvão, petróleo, hidráulica) de forma flexível, de melhor qualidade e com rendimento mais elevado. A soma de novas tecnologias e a diversidade de energias disponíveis viabilizou a criação de um sistema energético estável por aproximadamente um século.

O surgimento da energia nuclear, através do domínio da fissão nuclear, como fonte de energia, abriu uma nova fronteira para o aproveitamento energético. A transformação de matéria em energia criou a perspectiva de que a obtenção de energia é ilimitada. Nota-se,

no entanto, que esta modalidade de geração de energia apresenta problemas tecnológicos, econômicos e forte impacto ambiental, principalmente no que se refere aos resíduos nucleares. Considerando que a discussão acerca das emissões de gases de efeito estufa tenha se avultado nos últimos anos, a tecnologia de geração de energia via fissão nuclear figura como energia limpa, i.e., sem emissões de gases de efeito estufa. Contudo, os resíduos nucleares são o verdadeiro problema quando se refere a este segmento energético.

Destarte, a evolução das tecnologias e dos usos da energia demandou a criação de um sistema energético múltiplo onde o aproveitamento da energia se desse de forma integral e coordenada às diversas formas de energia e tecnologias disponíveis em cada região ou país. Com isso objetivava-se levar energia ao maior número de pessoas possível, com a menor perda e maior confiabilidade do sistema (SILVA, 2006).

## ***2.2 A Energia Elétrica no Brasil***

A eletricidade é materializada por um fluxo, de maneira diferente a qualquer outra forma de uso energético. Assim, não é possível sua estocagem de forma viável para grandes volumes de produção. Na cadeia elétrica, o consumo ocorre no momento exato da produção, o que exige um complexo sistema de controle centralizado, de forma a permitir o funcionamento integrado dos operadores. Cabe notar que a estruturação dos sistemas elétricos demanda elevados volumes de capital.

O primeiro registro da utilização comercial da eletricidade se deu através do telégrafo na primeira metade do século XIX, que tinha como objetivo melhorar e dar mais velocidade ao processo de transmissão de informação, vital para o projeto de expansão do modelo de desenvolvimento ora vigente (SILVA, 2006).

Os serviços de energia elétrica no Brasil têm como marco a implantação em junho de 1883 do primeiro sistema de iluminação pública do país na cidade de Campos (Rio de Janeiro), cuja economia estava baseada na agroindústria do açúcar, e a entrada em operação da primeira hidrelétrica do país, iniciativa de um industrial de Juiz de Fora (Minas Gerais) em setembro de 1889, com capacidade de 500 kW. De modo geral, a implantação inicial das instalações elétricas no Brasil foi bastante limitada, tanto pelo mercado interno quanto pela economia financeira. Na maioria das situações, a produção de energia elétrica não estava ligada ao emprego em atividades relacionadas aos bens de produção, mas majoritariamente

aos bens de consumo – especialmente iluminação. Inicialmente os primeiros empreendimentos tecnológicos vendidos e implantados não levaram em consideração a disponibilidade de recursos hidráulicos existentes no país, havendo grande expansão da geração a partir de fontes de energia mecânica de origem térmica.

Entre 1895 e 1900 é implantada a primeira empresa pública de serviços de eletricidade, sendo uma municipal e outra estadual. Neste mesmo período cresce o reconhecimento do potencial hidráulico brasileiro, e as instalações foram se expandindo principalmente nas cidades do interior de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Nas regiões Norte e Nordeste os sistemas foram implantados principalmente nas capitais: Manaus, Belém e Recife, além da existente no Rio Grande do Sul. Entretanto, estas empresas não eram nacionais e sim inglesas.

Em 1892, a eletricidade foi usada como força motriz para o transporte urbano no Rio de Janeiro, implantando a primeira linha de bondes elétricos instalada de caráter permanente no país, pela Companhia Ferro-Carril do Jardim Botânico.

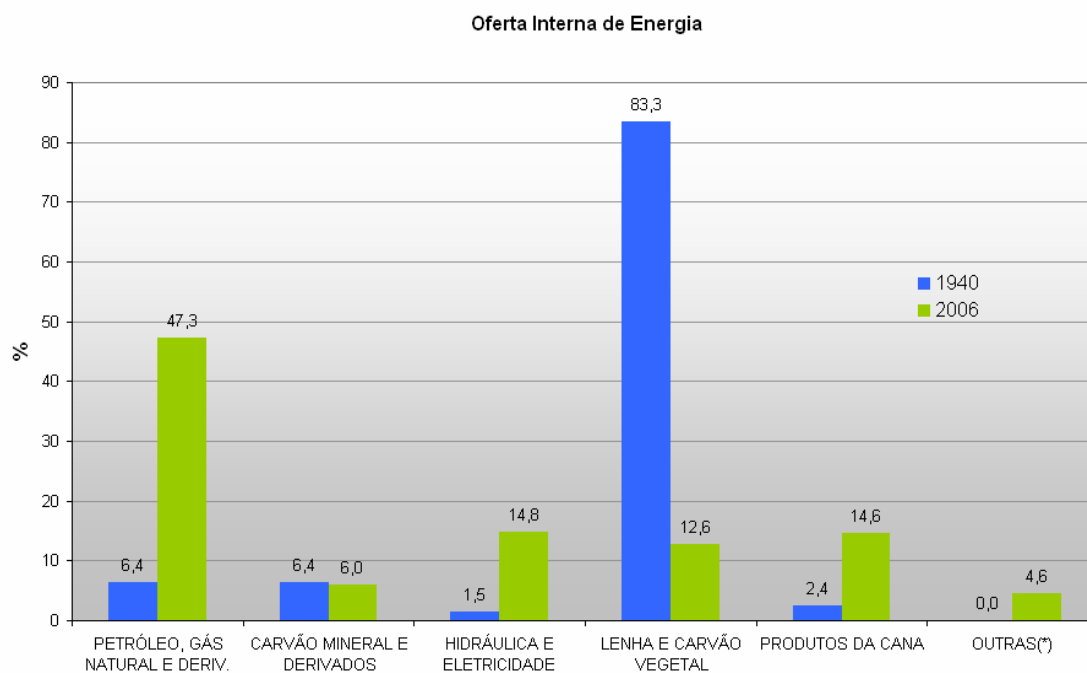
Com o fim do regime escravagista há um crescimento da indústria nacional, que em 1920 estava concentrada em São Paulo (31,1%), Rio Grande do Sul (13,3%), Rio de Janeiro (11,5%) e Minas Gerais (9,3%), e este crescimento demandava serviços de energia elétrica. Nos anos seguintes já existiam concentrações urbanas com elevada densidade populacional e havia atividades que demandavam uma série de serviços públicos, tais como distribuição e venda de energia elétrica.

Por se tratar de um país prioritariamente agrícola nesta época, o consumo de energia por habitante era de baixa intensidade, equivalente ao consumo de uma lâmpada incandescente de 60 W operando 5 minutos por dia (1900), 54 minutos por dia (1910), evoluindo para 1 hora e 43 minutos por dia em 1920 e chegando a 3 horas e 7 minutos por dia em 1930 (GONÇALVES JUNIOR, 2002). Considerando a população de 190.465.300 milhões de habitantes (IBGE, 2009) e o consumo de energia elétrica de 419,3 TWh (BEN, 2007), o consumo *per capita* atual equivale a uma lâmpada incandescente de 60 W operando 100 horas e 31 minutos por dia. Mas este ainda é de baixa intensidade energética. O consumo do Brasil, *per capita*, em 2005, foi idêntico ao dos Estados Unidos em 1943 (atraso de 62 anos) e ao da Alemanha Ocidental em 1957 (atraso de 48 anos).

Nas duas décadas finais do século XIX, a humanidade já estava dentro de um período denominado “Revolução Técnico-Científica”, que se deu pelo desenvolvimento da ciência e

do progresso técnico, a partir das descobertas e aplicações no âmbito do desenvolvimento da eletricidade, do petróleo e do motor a explosão.

Com a industrialização e a urbanização o perfil energético do país mudou rapidamente. Houve uma alteração na demanda e fornecimento de energia devido à construção de uma infra-estrutura no setor de transporte, baseada principalmente no transporte rodoviário. Em 1940 a lenha e o carvão vegetal eram responsáveis por mais de 80% das necessidades energéticas do Brasil. Nas décadas seguintes houve uma mudança do perfil energético e a participação desses insumos na matriz energética mudou de forma significativa e, em 2006, a participação da lenha e do carvão vegetal na matriz era menor que 13%, mostrando a tendência de declínio dessa fonte desde então e o aumento no uso do petróleo (COSTA, 2006; BEN, 2007). Observa-se na Figura 1 como variaram os insumos energéticos nos anos de 1940 e 2006. Ressalta-se a crescente participação do petróleo e a decrescente participação da lenha e carvão vegetal na oferta interna de energia.



(\*) inclui outras fontes primárias renováveis e urânio

**Figura 1 – Oferta interna de Energia no Brasil**

Fonte: BEN, 2007

Da década de 30 ao final dos anos 70, o setor de energia foi estruturado no Brasil como um instrumento responsável pela transformação do Estado agrário-exportador para um Estado

de cunho industrializante. A opção política pelo Estado Desenvolvimentista, no setor energético brasileiro, possibilitou a adequada estruturação setorial.

O Código de Águas, promulgado em 1934, pode ser considerado um marco no ideário de condução do setor elétrico brasileiro. O referido código estabeleceu a separação entre o direito de propriedade do solo de um lado, e dos recursos hídricos em sua superfície, do outro. Todos os recursos hídricos foram incorporados ao patrimônio da União, sendo, portanto, exploráveis mediante concessão e fiscalização do poder público.

Em 1938 deu-se a nacionalização da indústria de refino (petróleo importado e produção nacional) e a criação do Conselho Nacional de Petróleo (CNP) em 1948, que juntamente com a criação do Centro de Estudos do Petróleo antecederam o monopólio estatal com a criação da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.) em outubro de 1953. Seguindo esta trajetória, em 1962 foi criada a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás), desta forma as estatais demarcaram a consolidação da participação estatal no setor energético brasileiro (SILVA, 2006).

Observa-se então, no caso brasileiro, que ocorre uma mudança de perfil dos principais insumos que compõem a matriz energética nacional. Inicia-se com a energia hidrelétrica, migra-se para lenha e carvão vegetal e, atualmente, a presença do petróleo e seus derivados é de suma importância.

## ***2.3 Panorama da Energia no Mundo***

A energia está presente, de forma essencial, em nossas vidas. Envolvida em qualquer atividade, ela se manifesta quando usamos motores, chuveiros, carros, lâmpadas e todo tipo de equipamento ou, de maneira mais fundamental, nos nossos movimentos corporais, no metabolismo, na criação e manutenção de todo tipo de vida. Por sua onipresença, qualquer assunto relacionado à energia tem grande importância e influência no futuro.

As tendências da oferta e demanda de energia são afetados por muitos fatores de difícil previsão, tais como o preço da energia, o crescimento econômico, avanços tecnológicos, mudanças nos padrões climáticos e decisões de políticas públicas. No entanto, pode-se notar que os mercados de energia vêm se modificando gradualmente em resposta a fatores como o preço mais elevado da energia desde 2000, a maior influência dos países em desenvolvimento na demanda de energia mundial e mudanças na percepção das pessoas a assuntos relacionados ao uso de combustíveis alternativos, emissões de gases poluentes e

gases de efeito estufa, além da aceitabilidade e viabilidade econômica de distintas tecnologias energéticas (AEO, 2008).

### **2.3.1 Cenário de evolução da oferta de energia**

Prognostica-se que seja crescente e gradual a participação de biocombustíveis (tanto etanol quanto biodiesel) na matriz energética mundial, destacando: (i) crescimento na produção de carvão-para-líquido<sup>3</sup> (CTL, do inglês *coal to liquid*), (ii) aumento na demanda de tecnologias de transporte pouco convencionais (carros *flex fuel* e híbridos); e (iii) aumento na capacidade e geração de energia nuclear e melhorias aceleradas em eficiência energética (AEO, 2007).

Embora exista um crescimento da participação de fontes como biocombustíveis e energias renováveis não hídricas na matriz energética mundial, as fontes de origem fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, seguirão predominando na matriz energética mundial, responsáveis por prover mais de 80% da energia consumida mundialmente nos próximos 30 anos. A participação de hidrelétricas na oferta de energia mudou pouco nos últimos anos, as usinas nucleares estão diminuindo sua participação apesar da construção de novas usinas, e as novas fontes ainda têm uma tímida – mas crescente – participação no cenário global. Entretanto, deve-se notar que as fontes alternativas ainda figuram como caras, quando comparadas com fontes fósseis convencionais, e que sua disponibilidade se dá muitas vezes em áreas remotas, sendo necessária a construção de longas linhas de transmissão para viabilizar o uso da energia (AEO, 2008). A energia eólica merece um destaque devido a sua grande ampliação de uso na matriz energética mundial nas duas últimas décadas.

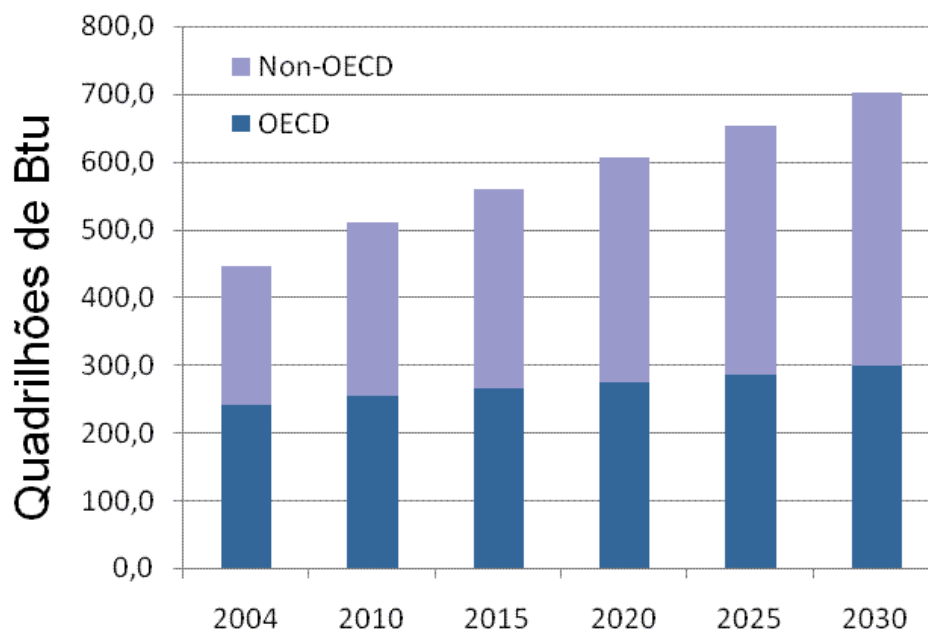
### **2.3.2 Demanda crescente de energia elétrica**

Aproximadamente 1/3 do consumo de energia primária mundial tem como finalidade a produção de eletricidade. Cerca de 1,6 bilhões de pessoas no mundo ainda hoje estão privadas do uso de eletricidade, o que corresponde a aproximadamente um quarto da população mundial. A maior parte delas encontra-se na África Sub-Saariana e na Índia o número de pessoas sem acesso à eletricidade é cerca de 500 milhões. (WORLD BANK, 2006; UNDP, 2009). Por essa razão, diversos programas de eletrificação procuram permitir o acesso dessa população à eletricidade. Assim, a tendência para as próximas décadas é

---

<sup>3</sup> Processo no qual o carvão é liquefeito diretamente ou gaseificado e depois, através do processo de Fischer Tropsch, liquefeito.

de que ocorra um aumento de consumo de energia, devido à grande utilização da eletricidade nos diversos níveis sociais. Este fato é mais recorrente em países em desenvolvimento, onde há uma demanda maior por energia e parte das populações desses países ainda não tem acesso a este bem. A Figura 2 ilustra o consumo de energia por região. Observa-se que a participação dos países não OCDE<sup>4</sup> cresce com as projeções e ultrapassa o consumo dos países OCDE.



**Figura 2 – Mercado Mundial do Consumo de Energia por região, 2004 – 2030**

Fonte: AEO, 2007

O Relatório Estatístico divulgado pela *British Petroleum* (BP, 2008) aponta um crescimento no consumo mundial de energia primária da ordem de 2,4% em relação ao ano de 2007, contrastando com o decréscimo de 2,7% em 2006. A região da Ásia-Pacífico somou dois terços deste crescimento, aumentando 5% acima da média, mesmo com o consumo japonês declinando em 0,9%. O consumo norte-americano se recuperou após o ano de 2006 ter mostrado baixa demanda, subindo em 1,6% – o dobro da média dos últimos dez anos. O crescimento chinês de 7,7% foi o menor desde 2002, embora ainda acima da média da última década. A China foi outra vez responsável por metade do crescimento global do

---

<sup>4</sup> A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, ou OECD em inglês) é uma organização internacional dos países comprometidos com os princípios da democracia representativa e da economia de livre mercado. Também é chamada de Grupo dos Ricos. Juntos, os 30 países participantes produzem mais da metade de toda a riqueza do mundo. A OCDE influencia a política econômica e social de seus membros. Entre os objetivos está o de ajudar o desenvolvimento econômico e social no mundo inteiro, estimulando investimentos nos países em desenvolvimento.

consumo de energia. O consumo indiano cresceu 6,8%, o terceiro incremento volumétrico, ficando atrás apenas da China e dos EUA. A União Européia decresceu seu consumo em 2,2%, sendo que o maior declínio do mundo foi registrado na Alemanha.

O consumo de petróleo cresceu 1,1%, o que significa um milhão de barris por dia, um pouco abaixo da média da última década. O crescimento de consumo nas regiões exportadoras do Oriente Médio, América do Sul e Central e África contribuiu com dois terços do crescimento global. A região da Ásia e do Pacífico cresceu 2,3%, de acordo com a sua tendência histórica, embora China e Japão tenham ficado um pouco abaixo desta média, mas notando-se um forte crescimento num grande número de economias emergentes do mundo. O consumo dos países OCDE caiu em 0,9%, ou cerca de 400.000 b/d. A produção global de petróleo caiu em 0,2%, sendo esta sua primeira queda desde 2002. A produção da OPEP<sup>5</sup> caiu em 350.000 b/d e a produção dos países fora da OPEP continuou baixa, mas cresceu 230.000 b/d em 2007.

O consumo mundial de gás natural cresceu em 3,1% em 2007, embora somente a América do Norte, Ásia Pacífico e África tenham registrado crescimentos regionais acima da média. Os EUA foram responsáveis por quase metade do crescimento do consumo mundial de gás natural. O consumo chinês cresceu em 19,9% e foi o segundo maior responsável pelo crescimento de consumo mundial deste combustível. O consumo da União Européia caiu em 1,6% – pelo segundo ano consecutivo. A produção de gás natural cresceu em 2,4% em 2007, sendo que os EUA foram os grandes responsáveis por este crescimento, com 4,3%, o maior desde 1984. A produção da União Européia caiu em 6,4%, sendo o Reino Unido responsável por 9,5% desta queda, a maior queda volumétrica mundial pelo segundo ano consecutivo. Houve uma pequena queda na produção russa, que foi compensada pelo forte crescimento na outras regiões da Ex-União Soviética. China e Qatar tiveram o segundo e terceiro maiores aumentos em produção, crescendo 18,4% e 17,9%, respectivamente.

Carvão foi o combustível com crescimento de consumo mais acelerado pelo quinto ano consecutivo. O crescimento global foi de 4,5%, acima da média da última década, de 3,2%. O crescimento de consumo foi disseminado, com aumento de consumo em todas as regiões

---

<sup>5</sup> Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP ou, pelo seu nome em inglês, OPEC – Organization of the Petroleum Exporting Countries) é uma organização composta por países que retêm algumas das maiores reservas de petróleo do mundo. A OPEP é o exemplo mais conhecido de cartel: seu objetivo é unificar a política petrolífera dos países membros, centralizando a administração da atividade, o que inclui um controle de preços e do volume de produção, estabelecendo pressões no mercado.

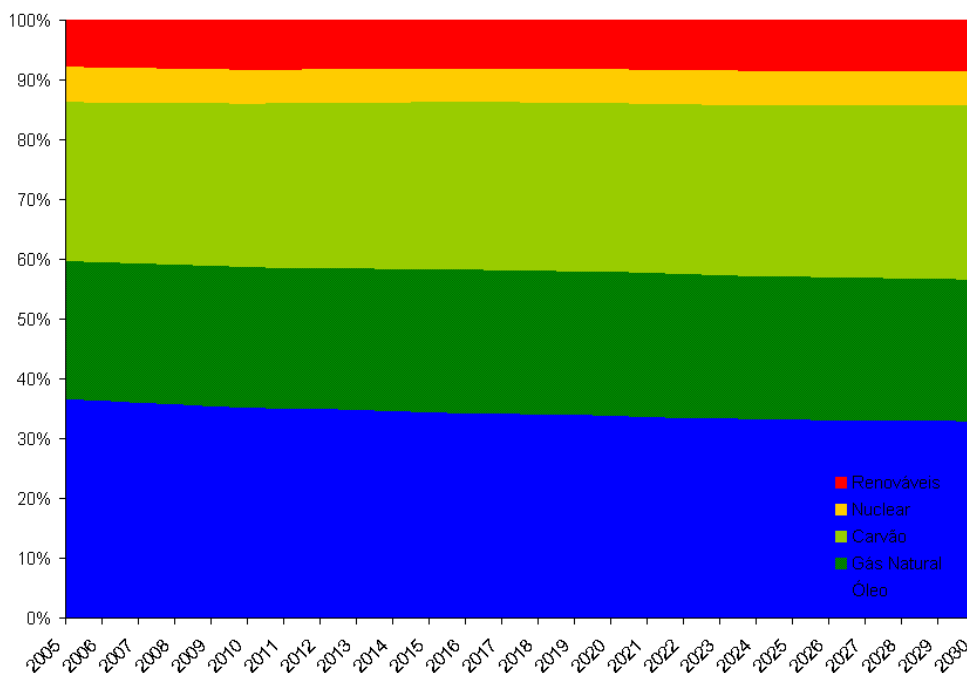
– exceto no Oriente Médio – excedendo a média dos últimos 10 anos. O consumo chinês por carvão aumentou em 7,9%, o menor crescimento desde 2002, mas ainda grande o suficiente para responsabilizar-se por mais de dois terços do crescimento mundial. O consumo indiano cresceu em 6,6% e os países da OCDE aumentaram seu consumo em 1,3%, ambos acima da média.

As contribuições advindas da energia nuclear caíram em 2%, a maior queda já registrada. No entanto mais de 90% deste declínio foi responsabilidade da Alemanha e do Japão, onde a maior central nuclear do mundo foi fechada após um terremoto em Kashizawaki.

A geração hidrelétrica cresceu 1,7%, ligeiramente abaixo da média da última década. As secas nos EUA e no sul da Europa foram compensadas pelo aumento da capacidade na China e no Brasil, em paralelo com melhorias na viabilidade hídrica no Canadá e norte da Europa.

As energias renováveis continuam com uma pequena participação no total de uso da energia global, mas grande parte das fontes de energia renovável experimentou um rápido crescimento em 2007. O consumo de etanol cresceu 27,8%. A capacidade global de geração de energia eólica e solar cresceu de acordo com a média histórica em 28,5% e 37%, respectivamente.

No Gráfico 1 a seguir se observa a participação de cada fonte na matriz energética mundial ao longo do tempo. A participação das fontes fósseis permanece acima dos 80%, restando menos de 10% para as fontes renováveis. Mesmo considerando que o montante de energia era de 462,3 quatrilhões de Btu (135.486,8 TWh) em 2005 e supondo que em 2030 este valor chegue a 694,7 quatrilhões de Btu (203.596,5 TWh), a participação das fontes renováveis de energia permanece em torno de 8%, contribuindo com 35,5 e 59,0 quatrilhões de Btu (10.404 e 17.291,2 TWh), respectivamente.



**Gráfico 1 – Participação no Mercado de Energia por fontes (2005 – 2030)**

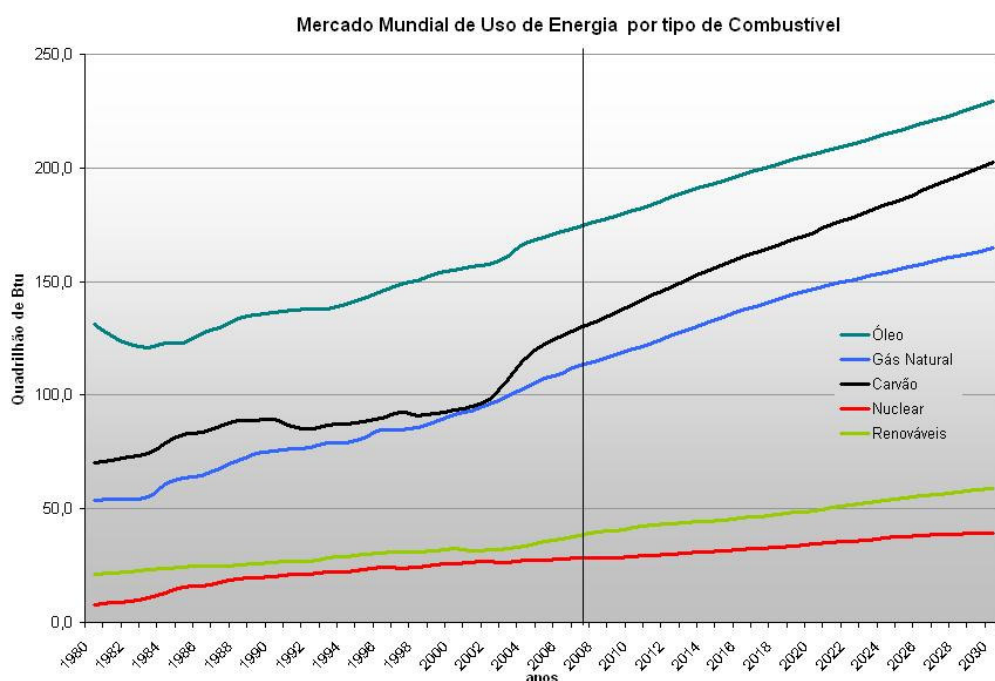
Fonte: AEO, 2008

Com o consumo anual de energia crescente, a perspectiva é que este movimento continue não somente pelo crescimento populacional, mas também pela quantidade de pessoas que vão ter acesso à energia nos países em desenvolvimento e suas perspectivas de consumo. Espera-se que a população mundial alcance 8 bilhões de habitantes em 2030, partindo dos atuais 6,4 bilhões de habitantes. Caso os governos continuem com suas políticas atuais, a demanda global de energia está projetada pra crescer cerca de 60% até 2030 – 16,5 bilhões de tep por ano (191.895 TWh) (WCI, 2008).

### 2.3.3 O carvão na matriz mundial

A matriz energética mundial baseia-se, majoritariamente, na utilização dos combustíveis líquidos. No entanto, mesmo não se encaixando neste perfil, o carvão destaca-se como insumo energético uma vez que, além de possuir grandes reservas mundiais, seu consumo cresceu de forma significativa quando comparado com o ano anterior. Sua aplicação como matéria prima para a gaseificação ajudou a impulsionar esta tecnologia, substituindo de forma estratégica os combustíveis líquidos. Desta forma cabe identificar a participação deste combustível de origem fóssil na matriz energética mundial.

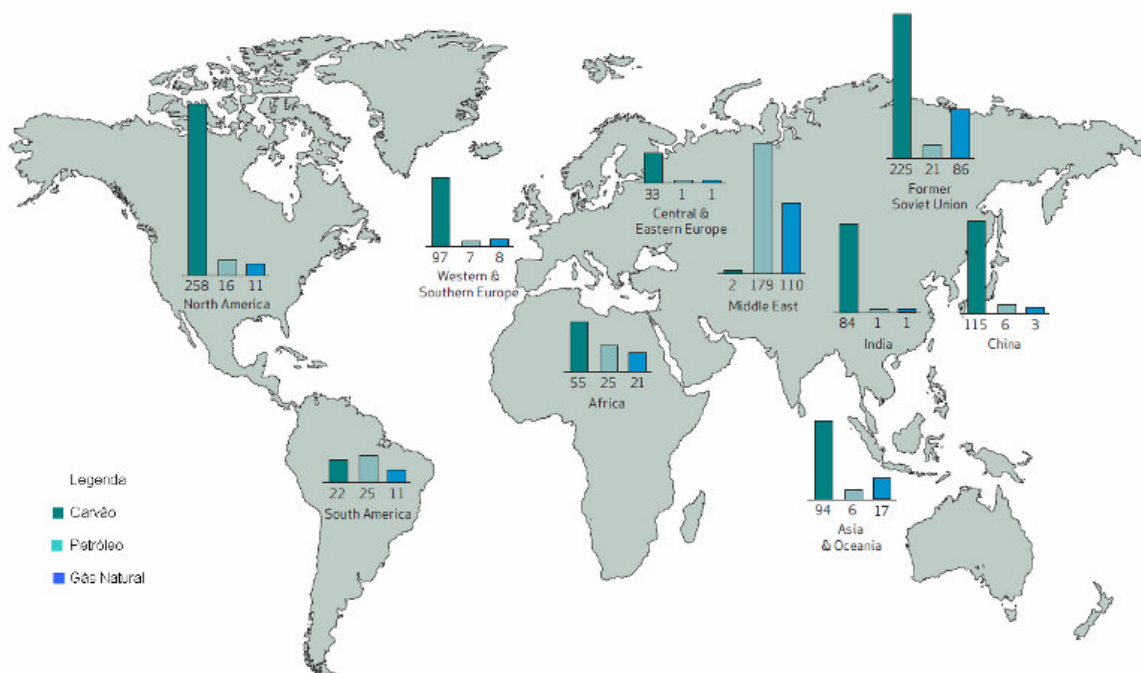
Diante da projeção de crescimento de demanda, urge identificar qual é a participação do carvão como fonte energética nos anos futuros. No Gráfico 2 se observa a crescente participação do carvão e das energias renováveis no mercado mundial de uso de energia. Pode-se especular se haverá extração deste mineral para fins energéticos. Uma vez que óleo e gás existem nos poros das rochas na sub-superfície da Terra, a quantidade de hidrocarbonetos que pode ser recuperada é função da propriedade da rocha, da tecnologia disponível e do cenário econômico e fiscal vigente na época da avaliação da área exploratória (PEREIRA, 2004). A extração de carvão obedece à mesma lógica, i.e., só será extraído caso represente uma oportunidade nessas frentes.



**Gráfico 2 – Perspectiva das participações no cenário energético por fonte**

Fonte: AEO, 2008

O crescente uso do carvão na matriz mundial está intimamente relacionado à disponibilidade deste recurso nos limites fronteiriços dos grandes consumidores, China, Rússia e EUA. A Figura 3 ilustra as reservas de carvão, petróleo e gás dos continentes do mundo. As reservas de carvão constituem uma importante reserva de energia para determinadas nações. O uso do carvão também oferece maior segurança energética aos países do ocidente, diminuindo sua dependência energética dos mercados do Oriente Médio, área esta de grande instabilidade política.

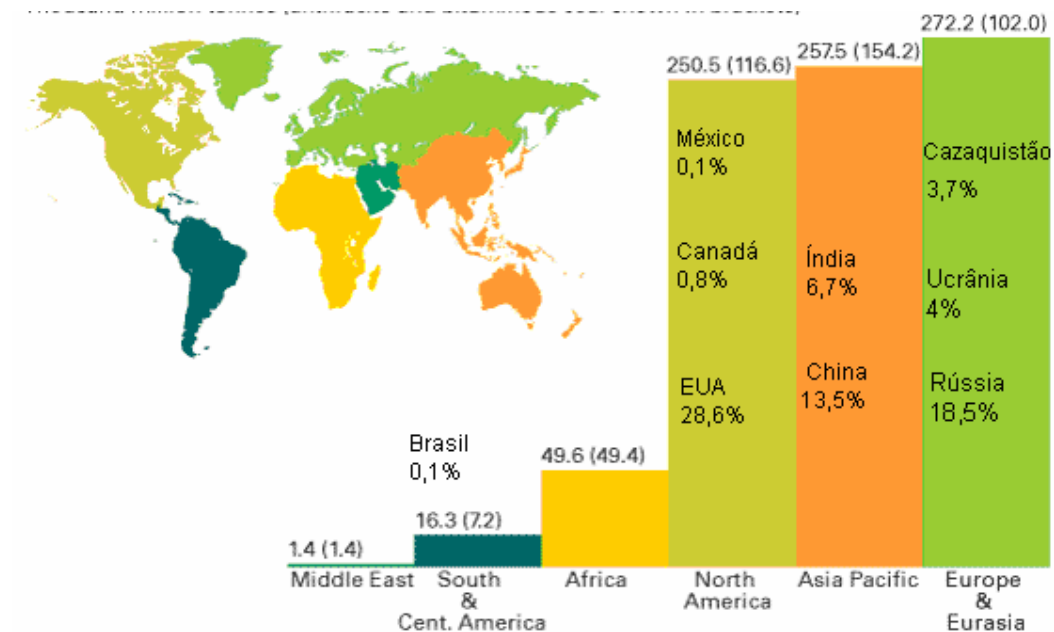


**Figura 3 – Localização das Maiores Reservas de Combustíveis Fósseis do Mundo (GigaTon de carvão equivalente). Dados de 2005.**

Fonte: WCI, 2008

Na Figura 4 observa-se a extensão das reservas provadas até o fim de 2007. Nela, nota-se que dentre as reservas de combustível fóssil do mundo, as de carvão são as mais significativas. Juntas, estas representam aproximadamente  $44 \times 10^{12}$  tep, muito superiores aos volumes de gás natural ( $1,2 \times 10^{12}$  tep), óleo não convencional, ( $4,4 \times 10^{12}$  tep) e óleo convencional ( $1,2 \times 10^{12}$  tep).

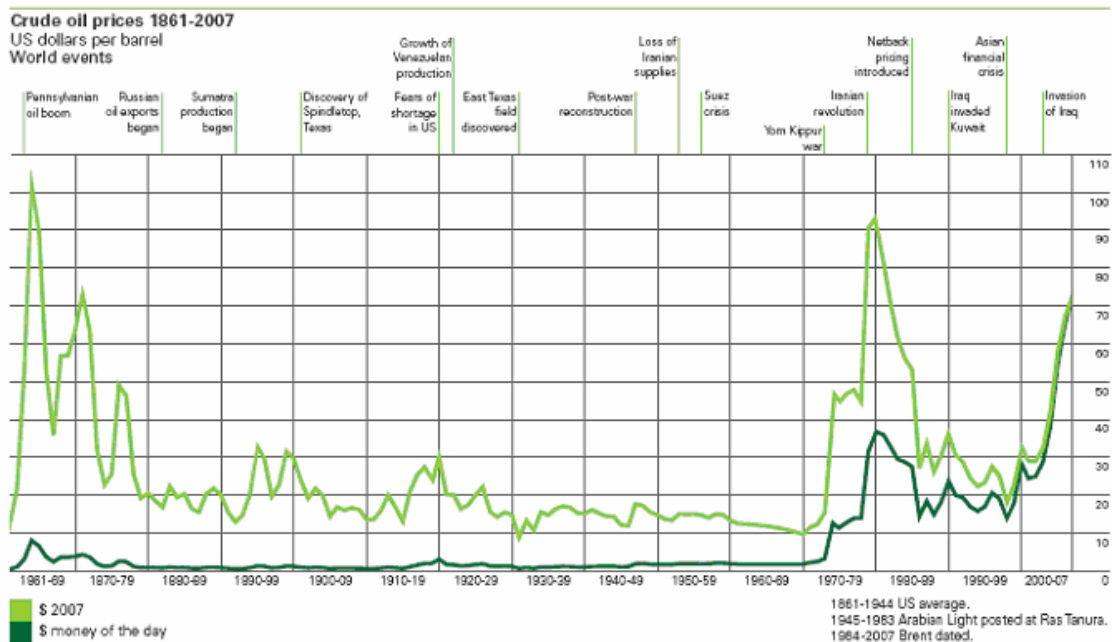
A pesquisa em gaseificação foi impulsionada pela existência de amplas reservas de carvão nos principais países consumidores de energia: Estados Unidos, China e ex-URSS. Associadas a novas tecnologias, estas devem ser suficientes para suprir energeticamente os consumidores por centenas de anos (DESCAMPS *et al.*, 2008). Registra-se que tais reservas são abundantes e geograficamente melhor distribuídas que as de petróleo.



**Figura 4 – Reservas provadas de carvão no fim de 2007. bilhões de toneladas (antracito e carvão betumino em parênteses)**

Fonte: BP, 2008

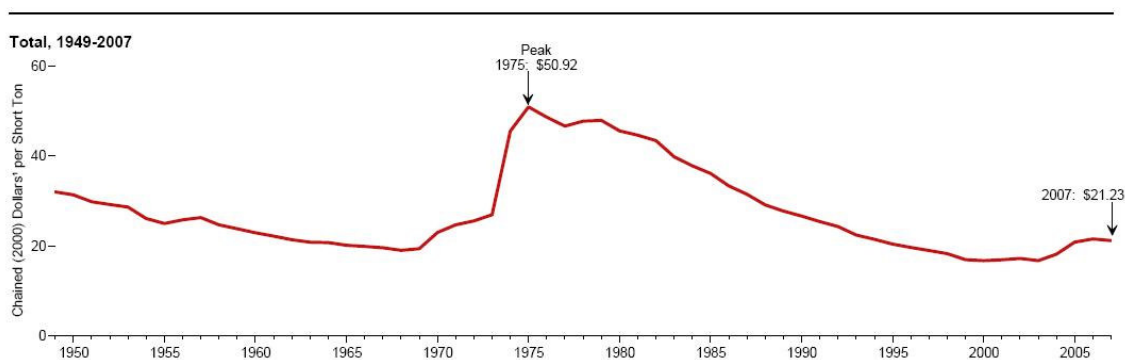
Outro fator de forte influência no avanço do uso do carvão foi a rápida ascensão e queda do preço do petróleo, observada durante o ano de 2008, por exemplo. A Figura 5 ilustra como variou o preço do petróleo ao longo dos últimos anos. Observa-se que o petróleo atingiu recordes diários durante o ano de 2008, sendo sua cotação em 27 de junho de 2008 de US\$ 140,56, valores presentes maiores do que os alcançados durante a Revolução Iraniana ou a invasão do Kuwait (ou Coveite) pelo Iraque no século passado. Diversos fatores contribuem para este valor, dentre eles forte especulação, crescente consumo asiático, instabilidade dos países produtores, desvalorização do dólar e subsídio da gasolina, dentre outros.



**Figura 5 – Preços do Petróleo entre 1861 e 2007.**

Fonte: BP, 2008

O preço do carvão, por sua vez, não apresentou a mesma variação ao longo do tempo, representando uma fonte energética de maior confiabilidade monetária. Dados da EIA (2008) ilustram na Figura 6 a estabilidade do preço deste insumo, evidenciando um pico no preço concomitante com a elevação do preço do petróleo no mesmo período, com o choque do petróleo. Cabe ressaltar que, embora o preço do carvão tenha permanecido estável por alguns anos, no primeiro semestre de 2008 este já demonstrava indícios de elevação. (EIA, 2008)



**Figura 6 – Preços Históricos do carvão**

Fonte: EIA, 2008

Com a elevação do preço do petróleo e a incerteza de sua existência num futuro não distante, ademais da consciência ambiental crescente, surge espaço para a implantação de energia de fontes alternativas ao petróleo. Embora o carvão não se enquadre dentre as tecnologias de menor emissão de gases de efeito estufa por kWh gerado, a segurança energética por ele gerada faz com que haja incentivos às pesquisas para a diminuição de seus impactos ambientais.

## ***2.4 Contexto atual para fontes alternativas de energia***

O progresso cultural e econômico, na história da civilização ocidental e do desenvolvimento humano manifesta-se, dentre outras coisas, através da inovação em tecnologias energéticas cada vez mais eficientes. Assim, verifica-se a evolução das tecnologias desde a milenar cultura chinesa até as sociedades avançadas da Mesopotâmia, Egito, Grécia e Roma, observando-se o processo das tecnologias de irrigação e melhoria na qualidade do transporte. Em seguida, tais avanços foram aplicados à industrialização, logo a partir da Idade Média, graças às energias hídrica e eólica.

A máquina a vapor representa, em tempos modernos, a Revolução Industrial, e foi introduzida na produção, no transporte fluvial e ferroviário. Ela continua a manter seu uso na pós-modernidade, porém, em geral, a partir da energia fóssil ou da energia nuclear. Cabe ressaltar que a máquina a vapor foi o conversor de combustível fóssil mais utilizado no século XIX, inicialmente com carvão, mais tarde petróleo e gás. Como produto deste uso surge a economia de energia fóssil (carvão – petróleo – gás natural) que, com a introdução da máquina a combustão, passa a ter elevada dependência de insumos petrolíferos. Porém, permanece firme como energético de referência, tendo uma série de aplicações, quer centralizadas, quer descentralizadas, para os consumidores que emergem com as tecnologias energéticas do século XX. Isso inclusive faz, a partir dos anos 50, com que a economia da energia atômica seja somada a energia fóssil, com a idéia, na época, de que a era nuclear substituiria a fóssil.

A princípio, as energias renováveis tomaram forma apenas através de grandes hidrelétricas, como parte do abastecimento energético moderno. O choque do petróleo em 1973 introduz outras formas de energias renováveis visando necessidades futuras. Porém, a economia fóssil predominante no mundo, apesar de tudo, segue comandando os rumos da expansão energética do planeta, pois a energia renovável não atingiu seu real potencial como

instrumento de desenvolvimento sustentável, modelo de desenvolvimento almejado atualmente.

Este modelo determina os limites de um sistema energético baseado não somente na energia fóssil e na nuclear. Considerando a energia nuclear, ficou claro no início do terceiro milênio que as expectativas relacionadas a esta tecnologia estavam deterioradas pelas próprias restrições desta fonte energética, tanto pela fissão como pela fusão nuclear, além dos danos relativos aos resíduos nucleares. Porém, é o sistema energético fóssil a questão principal, por tratar-se do modelo majoritariamente adotado, e cujo desenvolvimento está pautado sob uma lógica de concussão extrema, determinando limites que colocam ao mundo problemas de viabilidade do ser humano na Terra.

Nesse sentido, pode-se observar que o sistema energético (de e para a atividade socioeconômica no arcabouço do paradigma atual de desenvolvimento) conduz a limites físicos, ecológicos e econômicos que demonstram a necessidade da substituição das energias atômica e fóssil por energias renováveis. Tal estratégia exige um processo sistemático de introdução de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL<sup>6</sup>), para suprir as necessidades da atividade socioeconômica local e/ou global. Isso determinaria que as necessidades básicas humanas fossem satisfeitas de forma sustentável, conduzindo a um paradigma que preserve a base natural da vida no planeta. O século XX foi o precursor do desenvolvimento de várias tecnologias, incluso as de fontes renováveis. No entanto, a necessidade de adoção destas tecnologias de forma mais intensa surge no início deste século XXI, decorrente da maturação do pensamento ambiental e tecnológico. Face a isto, a introdução com maior vigor destas novas tecnologias viria a suprir a expectativa de forma favorável dos novos sistemas energéticos.

### **2.4.1 Biomassa como fonte energética**

Até a ocorrência da Revolução Industrial, as fontes primárias de energia que dominavam eram a biomassa (sobretudo madeira) e a tração animal. Dentre as mais pobres regiões do mundo essas ainda são as principais fontes de energia. Nota-se, porém, que a biomassa não é apenas mais uma fonte de energia tradicional baseada em tecnologia simples. A

---

<sup>6</sup> MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: definido no artigo 12 do Protocolo de Quioto, o propósito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo deve ser prestar assistência às Partes não incluídas no Anexo I da Convenção, para que atinjam o desenvolvimento sustentável e contribuam com o objetivo final da Convenção, e prestar assistência às Partes incluídas no Anexo I para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões no âmbito do artigo 30 do Protocolo de Quioto,

biomassa hoje é vista por muitos especialistas como uma das alternativas mais promissoras para o futuro energético sustentável. Isso se deve a uma maior compreensão dos ciclos naturais da terra e dos impactos causados por combustíveis fósseis, bem como o advento de novas tecnologias com elevada eficiência e menores impactos ambientais para o uso da biomassa (REIS, SILVEIRA, 2001).

## ***2.5 Avaliação da Tecnologia de Gaseificação***

Entre as possibilidades de um eficiente aproveitamento energético (considerando as variáveis termodinâmicas) e de baixo impacto ambiental, encontra-se a tecnologia de gaseificação, que consiste num processo de decomposição térmica da matéria sólida em gás combustível, na presença de uma fonte de calor e de uma quantidade de oxigênio abaixo do mínimo necessário para realização da combustão. O produto da gaseificação é um insumo energético limpo e flexível no seu uso e manuseio. (KRAUSE, 1990).

Os gases combustíveis advindos do processo de gaseificação, tendo como matéria prima o carvão mineral ou a biomassa, podem apresentar um poder calorífico relativamente baixo (entre 3,8 – 5,6 MJ/m<sup>3</sup>) ou até comparáveis com o gás natural (aproximadamente 38,0 MJ/Nm<sup>3</sup>) (GASNET, 2008). Isto se deve à composição do gás formado. O gás natural, por possuir grande quantidade de metano, tem um elevado poder calorífico. Já o gás advindo do processo de gaseificação possui uma mistura de gases que nem sempre é composta de gases com poder calorífico elevado. Esta composição varia por diversos fatores, incluindo a matéria prima utilizada e as condições operacionais. Por esta razão existe uma faixa de poder calorífico na qual o gás advindo da gaseificação pode se encaixar.

A utilização deste gás pelo setor elétrico pode dar-se via queima em caldeira, motores de combustão interna (ex. ciclo diesel), turbinas de combustão ou por combinações entre tais opções<sup>7</sup>. A utilização com base na queima do gás em turbinas de combustão poderá estar associada à utilização de ciclos combinados, que permitem alcançar maior eficiência energética global.

Na geração térmica, fundamentada em carvão mineral ou biomassa, linhas de desenvolvimento têm como base a busca de sistemas eficientes e menos impactantes de geração de calor/eletricidade bem como em processos de tratamento de gases oriundos da

---

<sup>7</sup>No ciclo combinado o calor dos gases provenientes da turbina de combustão (Ciclo Brayton) é recuperado e utilizado como fonte quente de um ciclo vapor (ciclo Rankine) convencional.

combustão. Deve-se ressaltar os demais impactos representados pela termoelectricidade, considerando processos de transformação de energia (disposição de cinzas, poluição térmica dos corpos receptores) ou na obtenção da própria matéria prima (lavra e beneficiamento de carvão, florestas energéticas, canaviais, etc.).

Com o objetivo de minimizar esses impactos, a utilização da biomassa como fonte de energia renovável é importante, não somente pela sua vasta distribuição, mas também pela sua abundância. No entanto, ela se mostra pouco atraente em alguns casos devido à sua baixa densidade energética e dificuldade de centralizar em usinas de geração de grande escala, além do risco de monocultura e demanda excessiva de água..

Apesar de tantos pontos positivos e das tecnologias renováveis estarem prontas para a utilização, o seu mercado está crescendo lentamente. Em muitos casos, no entanto, o alto custo inicial do equipamento, a utilização de metodologias tradicionais de planejamento e falhas em internalizar os custos sociais e ambientais das alternativas não-renováveis impedem uma maior utilização destas tecnologias.

A inófia em encontrar novas alternativas de energia adicionada à busca de novas tecnologias que diminuam os impactos ambientais da acumulação de resíduos indicou a necessidade de estudos em gaseificação de biomassa. O uso de resíduos de biomassa como fonte energética normalmente tem problemas de suprimento devido a sua sazonalidade e, por isso, a existência de um processo que permita o uso de diversas biomassas é vantajoso. Gaseificadores são desenvolvidos para consumirem quase todos os tipos de combustível orgânico. Uma grande variedade de combustíveis, como vários tipos de madeira, resíduos agrícolas, óleos residuais e resíduos sólidos urbanos podem ser considerados.

Como alternativa ao uso da biomassa está o carvão. Durante o choque do petróleo de 1970 e, depois, em 1980 este insumo energético foi visto como um importante substituto para o petróleo. Neste período, diversos gaseificadores a carvão foram desenvolvidos e comercializados. No entanto, devido à queda no preço do petróleo a gaseificação de carvão recuou em participação no mercado energético. Na última década foi observado um interesse crescente em gaseificação, tanto pelo uso do carvão, como também impulsionado pelo uso da biomassa, esta como uma alternativa de uso das energias renováveis. A introdução da biomassa como uma fonte renovável de energia é vital para a transição da sociedade atual para uma mais sustentável.

O enfoque conceitual de sistemas energéticos se baseia na compreensão abrangente das necessidades energéticas em um mundo que entra no terceiro milênio cheio de incertezas quanto a satisfazer às necessidades que não só o crescimento demográfico apresenta. Certamente, tais necessidades dentro do paradigma atual de desenvolvimento representam cargas pesadas para o planeta como fonte de recursos e receptor de rejeitos. Observações de futuro, calcadas nos modos atuais de sustentação da atividade sócio-econômica, mostram cenários impossíveis de serem alcançados caso os paradigmas de desenvolvimento em curso não incorporem mecanismos de desenvolvimento limpo. (GRIMONI *et al.*, 2004)

### **2.5.1 Gaseificação x Combustão**

O uso da gaseificação como processo para obtenção de energia não é tão evidente quanto o uso da combustão. Considerando que a geração de eletricidade é vista como uma das oportunidades mais lucrativas para a exploração comercial da biomassa, uma análise de ambas tecnologias é elucidativa. Os sistemas de combustão existentes queimam vários tipos de biomassa e resíduos em caldeiras para geração de vapor para ser utilizado em turbinas. Esta tecnologia, embora já conhecida, ainda não representa o ideal para o aproveitamento da biomassa (BRIDGWATER, 2002). A gaseificação está em processo de amadurecimento, embora muito já tenha sido estudado sobre ela, e vários ganhos tecnológicos já tenham sido incorporado à esta tecnologia. Espera-se que em breve diversas plantas pilotos possam estar acessíveis comercialmente, tal como aconteceu com as plantas que simultaneamente fazem seqüestro de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (QUAAK, 1999).

Na gaseificação, a capacidade de geração de energia é limitada pela quantidade de biomassa em estoque disponível para este fim. A aplicação de plantas de pequena escala nestes casos é importante, no entanto turbinas a vapor são pouco eficientes e de custo elevado, tanto para gaseificação quanto para combustão (BRIDGWATER, 2002; QUAAK, 1999). Mas a geração em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo vapor, simplesmente pela queima do gás em um motor de combustão interna. (CORTEZ, 2008) Com a conversão da biomassa sólida em um combustível intermediário, líquido ou gasoso, que possa então ser usado em turbinas a gás ou motores de combustão interna ocorre um aumento de eficiência e a diminuição do custo do capital

A integração de uma produção sustentável de biomassa, conversão de alimentação e geração elétrica de elevada eficiência podem ser a chave para geração de energia elétrica com biomassa a um custo mais baixo do que é praticado hoje (BRIDGWATER, 2002).

Algumas vantagens para o uso do gás proveniente dos gaseificadores podem ser elencadas a seguir (QUAAK, 1999):

- A chama do gás de síntese pode ser queimada com baixa emissão de  $\text{NO}_x$ ;
- O gás de síntese pode ser limpo antes da queima, o que facilita seu enquadramento em limites restritos de emissão;
- O gás de síntese pode ser direcionado facilmente para a zona de queima;
- Cada queimador pode ser controlado facilmente

Em pesquisa coordenada pelo Banco Mundial (QUAAK, 1999), foi realizada uma comparação entre um gaseificador e um sistema de combustão vinculado a uma caldeira a vapor, sendo ambos os sistemas de geração de energia com potência de 1MW. De forma sucinta, os resultados encontrados indicam que o sistema de gaseificação é mais eficiente que o de combustão, embora o investimento em gaseificadores seja maior. Por outro lado, a instalação do gaseificador é relativamente mais simples, embora sua operação seja um pouco mais elaborada. Para ambas as plantas o modo de operação contínuo é o mais eficiente, e o custo de 25 a 30% maior para a turbina a vapor deve-se ao seu elevado custo de capital e baixa eficiência global, o que resulta em mais combustível e custo de manutenção. Estudo análogo foi elaborado com uma unidade de potência de 5 MW e resultados similares foram encontrados, mesmo considerando que no caso dos gaseificadores fossem cinco unidades de 1MW.

## ***2.6 Legislação, desenvolvimento e meio ambiente***

É sabido que processos energéticos, em sua grande maioria, acarretarão impactos ambientais, uma vez que estes são inerentes ao aproveitamento energético. No entanto, minimiza-los têm sido o mote de pesquisas e avanços tecnológicos. O uso da energia também está relacionado ao padrão de desenvolvimento. Acredita-se que melhores indicadores de desenvolvimento podem ser obtidos com maior (e melhor) consumo

energético. Para que avanços neste tema sejam feitos de forma inequívoca, acredita-se que o arcabouço legal possa fornecer os subsídios jurídicos necessários para este fim.

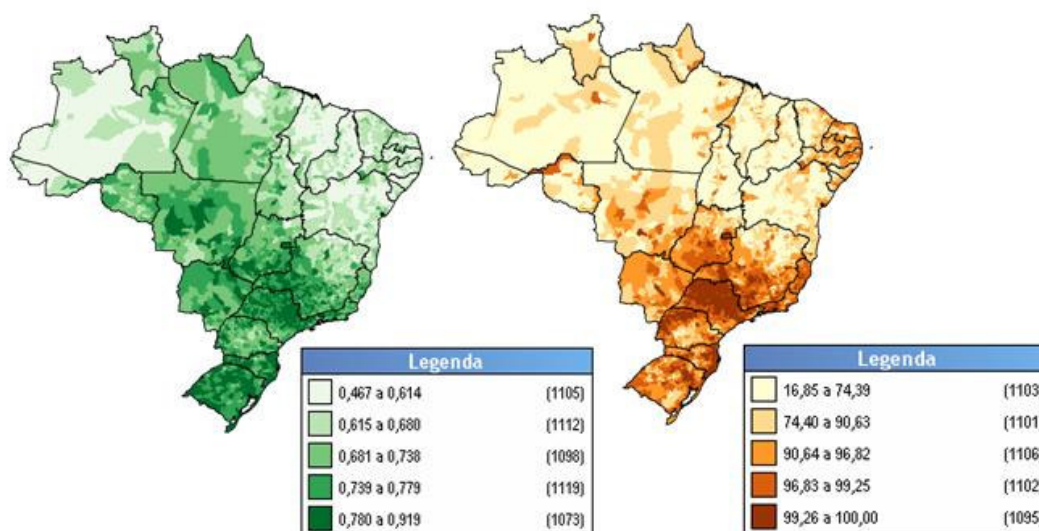
### **2.6.1 Aspectos relevantes acerca do desenvolvimento**

Existe uma forte relação entre energia e nível de desenvolvimento. De maneira geral o elevado grau de desenvolvimento está vinculado a grande consumo energético. Com maior acesso à energia ocorre uma melhoria na qualidade de vida que pode ser percebida por alguns indicadores de desenvolvimento adotados por organismos internacionais que lidam com o tema. Como há demanda por energia e almeja-se cada dia mais que esta venha de origem renovável, as fontes de energia tendem a uma diversificação, gerando impactos ambientais diferentes.

Assim, a questão da energia merece ser tratada sob o foco do desenvolvimento sustentável, no qual diversas fontes de geração utilizadas nas diferentes partes do planeta são identificadas. A intrínseca relação entre energia e grau de desenvolvimento pode ser observada na Figura 7, onde estão os mapas do Brasil com a distribuição do IDH<sup>8</sup> por município em verde e percentual de residências com acesso à energia elétrica nos municípios no mapa em amarelo. Pode-se notar que há uma coincidência das áreas onde ocorre maior concentração de residências com acesso à eletricidade (pontos mais escuros onde quase todas as residências têm acesso) e as que apresentam valor mais elevado de IDH (em verde). Desta forma evidencia-se que onde ocorre o acesso à energia elétrica sucede uma perceptível melhoria na qualidade de vida.

---

<sup>8</sup> IDH: Índice de Desenvolvimento Humano. Índice que é utilizado para aferir o avanço de uma população não considerando apenas a dimensão econômica, mas também outras características sociais, culturais e políticas que influenciam a qualidade da vida humana. O objetivo da elaboração do Índice de Desenvolvimento Humano é oferecer um contraponto a outro indicador muito utilizado, o Produto Interno Bruto (PIB) per capita, que considera apenas a dimensão econômica do desenvolvimento. (PNUD, 2008)



**Figura 7 – Distribuição de Energia elétrica e IDH no Brasil**

Fonte: PNUD, 2000

Este pensamento pode ser transposto de forma análoga aos países. Considerando o consumo de energia *per capita* de cada nação e confrontando estes dados com os valores de IDH por países observa-se que os maiores consumidores de energia possuem o valor de IDH mais elevado. Ressalta-se, no entanto, que alguns países da Europa não são grandes consumidores de energia e possuem um IDH elevado, provando que existem maneiras menos energo intensivas para manter uma qualidade de vida elevada (Figura 8 e Figura 9). Mas não se observam países com pouco acesso à energia que tenham um IDH elevado<sup>9</sup>, como são os países africanos.

<sup>9</sup> No caso da Groenlândia existe uma população muito pequena, por isso apresenta consumo de energia baixo.

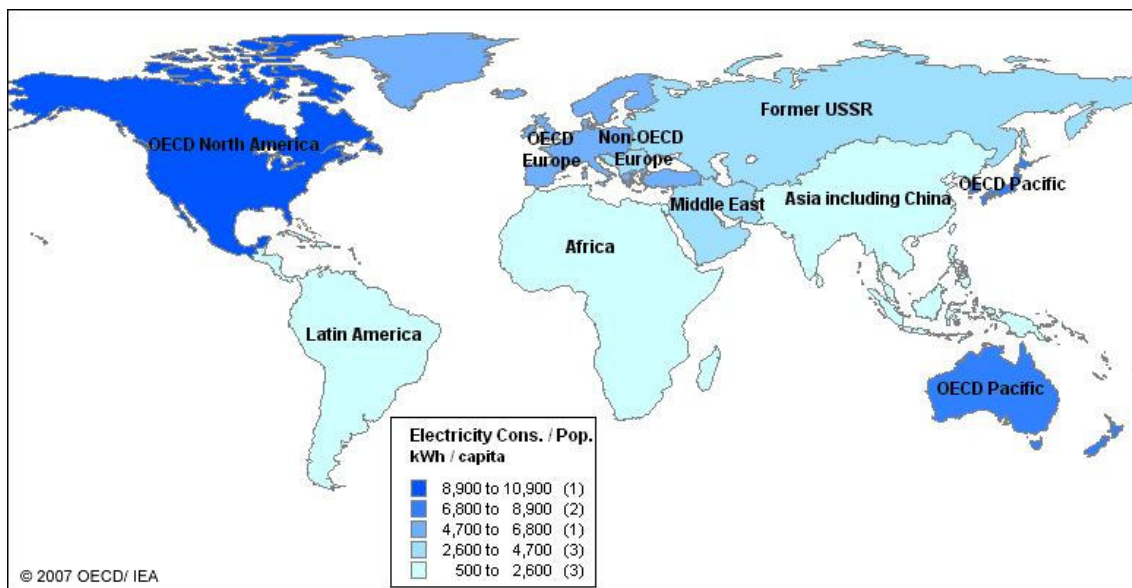


Figura 8 – Mapa da distribuição de consumo de eletricidade no mundo

Fonte: IEA, 2009

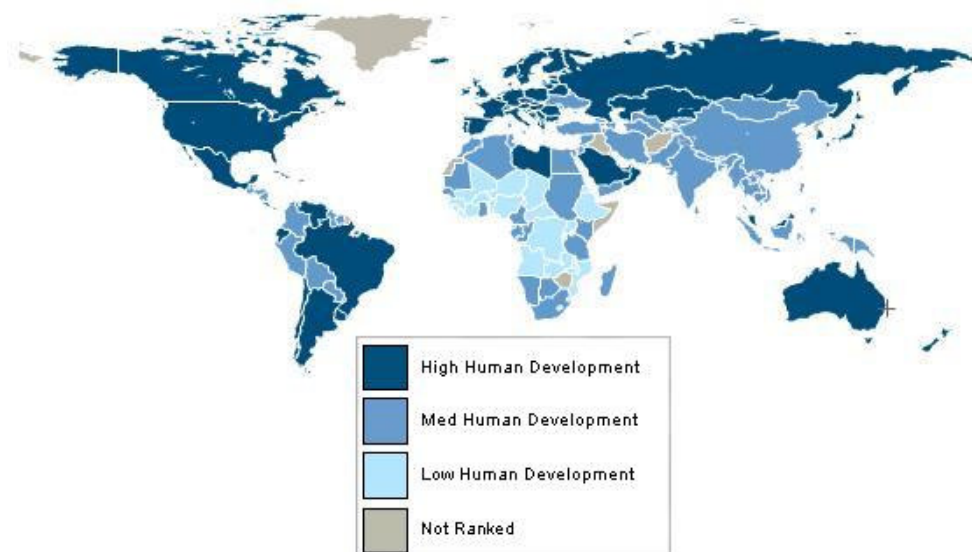


Figura 9 – Mapa da distribuição de IDH ao redor do mundo

Fonte: UNDP, 2008

Dado o modelo econômico no qual a humanidade está inserida, o objetivo é atingir o nível de desenvolvimento alcançado pelos países classificados como desenvolvidos. Para tanto urge o aumento do consumo de energia dos países que ainda não estão no mesmo patamar

evolutivo e, com a atual importância dada ao meio ambiente, com o menor impacto ambiental.

## **2.6.2 Aspectos Ambientais da Energia**

Todas as etapas envolvidas no uso final da energia, tais como extração de matéria prima para conversão em combustíveis, produção de energia, transformação, transporte, distribuição e o próprio uso final, causam impactos significativos no meio ambiente. É difícil identificar com total clareza todos esses impactos, pois eles podem acontecer de duas maneiras:

- Indiretamente, como por exemplo, a degradação costeira e dos mares por vazamento de petróleo, e;
- Diretamente, como, por exemplo, a poluição do ar pela queima de combustíveis fósseis em termelétricas

A Tabela 1 mostra alguns problemas ambientais decorrentes da produção e do uso de energia. Observa-se que os impactos diferem dentre as alternativas energéticas adotadas. Em relação aos impactos ambientais globais, que elevam a concentração de gases que intensificam o efeito estufa, as tecnologias envolvendo queima se sobressaem, embora a biomassa e a fotovoltaica também estejam enquadradas neste quesito, pois para a fotovoltaica é considerado o ciclo de vida e para a biomassa não é considerado o seqüestro de carbono decorrente do crescimento da mesma. A biodiversidade é afetada principalmente nos processos de geração hídrica e nuclear. A poluição local e o incremento ao aumento na concentração de ozônio troposférico também são mais freqüentes em atividades com queima. Contudo, acidentes graves são identificados na tecnologia termelétrica, nuclear e grandes centrais hídricas.

**Tabela 1 - Impactos ambientais provocados pelo uso da energia**

<b>Categorias de impacto</b>	<b>Solar Fotovoltaica</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Termoelétrica</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Incineração de resíduos</b>	<b>Mini-hídricas</b>	<b>Grandes Aproveitamentos</b>
Alterações Climáticas	A produção das células é um processo intensivo em energia	Emissões de GEE's, que no entanto não são contabilizadas para o aquecimento global. Emissões de SO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> na queima.	A extração, refino e sobretudo a queima de combustíveis fósseis geram emissões de GEE <sup>10</sup> s		A incineração de resíduos gera emissões de CO <sub>2</sub>		
Acidificação			O refino e sobretudo a queima de combustíveis fósseis geram emissões de SO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub>		A incineração gera emissões de SO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> , além de outros compostos acidificantes		
Poluição Atmosférica Local		Emissões de partículas na queima	As atividades de extração, transporte e queima de combustíveis fósseis geram emissão de partículas		As instalações de incineração emitem metais pesados e compostos orgânicos tais como dioxinas		
Ozônio Troposférico		Emissões de NO <sub>x</sub> durante a queima	Os óxidos de nitrogênio são precursores do ozônio troposférico		Os óxidos de nitrogênio são precursores do ozônio troposférico		
Fluxos Hidrológicos/Escassez de água		A remoção de vegetação pode provocar alterações no escoamento e infiltração.				Alteração do regime dos rios; redução dos caudais	Alteração do regime dos rios; redução de caudais (sobretudo nas represas)

<sup>10</sup> GEE: Gases de Efeito Estufa, dentre estes gases, estão o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), Perfluorcarbonetos (PFC's) e também o vapor d'água (H<sub>2</sub>O).

<b>Categorias de impacto</b>	<b>Solar Fotovoltaica</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Termoelétrica</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Incineração de resíduos</b>	<b>Mini-hídricas</b>	<b>Grandes Aproveitamentos</b>
Poluição Localizada de Águas Superficiais e Subterrâneas		Lixiviação de agroquímicos produção de biomassa pode causar contaminação e eutrofização.	Escoamento de poluentes nas atividades de extração transporte e refino; águas de refrigeração	Poluição térmica e radioativa das águas de refrigeração	Poluição térmica; efluentes de processo		Degradação da qualidade da água na represa (eutrofização) (menor risco nos fios-de-água)
Perda de Biodiversidade		Destruição de vegetação para culturas de energia e remoção resíduos florestais.		As emissões radioativas podem afetar organismos vivos		Efeitos negativos sobretudo nas populações de peixes; impactes cumulativos	Efeitos negativos nas populações de peixes; submersão de ecossistemas terrestres
Degradação do Solo	Extensas áreas requeridas, mas admitindo alguns usos	Degradação do solo por culturas energia; risco de erosão	A extração de carvão e o armazenamento de combustíveis causam degradação e contaminação do solo O transporte de combustíveis fósseis provoca contaminação de ecossistemas marinhos	A extração de combustíveis nucleares provoca degradação do solo			Inundação de áreas que podem ser significativas; risco de salinização dos solos (menor nos fios-de-água)
Degradação de Zonas Costeiras e Ecossistemas Marinhos							Redução dos sedimentos e nutrientes transportados aumenta erosão e diminui produtividade
Depleção de Recursos Abióticos	Algumas células utilizam materiais escassos		Os combustíveis fósseis são recursos abióticos não renováveis	Os combustíveis nucleares são recursos abióticos não renováveis			
Resíduos Sólidos e Perigosos	Geração de resíduos perigosos na produção e desmantelament o das células	Cinzas resultantes da combustão devem ter destino adequado	A refinação e queima de combustíveis fósseis gera cinzas e escórias	Produção de resíduos radioativos durante a operação	A incineração gera cinzas e escórias		

<b>Categorias de impacto</b>	<b>Solar Fotovoltaica</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Termoelétrica</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Incineração de resíduos</b>	<b>Mini-hídricas</b>	<b>Grandes Aproveitamentos</b>
Saúde Humana				Radiações emitidas têm efeitos na saúde humana Um acidente numa central nuclear pode ter consequências extremamente graves.			
Acidentes Graves			Perigo de explosão e incêndio em todas as fases				Aumento da sismicidade; probabilidade de ocorrência de acidentes (sobretudo nas barragens)
Riscos Químicos	Os materiais utilizados têm alguma periculosidade						
Intrusão Visual	Os painéis solares constituem uma estrutura estranha na paisagem	Culturas de energia têm impactes importantes na paisagem	As estruturas associadas geram impactes visuais	As estruturas associadas geram impactes visuais	As estruturas associadas geram impactes visuais	Alteração visual em áreas não perturbadas	Intrusão visual das estruturas (e.g.barragem); efeito positivo associado ao espelho de água
Ruído			Atividades associadas provocam aumento dos níveis de ruído		Atividades associadas provocam aumento dos níveis de ruído		
Impactos socioeconômicos							Submersão de núcleos populacionais, valores patrimoniais, estruturas. Novas oportunidades de uso

Fonte: ANTUNES, SALGUEIRO, SANTOS, 2000

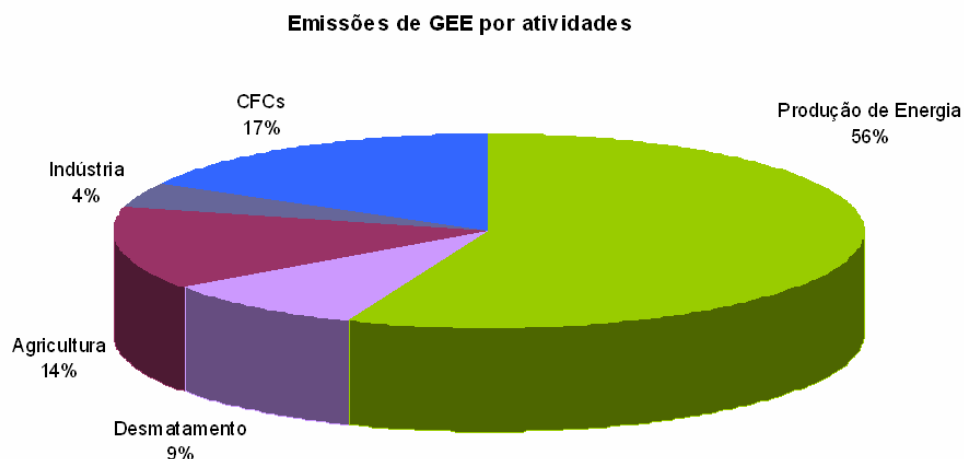
As mudanças climáticas e a intensificação do efeito estufa são consideradas como problemas mais graves causados pelo atual uso da energia. O efeito estufa é intensificado pelo aumento da concentração dos gases que refletem parte da energia térmica emitida pela Terra na atmosfera, tais como gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), clorofluorcarbonetos (CFCs).

O IPCC lançou no ano de 2007 seu quarto relatório, onde as incertezas sobre as responsabilidades antropogênicas para o aumento das emissões de gases de efeito estufa diminuíram, i.e., a humanidade é responsável pelo incremento de gases de efeito estufa na atmosfera e suas consequências ambientais. Essa é mais uma informação que fomenta o incentivo às fontes alternativas e tecnologias mais eficientes no consumo do combustível fóssil.

No entanto, torna-se necessário conhecer mais detalhadamente as atividades altamente dependentes do uso de energia e que provocam grandes impactos no meio ambiente. Dessa forma é possível interferir de forma eficaz para o controle deste processo. Neste contexto, as principais atividades responsáveis por grandes impactos ambientais são:

- A produção de eletricidade;
- O setor de transporte;
- A indústria de transformação; e
- O macro setor da construção civil

As contribuições das atividades acima apresentadas para o efeito estufa podem ser observadas no Gráfico 3.



**Gráfico 3 – Distribuição de Emissões de GEE por atividade**

Fonte: IPCC, 2007

No Gráfico 3 observou-se que a principal atividade geradora de gases de efeito estufa é a produção de energia, seguida pelos CFC's, agricultura, desmatamento e indústria. Os países desenvolvidos são os maiores consumidores de energia comercial do mundo. Juntamente com os países da OCDE, os países que compõem a antiga União soviética e a Europa Oriental consomem aproximadamente 60% de toda a energia primária mundial. (IEA, 2007)

A produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis leva a um aumento da concentração de óxidos de enxofre e de nitrogênio, dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono e particulados na atmosfera.

As ações relativas às alterações nos setores que mais emitem gases de efeito estufa poderão influir de forma determinante nos impactos ambientais decorrentes do uso da energia. Mas, para que exista maior participação de energias renováveis na matriz nacional, incentivos legais são essenciais.

### **2.6.3 Aspecto Legal no Brasil**

Apesar do grande potencial, o uso de fontes renováveis para a geração de energia elétrica no Brasil esteve sempre ligado aos programas de eletrificação rural em comunidades isoladas, onde as grandes distâncias elevam os custos da extensão da rede de energia elétrica.

No que se refere à gaseificação, houve uma lei específica para incentivar sua utilização. Registra-se que o Decreto de Lei nº 2526, assinado pelo então Presidente

da República Getúlio Vargas em 23 de agosto de 1940, criou a “Comissão Nacional de Gasogênio”, destinada a incrementar o uso e a fabricação dos aparelhos, e tornou obrigatória a utilização de gaseificadores em 10% dos veículos automotivos de uma mesma frota (CEMIG, 1986). Este decreto não está mais em vigor.

em um passado mais recente, foi criado em 1994, O PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios) tinha como objetivo atender as localidades isoladas, não supridas de energia elétrica pela rede convencional, utilizando para este fim principalmente energia fotovoltaica. O programa teve algumas dificuldades relacionadas à manutenção e operação no longo prazo. Recentemente foi incorporado ao Programa “Luz para Todos” do Governo Federal para universalização da energia (COSTA, 2006).

O Decreto nº 4.873 de 11 de novembro de 2003 cria o Programa Luz para Todos, cujo objetivo é propiciar o atendimento em energia elétrica à parcela da população do meio rural brasileiro que ainda não possui acesso a esse serviço público. Para isso serão utilizados recursos da CDE – Conta de Desenvolvimento Energético, da RGR – Reserva Global de Reversão, dos Agentes do Setor, dos Estados e Municípios

Mas o grande marco regulatório para as energias renováveis foi a aprovação da Lei nº 10.438/2002 (alterado pela Lei nº 10.762/2003) que criou o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia), consolidando-se como resultado de vários esforços feitos durante a década de 90 direcionados para o desenvolvimento das fontes alternativas no Brasil. Este programa, estipulado para ser implantado em duas fases, garante uma contratação de 3300 MW em projetos de biomassa<sup>11</sup>, PCH e eólica, na sua primeira fase. Em sua segunda fase, o PROINFA estipula regras para que a participação destas fontes renováveis de energia forneça 10% de toda a demanda de energia elétrica no Brasil num horizonte de até vinte anos. Além de incentivar as fontes renováveis de energia, a regulamentação do PROINFA incorpora mecanismos para o uso de equipamentos nacionalizados além de gerar empregos e diversificar a matriz energética brasileira (DUTRA, 2007; COSTA, 2006). Esta mesma Lei cria a CDE (Conta de Desenvolvimento Energético) que tem como objetivo promover o desenvolvimento energético dos Estados, a projetos de universalização dos serviços de energia elétrica (provendo recursos ao Programa Luz para Todos), ao programa de subvenção aos consumidores de baixa renda e à expansão da malha de gás natural para o atendimento dos estados que ainda não possuem rede canalizada.

---

<sup>11</sup> Entende-se como biomassa para o PROINFA cana de açúcar, madeira e casca de arroz. Por energia renovável entende-se, além das biomassas citadas, PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas), energia eólica e biogás.

A CDE também é utilizada para garantir a competitividade da energia produzida a partir de fontes alternativas (eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) e do carvão mineral nacional. Este encargo setorial é pago pelas empresas de distribuição, cujo valor anual é fixado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), terá duração de 25 anos e é gerida pela Eletrobrás cumprindo programação determinada pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

Existem outros marcos regulatórios diretamente ligados com o desenvolvimento das novas fontes renováveis de energia no Brasil a partir do final da década de noventa, a saber (DUTRA, 2007):

- Lei nº9.074/1995 e Decreto nº 2.003/1996 – cria a figura do Produtor Independente e autoprodutor;
- Resoluções da ANEEL nº245/1999 e nº146/2005 – trata do uso dos benefícios da CCC para empreendimentos renováveis e o Programa PROEÓLICA.

O Governo do Estado do Rio de Janeiro promulgou em maio de 2008 um decreto que tem por objetivo dispor de mecanismos de compensação energética de térmicas a combustíveis fósseis a serem instaladas no Estado do Rio de Janeiro. O decreto nº41.318 institui um mecanismo de compensação energética com a finalidade de combater o aquecimento global. Para cada MW de combustível fóssil instalado (aqui compreendendo carvão, óleo combustível e gás natural) deverá ser implementado uma quantidade de energia advinda de origem renovável de acordo com o Fator de Compensação Energética presente na lei, que varia conforme o combustível utilizado.

Ressalta-se, ainda, a Lei da Eficiência Energética 10.295, promulgada em 17 de outubro de 2001, que estabelece, no seu artigo 2º, que “os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica”. Esta lei que teve como objetivos principais (HOLLAUER, CRUZ, 2007):

- A redução de custos e aumento de competitividade
  - Para consumidores, produtores e distribuidores de energia
- Aumento da eficiência econômica
  - Redução da intensidade energética

- Melhoria da balança comercial
  - Redução da importação de diesel e GLP
- Diferimento da necessidade de investimentos na infra-estrutura de GT&D
- Redução dos impactos socioambiental

Esta lei veio dar continuidade aos programas de eficiência já existentes no país: o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) que funciona desde 1984, o selo de eficiência do PROCEL, e vigor desde 1985, o CONPET, que foi instituído por decreto federal em 1991, como Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural e tem como principal objetivo incentivar o uso eficiente destas fontes de energia não renováveis no transporte, nas residências, no comércio, na indústria e na agropecuária e o PEE, Programas de Eficiência das Concessionárias de Energia Elétrica, promulgado pela Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. Este Programa prevê a aplicação compulsória de, no mínimo, 0,5% da receita operacional líquida das concessionárias distribuidoras em programas de eficiência energética no consumo final (Lei nº 11.465, de 28/03/2007).

Também importante foi a promulgação da Lei nº 11.107 em 6 de abril de 2005. Esta lei possibilita a contratação de consórcio público para realizações de interesses comuns entre Municípios, Estados e o Distrito Federal. Dois anos depois é promulgada a Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007 que trata de saneamento básico. Esta lei estabelece que os serviços de saneamento básico sejam prestados com base em diversos fundamentos, dentre eles:

- Abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente;
- Adoção de métodos, técnicas e processos que considerem as peculiaridades locais e regionais;
- Eficiência e sustentabilidade econômica;
- Utilização de tecnologias apropriadas, considerando a capacidade de pagamento dos usuários e a adoção de soluções graduais e progressivas;

O terceiro parágrafo do artigo 7º desta lei institui que o manejo de resíduos sólidos urbanos seja composto por atividades de triagem para fins de reúso ou reciclagem, de

tratamento, inclusive por compostagem, e de disposição final dos resíduos. Consoante com a Lei nº11.107/2005, esta consolida o serviço de saneamento ser efetuado por um único prestador de serviço para vários municípios, i.e., consórcios entre municípios para atender interesses comuns. Conforme o artigo 16º da Lei 11.445/2007, a prestação regionalizada poderia ser realizada por órgão, autarquia, fundação de direito público, consórcio público, empresa pública ou sociedade de economia mista estadual, do Distrito Federal, ou municipal, na forma da legislação; ou empresa a que se tenham concedido os serviços.

Está em trâmite um projeto de lei, de autoria do Dep. Roberto Gouveia, que altera o art. 1º da Lei n.º 8.001, de 13 de março de 1990, constituindo um fundo especial para financiar pesquisas e fomentar a produção de energia elétrica e térmica a partir da energia solar e da energia eólica.

Encontra-se em análise na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei nº523/2007, que institui a Política Nacional de Energias Alternativas. De autoria do Deputado Federal Antonio Carlos Mendes Thame (PSDB/SP), o Projeto de Lei (PL) objetiva incentivar a ampliação, o desenvolvimento e a disseminação do uso das energias alternativas no lugar dos combustíveis fósseis por meio de incentivos ao desenvolvimento tecnológico dessas fontes, buscando a consolidação da matriz energética nacional limpa.

De acordo com o documento, até 2020, a produção de energia elétrica a partir de fontes alternativas deve corresponder a 25% de toda a energia gerada e consumida no Brasil, devendo, até 2030, subir para 35%. Se isso não ocorrer, aponta o texto, ficará proibida a expedição de licenças ambientais para novos empreendimentos convencionais de geração de energia elétrica, mesmo estando em fase de instalação e operação. O texto ainda define diretrizes para o financiamento da conversão de usinas de fontes convencionais em renováveis. Neste caso, o poder público, define o Projeto de Lei, irá financiar as iniciativas por meio de linhas próprias de créditos em bancos sob controle da União e em agências de desenvolvimento.

O Projeto de Lei também prevê o estímulo à construção e reativação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) por meio de mecanismos financeiros, tributários e econômicos, estimulando assim a geração distribuída e a geração autônoma para atendimento das próprias necessidades.

Vale ressaltar que o Projeto de Lei para fins da Política Nacional considera como energias alternativas a geração de força motriz, de calor ou de eletricidade através de

biocombustíveis, biomassa, energia eólica, solar-térmica, fotovoltaica e as pequenas centrais hidrelétricas. O projeto ainda inclui a energia das marés, de fontes termais subterrâneas, dentre outras fontes não-convencionais.

Embora a energia advinda de fontes renováveis de maneira geral esteja contemplada no arcabouço legal do Estado brasileiro, no que tange à gaseificação, não há nenhuma lei específica sobre sua aplicação.

## **2.7 Conclusões Preliminares**

O homem, através da evolução, passou a dominar as técnicas de transformação das diversas formas de energia em eletricidade. Esta então passa a integrar a vida da humanidade de forma contundente.

No Brasil, o sistema elétrico surge com a utilização da energia mecânica térmica e depois através da hidroeletricidade. No início do século XX a demanda interna ainda é pequena e, em 1940, mais de 80% da oferta interna de energia era suprida através da lenha ou do carvão vegetal. Este perfil muda completamente com o incremento da indústria do petróleo, o crescimento da demanda interna e a mudança de um país com perfil agrícola para um país urbano. Destarte, em 2006 menos de 13% da oferta interna de energia era através da lenha ou do carvão vegetal. O consumo interno de energia muda drasticamente, dado que o consumo de energia primária em 1970 era de cerca de 32.000 tep e em 2006 este valor era de 63.400 tep. (BEN, 2007)

Como ocorreu no Brasil, este crescimento de demanda tem ocorrido principalmente nos países em desenvolvimento, onde o acesso à eletricidade ainda é restrito, e onde a população tem um consumo de energia *per capita* abaixo da média mundial. O insumo usado para atender este crescimento, desde o domínio da exploração do petróleo, tem sido os combustíveis fósseis. Dentre eles, destaca-se que a demanda por carvão foi a que mais cresceu na última década. A produção mundial de carvão era de 2.295,8 milhões de tep em 1997 e foi para 3.1315,6 milhões de tep em 2007 (aumento de 36%). Por sua vez o consumo passou de 2.317,7 milhões de tep em 1997 para 3.177,5 milhões de tep em 2007 (aumento de 37%). Grande responsável por este aumento – tanto em produção quanto em demanda – foi a região da Ásia e Pacífico, que em 1997 tinha uma produção de 1.036,5 milhões de tep e em 2007 este valor era de 1.753,4 milhões de tep (aumento de 70%). O consumo no mesmo período passou 1.078,1 para 1.896,2 milhões de tep em 2007 (aumento de 76%). (BP, 2008)

As maiores reservas atuais de energia são de carvão e sua distribuição geográfica se dá de forma mais homogênea que a do petróleo.

A abundância e preço do carvão incentivam o aparecimento de tecnologias que façam uso deste recurso. Desenvolve-se assim um processo tecnológico que se aprimora e passa a ser usado não só com carvão, mas também com insumos de origem renovável. Assim, a gaseificação surge como alternativa mais eficiente que a combustão para geração de energia elétrica, utilizando carvão ou biomassa.

A partir das discussões sobre o modelo de desenvolvimento ora adotado, o uso da biomassa decorre das reflexões sociais sobre a importância dos impactos ambientais nos sistemas de geração de energia e sobre quais recursos serão disponíveis para as gerações futuras. Sobre a égide do termo “desenvolvimento sustentável”, além de uma oportunidade de diversificação da matriz energética, ocorre o estímulo a fontes renováveis de energia, e dentre elas a utilização de biomassa como insumo para demandas energéticas. A biomassa, por ter um potencial de produção amplo, tem seu uso incentivado, além de ser renovável e contribuir, de maneira geral, para indicadores sociais.

Os impactos ambientais advindos do uso dos sistemas de geração de energia passam a exercer maior influência quando da escolha de uma tecnologia para este fim. Com a consciência dos impactos decorrentes das emissões de gases de efeito estufa, este critério passou a ter um peso mais significativo, não sendo, no entanto negligenciados os outros impactos ambientais diretos ou indiretos dos sistemas energéticos. Desta forma, consolida-se a busca por tecnologias que minimizem estes impactos e façam uso de recursos que encaixem no modelo de desenvolvimento que não comprometa as gerações futuras. E para consorciar estas demandas, a gaseificação de biomassa compreende em sua essência menor impacto ambiental que os sistemas de combustão existentes e usa insumos energéticos renováveis.

No que tange à legislação existente, avanços foram feitos nacionalmente com o objetivo de aumentar a inserção de fontes alternativas de energia na matriz energética. Contudo, mesmo perspectivas mais ousadas não prevêem uma participação maior que 10% destas fontes no cenário nacional. Incentivos governamentais são de vital importância para que haja mudanças de paradigmas em alguns setores. Embora já estejam estipuladas partes do orçamento nacional para fomentar novas tecnologias, caso não exista uma vontade política determinante é pouco provável que o cenário

atual se altere. Em relação à gaseificação, especificamente, não há lei que a incentive diretamente, nem projetos de lei que possam vir a fazê-lo.

### **3 Estado da Arte da Gaseificação**

Neste capítulo é feita uma revisão contemplando desde o surgimento da gaseificação até os desenvolvimentos técnicos dos dias de hoje. Além disso, os diversos processos de gaseificação serão analisados e um histórico da gaseificação no Brasil e o estado da arte desta tecnologia no mundo estará presente.

#### **3.1 Gênese**

A gaseificação é um processo químico de conversão de materiais sólidos (fósseis – carvão, turfa, ou renováveis – biomassa) em gases combustíveis, gases redutores ou gases para síntese química, i.e., a conversão para um combustível energético de maior versatilidade e facilidade de manuseio (KRAUSE, 1990).

A tecnologia de gaseificação de combustíveis foi descoberta separadamente na Inglaterra e França em 1798. Em 1850 a tecnologia havia se desenvolvido a um ponto que era possível utilizar de forma comercial o gás manufaturado ou “gás da cidade” de carvão na cidade de Londres. Um considerável avanço tecnológico ocorreu em 1860 com o desenvolvimento do gaseificador Siemens (RFA), na Alemanha (REED, DAS, 1988; KRAUSE, 1990).

Por volta de 1881, o gás de gaseificação foi utilizado em motores de combustão interna. Em 1904, um decreto do Ministério da Indústria e Comércio da Prússia estabelecia “Normas para utilização de Instalações Motrizes a gás de gaseificador”. Na Alemanha, em 1906, foram estabelecidas pela Associação dos Engenheiros Alemães, pela União dos Construtores de Máquinas e pelo Sindicato dos Construtores de Motores a Gás as “Normas para determinação de potência em motores movidos a gaseificadores” (CEMIG, 1986).

O gás manufaturado cruzou o Atlântico rumo aos Estados Unidos e em 1920 muitas das cidades americanas eram abastecidas com gás para cozimento residencial e iluminação através da distribuição de gás local. (SANTOS 2006, CORRÊA NETO 2001) Em 1926 já havia 150 indústrias produzindo mais de 12.000 gaseificadores nos EUA, gerando calor de processo e os utilizando em motores de combustão interna. Ainda na década de 20 foram desenvolvidos gaseificadores pelo processo Winkler (1921), em 1930 foi o lançamento do gaseificador elaborado pela Lurgi (leito fixo, cinzas secas) um dos mais utilizados ainda hoje e possui, na África do Sul, mais de 90 destes gaseificadores (KRAUSE, 1990).

Em 1948 foi desenvolvido o gaseificador com a tecnologia Koppers-Totzek e, na década de 1950, a tecnologia de gaseificação sofreu forte evolução com a criação da empresa SASOL – *South African Coal, Oil and Gas Corporation Ltd.*, na África do Sul. Esta desenvolveu a produção da indústria carboquímica e de fertilizantes, apoiada principalmente pela tecnologia Lurgi.

O gás natural começou, gradualmente a substituir o gás manufaturado e foi construída, em 1930, a primeira tubulação de gás natural para levá-lo dos campos de óleo do Texas para Denver (CEMIG, 1986). Com as tubulações cruzando todo os EUA a baixo custo, o gás natural substituiu o gás manufaturado e a indústria de gás manufaturado foi desprezada. No entanto, este gás (manufaturado) foi utilizado na Inglaterra até a década de 1970, mas as plantas foram sendo desmontadas de acordo com a descoberta do petróleo no Mar do Norte. Experiências “*in situ*”, i.e., em minas subterrâneas, tiveram êxito apenas na antiga URSS (KRAUSE, 1990), embora hoje em dia esta técnica esteja sendo reaplicada em outros países.

Nos anos de 1970 e 1980 a maioria das grandes corporações internacionais envolvidas na área de energia atuou técnica ou financeiramente com processos de gaseificação. Muitos projetos de plantas piloto e algumas plantas de demonstração de gaseificação foram implementados, sendo que alguns destes atingiram escala comercial. Os dados obtidos em tais projetos reiteraram as vantagens do sistema de gaseificação, principalmente do ponto de vista da flexibilidade e do atendimento às restrições ambientais. (KRAUSE, 1990)

Os projetos mais importantes, com o objetivo de aprimorar a tecnologia, foram os desenvolvidos pela Chevron – Texaco, Shell, Dow, British Gas/Lurgi, Rheinbraun Brennstoff GmbH, Kellogs-Westinghouse e Krupp-Koppers GmbH (Thyssen Krupp AG), estimando, em média, um investimento de US\$200 milhões em cada programa.

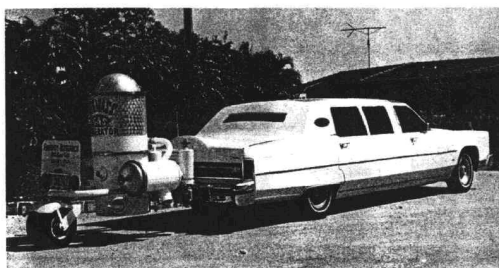
O uso da biomassa como insumo foi interrompido a partir da Segunda Grande Guerra, não havendo maiores incentivos ao uso da tecnologia com esta matéria prima, principalmente devido ao elevado preço relativo da lenha nos países industrializados. Entretanto, a lenha possui valor mais atrativo em economias em desenvolvimento (Ásia, África e América do Sul) onde a utilização de gaseificadores é bastante difundida.

No Brasil, houve uma considerável evolução dos gaseificadores no meio da década de 1980, quando cerca de 20 fabricantes já tinham colocado no mercado mais de 1.000

gaseificadores. Um dos fatores que contribuiu para este processo foi o estabelecimento de cotas limites para compra de derivados de petróleo. Entretanto a alta no preço da lenha interrompeu as atividades de muitos fabricantes de gaseificadores (KRAUSE, 1990).

Iniciando na época da Primeira Guerra Mundial, pequenos gaseificadores foram desenvolvidos utilizando os estoques de carvão e biomassa para operar veículos, barcos, trens e pequenos geradores elétricos. Entre as duas grandes guerras, o desenvolvimento foi levado principalmente por amadores entusiastas, pois a gasolina era relativamente barata e de mais fácil utilização. Em 1939 o bloqueio germânico suspendeu todo transporte de óleo para a Europa. O uso militar da gasolina recebeu prioridade, e a população civil utilizou outros meios para adquirir combustível para transporte. Aproximadamente um milhão de gaseificadores foram utilizados para operar veículos por todo o mundo durante esses anos.

De 1920 a 1944, a França (*Berliet, Panhard e Renault*), a Alemanha (*Imbert, Fritz Werner*), a Suécia, a Austrália e a Itália (*Fiat e Alfa Romeo*) fizeram progressos com gaseificadores operando em motores Ciclo Otto (CEMIG, 1986). No início da Segunda Guerra, existia um grande interesse nas fontes alternativas de combustível. Em 1943, 90% dos veículos da Suécia eram movidos por gaseificadores. No fim da guerra, existiam mais de 700.000 geradores de gás com madeira movendo caminhões, carros e ônibus na Europa e aproximadamente mais de um milhão por todo o mundo. No entanto, esses números impressionantes incluem somente seis veículos tendo a madeira como insumo nos EUA e dois no Canadá, onde o baixo custo da gasolina continuou sendo possível mesmo depois da guerra.



Miami, Florida, 1981. A charge of 110 lb of wood in the generator of this wood-powered 8,000-lb Lincoln Continental limousine takes it 85 miles or so on flat Florida terrain. In 1981, under a contract from the Department of Energy, its owner toured many southern universities demonstrating producer gas technology, especially to engineering students. (H. La Fontaine, 1995 Keystone Boulevard, Miami, Florida 33181, USA)



Gainesville, Florida, 1981. The tiny generator that powers this wood-burning motorcycle was constructed at the University of Florida out of a fire-extinguisher casing. The vehicle gets 70 km per kg of wood (20 miles per lb). (Sun Photo by Barbara Hansen)

**Figura 10 – Veículos movidos a gaseificadores**

No Brasil, o uso de gaseificadores veiculares ocorreu devido aos incentivos provenientes do Ministério da Agricultura ao uso de gaseificadores desde a década de 1930. Estudos com o fim de otimizar os gaseificadores iniciaram somente depois de 1938 e o uso deste conversor foi fortalecido pelo Decreto de Lei n° 2526, assinado pelo então Presidente da República Getúlio Vargas em 23 de agosto de 1940, já mencionado. (CEMIG, 1986).

Muitos dos gaseificadores foram simplesmente vistos como modificações temporárias para as condições dos tempos de guerra e abandonados. Entretanto, um pequeno número de fabricantes de veículos foi além e modificou o corpo das instalações do gaseificador. Logo depois da guerra a gasolina de baixo custo tornou-se disponível outra vez e a maioria dos usuários voltou a usar gasolina devido a sua conveniência. A Suécia, por razões estratégicas e por ocasião do fechamento do Canal de Suez, reiniciou em 1956, pesquisas sobre gaseificação de biomassa (idem).

### ***3.2 Reações Químicas do Processo***

A gaseificação é a conversão de qualquer combustível sólido ou líquido em um gás energético através da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta conversão pode ser realizada em diversos tipos de reatores, chamados gaseificadores. O processo de gaseificação ocorre normalmente em quatro etapas físico-químicas distintas, com temperaturas de reação diferentes: secagem da biomassa, pirólise, redução e combustão. Cada um desses processos pode ser visualizado em uma região separada dentro do equipamento, em uma seqüência determinada pelas características do projeto. O processo de gaseificação da biomassa resulta de complexas reações, ainda não bem conhecidas em sua totalidade. Porém, o atual estágio de seu desenvolvimento permite que ocorra a subdivisão destas reações em várias etapas

A localização da zona de combustão é determinada pela posição da entrada de ar e a temperatura desta zona varia normalmente entre 900 °C e 1.300 °C, resultado da reação exotérmica entre o combustível e o oxigênio do ar. Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido.

A zona de pirólise fica situada acima das zonas de combustão e redução, que fornecem a energia necessária para os processos pirolíticos. As reações de pirólise

começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400 °C, quando a estrutura dos materiais ligno-celulósicos começa a se decompor por ação térmica. Consideradas globalmente, as reações de pirólise são exotérmicas, formando vapor d'água, metanol, ácido acético e uma grande quantidade de alcatrão<sup>12</sup>. As etapas podem ser divididas da seguinte forma:

- Etapa de pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C.
- Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, método que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.
- Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados.
- 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.

A descrição da oxidação parcial dos produtos da pirólise observa-se a seguir. Numa primeira etapa ocorre a pirólise, que consiste na conversão de biomassa e calor em coque, gases, alcatrão e condensáveis. A etapa seguinte se refere à oxidação do carbono, onde a reação do carbono com o oxigênio produz monóxido e dióxido de carbono. Na última etapa ocorrem as diversas reações heterogêneas.

## I. Pirólise



## II. Oxidação do Carbono (SÁNCHEZ, 2008)



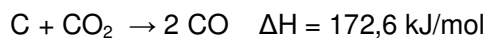
## III. Gaseificação

---

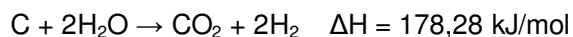
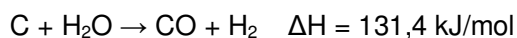
<sup>12</sup> O alcatrão é uma substância betuminosa, espessa, escura e de forte odor, que se obtém da destilação de certas matérias orgânicas, principalmente de carvão de algumas madeiras resinosas. O alcatrão é um resíduo negro e viscoso composto por centenas de substâncias químicas, algumas das quais são consideradas carcinogênicas ou classificadas como resíduos tóxicos.

## Reações Heterogêneas

a) Reação de Boudouard



b) Reação de gás de água ou reação carbono vapor

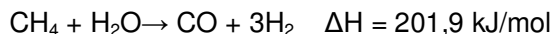
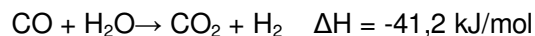


c) Reação de formação de metano

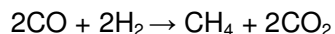
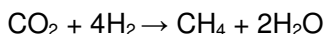
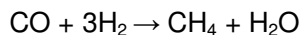


## Reações Homogêneas – fase gasosa

Reação de “deslocamento” da água



Além dessas, devem ainda ser consideradas as seguintes reações, caso o gaseificador seja operado com pressões e agentes gaseificantes diferentes dos acima mencionados. (SÁNCHEZ, 2008):



Assim os gaseificadores, através das diversas reações apresentadas acima, tendo como combustível carvão ou biomassa de maneira geral, têm como subproduto gasosos CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, além de alcatrão e condensáveis. A Tabela 2 a seguir mostra a composição média do gás que sai do gaseificador

**Tabela 2 - Composição típica do gás produzido pela gaseificação de biomassa**

Componente	Símbolo	Quantidade (% em volume)
Monóxido de carbono	CO	21,0
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	9,2
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	14,5
Vapor de água	H <sub>2</sub> O	4,8
Metano	CH <sub>4</sub>	1,6
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	48,4

Fonte: PIFFER, 1999; REED & DAS ,1988

O poder calorífico desse gás produzido é da ordem de 5.500 kJ/Nm<sup>3</sup>, considerando o nitrogênio presente no ar.

### **3.3 Principais Tecnologias**

Pode-se definir um gaseificador como um reator químico alimentado por combustível sólido ou líquido e com a quantidade controlada de ar forçada para dentro do equipamento, posicionado de acordo com o projeto. Uma unidade de gaseificação é constituída principalmente pelos equipamentos e sistemas abaixo listados (CORRÊA NETO 2001):

- Pré-processamento – estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado;
- Seção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás;
- Tratamento do gás com limpeza e, se necessário, resfriamento;
- Sistema de controle;
- Tratamento dos efluentes com disposição adequada.

A Tabela 3 ilustra as diversas formas pelas quais os gaseificadores podem ser classificados de acordo com diversas características, a saber:

**Tabela 3 – Características dos Gaseificadores**

Características	Variações	
	baixo	Até 5MJ/Nm <sup>3</sup>
Poder calorífico do gás produzido	médio	Entre 5 e 10 MJ/Nm <sup>3</sup>
	alto	Entre 10 e 40 MJ/Nm <sup>3</sup>
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação)	
Movimento relativo das massas	Leito fixo	Contrafluxo (contracorrente) <i>updraft</i>
		Fluxo direto (co-corrente) <i>downdraft</i>
	Leito fluidizado	Leito circulante
Pressão de Trabalho	Baixa pressão	Atmosférica
	Pressurizados	Até .6 MPa (59,2 atm)
Natureza da Biomassa	Resíduos	Agrícolas, industriais e sólidos urbanos (lixo)
	Biomassa	Em natura, peletizada, pulverizada

Fonte: (SANTOS 2006, CORRÊA NETO 2001)

Os gaseificadores hoje existentes representam um estágio avançado de alguns modelos desenvolvidos desde os primórdios da evolução desta tecnologia, a fim de atender às particularidades das matérias primas e à demanda de gás. Embora existam outros parâmetros que possibilitem esta classificação, a maioria dos gaseificadores em comercialização ou em fase de desenvolvimento é classificada segundo o tipo de leito utilizado, em uma das duas concepções apresentadas abaixo (SANTOS 2006), cujas descrições apresentam-se a seguir:

- Gaseificadores de leito fixo
- Gaseificadores de leito fluidizado ou leito circulante

### 3.3.1 Leito fixo

Destaca-se como característica marcante nos gaseificadores de leito fixo o fato do movimento do combustível ocorrer somente por ação da gravidade. Gaseificadores de leito fixo representam a maior parte dos equipamentos para este fim em operação ou em construção no mundo, i.e., 77,5% dos projetos de gaseificadores são de leito fixo, 20% de leito fluidizado e o restante (2,5%) de outros tipos. Esses gaseificadores são indicados para projetos de pequeno porte por serem adequados para conversão de quantidade relativamente pequena de biomassa. Dentre os gaseificadores de leito fixo, ressalta-se a existência de dois grandes grupos: os de circulação de gases co-corrente (*downdraft*) e contracorrente (*updraft*). Detalhes destes gaseificadores são apresentados a seguir. (SANTOS 2006, KRAUSE, 1990)

### 3.3.1.1 Contracorrente

Gaseificador de fluxo contracorrente é o projeto mais antigo e simples de gaseificação e ainda é utilizado para gaseificação de carvão mineral e, em menor escala, para gaseificação de biomassa.

O termo contracorrente se refere ao fato do combustível e o ar entrarem em sentidos opostos, saindo o gás pela parte superior. Ou seja, a alimentação se dá pelo topo (através de uma válvula rotativa ou porta de alimentação) e desce em contracorrente ao ar (ou oxigênio, também misturado com vapor d'água ou  $\text{CO}_2$ ) Em contato com os gases ascendentes, o combustível sofre uma secagem inicial e, em seguida, é pirolisado. O alcatrão produzido durante esta etapa é arrastado pelos gases que deixam o gaseificador. Ao término da pirólise, o combustível se gaseifica na zona de redução utilizando a energia gerada nas reações químicas que ocorrem nesta zona. A Figura 11 ilustra este processo. (SANTOS 2006, CORRÊA 2001, KRAUSE, 1990)

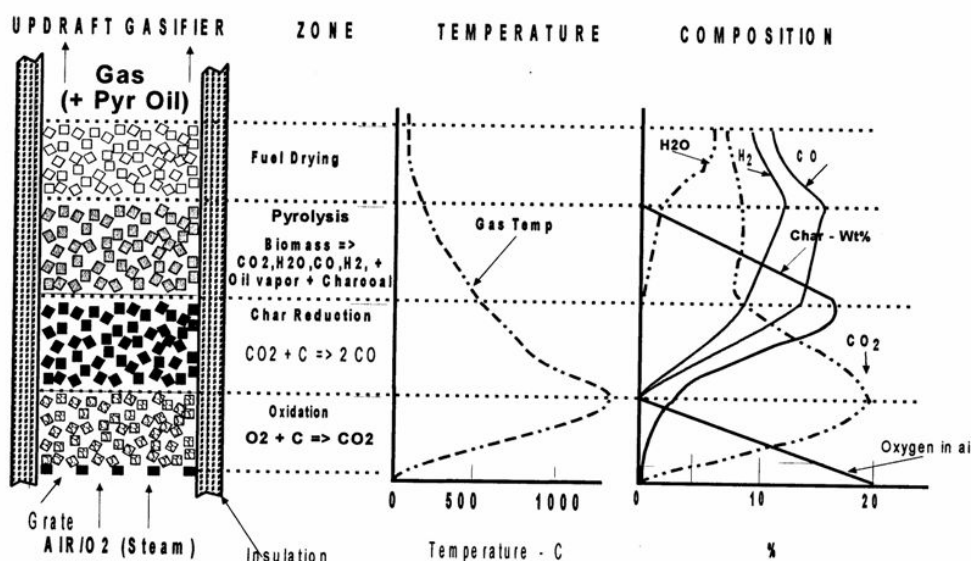


Figura 11 – Esquema das regiões de um gaseificador de leito fixo contracorrente

Fonte: REED 1998, SANTOS 2006

Mais detalhadamente, podem ser observadas também na Figura 11 as diversas regiões normalmente encontradas num corte vertical, em um gaseificador contracorrente típico em operação, além do perfil das temperaturas e composição dos gases.

O gaseificador contracorrente, quando observado a partir da grelha, apresenta sua primeira camada coberta pelo combustível, onde ocorre uma combustão intensa, produzindo  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  a temperaturas elevadas, que podem atingir  $1300^\circ\text{C}$ . Em um segundo momento, esses gases são reduzidos a  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$  de acordo com sua passagem pela camada de combustível, resfriando-se a uma temperatura da ordem de  $750^\circ\text{C}$ . Abaixo desta temperatura as taxas de reações de gaseificação caem significativamente, praticamente cessando.

No entanto, os gases ao subirem continuam trocando calor com a corrente de sólidos, promovendo a sua pirólise, com liberação e incorporação da matéria volátil do combustível à corrente gasosa, aquecimento e secagem. Os gases já frios e com a incorporação da matéria volátil e umidade do combustível alimentado, saem pelo topo do gaseificador, com a temperatura em torno de  $400^\circ\text{C}$ . As cinzas resultantes, ainda com uma fração do combustível não convertido em gás, deixam o gaseificador pela base. (SANTOS 2006, CORRÊA 2001)

Observa-se que este tipo de gaseificador apresenta problemas de fundição de cinzas (*clinker*) e aglomeração, reduzindo a área de contato gás – matéria prima no leito. Assim, este modelo não é recomendado para carvões com características muito aglomerantes, bagaço de cana e lenha picada (KRAUSE, 1990).

Em razão da presença de alcatrão em níveis elevados no gás, o poder calorífico atinge os valores mais altos possíveis e, por este motivo, faz-se necessário que ocorra a lavagem dos gases, vislumbrando a minimizar a presença de alcatrão no gás final. No entanto, após este procedimento, observa-se conseqüentemente uma perda do calor sensível<sup>13</sup> que diminui a eficiência energética global do processo. A água utilizada na lavagem constitui um foco de poluição ambiental nos casos de grandes unidades de processamento.

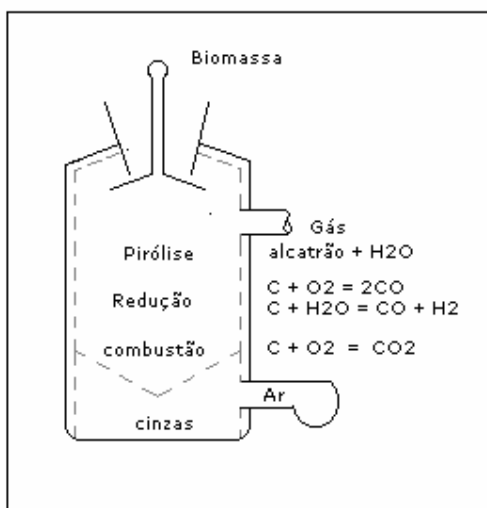
Como exemplo de gaseificador contracorrente, observa-se o gaseificador Lurgi (Figura 13), que foi muito empregado na gaseificação de carvão mineral para geração de gás de síntese. Ressalta-se a presença de um dispositivo de distribuição de carvão sobre o leito, para evitar a formação de canais preferenciais e sistemas de alimentação e descarga de sólidos estanques, devido à pressurização do gaseificador (2,5 – 3,0 MPa). Por ser pressurizado, apresenta uma capacidade 5 vezes superior que um

---

<sup>13</sup> Consideremos um corpo que recebeu ou perdeu uma determinada quantidade de calor  $Q$ . Esse calor é denominado calor sensível quando provoca apenas uma variação da temperatura do corpo, sem mudar seu estado de agregação (se o corpo é sólido, continua sólido, se é líquido continua líquido e, se é gasoso, continua gasoso). (CEPA 2005)

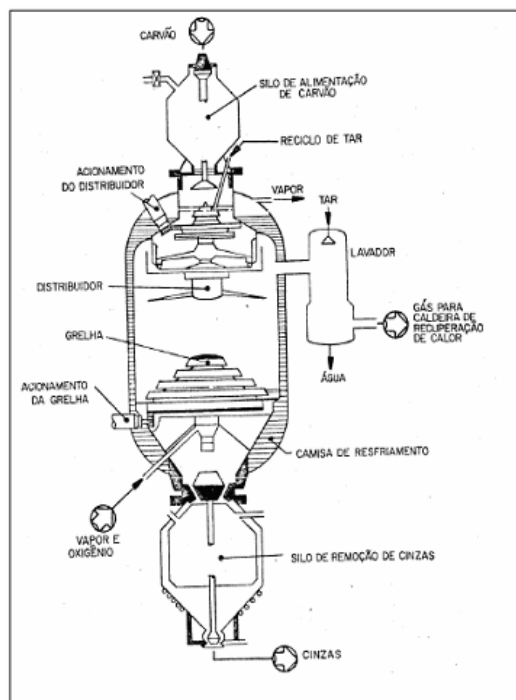
equivalente atmosférico, somado a uma complexidade mecânica e operacional significativamente maior, não sendo competitivo para pequenas capacidades.

Os gaseificadores pressurizados foram largamente utilizados no início por oferecem um melhor balanço energético, além de não haver necessidade de compressão do gás antes da entrada na câmara de combustão. Contudo, este tipo de gaseificador trouxe outros tipos de problemas, e.g., a alimentação do gaseificador. (SANTOS 2006, CORRÊA 2001)



**Figura 12 – Gaseificador Contracorrente**

Fonte: PIFFER, 1999

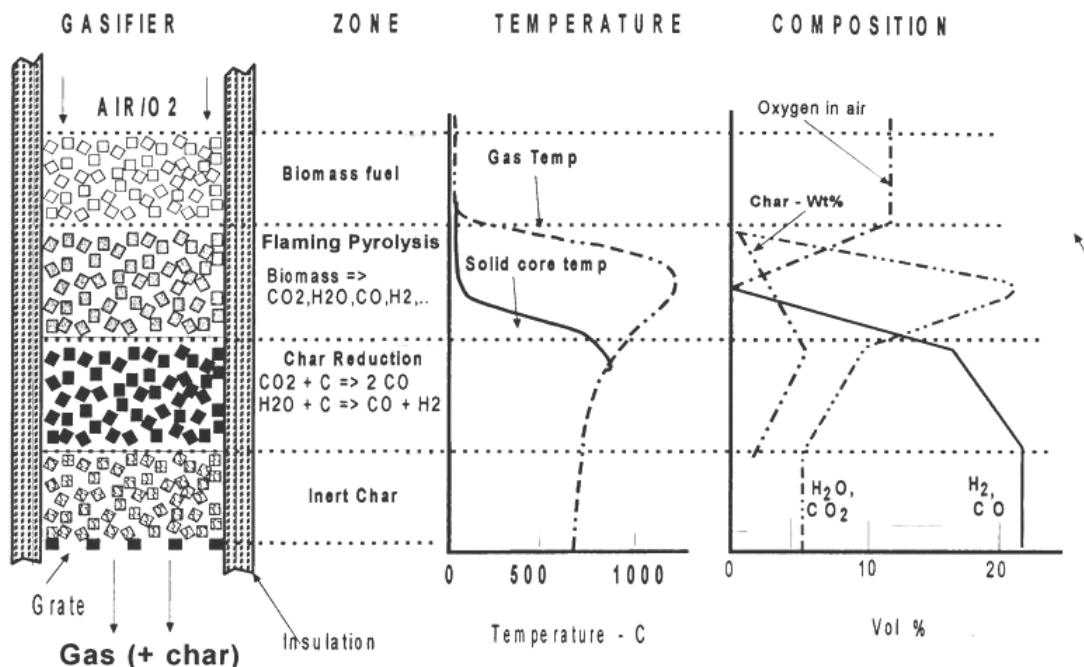


**Figura 13 – Gaseificador contracorrente pressurizado, Lurgi**

Fonte: SANTOS 2006

### 3.3.1.2 Co- corrente

O gaseificador co-corrente, ou de fluxo descendente, caracteriza-se por apresentar alimentação de biomassa e ar para combustão pela extremidade superior e produzir um gás praticamente isento de alcatrão. Esta alteração faz toda a diferença para um combustível com teor elevado de matéria volátil como a biomassa. Neste tipo de gaseificador, o ar injetado pode queimar até 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível, e por isso o nome alternativo de gaseificador “queima de alcatrão”. A Figura 14 ilustra as zonas de pirólise e redução, como também os perfis de temperatura e composição em um gaseificador típico co-corrente. (SANTOS 2006, CORRÊA 2001, KRAUSE, 1990)



**Figura 14 – Regiões normalmente encontradas em gaseificadores co-corrente**

Fonte: SANTOS, 2006

Conforme ilustrado, o ar introduzido no gaseificador encontra, em um primeiro momento, a biomassa não queimada, ainda não reagida. A temperatura máxima ocorre na fase gasosa, na região de pirólise flamejante.

O material sólido localizado logo acima desta região sofre um pré-aquecimento e secagem, principalmente por troca de calor por radiação com a região de pirólise flamejante. Os produtos da pirólise passam forçadamente através da zona de combustão e encontram o combustível incandescente, destruindo termicamente o alcatrão formado e obtendo-se um gás limpo, porém de menor poder calorífico que o gás produzido no gaseificador contracorrente. Em comparação com o modelo de leito fixo, este gaseificador apresenta um maior consumo de ar de gaseificação, o que pode influenciar a qualidade do gás obtido.

A biomassa tem sua temperatura elevada com o processo. Ao atingir a marca dos 200°C ocorre a liberação de combustíveis voláteis que, ao entrarem em ignição com o ar descendente, formam uma chama no entorno das partículas, que passam a queimar mais intensamente devido à troca de calor com a própria chama e até que haja o esgotamento de toda matéria volátil, restando de 5 a 15% de carvão vegetal (SANTOS 2006, CORRÊA 2001).

Os gases ricos e aquecidos desta região reagem com o carvão vegetal a 800-1200 °C, gerando mais CO e H<sub>2</sub>. Como as principais reações que ocorrem nesta região são endotérmicas, a temperatura do gás cai abaixo de 800 °C, temperatura na qual as reações de gaseificação ficam praticamente inexistentes.

As cinzas advindas deste processo possuem uma quantidade de carbono ainda não reagido (algo entre 4 e 8% da massa alimentada) e passa através da grelha para disposição

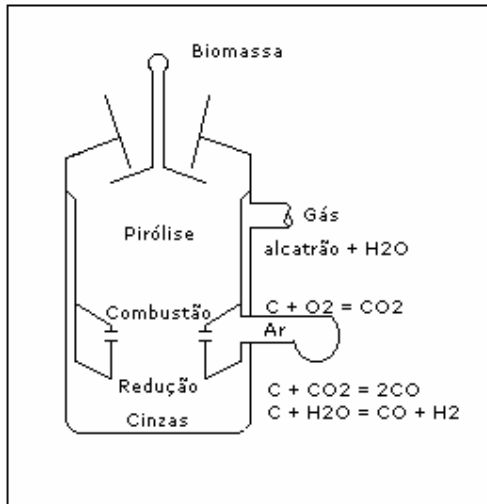
Devido à ausência de alcatrão, a lavagem é dispensada, elevando a eficiência global do processo por utilizar os gases ainda quentes. A energia necessária para gaseificação é obtida através das reações de combustão que ocorrem no leito descendente.

Um fator limitante deste tipo de equipamento é o teor de umidade aceitável para o processo, cujo limite superior está entre 20% e 30% devido à instabilidade provocada pelo vapor d'água na zona de combustão. A evaporação da água contida no interior das partículas retarda ou até impede a formação da região de pirólise flamejante, o que induz à formação de gases com elevado teor de alcatrão. Assim, é indispensável uma operação de pré-secagem da biomassa que conduza o valor da umidade a níveis abaixo do estipulado acima (de 20% a 30%). Para pequenas unidades, esta pré-secagem não configura maiores inconvenientes técnicos ou econômicos, porém, para instalações de grande porte, que exigem o manuseio e estocagem de milhares de toneladas mensalmente, esta etapa deve ser considerada com parte integrante do processo de gaseificação.

Para os gaseificadores co-corrente, a zona de combustão é um elemento crítico, pois de seu arranjo depende a manutenção da temperatura de operação mínima necessária para garantir o craqueamento dos alcatrões e voláteis, bem como a uniformidade de temperatura por toda seção.

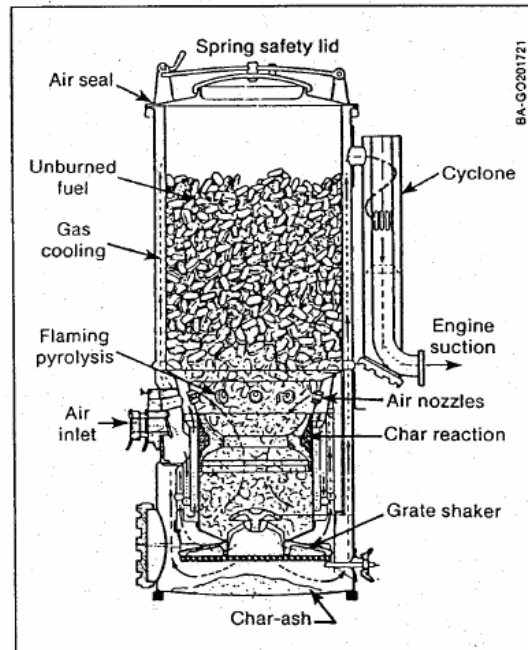
Um exemplo típico destes gaseificadores são os do modelo Imbert (Figura 16). Estes gaseificadores apresentam uma região de estrangulamento onde ocorre a injeção de ar, através de bocais localizados nas paredes. Esta região tem a função de forçar a passagem dos voláteis liberados na região de destilação pela região de combustão (*hearth zone*) para a sua destruição. Entretanto, entre os bocais de injeção de ar e no centro da região de combustão formam-se regiões sem acesso de ar, conseqüentemente com temperaturas mais baixas, por onde o alcatrão pode passar

praticamente sem sofrer decomposição. Na zona de redução, mais abaixo, este alcatrão pode ser apenas parcialmente craqueado porque as temperaturas predominantes nesta zona, da ordem de 650°C, não são suficientes para uma decomposição total.



**Figura 15 – Gaseificador co-corrente**

Fonte: PIFFER, 1999



**Figura 16 – Desenho esquemático do Gaseificador Imbert**

(Fonte: SANTOS, 2006)

As vantagens e desvantagens dentre os gaseificadores de leito fixo, contra-corrente e co-corrente, podem ser observadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens dos Gaseificadores de Leito Fixo**

Gaseificador	Vantagens	Desvantagens
Contra-corrente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico, como lodo residual do tratamento de esgoto;</li> <li>2. Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha (a menos que vapor d'água seja injetado na grelha) capaz de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida).</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O gás gerado normalmente contém de 10 a 20 % do alcatrão produzido na pirólise do combustível, com uma concentração da ordem de 100 g/Nm<sup>3</sup>. Estes alcatrões, no entanto, queimam bem em processos de combustão direta;</li> <li>2. No caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, o alcatrão deverá ser removido;</li> <li>3. A grelha pode ser submetida a temperaturas muito elevadas, a não ser que vapor d'água ou CO<sub>2</sub> seja injetado com o ar ou oxigênio;</li> <li>4. A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito (no caso do gaseificador atmosférico) ou formação de canais preferenciais.</li> </ol>
Co-corrente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Consomem entre 99 a 99,9 % do alcatrão. Desta forma o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizados em motores com um mínimo de limpeza;</li> <li>2. Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz de carvão e cinza retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente;</li> <li>3. O gaseificador co-corrente é um sistema comprovado, com mais de um milhão de veículos utilizando este sistema durante a Segunda Guerra Mundial;</li> <li>4. O gás (quando limpo) pode ser utilizado em motores de linha, sem maiores modificações;</li> <li>5. Os gaseificadores de topo aberto apresentam poucos problemas em casos de explosão.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O combustível tem de apresentar baixa umidade (&lt;20 %) e granulometria uniforme;</li> <li>2. O gás sai do gaseificador a temperaturas elevadas (em geral 700 °C); desta forma esta energia é perdida, a menos que haja algum aproveitamento (para preaquecimento do ar, secagem do combustível etc.);</li> <li>3. Tipicamente 4 a 7% do carbono do combustível não é convertido, saindo com as cinzas pelo fundo do gaseificador;</li> <li>4. A potência de pico de motores com ignição a vela é reduzida em 30 a 40 %, a menos que ele seja turbinado.</li> </ol>

Fonte: SANTOS 2006

### 3.3.2 Leito Fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado foram desenvolvidos antes da Segunda Guerra Mundial para sistemas de gaseificação de carvão mineral de grande capacidade (modelos Winkler). Posteriormente, este modelo foi adotado pelas indústrias químicas

e petroquímicas para craqueamento catalítico de hidrocarbonetos pesados, secagem e outras diversas aplicações. Sua operação é mais complexa do que as dos gaseificadores de leito fixo e por este motivo são utilizados majoritariamente em grandes instalações. (SANTOS 2006, KRAUSE, 1990)

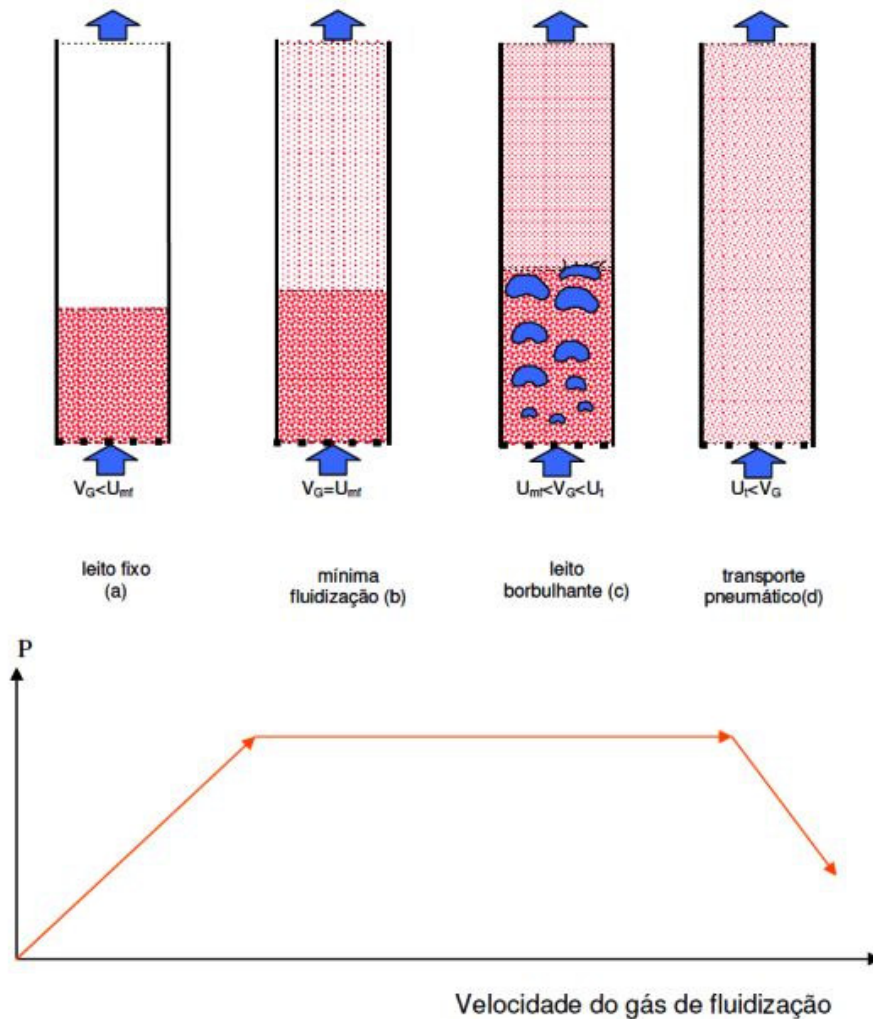
Os gaseificadores de leito fluidizado apresentam como principal característica a formação de um leito de biomassa em suspensão produzido por efeito do fluxo de ar forçado através de uma grelha distribuidora. As partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas, alumina), fluidizadas pelo fluxo de ar. A biomassa é alimentada em dimensões reduzidas para permitir a fluidização.

A Figura 17 ilustra como se dá o funcionamento de um gaseificador com essas características. Em um primeiro momento o gás passa através do leito formado pelo material particulado e observa-se uma elevação de pressão na grelha. Ao se elevar continuamente a vazão do gás obtêm-se um aumento contínuo da pressão até ser atingida a velocidade na qual a força peso das partículas se iguala à força de arraste do gás (velocidade mínima de fluidização,  $U_{mf}$ ). Neste ponto as partículas começam a se descolar uma das outras e ficam suspensas, e passam a se comportar como um líquido. Caso passe uma quantidade maior de gás do que a do equilíbrio, esta formar-se-á bolha, diminuindo a superfície de contato com as partículas. (SANTOS 2006, CORRÊA NETO 2001)

Com o aumento de velocidade podem ser identificadas duas fases numa seção transversal do leito: a emulsão (composta de gás e material particulado) e as bolhas (constituída somente de gás). As bolhas são praticamente isentas de partículas sólidas, mas, em sua passagem pelo leito, algumas partículas são arrastadas por elas. A emulsão contém as partículas sólidas e o gás que percola (processo de filtragem de gás) através delas.

As bolhas, ao subirem, aumentam de tamanho por redução da pressão e coalescimento com outras bolhas, arrastando grande quantidade de material particulado na sua subida. São elas responsáveis pela grande taxa de circulação de sólidos no leito. A elevação continuada da vazão, nesta condição, provoca somente o aumento do número e tamanho das bolhas, sem elevar a pressão na base da grelha. Quando a velocidade do gás atinge a velocidade terminal das partículas ( $U_t$ ) começa a haver um arraste do material mais fino, diminuindo a altura do leito e a pressão na

sua base. No caso destas partículas arrastadas serem coletadas em um ciclone<sup>14</sup>, ou outro dispositivo semelhante, e serem retornadas ao leito, têm-se um leito fluidizado circulante. Quando não há este retorno, têm-se um leito de arraste.



**Figura 17 – Evolução da pressão na base de um leito de material particulado com o aumento da vazão de ar**

Fonte: SANTOS 2006

Devido a intensa interação entre a biomassa e o ar no leito fluidizado, os processos de transferência de massa e energia se realizam com facilidade, obtendo-se uma distribuição quase uniforme da temperatura ao longo do equipamento. Nestas condições, não se distinguem as zonas de combustão, redução e pirólise.

<sup>14</sup> Ciclone: equipamento responsável pela separação de sólidos ou líquidos de gases. Utilizado normalmente para partículas maiores que 5 $\mu$ m

O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar, de qualquer natureza, até que atinja temperatura suficientemente alta para o início do processo de gaseificação. A temperatura de operação é da ordem de 900°C e o alcatrão e os voláteis são destruídos termicamente (craqueamento), resultado de um gás bastante limpo, mas não por completo. Para produzir um gás completamente isento de alcatrão e voláteis, são necessárias temperaturas do leito entre 1100°C e 1200°C. (CORRÊA NETO 2001)

Além de alguma quantidade de alcatrão e voláteis, o gás produzido pode também conter carbono não queimado e parte das cinzas contidas originalmente no combustível, que devem ser removidas por sistema de limpeza. Sua operação em temperaturas relativamente mais baixas que a dos gaseificadores de leito fixo reduz significativamente os teores de enxofre e de material particulado, além de diminuir a formação de óxidos de nitrogênio.

Este gaseificador apresenta fácil controle de temperatura do leito através da variação da alimentação de ar e de combustível. Entretanto, a variação na quantidade de gás consumido requer alterações nas quantidades de ar e combustível fornecidos ao leito para alterar a vazão do gás produzido, tornando o sistema de alimentação parte vital do equipamento.

O gaseificador de leito fluidizado apresenta uma concepção mais moderna, sendo atualmente objeto de estudos mais intensos e apresenta perspectivas bastante promissoras, principalmente devido a sua adequação a utilização de combustíveis como bagaço de cana e casca de arroz, biocombustíveis baratos e disponíveis, cuja gaseificação é difícil pelos métodos tradicionais devido a suas características de umidade, granulometria e baixa densidade.

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser de leito borbulhante ou circulante. A diferença principal é a velocidade com a qual o material atravessa o leito. O gaseificador de leito borbulhante foi o primeiro equipamento de leito fluidizado a ser projetado, com velocidade de 1 m/s. No de leito circulante, resultados de projetos mais recentes, a velocidade na qual o material atravessa é mais alta, entre 7 e 10 m/s, permitindo melhor mistura do ar com o combustível gaseificado.

Esta tecnologia de gaseificação apresenta-se como a mais indicada para instalações de grande capacidade, atingindo potências de até 25 MW e já se pensando em projetos de escala até 100 MW. Para geração de energia elétrica a partir da

gaseificação da biomassa, estão em desenvolvimento sistemas de leito fluidizado, tanto atmosféricos como pressurizados.

### **3.3.2.1 Gaseificadores Pressurizados e Atmosféricos**

A escolha entre gaseificação pressurizada ou atmosférica é decorrente da aplicação que vai ser dada ao gaseificador. Para geração de energia de ciclos termelétricos, utiliza-se principalmente a gaseificação pressurizada. Os gaseificadores pressurizados tendem a ser menores, mas esta diferença só evidencia-se em reatores com potência superior a 150 MW, enquanto que na faixa de 20MW praticamente não há redução significativa. Os sistemas pressurizados apresentam problemas ainda não solucionados, como a alimentação de combustível, a redução do teor de alcatrão do gás, os óxidos de nitrogênio produzidos e a filtragem do gás quente.

Os sistemas pressurizados envolvem uma quantidade maior de sofisticação tecnológica dos seus componentes, como o sistema de alimentação de biomassa, características do leito fluidizado, cinética química e intensificação da dissipação térmica. Os sistemas de pressão atmosférica já possuem sua operação comercial conhecida enquanto os pressurizados devem passar ainda a este nível tecnológico.

O benefício de utilizar um gaseificador pressurizado reside na eliminação de perdas operacionais com a compressão do gás combustível quente necessária para injeção na câmara de combustão de uma turbina a gás. Em contra partida as perdas do sistema de alimentação da biomassa se elevam pelo escapamento de gases, que tem sido foco de desenvolvimento recente.

A escala comercial de desenvolvimento dos sistemas pressurizados está na faixa dos 2,0 a 3,5 MPa, suficiente para alimentar diretamente, sem compressores, as turbinas aeroderivativas de pequeno e médio porte atuais.

**Tabela 5 – Comparação entre Gaseificadores de leito fixo e leito fluidizado**

	Gaseificador de leito fixo	Gaseificador de leito fluidizado
Porte	Pequeno porte (de 1 kW a 1MW)	Grande porte (a partir de 1MW)
Alcatrão contido no gás gerado	100 g/Nm <sup>3</sup> no leito fixo contracorrente e 1g/Nm <sup>3</sup> no leito fixo co-corrente	10 g/Nm <sup>3</sup>
Biomassa	Baixa umidade (menor que 20%) e granulometria uniforme (no máximo 6 cm)	Alta umidade (até 65%) e granulometria uniforme (5 a 10 cm)
Uso do gás gerado	Motores de linha (combustão interna, ex. ciclo Otto).	Turbinas a gás

Fonte: SANTOS, 2006

### **3.4 Tendências Mundiais**

Dentre as diversas aplicações da gaseificação destaca-se o IGCC – Sistemas Integrados de Gaseificação e Ciclo Combinado, que representam a conjugação de diversas tecnologias de conversão de energia. Uma vez que unidades de gaseificação (seja a carvão ou a biomassa) produzem gases combustíveis que acionam turbinas de combustão, estas produzem energia elétrica. Os gases exauridos das turbinas de combustão geram vapor d'água em uma caldeira de recuperação de calor, com ou sem queima auxiliar, acionando uma caldeira a vapor (ciclo Rankine convencional, como já visto anteriormente), que está acoplado a um alternador produzindo assim energia elétrica. Uma parcela do vapor gerado pode ser utilizada como agente gaseificante ou como vapor de processo dentro de um complexo industrial.

Na década de 1970 a idéia de utilização de um sistema IGCC cresceu consideravelmente devido ao elevado preço do barril de petróleo. Mais de 150 processos de gaseificação tiveram início de desenvolvimento no período. A primeira planta de IGCC foi construída em Lunen, Alemanha em 1972 e tinha potência instalada de 170 MW, e hoje encontra-se fora de operação. A partir da década de 1980, a situação econômica alterou-se e a viabilidade econômica de tais sistemas passou por uma avaliação em diversos países. Algumas plantas já existentes sofreram alterações, tais como o EPRI (*Electric Power Research Institute*), que ajudou a fundar na década de 1980 o projeto *Cool Water*, com potência de 125 MW, e mudou-se para o Kansas em 1990 para um projeto de conversão de pet em fertilizantes. Outra experiência não bem sucedida foi a da Dow Química, que construiu uma planta

demonstrativa em Plaquemine, Los Angeles, na década de 1980 com potencia de 165 MW, mas não se encontra mais em operação. No entanto a Texaco construiu duas pequenas plantas de IGCC nas refinarias na década de 1990 e há uma planta pequena de IGCC que opera no leste da Alemanha (Schwarzepumpe); a República Tcheca construiu uma planta de IGCC com potência de 350 MW na década de 1990, utilizando 26 gaseificadores Lurgi e turbinas a gás da GE. E ainda um consórcio japonês colocou em operação no fim de 2007 uma planta de IGCC com potência de 250 MW.

A proliferação deste sistema por diversos países explica-se pela facilidade com a qual ele pode ser instalado. Através de módulos onde o sistema se encaixa e seu potencial frente às reservas mundiais de carvão, identifica-se um forte catalisador para sua expansão. Outro ponto positivo refere-se ao rendimento do processo. Alguns deles apresentam eficiência de até 52%, sendo os que contam com outros equipamentos na planta (como recuperação de enxofre e recuperação de calor na planta) podem obter 39% de rendimento. Até o fim de 2007 eram 4.900 MW de plantas de IGCC instaladas em todo o mundo, sendo cerca de 2.400 MW de combustível sólido e 2.500 MW de combustível líquido. Estima-se que após 2020 todas as plantas de IGCC poderão ter captura e estocagem de 90% do CO<sub>2</sub> por ela produzido (KRAUSE, 1999; EPRI, 2007). Outra fonte (COAL-GEN, 2007) cita a existência de 56.000 MW<sub>th</sub> instalados, sendo 55% tendo carvão e 32% tendo PET como combustível, e os produtos gerados são químicos (44%), destinados a Fischer - Tropsch<sup>15</sup> (30%) e energia (18%). A Tabela 6 ilustra o impacto do seqüestro de CO<sub>2</sub> na eficiência do processo de IGCC.

**Tabela 6 – Sumário da Performance do IGCC com Captura de CO<sub>2</sub>**

	GE Eenergía		E-Gas		Shell	
Captura de CO <sub>2</sub>	NAO	SIM	NAO	SIM	NAO	SIM
Potência Bruta (MW)	770	745	743	694	748	694
Potência Auxiliar (MW)						
Suprimento para Planta Base	23	23	25	26	21	19
Unidade de Separação de Ar	103	121	91	109	90	113
Limpeza de Gases / Captura de CO <sub>2</sub>	4	18	3	15	1	16
Compressão de CO <sub>2</sub>	-	27	-	26	-	28
Total de Potência para planta auxiliar (MW)	130	189	119	176	112	176
Potência Líquida (MW)	640	556	623	518	636	517
Taxa de Calor (Btu/kWh)	8.922	10.505	8.681	10.757	8.304	10.674
Eficiência (%HHV)	38,2	32,5	39,3	31,7	41,1	32,0
Perda de Energia <sup>1</sup>	-	5,7	-	7,6	-	9,1

<sup>1</sup>Perda de Energia pela Captura de CO<sub>2</sub> = perda de pontos percentuais em potência líquida  
Eficiência da planta devido à captura de CO<sub>2</sub>

Fonte: NETL, 2007a

<sup>15</sup> Produção de Hidrocarbonetos, ver Anexo I.

Grandes firmas têm investido fortemente em novas tecnologias de gaseificação ao redor do mundo sem perder de vista o viés ambiental. A PRAXAIR (no Brasil conhecida como White Martins), juntamente com a GE (*General Electric*) desenvolveram um gaseificador do tipo IGCC com captura de aproximadamente 90% do CO<sub>2</sub> gerado com a produção de energia, além de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e cinzas - que podem ser usadas para produção de cimento, cobertura de aterros sanitários e asfalto. Exemplo similar foi seguido pelo Departamento de Energia Americano, (DOE) com o desenvolvimento de um gaseificador IGCC. A Conoco-Phillips também está investindo nesta tecnologia, bem como a Shell, a Siemens, Kellogg Brown&Root, Duke Energy e a Mitsubishi (CH2MHill, 2007).

Segundo o CH2MHill (2007), existem 117 plantas de gaseificação em operação (não IGCC), com um total de 385 gaseificadores em todo o mundo (ou 138 plantas em operação e 417 gaseificadores [COAL-GEN, 2007]). Eles são usados principalmente para gaseificação de carvão e resíduos de refinaria. O gás de síntese obtido pode ser utilizado na elaboração de produtos químicos, gás natural sintético, hidrogênio para produção de amônia, combustível para reação de Fischer-Tropsch e geração de energia elétrica. A utilização de Fischer-Tropsch e a existência de métodos que diminuem drasticamente as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado tornam a tecnologia ainda mais atraente. Algumas tecnologias utilizam oxigênio puro no processo, ou ar enriquecido, o que potencializa o surgimento de outros subprodutos e aumenta a proporção de CO no gás de síntese (NETL, 2007b). Hoje o NETL desenvolve estudos sobre a gaseificação de biomassa e carvão juntos (NETL, 2008). A Figura 18 a seguir ilustra uma planta com IGCC e captura de CO<sub>2</sub>.

Conforme pode ser observado na Figura 18, as atuais plantas de gaseificação possuem diversos equipamentos cujo objetivo é melhorar a performance tecnológica e diminuir o impacto ambiental.

## IGCC with CO<sub>2</sub> Capture

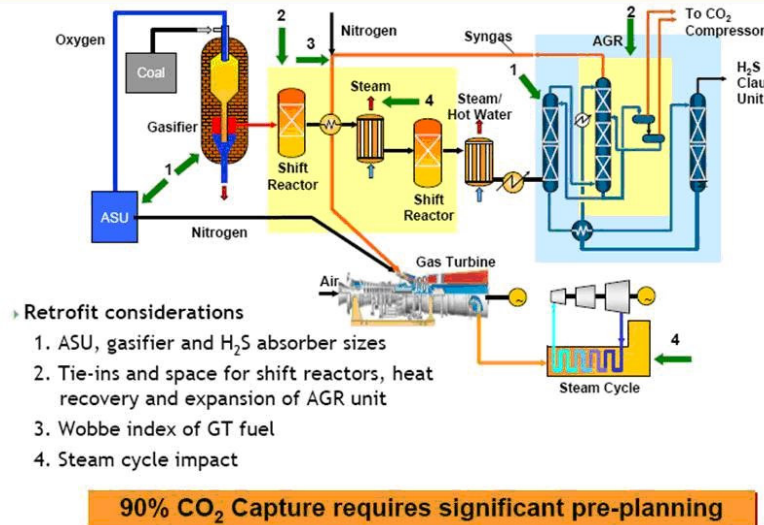


Figura 18 – Sistema de Gaseificação com Ciclo Combinado e captura de CO<sub>2</sub>

Fonte: SHAH et alli, 2005

Outra possibilidade de aplicação da gaseificação é a UCG – *Underground Coal Gasification*, ou gaseificação de carvão subterrânea. Esta técnica já havia sido utilizada anteriormente, mas foi retomada com novas tecnologias. A UCG permite a utilização de reservas de carvão que não estariam presentes nas primeiras estimativas. O processo consiste no uso de minas que, por restrições econômicas ou geológicas, não estão mais sendo usadas. Nelas, é feita a gaseificação controlada *in situ*, gerando gás de síntese. O dióxido de carbono gerado neste processo pode ser retornado ao local de onde ele foi retirado, resultando em emissões zero de CO<sub>2</sub> e gerando pequenos distúrbios terrestres. Pesquisas de viabilidade e plantas demonstrativas estão em andamento no Reino Unido, Rússia, China, África do Sul, Nova Zelândia, dentre outros. Estudos preliminares indicam que o uso de UCG pode aumentar as reservas mundiais em até 600 bilhões de toneladas de carvão (WEC, 2007).

### 3.5 Gaseificadores no Brasil

A presença de gaseificadores no Brasil não é recente. Entretanto sua aplicação não está difundida dentre as diversas formas de aproveitamento energético. Assim, algumas empresas tiveram iniciativas na pesquisa e desenvolvimento desta

tecnologia. A Petrobras, pela gerência de Energias Renováveis do CENPES (PDDES/ER), está instalando alguns gaseificadores no Brasil como projetos experimentais. O projeto de Gaseificação de Biomassa, da carteira do Programa Tecnológico de Energias Renováveis (PROGER) vem realizando testes com diferentes tipos de gaseificadores, almejando fomentar pesquisa com equipamentos de aproveitamento de biomassa para geração de energia elétrica e gás de síntese. Este Programa encontra suporte na busca da empresa por alternativas energéticas ao cenário existente, visto a volatilidade do preço do petróleo e o contexto ambiental. As pesquisas estão direcionadas à gaseificadores de leito fluidizado ou de arraste, mais adequados para geração de calor e potência elétrica em grandes quantidades, além de serem importantes para síntese de produtos químicos (PETROBRAS, 2008).

A Petrobras, em parceria com a Termoquip, desenvolveu um gaseificador de leito fixo pela CODET/UNICAMP (Coordenação de Desenvolvimento Tecnológico em Engenharia Sanitária da Universidade Estadual de Campinas), que cedeu a tecnologia à Termoquip Energia Alternativa S.A. a partir de 1981. O gaseificador utilizou pedaços de lenha de até 12 cm, produzindo um gás com poder calorífico na faixa de 0,1 a 5 Gcal/h (entre 420MJ/h ou 116,4 kW e 21 GJ/h ou 5,8 MW), e ele foi aplicado principalmente em fornos secadores e tratamento térmico. Segundo a Petrobras (2008), os gases obtidos deste processo encontravam-se dentro das especificações esperadas para o equipamento. Por se tratar de uma tecnologia já consolidada, os testes avaliaram basicamente o funcionamento do gaseificador. A Termoquip, líder em gaseificadores na década de 90, desenvolveu também um gaseificador de leito fluidizado. A parceria estendeu-se à COOPERSUCAR, onde foi testado um protótipo com palha e bagaço de cana e outras gramíneas em um gaseificador também de leito fluidizado. (SANTOS, 2006; PETROBRAS, 2008)

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ainda em parceria com a Petrobras, realizou no fim de 2007 testes com um gaseificador de leito fluidizado, tendo como combustível o bagaço de cana, cavaco de madeira e casca de arroz. Os testes, de acordo com a Petrobras (2008), apresentaram excelentes resultados. O Cenpes e a UNIFEI desenvolvem um projeto conceitual de um gaseificador de leito fluidizado circulante, ainda inédito no Brasil.

A Petrobras foi realizadora ainda de três projetos, que utilizavam os seguintes combustíveis, mas foram estagnados por motivos econômicos:

- Carvão vegetal, gaseificador de leito fixo, contracorrente, com potência nominal de 5 Gcal/h (cerca de 21 GJ/h ou 5,8 MW), instalado na refinaria de Manaus, substituindo o sistema existente que utilizava óleo combustível nas caldeiras;
- Casca de coco de babaçu, gaseificador de leito fixo, co-corrente, potência nominal de 5Gcal/h (cerca de 21 GJ/h ou 5,8 MW), instalado em uma usina de asfalto em Fortaleza, e posteriormente realocado em uma usina de cerâmica; e
- *Chips* de madeira, leito fluidizado, com potência nominal de 9 Gcal/h (cerca de 37,7 GJ/h ou 10,4 MW), instalado na refinaria de Paulínia, substituindo o sistema existente que utilizava óleo combustível nas caldeiras.

Outro projeto existente envolve o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que utilizou um gaseificador de leito movente, possibilitando diversas configurações: contra corrente, co-corrente, e ainda possui reciclo de gases de topo.

Uma parceria do IPT com o CENBIO e o BUN (*Biomass Users Network* do Brasil e a Universidade do Amazonas) construiu um gaseificador de leito fluidizado em escala piloto (aproximadamente 250 kg/h de combustível), testando a gaseificação de bagaço de cana em *pellets*, com 10% de umidade. Este equipamento operava com pressão atmosférica, com injeção de combustível e agentes gaseificantes na parte inferior. Ar ou oxigênio eram injetados acima do leito para garantir o craqueamento de alcatrões. O rendimento do gaseificador variava entre 40 e 55%. A Tabela 7 apresenta as propriedades dos gases obtidos e do bagaço empregado. (SANTOS 2006; KRAUSE, 1999)

**Tabela 7 – Propriedades dos Gases obtidos – IPT**

Componente	Composição do gás (% molar )
N <sub>2</sub>	27,15
CO <sub>2</sub>	12,05
CO	15,72
H <sub>2</sub>	11,90
CH <sub>4</sub>	4,65
H <sub>2</sub> O	27,81
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	7,00
H <sub>2</sub> S	0,0003
Combustível	% de umidade
Bagaço em briquete	15
Poder calorífico inferior (kJ/kg)	5100

Fonte: KRAUSE, 1999

Ainda com o CENBIO foi assinado em 1998 o projeto “Promoção de Investimentos Conjuntos Brasil/União Européia para Geração de Eletricidade a partir de biomassa no

Brasil”, patrocinado pelo programa THERMI, desenvolvido no Brasil pelo CENBIO/Centro Nacional de Referência em Biomassa, *Biomass Users Network* do Brasil e, na Europa, por várias instituições coordenadas pelo CEEETA (Centro dos Estudos da Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal) (COELHO, 1999)

Outras experiências ainda foram executadas como, por exemplo, o gaseificador da CEMIG (Companhias Elétricas de Minas Gerais), que juntamente com o CETEC (Centro Tecnológico de Minas Gerais) produziram um equipamento de pequena potência (até 15 HP ou 11,2 kW) a carvão vegetal em escala laboratorial, hoje fora de operação; o Projeto Ribeirinha, um convênio com a ELETROBRÁS, CEPEL, CEAM e UFAM que operava um gaseificador cujo projeto era indiano e que hoje se encontra parado por problemas no grupo gerador; o convênio da COOPERSUCAR com o PNUD, coordenado pelo MCT em 1997, utilizando bagaço e palha de cana; e ainda o projeto desenvolvido na Universidade do Pará com uma unidade com resíduos de madeira, a WBP-SIGAME experimentaram resíduos de madeira. (SANTOS 2006, COELHO, 1999)

No Rio Grande do Sul a CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul) executou um programa de testes com *chips* de eucalipto e casca de arroz e acácio em um gaseificador de leito fluidizado, com potência nominal de 1 Gcal/h (420MJ/h ou 1,2 MW), que foi convertido para gaseificador pressurizado de carvão mineral pelo projeto CIGAS.

A mesma CIENTEC-RS, juntamente com CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), ELETROBRAS, empresas de consultoria além do próprio governo federal e empresas européias (*Shell International*, TPS, e Bioflow) deram início ao projeto SIGAME – Sistema de Gaseificação Integrada de Madeira para Geração de Eletricidade – *Brazilian Demonstration Project*. O projeto era estruturado em cinco fases e ao início de cada fase o seu financiamento era negociado, o que permitia a participação de várias entidades, como a *Rockefeller Foundation*, a *Winrock International*, a *Environment Protection Agency* (EPA/USA) e o *Global Environmental Foundation* (GEF). O objetivo final do projeto era a operação comercial de uma unidade de gaseificação de biomassa e alimentação de um ciclo combinado, alimentada com madeira e produzindo cerca de 30 MW. A unidade seria construída no interior da Bahia (COELHO, 1999).

Uma parceria da ELETROBRÁS com a LIGHT desenvolveu um gaseificador para operação dual de gás com diesel em motores ciclo Otto. (KRAUSE 1990)

Ressalta-se ainda a iniciativa da CESP (Companhia Energética de São Paulo), que celebrou um contrato juntamente com a Rheinbraun (RFA) para testes de gaseificação de eucalipto em gaseificadores HTW (*High Temperature Winkler*), com planos de implantar gaseificador em leito fluidizado para lenha e bagaço de cana (principalmente para produção de metanol).

O Brasil teve outros projetos anteriores aos citados acima. Dentre os projetos mais antigos destacam-se (KRAUSE 1990):

- Avimec – gaseificador contracorrente, com uso indicado para lenha e carvão vegetal, e opera levemente pressurizado, com sistema de lavagem de gases de coluna com cavacos de madeira. Quase todas as unidades vendidas eram destinadas ao uso *dual – fuel* em motores do ciclo Diesel e em 1990 já estavam paralisadas. Pouco antes da paralisação a Avimec vendeu sua tecnologia pra a empresa Gaspel que vislumbrava iniciar a comercialização com melhorias.
- GTI – Grupo Técnico industrial – produzia dois tipos de gaseificadores, sendo um vertical de leito fixo (tendo como combustível lenha de metro, sem corte para obter custos mais baixos de processamento do combustível) e outro rotativo, para carvão vegetal. Em ambos os casos a parcela de gás gerada é reinjetada junto aos agentes gaseificantes (ar e vapor d'água) para resfriamento de grelhas. Fabricados com potências de 1 a 7,5 Gcal/h (entre 420MJ/h ou 1,2 MW e 31,4 GJ/h ou 8,7 MW), eram normalmente acoplados diretamente a fornos de cal.
- Industrial Conventos – gaseificador do tipo leito fixo, contra corrente, com potencial nominal de 5Gcal/h (cerca de 21 GJ/h ou 5,8 MW), normalmente com um sistema de lavagem de gases acoplados e utilizados principalmente em fornos cerâmicos. Na década de 90 era usado com carvão vegetal devido a problemas de poluição de água dos lavadores (presença de alcatrão, fenóis, etc.). Foram comercializadas cerca de 40 unidades e estavam em operação até 1990.

- Riedhommer – produção de gaseificadores inicializada em 1980, foi encerrada na década seguinte pela baixa economicidade. Gaseificadores contracorrente com complexo sistema de lavagem de gases, com 20 unidades com potência nominal de 5Gcal/h (cerca de 21 GJ/h ou 5,8 MW) vendidas e em funcionamento até 1988.
- Scheffer – gaseificador do tipo co-corrente fabricado pela Gasogênio do Brasil Ltda., projetado para trabalhar com lenha até 20 cm. Os gases são lavados em colunas com lascas de aço e passam por filtro de espuma. As unidades vendidas eram destinadas unicamente ao uso *dual – fuel* em motores do ciclo Diesel (170 HP). Em 1990 metade dos gaseificadores ainda estava em operação.
- Siqueroli, – fabricante que iniciou a produção em 1979 e interrompeu no fim dos anos 80, tendo produzido mais de 1000 gaseificadores (principalmente para acoplamento em pequenos motores Ciclo Otto). Gaseificadores do tipo misto (fogo cruzado), com grelha vertical, camisa d'água e sem refratário (baixo custo). Para tratamento dos gases é provido de ciclone e filtro de papel.
- Technor – gaseificadores de leito fixo, co-corrente, resfriado por camisa d'água, sem utilização de refratários e trabalha pressurizado. Utiliza como combustível principalmente lenha em toras e tem potência nominal de 6 Gcal/h (cerca de 25 GJ/h ou 6,9 MW). Sua comercialização foi direcionada para usinas asfálticas, principalmente em locais afastados dos grandes centros urbanos.
- Voith – gaseificadores do tipo leito fixo com fluxo misto, com processo de reciclo e evaporação de fenóis e fabricados com potência nominal entre 1 e 9 Gcal/h (entre 4,2 GJ/h ou 1,2 MW e 37,7 GJ/h ou 10,4 MW). O gaseificador trabalha levemente pressurizado, tendo como combustíveis principais a lenha e o carvão vegetal. Apresenta-se em projeto multi-célula e sua comercialização foi direcionada para a indústria de cerâmica, e já se encontrava estagnada na década de 90.

Uma vez que já foram expostas as reações dos processos de gaseificação e as tecnologias disponíveis para viabilizar esta tecnologia, cabe ressaltar quais são os passos seguintes que possibilitam a geração de energia elétrica. Para que a biomassa utilizada na gaseificação gere energia elétrica é necessário que o sistema de gaseificação seja acoplado a turbinas a gás e motores de combustão interna. Para que

a produção de eletricidade ocorra de forma eficiente, os gases de escape da turbina precisam ser aproveitados em sistemas de cogeração, na produção de vapor para alimentar as turbinas a vapor do ciclo combinado, ou ainda na produção de vapor a ser injetado na própria turbina a gás. A utilização da gaseificação em motores de combustão interna é tradicionalmente explorada em unidades de pequeno porte, geralmente em regiões com restrições de fornecimento de energia pela rede (COELHO, 1999).

### **3.6 Termelétricidade**

Uma vez que neste capítulo foram abordados os diversos processos viáveis econômica e ecologicamente para obtenção de gás advindo dos gaseificadores, cabe mostrar quais são as alternativas existentes para o aproveitamento energético desses gases.

No Brasil, a dominância absoluta da geração hidrelétrica representa uma inegável vantagem comparativa para nossa sociedade no que diz respeito à energia renovável. Trata-se de uma energia abundante, uma vez que grande parte do potencial hidrelétrico permanece inexplorado, e barata. Entretanto, devido à vastidão do nosso território, as usinas hidrelétricas situam-se na maior parte das vezes distantes de onde se estabeleceram os principais centros consumidores, levando à construção de longas linhas de transmissão.

Do ponto de vista do planejamento energético, as usinas termelétricas constituem alternativas competitivas devido ao seu reduzido tempo de construção, baixo custo de capital e ser uma tecnologia madura. As usinas termelétricas apresentam como vantagem sua mobilidade. Desta forma o atendimento aos sistemas isolados é um importante nicho para as usinas termelétricas, além de serem mais atrativas aos investimentos privados, importantes atores no setor energético, dada a restrita capacidade de financiamento do setor público para investimento no parque gerador (MARRECO, 2007). Vale ressaltar que a quase totalidade das plantas termelétricas brasileiras foi implantada com base em grandes pacotes importados, à exceção de unidades para queima de lenha e centrais de matéria prima de alguns pólos industriais. (KRAUSE, 1990)

O uso de termelétricas é possível graças ao aproveitamento da energia contida nos insumos energéticos. A produção de energia mecânica ou elétrica a partir da transformação da energia química contida nos combustíveis só é possível através de

processos realizados por diversos equipamentos cuja construção é baseada em alguns dos vários ciclos termodinâmicos. Dizemos que um gás executa um ciclo termodinâmico quando ele é submetido a transformações repetitivas de condições termodinâmicas, retornando a cada vez às suas condições originais. Na prática, os ciclos termodinâmicos são usados para produzir trabalho (motores, turbinas), aquecimento ou refrigeração. No entanto, não é necessário que a mesma massa de gás execute cada ciclo. O principal é que os estados termodinâmicos sejam repetitivos (HENRIQUES, 2004). A utilização de combustíveis gasosos pode dar-se via queima em caldeiras, o Ciclo Brayton e o Ciclo Rankine para turbinas, ou em motores de combustão interna, os Ciclo Otto e Ciclo Diesel (CORREA NETO, 2001).

Várias mudanças no processo de tecnologia de geração termelétrica estão em andamento no mundo, cujo objetivo é a aplicação de novas e eficientes plantas baseadas em turbinas a gás. Os principais agentes desta transformação são o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de controle, da dinâmica do fluido, da metalurgia e de novos materiais.

Os ciclos a vapor hoje encontram seu avanço limitado pela maturidade da tecnologia, ao menos no que diz respeito a máquina motriz. Entretanto as turbinas a vapor desempenham importante papel nestas mudanças, participando em uma nova posição nos ciclos térmicos com recuperação de calor, tais como os ciclos de cogeração e os ciclos combinados (CORREA NETO, 2001).

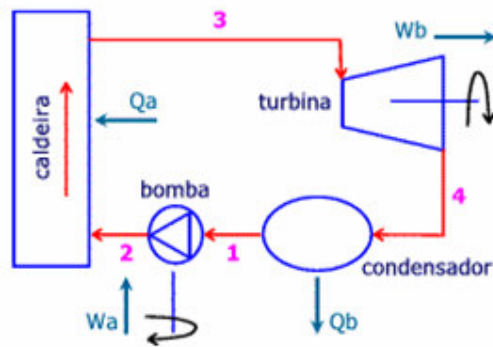
### **3.6.1 Turbinas a Vapor**

Pela Segunda Lei da Termodinâmica fica determinado que a máxima eficiência na conversão de calor em trabalho é obtida quando a operação do ciclo é reversível, com o calor sendo absorvido a uma temperatura elevada constante e rejeitado a uma temperatura baixa, também constante (Ciclo de Carnot). Para as máquinas a vapor, a eficiência aumenta quando a temperatura da fonte térmica também aumenta. Portanto, o fluido na máquina térmica deveria absorver a energia na temperatura mais elevada possível a fim de tornar a operação mais eficiente. Para que este fato ocorra a uma temperatura constante é necessário que haja mudança de fase do fluido que recebe calor. Em elevadas temperaturas isso significa, praticamente, que o fluido passa de uma fase líquida para uma fase vapor, absorvendo neste processo calor latente de vaporização. Numa usina termelétrica, alimentada por combustível convencional, o fluido mais desejável é aquele que pode ser vaporizado a uma temperatura um pouco inferior à do ponto de ebulição do combustível e em pressões suficientemente baixas para que o

equipamento possa ser montado sem muitos empecilhos. A água tem um elevado calor latente, não é tóxica e a temperatura e pressão que ela pode ser vaporizada são limitadas pela resistência estrutural do material da caldeira. (SMITH, VAN NESS, 1980).

A tecnologia das turbinas a vapor, conhecida e aplicada desde o final do século XIX, foi dominante no panorama mundial de geração do século XX, atingiu seu limite de desenvolvimento na década de 60 do mesmo século e até hoje está estagnado (KRAUSE, 1990). Turbinas a vapor estão disponíveis no mercado em uma ampla faixa de potência, contrastando com motores alternativos e turbinas a gás. Existe uma variada gama de tipos e modelos de turbinas a vapor, cada qual com características adequadas a uma determinada aplicação. Os modelos mais simples são as turbinas de um estágio, que se encontram disponíveis nas menores faixas de potência nominal (normalmente entre 50 e 2.000 kWe). Turbinas de múltiplos estágios, mais eficientes, podem atingir a potência nominal na ordem de 10.000 kWe (SZKLO, 2001)

Nos ciclos que utilizam caldeiras, a queima do combustível ocorre na parte interna do equipamento, e é também por onde passam os tubos contendo água ou algum outro fluido. A queima provoca a transferência de energia química do combustível em energia térmica, o que ocasionará o aquecimento, vaporização e eventual super aquecimento do fluido na caldeira. O vapor lá produzido irá expandir-se em uma turbina gerando trabalho, ou energia elétrica caso esta esteja acoplada a um alternador. O vapor saturado egresso da turbina volta à condição de líquido em um condensador, conforme ilustrado na Figura 19, compreendendo um Ciclo Rankine convencional (KRAUSE, 1990). A turbina a vapor é aplicada tradicionalmente a combustíveis fósseis menos nobres e mais poluentes, tais como óleos pesados e derivados de petróleo (CORREA NETO, 2001).



**Figura 19 – Ciclo Rankine convencional**

Fonte: HENRIQUES, 2004

O desenvolvimento dos ciclos termelétricos com turbinas a vapor atingiu um ápice de eficiência entre 38% e 40% em centrais com centenas de MWs de potência e complexas configurações com temperaturas de vapor máximas na faixa dos 540°C a 560°C. Grandes esforços foram feitos para tentar elevar o desempenho destes ciclos, mas não obtiveram sucesso. Sua eficiência chegou a 48% com o desenvolvimento de soluções técnicas e pesquisas sobre as perdas termodinâmicas. Entretanto, embora viáveis tecnicamente, essas soluções encontram barreiras econômicas (CORREA NETO, 2001).

Para alcançar as eficiências mais elevadas os ciclos de vapor necessitam de complexo sistema de geração de vapor que inclui diversos trocadores de calor, entre eles aquecedores de ar, aquecedores intermediários, economizadores, superaquecedores e condensadores. Atualmente o desempenho de modernas plantas de geração a vapor está sendo dificultada pelas solicitações dos sistemas de controle ambiental. Com o crescimento dos controles e restrições ambientais, aumentaram os custos econômicos de instalação e operação e o próprio consumo da unidade com sistemas auxiliares, reduzindo a eficiência global do ciclo vapor.

### 3.6.2 Turbinas de Combustão

As turbinas a gás, ou turbinas de combustão, são máquinas motrizes de combustão interna, pois a energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, composto pelo ar comprimido misturado aos gases de combustão, sem a necessidade de trocadores de calor para transferir energia entre a fonte de calor e o

fluido de trabalho ou entre o fluido e o meio ambiente, uma vez que os gases de exaustão são descarregados diretamente na atmosfera (CORREA NETO, 2001).

A inexistência de volumosos trocadores de calor faz da turbina a gás um motor compacto e leve, de melhor custo, de fácil transporte e instalação, não necessita de meios refrigerantes e que tem ainda como vantagem a capacidade de partir e atingir a plena carga em poucos minutos (no caso da turbina a vapor este processo leva horas).

A queima do gás em turbinas de combustão corresponde a maior parte das instalações mundiais para o uso de termoelectricidade. Elas são usadas no setor elétrico desde os anos 40 e seu desenvolvimento deu-se principalmente devido à sua utilização nas indústrias aeronáutica e militar (CORREA NETO, 2001; KRAUSE, 1990).

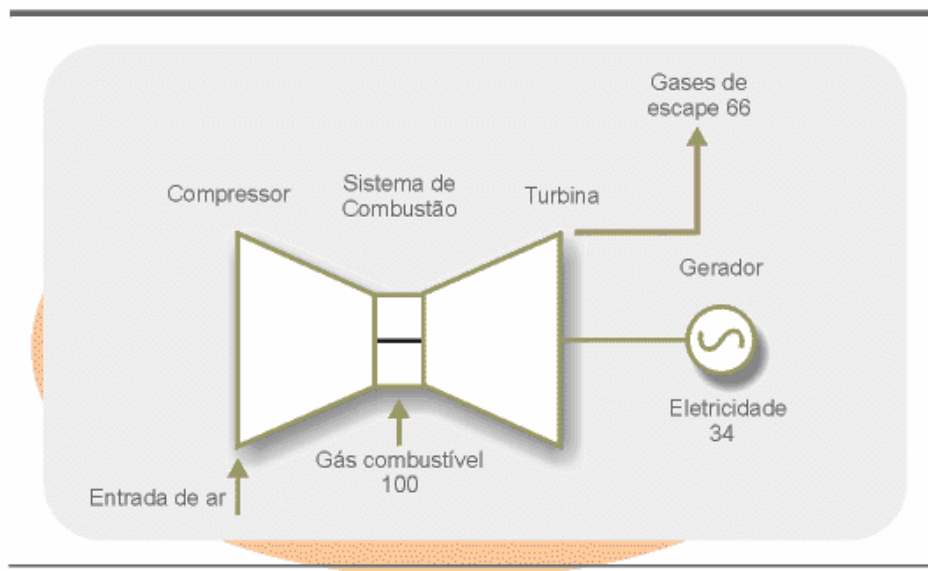
Essas turbinas são classificadas em dois tipos principais: (i) aeroderivativas – com base nos modelos utilizados na indústria aeronáutica, apresentando maior relação potência/peso, eficiência e facilidade para acompanhar variações de carga; e (ii) industriais – *heavy duty* – mais simples e robustas, de maior vida útil, resistente a ambientes agressivos e mais flexíveis quanto aos combustíveis. (KRAUSE, 1990)

Até 1960 eram produzidas unidades de até 25 MW, com eficiências térmicas na ordem de 20-30%. Na década de 1990 tinham potência nominal de até 150 MW, com eficiência de até 34% (KRAUSE, 1990) e hoje chegam a 160MW (SIEMENS, 2008). Na década de 1980 a utilização desses equipamentos sofreu forte retração, em função do preço do gás natural e dos derivados de petróleo. A queda dos preços atrelada ao aumento da eficiência alcançada nas turbinas a gás e principalmente a expansão da cogeração, implicaram em novo crescimento de mercado. Assim, nesta mesma década outras aplicações começaram a ocorrer fora da aviação, mas as características termodinâmicas e técnicas das turbinas a gás de então restringiram sua aplicação estacionária a segmentos tais como:

- *Peak Shaving*: geração em horário de ponta, quando a usina da base não atende a demanda integralmente;
- *Stand by*: geração na ocorrência de falha no suprimento principal;

- Emergência: devido a sua portabilidade, é aplicada para atender temporariamente as necessidades de potência em emergências e regiões de difícil acesso.

Para essas aplicações são importantes: o baixo custo específico da instalação, o curto espaço de tempo entre o comissionamento e a operação comercial, a rapidez de partida e de disponibilidade da máxima carga e a flexibilidade para suportar as variações bruscas de carga (CORREA NETO, 2001). A Figura 20 mostra o esquema de um sistema com turbina a gás, com o fluxo numérico de energia da unidade.



**Figura 20 – Turbina a gás com fluxo numérico de energia**

Fonte: GASNET, 2008

As turbinas a combustão (ciclo Brayton) são acionadas pela expansão de gases quentes provenientes da queima contínua de combustíveis. Com um compressor centrífugo, a turbina e o compressor podem operar num mesmo eixo, como parte do trabalho da turbina usado para movimentar o compressor.

O ciclo térmico baseia-se na elevação da pressão do ar em um compressor, passando o ar comprimido em uma (ou várias) câmaras de combustão a uma pressão de cerca de 13 bar, onde a queima de um combustível eleva a temperatura da mistura, que se expande em uma turbina. A eficiência é relativamente baixa (34%), principalmente pelo trabalho despendido no compressor (até 50% da potência útil) e pela energia contida nos gases de exaustão (450°C – 550°C). Dentre os principais parâmetros

associados à eficiência da turbina estão a taxa de compressão e a temperatura de admissão. Quanto mais elevada for a temperatura dos gases de combustão que entram na turbina, mais elevada será a eficiência (razão entre o trabalho líquido produzido e o calor absorvido) da unidade. Deve-se, no entanto, levar em conta os limites práticos e econômicos quanto a materiais e sistemas de resfriamento da turbina. Uma vez que esta temperatura depende da taxa de transferência de calor dos gases, quaisquer meios de reduzir a taxa de transferência e de resfriar as lâminas permitem a operação com temperaturas mais elevadas do gás. Esta temperatura atualmente está entre 1000°C e 1425°C, as taxas de compressão entre 10 e 14 e a vazão de até 500kg/s para uma potência de 150 MW.(KRAUSE, 1990; SZKLO, 2001).

Os ciclos de geração termelétricas baseados em turbinas a gás encontram-se em estágio maduro de confiabilidade e eficiência apresentando ainda expressiva vantagem com redução do impacto ambiental e um enorme potencial de desenvolvimento técnico com conseqüente elevação da eficiência global. Além disso, plantas térmicas baseadas em turbinas a gás têm apresentado um custo de geração decrescente, principalmente graças ao aumento de eficiência dos equipamentos de geração, que deve ser atribuído, particularmente, ao emprego de materiais resistentes a altas temperaturas e ao resfriamento das palhetas, que permitiram elevar a temperatura de entrada dos gases (SZKLO, 2001).

Os motores de combustão interna diferem em muito das máquinas a vapor. Enquanto as máquinas a vapor operam com um fluido inerte ao qual se deve transferir o calor proveniente de uma forma externa (o combustível), a máquina de combustão interna emprega uma mistura do próprio combustível como o fluido operante, e com isso a energia térmica do processo de combustão é disponível no interior da máquina motriz, e.g., dentro de um conjunto cilindro e pistão.

Outra diferença importante entre os dois tipos de máquina é que o fluido na máquina a vapor passa por um ciclo de processos e retorna ao seu estado original depois de cada ciclo, o que não ocorre no motor de combustão interna. Como a mistura de combustível e ar é queimada e os produtos da combustão são expelidos para a vizinhança, este processo, sob o ponto de vista termodinâmico, não é considerado completamente cíclico. Este motor pode ser construído em modelos pequenos e compactos, para aplicações não estacionárias, além de operar em elevadas temperaturas, o que eleva a eficiência do processo.

A análise dos motores Otto e Diesel<sup>16</sup> mostra que a utilização direta de energia dos gases a alta temperatura e elevada pressão, sem transferência de calor externo, apresenta certas vantagens como fonte de energia. Entretanto a turbina é mais eficiente que o pistão alternativo na utilização de energia, principalmente tendo em vista o atrito que acompanha a inversão contínua do movimento do pistão e o atrito na operação das válvulas. A turbina a gás de combustão é a consequência das tentativas de combinar numa só unidade as vantagens do motor de combustão interna com as da turbina.

Uma vez que essas turbinas apresentam baixo rendimento, outros ciclos foram criados objetivando principalmente recuperar a energia contida nos gases exaustos da turbina. Dentre eles destaca-se o ciclo combinado.

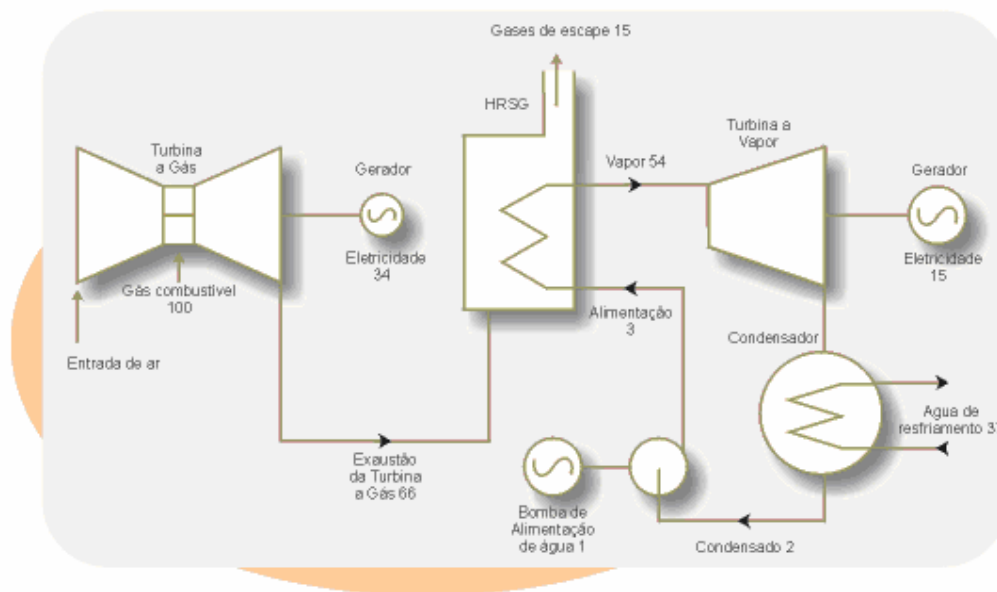
### **3.6.3 Ciclo Combinado**

Um ciclo combinado é uma central termelétrica constituída por dois ou mais ciclos termodinâmicos em uma mesma planta cuja finalidade exclusiva é produzir energia elétrica. (CORREA NETO, 2001).

Podem ser combinados diferentes máquinas térmicas e processos, trabalhando com o mesmo fluido ou fluidos distintos, e podem ser construídos ciclos empregando as mais diferentes substâncias. Contudo, o ciclo combinado que apresenta maior aplicação é o ciclo cujo sistema utiliza uma turbina a gás (ciclo Brayton) associada a uma turbina a vapor (ciclo Rankine), esquematicamente representado na Figura 21, com o fluxo numérico de energia da unidade.

---

<sup>16</sup> A principal diferença entre um motor Diesel e um motor Otto é que este possui uma temperatura final do processo de compressão tão elevada que a combustão se inicia espontaneamente. Esta temperatura é alcançada mediante a continuação da etapa de compressão até uma pressão mais alta ou até uma razão de compressão maior. O combustível só é injetado ao término da compressão, de forma muito lenta em relação ao movimento do pistão, para que o processo de combustão ocorra, idealmente, a uma pressão constante. Em geral o motor Otto é mais eficiente que o motor Diesel para a mesma razão de compressão. Entretanto, a pré – ignição mostra dificuldades no motor Otto, limitando sua razão de compressão. Como o motor Diesel possibilita maiores taxas, acaba se tornando mais eficiente (SMITH, VAN NESS, 1980).



**Figura 21 – Ciclo Combinado Simplificado com fluxo numérico de energia**

Fonte: GASNET, 2008

A energia contida nos gases quentes exaustos advindos das turbinas à gás é utilizada para produzir vapor em uma caldeira da recuperação. Este vapor é utilizado como fluido de acionamento da turbina a vapor para gerar trabalho adicional. A turbina a vapor deve ser do tipo condensação, pois após o vapor realizar trabalho na turbina é encaminhado para o condensador, e depois de condensado retorna em ciclo fechado para a caldeira, onde vaporizar-se-á no ciclo seguinte.

Neste ciclo a eficiência térmica pode atingir 50%, sendo as tecnologias associadas completamente dominadas. Em ciclos combinados comerciais esses valores podem oscilar entre 55 e 60%.

Para gaseificação o sistema mais usado é o de ciclo combinado (IGCC – Sistemas Integrados de Gaseificação e Ciclo Combinado).

### 3.6.4 Eficiência do processo de gaseificação

O desenvolvimento de tecnologias que viabilizam a utilização das fontes de energia renováveis tem crescido muito nas últimas décadas. Pesquisas importantes têm sido realizadas e muitos avanços já podem ser notados. No entanto, mesmo processos com elevado grau de desenvolvimento, responsáveis pela transformação das

diferentes formas de energia, não alcançam eficiência de 100%. Por outro lado, os métodos atuais do uso de energia molecular ou nuclear em grande escala estão baseados na evolução da energia em forma térmica com a conversão posterior de parte do calor em trabalho útil, e a eficiência de todos esses processos é baixa (raros são os valores maiores que 30%), apesar do aperfeiçoamento dos projetos dos equipamentos. Isto é consequência da Segunda Lei da Termodinâmica. Caso fosse descoberto um meio de converter a energia dos combustíveis em trabalho, sem a geração intermediária de calor, a eficiência da conversão poderia ser consideravelmente melhorada. As pilhas combustíveis, por exemplo, têm eficiência média entre 65% e 80%, aproximadamente o dobro do que se obtém pelos processos convencionais de conversão inicial de energia química em calor (SMITH, VAN NESS, 1980).

Uma das tecnologias utilizadas com o objetivo de maximizar a conversão de energia dos combustíveis em trabalho é a gaseificação. Admite-se que a conversão de uma biomassa sólida em gás otimiza este processo de conversão e melhora a eficiência do processo.

#### **3.6.4.1 Processos de conversão**

Conforme já visto, entende-se por gaseificação de biomassa o processo pelo qual a biomassa sólida é decomposta termicamente na presença de controlada oxigênio para produção de gás combustível. O calor requerido para gaseificação é gerado pela combustão parcial da biomassa. O gás produzido tem o poder calorífico entre 4,0 e 6,0 MJ/Nm<sup>3</sup>, ou cerca de 10 a 15% do poder calorífico do gás natural (STASSEN, 1995)

Embora não seja um gás de elevado poder calorífico, o gás produzido pode ser utilizado em motores de combustão interna para produção de energia elétrica, bombeamento d'água, etc. Nessas aplicações o gaseificador é identificado como gaseificador de potência. De outra forma, o gás pode ser utilizado como combustível em queimadores externos para produzir calor para *boilers*, secadores, fornos, dentre outros. Para essas aplicações o sistema de gaseificação é referenciado como gaseificador de aquecimento (STASSEN, 1995, LAPUERTA *et al.*, 2008)

Existem algumas diferenças entre esses dois tipos de gaseificadores. Uma delas refere-se à qualidade do gás. Para o gás utilizado no motor de combustão interna, faz-se necessário que este esteja limpo. Já pra ser queimado em aquecedores, não existem exigências quanto à limpeza do gás.

Os métodos para descrever as saídas<sup>17</sup> de potência e calor também variam. Para gaseificadores de potência, as saídas estão em termos de potência elétrica ( $kW_{et}$ ) que pode ser produzida quando a turbina é conectada ao gerador. Já para o gaseificador de aquecimento, os termos são em valores térmicos ( $kW_{th}$ ) de gás produzido.

Motores Otto e Diesel podem ser utilizados para geração de energia com o gás de gaseificação. No entanto, para motores diesel recomenda-se o uso conjunto de diesel combustível, o que dificulta a aplicação do gás nesses motores.

A máxima potência gerada com o gás produzido é menor do que a gerada utilizando um combustível líquido convencional, fenômeno conhecido como *derating* (modo operacional que visa aumentar a vida útil do material). A eficiência dos motores de gás produzido é, ainda, teoricamente a mesma para motores Otto e diesel. Dependendo um pouco do tamanho, motores Otto podem ter sua eficiência variando entre 20 e 24% enquanto motores diesel variam entre 28 e 32%.

Para os sistemas energéticos em geral, a eficiência global do sistema é definida como a razão entre a taxa de energia liberada pelo sistema na forma de potência e calor e a energia consumida pelo sistema na forma de combustível e é expressa, na maior parte das vezes, em termos percentuais. Para gaseificadores de potência, as saídas podem ser medidas em kilowatt hora elétrico ( $kWh_e$ ) ou kilowatt hora mecânico ( $kWh_{me}$ ) dependendo se o sistema produz energia elétrica ou potência para o eixo. As saídas de calor para o gaseificador de aquecimento podem ser mediadas em kilowatt hora térmicos ( $kWh_{th}$ ), em megajoules (MJ) ou kilocalorias (kcal).

Motores de combustão interna que utilizam gases oriundos do processo de gaseificação de madeira ou casca de arroz possuem eficiência variando entre 7% e 15%. Já gaseificadores de aquecimento mostram eficiência entre 68 e 77%. Deve-se enfatizar que isto se refere somente à energia química do gás, não levando em conta seu calor sensível, o que poderia elevar a eficiência total relativa ao calor para 85 ou 95% (STASSEN, 1995)

Uma maneira para calcular a eficiência dos gaseificadores é ilustrada por FAO (1986). Para gás utilizado em motores, a eficiência é calculada por:

---

<sup>17</sup> Rubrica eletricidade: conjunto de fenômenos naturais que envolvem a existência de cargas elétricas estacionárias ou em movimento; energia elétrica utilizável ou outra forma de energia fornecida por um circuito ou dispositivo (HOUAISS, 2006)

$$\eta_m = \frac{H_g * Q_g}{H_s * M_s} * 100\%$$

Onde:

$\eta_m$  = eficiência do gaseificador (%) (mecânica)

$H_g$  = poder calorífico do gás (kJ/m³)

$Q_g$  = vazão volumétrica do gás (m³/s)

$H_s$  = poder calorífico inferior do combustível gaseificado (kJ/kg)

$M_s$  = consumo do combustível sólido gaseificado (kg/s)

Caso o gás seja utilizado para queima direta, a eficiência do gaseificador é definida como:

$$\eta_{th} = \frac{(H_g * Q_g) + (Q_g * \rho_g * C_p * \Delta T)}{H_s * M_s} * 100\%$$

Onde:

$\eta_{th}$  = eficiência do gaseificador (%) (térmica)

$\rho_g$  = densidade do gás (kg/m³)

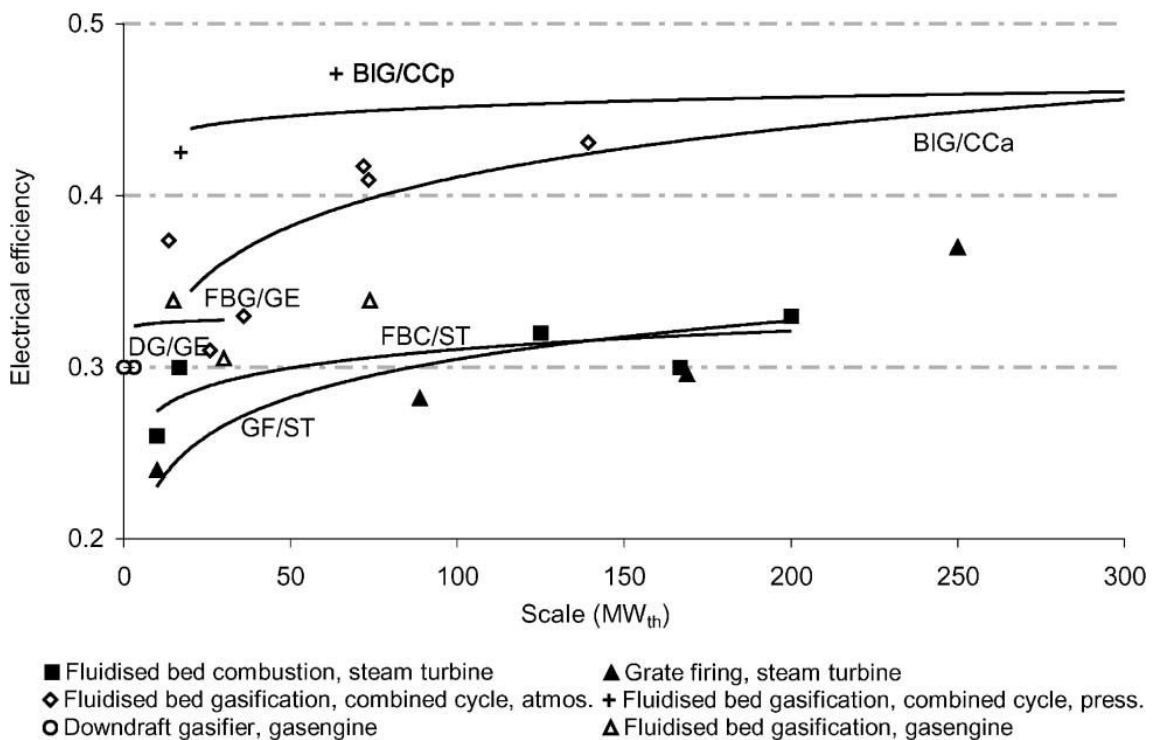
$C_p$  = calor específico do gás (kJ/kg °K)

$\Delta T$  = diferença de temperatura entre o gás na entrada do queimador e o combustível entrando no gaseificador (°K)

Dependendo do tipo e do *design* do gaseificador, bem como das características do combustível, a eficiência mecânica pode variar entre 60 e 75%, já para o caso de aplicações térmicas, esta eficiência pode chegar a 90%.

Para Lapuerta *et al.* (2008) a eficiência mecânica do gaseificador *downdraft* variou entre 15 e 55%, alternando a temperatura e a razão entre ar e biomassa. Um outro exemplo é observado em Karellas *et al.* (2008) em um consórcio de um gaseificador com uma microturbina - eficiência térmica e elétrica entre 45 e 65%; e gaseificador com uma célula combustível, cuja eficiência elétrica é superior a 40% e eficiência total – térmica e elétrica – entre 60 e 80%.

O estudo de Dornburg e Faaij (2001) ilustra a eficiência de alguns gaseificadores e certas opções de geração de energia elétrica, variando a escala do projeto. Pela Figura 22 observa-se que, para a potência de 100 MW, o processo mais eficiente é o de gaseificação em leito fluidizado, ciclo combinado pressurizado, atingindo a eficiência aproximada de 45%. Em seguida observa-se a gaseificação também em leito fluidizado, ciclo combinado à pressão atmosférica. Para este sistema, a eficiência em grandes potências aproxima-se do mesmo processo pressurizado, mas para a potência de 100 MW sua eficiência fica ligeiramente acima dos 40%. Gaseificadores *downdraft* apresentam eficiência de cerca de 30%, ligeiramente abaixo dos gaseificadores de leito fluidizado utilizando motores de combustão interna (eficiência acima de 30%). Além desses, a combustão com turbinas a vapor é considerada, porém sua eficiência em geral é abaixo da presente em processos de gaseificação.



**Figura 22 – Eficiência de plantas de energia elétrica**

Fonte: DORNBURG, FAAIJ, 2001

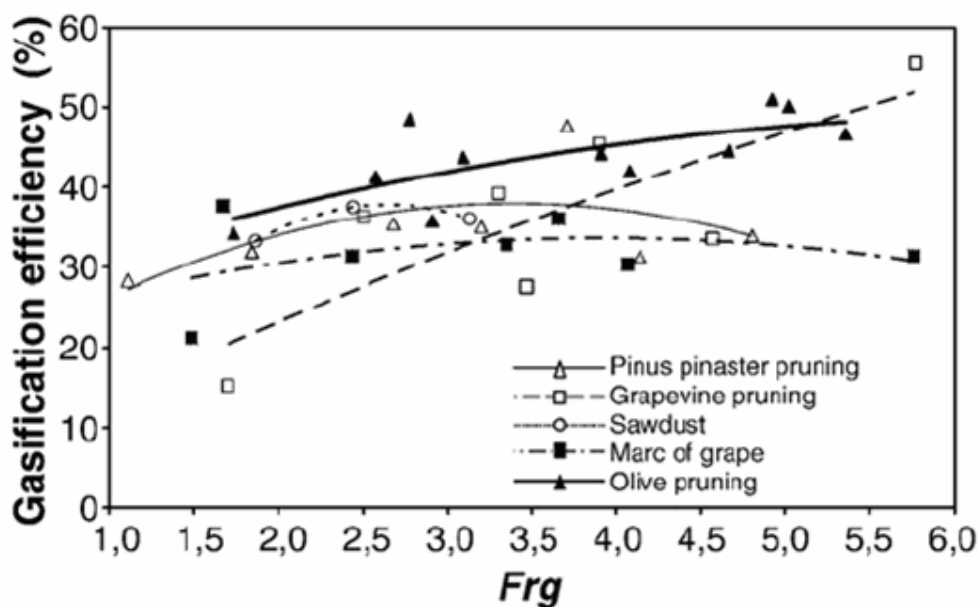
Pode-se imaginar que a gaseificação de diversas biomassas origina gases de características muito diversas. Entretanto, observa-se em estudo liderado por Lapuerta *et al.* (2008) que gaseifica galhos de madeira, de oliveira, de parreiras, serragem, resíduos de vinhedos (restos de uvas sem o suco) e uma mistura de carvão e coque que o poder calorífico do gás de síntese obtido não difere significativamente entre as biomassas, embora exista uma variação na eficiência do processo (Gráfico 4, Tabela

8). Valores similares foram encontrados por Franco *et al.* (2003), gaseificando pínus, eucalipto e carvalho.

**Tabela 8 – Diferentes Biomassas e Poder calorífico do gás**

Biomassa	LHV (MJ/kg)
Galhos de pinus <sup>2</sup>	19,99
Pinus <sup>1</sup>	20,2
Galhos de Oliveiras <sup>2</sup>	19,99
Galhos de Parreiras <sup>2</sup>	17,91
Serragem <sup>2</sup>	20,47
Resíduos de vinhedo <sup>2</sup>	19,51
Carvão e Coque <sup>2</sup>	22,50
Carvalho <sup>1</sup>	19,45
Eucalipto <sup>1</sup>	21,25

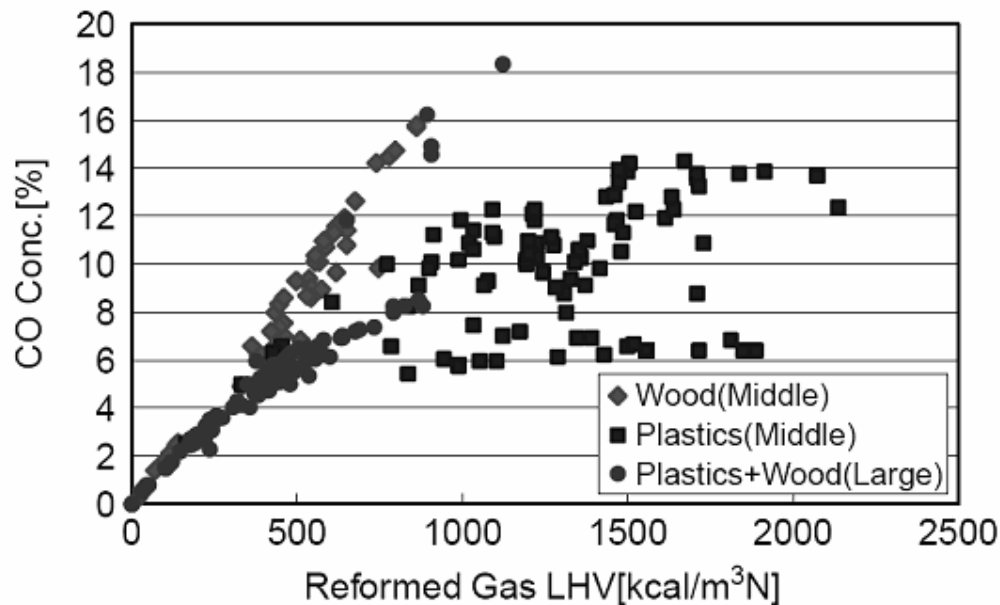
Fonte: <sup>1</sup>Franco *et al.*, 2003; <sup>2</sup>Lapuerta *et al.*, 2008



**Gráfico 4 – Eficiência da gaseificação versus razão biomassa/ar de entrada (Frg)**

Fonte: LAPUERTA, FAALJ, 2008

Em estudo desenvolvido por Yoshikawa (2006) com plantas de gaseificação de tamanhos pequeno (20 kW), médio (50-100 kW) e grande (600 kW), usando madeira úmida (na planta de pequena escala), madeira e plástico separadamente na planta de média escala e uma mistura de madeira e plástico (proporção de 63:37) na planta de grande escala, ele conclui que as plantas de tamanho médio e grande alcançam eficiência acima de 60% (razão de energia que entra e sai) e a concentração de CO varia em cada caso, como pode ser observado no Gráfico 5.



**Gráfico 5 – Concentração de CO<sub>2</sub> versus poder calorífico do gás**

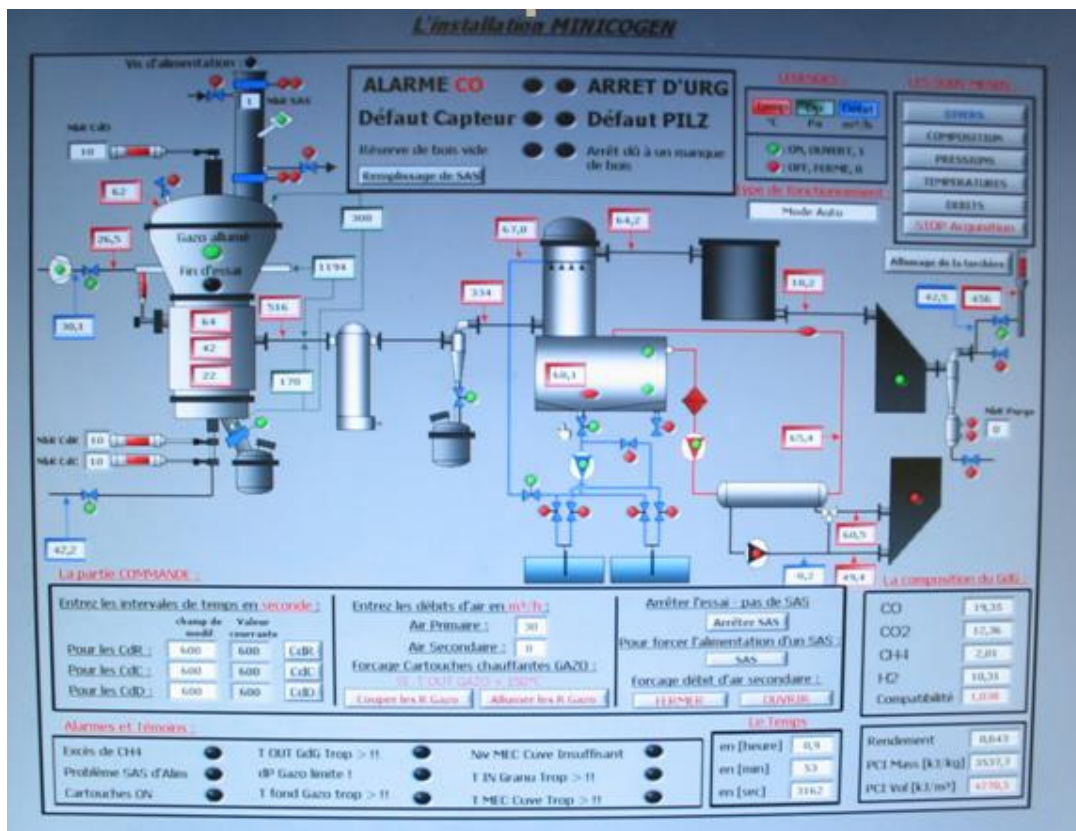
Fonte: YOSHIKAWA, 2006

Outro estudo com a mistura de madeira e plástico (60% de madeira e 40% de plástico) obtém gás de síntese com poder calorífico aproximado ao adquirido com os outros materiais. Neste estudo, liderado por Pinto *et al.* (2002), em gaseificador de leito fluidizado, observa-se que a concentração de CO no gás produzido oscila com a temperatura do leito (aumenta com o aumento da temperatura), e a concentração do hidrogênio (H<sub>2</sub>) tem o mesmo comportamento.

Quando analisada a eficiência térmica de acordo com o modelo de gaseificador utilizado para geração de energia, observa-se alguma semelhança. Wu *et al.* (2002) analisaram um gaseificador *downdraft* operando com cavacos de madeira (pequena escala, 2,0 – 3,0 kW) e um gaseificador de leito fluidizado operando com cascas de arroz e cavacos de madeira (grande escala, 1,0 – 1,2 MW). A eficiência foi de 70% para o *downdraft* e entre 67 – 75 % para o de leito fluidizado. Na planta piloto belga<sup>18</sup> (utilizada para execução de parte deste trabalho) a eficiência era da ordem de 64%, embora o poder calorífico do gás advindo do gaseificador *downdraft* utilizando cavaco de madeira fosse baixo, 3,5 MJ/kg. A Figura 23 a seguir ilustra a interface computacional que representa a planta piloto de gaseificação utilizada para o experimento. Dados operacionais podem ser observados na Figura 23 .

<sup>18</sup>

Parte deste doutorado foi realizado na Universidade Católica de Louvain, na Bélgica, dentro do departamento de Engenharia Mecânica, em uma planta piloto de gaseificação. O próximo capítulo descreverá detalhes do trabalho executado.



**Figura 23 – Interface computacional da Planta piloto Belga**

Fonte: autora, 2006

Quando analisada a eficiência, levando em consideração o processo utilizado para geração de energia, outros números tornam-se evidentes. Ao considerar várias plantas a carvão, o Laboratório Nacional Tecnológico de Energia do governo americano (NETL, 2003) mostrou que a média da eficiência térmica para plantas de IGCC era cerca de 40%, e o estudo aponta perspectivas que este número chegue a 50% com a maturação da tecnologia. Número similar é encontrado por Corti e Lombardi (2004) onde uma planta de IGCC com captura de CO<sub>2</sub> é analisada e é encontrada uma eficiência de 36%.

No capítulo anterior foi mencionada a perda de eficiência de algumas plantas ao executarem o seqüestro de CO<sub>2</sub>. Embora as potências empregadas sejam diferentes, o cálculo de eficiência é feito e as perdas podem chegar a 10% dependendo do percentual de CO<sub>2</sub> capturado (quanto mais se captura menos eficiente tende ser a planta) (NETL, 2003; DESCAMPS *et al.*, 2008). Resultado teórico similar foi encontrado por Souza – Santos (1999), em estudo analisando a geração de energia com turbina a gás em gaseificador de leite fluidizado com bagaço de cana, onde a eficiência global do processo foi de 44,63%. Menor eficiência é encontrada em Wang

*et al.* (2007) onde um gaseificador de leito fixo é alimentado com cavacos de madeira e óleo leve (71% e 29%, em termos energéticos, respectivamente). A eficiência global do sistema é de 27%.

### **3.7 Conclusões Preliminares**

No Capítulo 3 observou-se que o desenvolvimento da gaseificação deu-se simultaneamente na Inglaterra e na França ao fim do século XVIII, e encontrava-se em estágio avançado de evolução na metade do século XIX. Com a interrupção do fornecimento de derivados de petróleo durante a Segunda Guerra, ocorre uma migração dos gaseificadores para veículos, onde operaram a lenha. No Brasil houve um incentivo federal para que as frotas tivessem parte dos veículos movidos a gaseificadores, e na década de 1980 já havia mais de 1.000 em solo nacional.

O aprofundamento das descrições das etapas de gaseificação constitui um importante passo para o entendimento desta tecnologia. Aqui foi discutida esta fase que funciona como subsídio para melhor compreensão do capítulo seguinte, onde as reações e os produtos gerados por este processo serão discutidos. A gaseificação pode ser desmembrada em vários seguimentos, caracterizando cada fase, a saber: pirólise, oxidação, gaseificação e craqueamento. Estas reações não estão todas dominadas, porém podem ser identificadas em cada seção do gaseificador, independente do modelo adotado.

Dentre os principais tipos de gaseificadores destacam-se os de leito fixo e leito fluidizado, sendo que o primeiro corresponde a maior parte dos gaseificadores existentes. Considerando os gaseificadores de leito fixo identificou-se, principalmente, os co-corrente e contra-corrente. Mais antigos, os gaseificadores contra-corrente (*updraft*) são assim chamados pois o combustível entra no gaseificador no sentido contrário ao do ar. Os co-correntes (*dawndraft*) têm o combustível e o ar entrando no gaseificador no mesmo sentido. Observou-se que o gaseificador de leito fluidizado possui uma tecnologia mais complexa e é utilizado prioritariamente em grandes instalações. As possibilidades de uso a pressão atmosférica ou pressurizados também são citados.

No capítulo enumeraram-se as experiências nacionais com gaseificadores. É identificada a Petrobras como patrocinadora atual dos projetos pilotos de gaseificação. No passado, consórcios entre empresas e universidades foram criados para experimentos com gaseificação.

Sistemas com ciclo combinados e seqüestro de CO<sub>2</sub> representam o mais avançado estágio da tecnologia atual. Novas técnicas de gaseificação *in situ* também têm sido testadas. Além disso, queima com oxigênio puro, consórcio de biomassa e carvão e utilização do gás de síntese para geração de líquidos, através do processo de Fischer-Tropsch são identificadas como a vanguarda desta tecnologia. Observa-se também que embora ocorram variações na biomassa utilizada, o poder calorífico médio do gás gerado altera-se muito pouco.

Concluindo que as tecnologias existentes para geração de energia elétrica, através do uso de turbinas a vapor e de combustão, é explorada bem como o ciclo combinado. Ressalta-se ainda as diferentes eficiências existentes no processo de gaseificação, que podem oscilar entre 40% e 27%, dependendo das condições do processo.

## **4 Análise Experimental – produção de alcatrão e tamanho de partícula na gaseificação**

Reduzir a quantidade de alcatrão formada no processo de gaseificação é um objetivo daqueles que utilizam essa técnica. Entender o porquê de sua gênese e especular sobre os caminhos que podem reduzir a sua formação assume grande importância na expansão do uso gaseificação como alternativa de aproveitamento energético.

Este capítulo apresenta o trabalho desenvolvido na planta piloto de gaseificação, instalada no Departamento de Engenharia Mecânica, unidade de Energia e Biomassa na Universidade Católica de Louvain, em Louvain la Neuve. O estudo desenvolvido nesta planta teve como objetivo verificar a existência de uma relação entre as dimensões dos “cavacos de madeira” e quantidade de alcatrão gerado no processo de gaseificação. Para a consecução dos objetivos foram necessárias horas de ensaio e estudos adicionais que permitiram estabelecer uma equação que representasse uma relação factível entre os dados obtidos através do experimento envolvendo os cavacos de madeira e seus respectivos tamanhos.

A motivação para a investigação presente nesse capítulo tem sua origem nas linhas de pesquisas apresentadas pelo orientador belga Prof. Hervé Jeanmart. Diante dos diversos estudos propostos foi consensuado que dentre os assuntos de interesse à realidade brasileira, incluídos na base de pesquisa do orientador, o tema referente às implicações dos tamanhos variados de cavacos de madeira apresentados no experimento e sua adaptação a realidade da biomassa brasileira. Destarte, este conhecimento serve como base para que, no capítulo seguinte, sejam consideradas diversas biomassas e seu potencial para geração de energia elétrica.

O uso de biomassa residual como fonte de energia tem sido realizado pela humanidade desde a antiguidade, sendo tipicamente empregado em pequenos fornos e algumas formas particulares de aquecedores. Seu uso na Europa foi muito extenso durante a história embora um importante retrocesso nesta prática tenha ocorrido desde a revolução técnico científica, onde a penetração na matriz energética mundial dos combustíveis fósseis minimizou sua importância devido à vários fatores, dentre eles as facilidades de armazenagem e transporte.

Assim, o uso de biomassa como combustível requer alguns procedimentos de transformações prévios. Tais processos podem ser classificados em três grandes grupos:

- Processos físicos (trituração e secagem),
- Processos bioquímicos (como fermentação de álcool e digestão anaeróbica), e,
- Processos termoquímicos realizados a altas temperaturas.

Entre os processos termoquímicos três outros podem ser destacados:

- Combustão,
- Pirólise; e,
- Gaseificação.

A quantidade de ar consumida durante o processo é o parâmetro utilizado na definição de tecnologias de conversão termoquímica. A combustão é entendida como a completa oxidação da carga de biomassa, o que significa que a quantidade de oxigênio é a mínima requerida para converter todo o material combustível presente na carga de biomassa em gases permanentes.

Se a quantidade de oxigênio não alcança o valor mínimo, determinado pelo balanço estequiométrico<sup>19</sup>, os processos termoquímicos são definidos como oxidação incompleta, gaseificação ou pirólise. A Tabela 9 detalha a classificação dos processos termoquímicos e seus vínculos com a presença de ar.

**Tabela 9– Quantidade de oxigênio e Processos de Oxidação**

Processos Termoquímicos	Excesso de ar*
Combustão	$x \geq 1$
Combustão incompleta	$0,5 \leq x < 1$
Gaseificação	$0,2 \leq x < 0,5$
Pirólise	$x < 0,2$

\* representa a quantidade de ar necessária, onde 1 (um) é o mínimo necessário para uma combustão completa

Fonte: (SEYNHAEVE, JEANMART, NAVEZ, 2004)

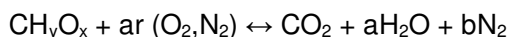
A gaseificação pode ser descrita como um processo termoquímico, transformando um estoque químico de energia de um combustível sólido em combustível gasoso, o qual

<sup>19</sup> Definição dos coeficientes de uma reação química representada na forma de equação onde há preservação da massa, i.e., a quantidade de massa dos reagentes se preserva na massa dos produtos.

possui poder calorífico inferior normalmente a 5 MJ/Nm<sup>3</sup> e as temperaturas do processo alcançam de 700 °C a 900 °C.

Pirólise (do grego pyr, pyrós = fogo + lysis = dissolução) é um processo de degradação térmica, onde as temperaturas são de 200 °C a 500 °C. Assim, ocorre a ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. Neste processo, o poder calorífico inferior do gás originado na pirólise é maior do que no processo de gaseificação, pois este dá origem a produtos durante o processo diferentes dos obtidos através da gaseificação.

A combustão da biomassa é mais complexa que os processos de pirólise ou gaseificação, uma vez que ela deve primeiramente pirolisar, depois ser parcialmente gaseificada antes de ser totalmente consumida pela combustão. A reação global de combustão pode ser representada conforme ilustrado abaixo.



Onde CH<sub>y</sub>O<sub>x</sub> é uma formula típica de biomassa genérica, e “y” representa a quantidade de hidrogênio (normalmente y = 1,4) e “x” representa a quantidade de oxigênio (normalmente x = 0,6). Os coeficientes “a” e “b” quantificam os moles de água e nitrogênio, respectivamente, para cada reação. A Tabela 10 ilustra esta distribuição.

**Tabela 10– Propriedades Térmicas da Biomassa Típica**

Fórmula típica de biomassa seca: CH <sub>1,4</sub> O <sub>0,66</sub> (base livre de cinzas e umidade [MAF])			
	C	H	O
Composição (peso %)	52.2	4.3	41.7
Composição (mole %)	33.3	46.7	20

Fonte: (KLOCK, 2001, PIFFER, 1999; McKENDRY, 2002)

## 4.1 Minimização do alcatrão

Entende-se por alcatrão um conjunto de hidrocarbonetos obtidas pela destilação seca de produtos naturais (carvão mineral, biomassas e madeira) a altas temperaturas. A presença de umidade pode aumentar sua produção. O alcatrão é um líquido viscoso, de cor que vai do castanho escuro ao preto com reflexos esverdeados. Quando bruto, apresenta um cheiro amoniacal, derivado das bases piridínicas presentes em sua composição. Suas propriedades e composição variam de acordo com a origem do produto natural e o processo de pirólise adotado. O alcatrão destilado a temperaturas

elevadas é mais rico em hidrocarbonetos aromáticos do que parafínicos, tem maior relação C/H e menor porcentagem de fenóis.

Muitos dos derivados do alcatrão constituem matérias-primas essenciais para grande número de indústrias. Entre eles se encontram hidrocarbonetos (benzeno, tolueno, xileno, naftaleno), ácidos carboxílicos (fenol, crisol, xilenol, naftol, fenilfenol), bases nitrogenadas (anilina, piridina, quinaldina), substâncias sulfurosas e outros.

Para obtê-los faz-se a destilação fracionada do alcatrão em caldeiras especiais, providas de longas serpentinas, das quais eles são separados, nos respectivos estágios, à proporção a temperatura vai se elevando. Sua divisão em grupos leves, médio e pesados deve-se a isso.

Entre os produtos leves advindos do alcatrão citam-se o benzol, o xilol, o toluol; entre os médios, o fenol e a naftalina; entre os pesados, o antraceno e o creosoto. Todos esses produtos também podem ser refinados, isto é, submetidos a nova e mais intensa destilação, levando a derivados de aplicação na medicina e na indústria. O líquido espesso que fica como resíduo da destilação do alcatrão, de consistência variável conforme a temperatura alcançada, é empregado em trabalhos da via pública, como o piche, na impermeabilização de tetos e na fabricação de vernizes (BIOMANIA, 2008).

Sua presença durante o processo de gaseificação não é desejável mesmo que em pequenas proporções, pois os hidrocarbonetos que o compõem podem se depositar nas partes internas dos motores usados para conversão do gás em vapor (turbinas) ou energia elétrica (motores de combustão), levando a manutenção mais freqüente. Além disso, sua presença é concorrente à formação de um gás com poder calorífico mais elevado.

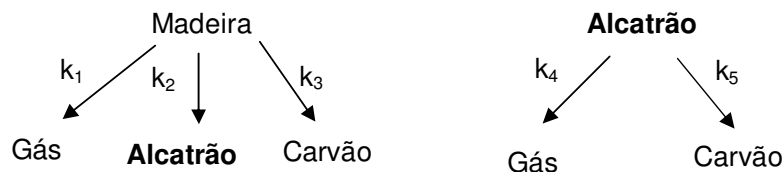
#### **4.1.1 Análise do tamanho da partícula e geração de alcatrão**

Com anteriormente definido o objetivo do estudo foi buscar uma correlação entre tamanho da partícula e a quantidade de alcatrão gerada durante o processo de gaseificação. O alcatrão surge durante o processo, na etapa de pirólise da biomassa.

A secagem da madeira, pirólise e combustão constituem dois domínios separados. As reações ocorrem entre um poro sólido e uma fase gasosa externa, onde a superfície do carvão propicia a interface entre esses dois domínios. Uma vez que a superfície é

aquecida, a madeira é primeiro secada e depois pirolisada por transferência de calor, via radiação e convecção. Uma pequena porção dos gases de pirólise e vapor d'água são convertidos internamente, enquanto uma outra parte desses gases passa através do carvão provocando bolhas na superfície. Os gases de pirólise podem reagir com o oxigênio dentro da camada limite para formação de uma chama que realimenta de energia a superfície. (BRYDEN, RAGLAND, RUTLAND, 2002)

O processo de pirólise possui dois estágios representados da seguinte maneira:



A madeira sofre decomposição térmica de acordo com as reações do primeiro estágio ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ), formando gás, alcatrão e carvão. O alcatrão se decompõe com as reações do segundo estágio ( $k_4$ ,  $k_5$ ) em gases e carvão (BABU, CHAURASIA, 2004).

Uma explicação mais completa para este fenômeno é encontrada em BRYDEN e HAGGE (2002). Eles afirmam que elevadas temperaturas induzem a uma maior produção de alcatrão, resultante do primeiro estágio das reações de pirólise. Em seguida às reações observadas no primeiro estágio, os gases de pirólise passam pelo leito de carvão onde o alcatrão é craqueado, e ao passarem pelo segundo estágio de reações, o alcatrão é “repirolisado” para formar hidrocarbonetos de baixo peso molecular e carvão.

Durante o processo também ocorre o encolhimento das partículas de combustível, o que reduz a resistência interna à transferência de calor para as partes que ainda não reagiram no interior da partícula, devido à redução do efeito isolante do carvão. Este efeito, somado à diminuição do tempo de residência dos gases com a partícula, aumento da temperatura de pirólise e resfriamento do leito de carvão, faz com que haja uma redução significativa na produção de hidrocarbonetos leves e aumento na produção de alcatrão (idem). Devido ao aumento da produção de alcatrão decorrente da elevada temperatura de pirólise, a diminuição do tempo de residência e o resfriamento do leito de carvão, ocorre uma redução na conversão de alcatrão em hidrocarbonetos leves, o que não é desejado, pois trata-se de um sub-produto do processo que onera os gastos com limpeza dos gases advindos da gaseificação. (HORNE, WILLIAMS, 1996; SCHRÖDER, 2004)

Estudos de simulação lidando com os tamanhos limites das partículas e como a transferência de calor altera a cinética da pirólise na biomassa foi mostrada em SIMMONS (1986). Neste estudo é concluído que hemiceluloses<sup>20</sup> de decomposição rápida torna-se limitante a transferência de calor em partículas de dimensões menores do que a decomposição da celulose.

Este assunto também é abordado por GRØNLI (1996), que expõe em seu trabalho que existe uma diferença de o comportamento durante a pirólise entre partículas grandes e pequenas. Devido a esta diferença, a geração de alcatrão tende a aumentar em partículas pequenas.

Outros autores publicaram análises similares relacionando diferentes tamanhos e desempenho da gaseificação. Em HANSON, PATRICK e WALTER (2002) pode ser observado que diferentes tamanhos de carvão realizaram diversas alterações na pirólise. Partículas menores de carvão estavam mais propensas a produzir partículas de cinzas maiores que elas próprias; partículas maiores tinham uma tendência maior à fragmentação. As partículas de carvão fracionadas mostraram uma produção similar de cinzas, sem correlação com as diferentes distribuições de tamanhos de partículas de cinzas resultantes da pirólise. A reatividade das cinzas no ar e CO<sub>2</sub> não revelaram diferenças significativas entre tamanho das frações de cinzas, nem houve gaseificação parcial do vapor no reator de leito de bico (*spouted bed reactor*), utilizado neste experimento.

Diferentes resíduos agrícolas com tamanhos distintos foram estudados por DEMIRBAS (2004), onde foi observado que a produção de carvão aumentava com o incremento do tamanho da partícula da amostra. Foi também ressaltado que pequenas partículas em temperaturas elevadas exibiram elevação na taxa de aquecimento e uma diminuição na produção de carvão. Uma correlação pode ser encontrada neste experimento entre lignina e carvão. Como as matérias primas eram resíduos de oliveira, de espiga de milho e de chá, foi observada uma relação entre elevado teor de lignina no resíduo de oliveira e elevada produção de carvão e alcatrão. É também mencionado no estudo que a lignina contribui com três vezes mais metoxil que a madeira, embora a madeira gere maior produção de carvão e alcatrão.

Um ponto de vista distinto é observado no estudo de JANSE, WESTERHOUT e PRINS (2000), onde o modelo desenvolvido, quando aplicado para diferentes

---

<sup>20</sup> Hemicelulose: parte constituinte da estrutura da madeira.

tamanhos de partículas, não apresenta variação na produção de alcatrão. Este resultado pode ter sido obtido pela utilização de uma equação unidimensional no modelo. No entanto, eles não desconsideram a possibilidade de um segundo craqueamento da molécula de alcatrão nos poros das partículas ou nos seus arredores, o que pode ser negligenciado caso a partícula seja muito pequena.

Já o modelo unidimensional de BRYDEN e HAGGE (2003) simula a contração das partículas de biomassa durante a pirólise. Neste estudo, foi constatado que partículas menores (que sofrem contração) aumentam a produção de alcatrão, pois a formação de um leito delgado de carvão aumenta a temperatura na zona de reação de pirólise, favorecendo a produção de alcatrão. Esta mesma teoria é consensuada por Di Blasi (1996), onde temperaturas mais elevadas no primeiro estágio de reação favorecem o encolhimento das partículas, beneficiando a formação de alcatrão. Conclusão consoante é obtida do estudo de BRYDEN, RAGLAND e RUTLAND (2002), onde afirmam que com o aumento do tamanho da partícula o leito de carvão torna-se mais fino, o que acarreta em maior tempo de residência e decréscimo da produção de alcatrão.

Uma importante correlação entre a produção de alcatrão e velocidade superficial (razão entre a vazão de gás e a seção interna reta transversal do gaseificador) foi encontrada no estudo de YAMAZAKI et alii (2005). Neste trabalho, os autores apontam que uma maior velocidade superficial produz uma maior quantidade de alcatrão devido ao menor tempo de residência e maior impacto entre as moléculas do mesmo, que tenderiam a aglutinar-se. Este mesmo argumento pode ser utilizado para justificar o aumento das partículas de cinzas com o aumento da velocidade superficial.

PETERS e BRUNCH (2003) incorporaram aos estudos de GRØNLI (1996) suas experiências e concluem que, devido à baixa condutividade da madeira, diferenças drásticas de temperatura podem ser encontradas na amostra, demonstrando que apesar de existir um regime limite para transferência de calor na reação, existe também, paralelamente, um regime limite para transferência de calor dentro das grandes partículas. Assim, uma aproximação global baseada na temperatura média não caracteriza o comportamento corretamente.

CAO et alii (2005) mostram que a quantidade de alcatrão formado durante o processo de gaseificação diminui com o aumento da temperatura. Embora não seja dada nenhuma justificativa em seu artigo para tal fato, pode-se conjecturar que o mesmo ocorre devido à maior velocidade cinética das moléculas e, por esta razão, chocam-se mais e

acabam se fragmentando em moléculas menores que as que compõem o conjunto de moléculas que fazem parte do alcatrão.

Respalhando os estudos de CAO et alli (2005), PONZIO, KALISZ, BLASIAK (2006) e Di BLASI (2000), KNOEF (2000) estudou 20 gaseificadores em diversos países em desenvolvimento (Indonésia, Filipinas, Mali, Seicheles, Vanuatu e Burundi) e concluiu que elevados teores de alcatrão podem ser encontrados em temperaturas relativamente baixas (200-300°C) devido à polimerização de hidrocarbonetos políclicos. Baseado nos dados obtidos, ele concluiu que a produção de alcatrão diminui com o aumento da temperatura da gaseificação. Esta produção varia também com a quantidade de carga dentro do gaseificador, pois com uma grande quantidade de carga a temperatura é elevada e a capacidade de fracionamento do alcatrão também é grande; ao mesmo tempo, o tempo de residência diminui e, conseqüentemente, a produção de alcatrão volta a subir.

Nota-se que em YAMAZAKI et alli (2005) a velocidade era usada para justificar a aglomeração das moléculas e em CAO et alli (2005) esta mesma explicação é usada para legitimar a fragmentação das mesmas. No entanto, esses estudos não divergem nas suas conclusões, apenas apontam para direções que podem ser coadunadas.

Um importante ponto deste estudo (YAMAZAKI et alli, 2005) é que se o propósito do experimento é aumentar a produção de produtos líquidos, resultantes da pirólise de biomassa, são necessários baixa temperatura, elevada taxa de aquecimento e curto período de residência do gás no processo. Para uma elevada produção de carvão, por sua vez iam ser necessárias baixa temperatura e baixa taxa de aquecimento. Mas se o propósito era maximizar a produção de gás combustível resultante da pirólise, seria preferível elevada temperatura, baixa taxa de aquecimento e um longo período de residência do gás de processo. É também dito que o tamanho das partículas afeta diretamente a taxa de aquecimento (quanto a partícula aquece com o tempo) e o fluxo de calor eram maiores em partículas pequenas do que em partículas grandes.

Experimentos com leitos fixos foram realizados com partículas de madeira (faia) de 10 mm, que foram pirolizadas em condições de pirólise normais (SCHRÖDER, 2004). Neste estudo é afirmado que o aumento de temperatura tende a estimular a formação de gás, enquanto a produção de líquido e carvão diminuem.

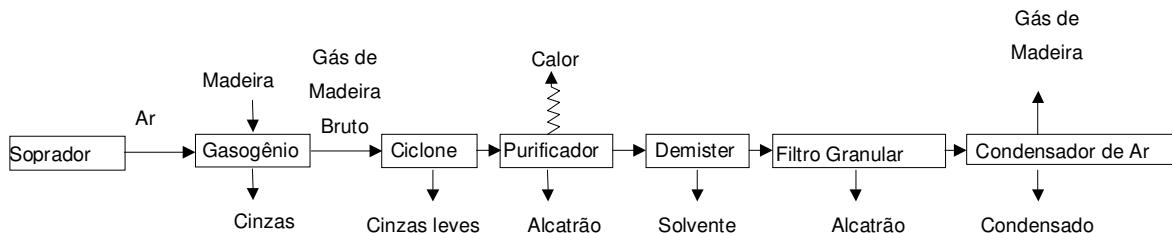
Um rápido decréscimo na produção de carvão é observado no range de temperatura entre 250°C e 350°C. O Carvão neste caso caracteriza os sólidos não reagidos ou

pouco regidos dentro do reator. Em temperaturas acima de 350 °C, a massa de carvão diminui mais vagarosamente. Quando a decomposição de celulose e hemicelulose inicia aproximadamente em cerca de 200 °C, a massa do leito diminui rapidamente. Hemicelulose decompõem principalmente entre 250 °C e 350 °C, celulose entre 200 °C e 400 °C. A celulose tem elevada taxa de decomposição. À temperatura acima de 350 °C, a lignina é decomposta acima de uma vasta faixa de temperaturas, assim conduzindo para outros decréscimos de massa, mas com um gradiente mais baixo. Acima de 350 °C, a decomposição de celulose e hemicelulose é completa. Isso explica a rápida perda de massa nesta faixa de temperatura. O decréscimo de massa resulta em um aumento de alcatrão e gases (GAÑAN et alli, 2005).

Em temperaturas acima de 300 °C, o aumento na produção de alcatrão torna-se menor que em baixas temperaturas. À 525 °C, 46% (em peso) de alcatrão foram produzidos. O total de gases produzidos na mesma temperatura é aproximadamente de 30% (em peso). Com a elevação final da temperatura da pirólise o conteúdo de carbono aumentou para 85% (em peso), à 525 °C. O aumento no conteúdo de carbono é combinado com a diminuição no conteúdo de oxigênio e hidrogênio. O conteúdo de oxigênio cai fortemente em temperaturas acima de 300 °C. Uma rápida perda de massa ocorre neste ponto. Além disso, estão contidas no gás enormes quantidades de dióxido e monóxido de carbono analisadas no gás de exaustão. Isto resulta na degradação de celulose e hemicelulose. Na verdade, à altas temperaturas, a maior parte do oxigênio combustível é consumido para produção de monóxido e dióxido de carbono. (SCHRÖDER, 2004)

## ***4.2 Descrição do Gaseificador da Universidade Católica de Louvain – UCL***

O experimento foi realizado na planta piloto do gaseificador downdraft localizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Católica de Louvain, em Louvain la Neuve, Bélgica. O esquema da planta piloto pode ser observado a seguir.



Como pode ser observado, um soprador fornece ar ao gaseificador, o gás de madeira bruto (ou gás de síntese) passa inicialmente por um ciclone, onde a maioria das partículas sólidas é capturada. O gás é então limpo e resfriado pelo purificador, onde tanto o alcatrão como as finas partículas sólidas são retidas pela interação com o solvente. As partículas sólidas, fuligem remanescente e alcatrão são finalmente capturados no filtro granular. Um condensador de ar é usado para resfriar, condensar e remover vapor d'água do gás. O total de impurezas no gás limpo por este processo, advindo da gaseificação da madeira, é de cerca de 100mg/Nm<sup>3</sup>. O gás é usado como combustível em máquinas de combustão interna.

### 4.3 Experimento

O experimento ocorreu dentro das instalações da Universidade, que contavam com a infra-estrutura necessária para tal. Além disso, havia o apoio de três técnicos e dos professores do Departamento de Engenharia Mecânica. O experimento teve quatro procedimentos bem determinados, sendo eles a preparação da madeira, a triagem dos cavacos, o equipamento e os procedimentos de coleta. Estas etapas estão descritas em detalhes a seguir.

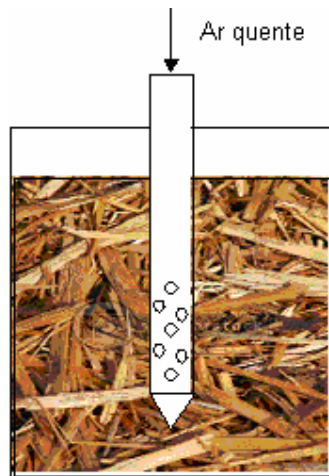
- **Preparação da Madeira**

A madeira utilizada para alimentação do gaseificador é uma mistura da madeira triturada vinda da sociedade SECOBOIS (Charleroi/Marienbourg, Bélgica). A madeira é entregue em sacos (big bag) de cerca de 150kg. A mistura de madeira contém toda sorte de tamanho de partículas, aqui compreendendo as serragens bem finas e partículas de até 50 mm. Toda a madeira foi previamente secada e depois separada.

- **Secagem da madeira**

A madeira sem tratamento contém aproximadamente 30% (em massa) de umidade. A presença de água interfere diretamente no poder calorífico e assim é melhor para o

processo que esta seja retirada. Este procedimento foi realizado ao lado da planta piloto e é de fácil execução. Para tal, foi introduzido um pequeno tubo (Figura 24) perfurado dentro do big bag onde estava a madeira. Por este tubo ventilava-se ar quente por cerca de 24hs, conforme ilustrado abaixo.



**Figura 24 Secagem da madeira**

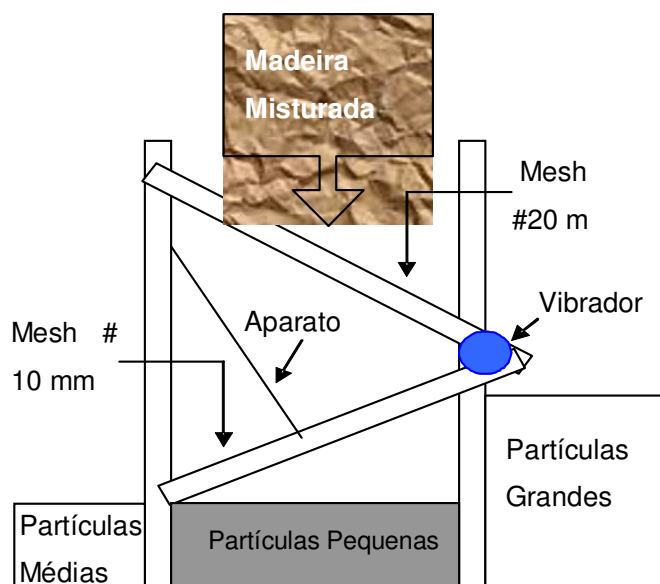
Fonte: autora

Antes de cada ensaio, três amostras de madeira que seriam gaseificadas eram selecionadas para exame de umidade. A determinação da umidade das amostras de madeira era efetuada com a ajuda de uma estufa e uma balança. As amostras eram pesadas antes e após a secagem dentro da estufa e a diferença de peso indicava a quantidade de umidade presente. As amostras eram então guardadas dentro da estufa aquecida à 105 °C por cerca de 12 horas. A umidade dos cavacos de madeira variou entre 8 e 10% (em peso) durante os dias de execução do experimento.

- **Triagem da madeira**

A madeira era triada com a ajuda de um dispositivo, que consistia de duas peneiras metálicas e um vibrador. A triagem é provocada pela vibração das peneiras, sob a ação do vibrador. A peneira superior com aberturas de 20 mm de diâmetro mantinha-se inclinada permitindo o deslocamento das partículas em direção ao saco direcionado às grandes partículas (compreendendo as partículas maiores que 20 mm). Uma outra peneira, posicionada abaixo desta e também inclinada, possuía aberturas com 10 mm de diâmetro. Esta peneira separava as partículas pequenas das médias. As partículas médias tombavam dentro de outro saco posicionado no outro extremo da estrutura. Dado que o escoamento dos resíduos de madeiras após a triagem sobre a peneira

superior é mais difícil, a peneira inferior é mais inclinada que a precedente. Para assegurar a boa divisão das partículas, uma placa metálica é posicionada para auxiliar no escoamento da madeiras. As pequenas partículas caem então numa caixa localizada debaixo da peneira inferior. O big bag de 150 kg é posicionado no topo da estrutura e todo procedimento leva cerca de 40 minutos. Os detalhes são mostrados nas Figura 25 e Figura 26.



**Figura 25 – Esquema do dispositivo de triagem**

Fonte:autora



**Figura 26 – Imagem do dispositivo de triagem em operação**

Fonte: autora

As dimensões das peneiras foram escolhidas com base na distribuição dimensional observada para os tamanhos de madeira triada. A distribuição mássica de um saco de madeiras misturada é apresentada Tabela 11 – Granulometria da Madeira Misturada.

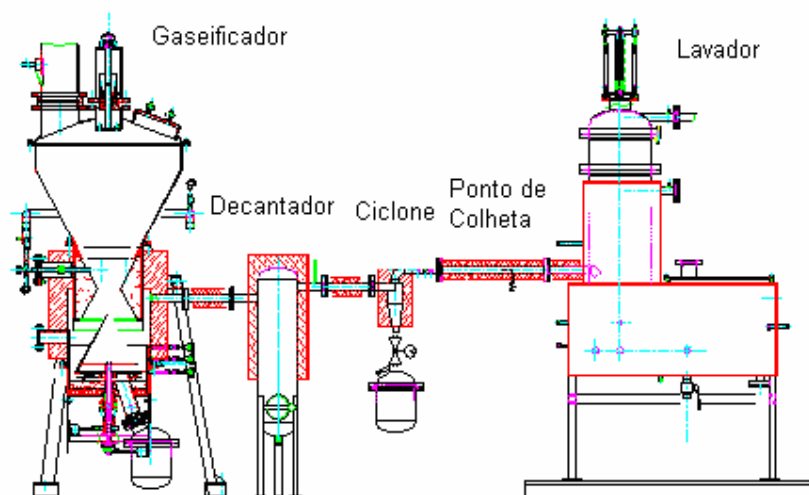
**Tabela 11 – Granulometria da Madeira Misturada**

Designação da Madeira	Tamanho (mm)	Massa (%)
Partículas Grandes (PG)	$x > 20$	37
Partículas Médias (PM)	$10 < x < 20$	41
Partículas Pequenas (PP)	$X < 10$	22

Fonte: autor

#### **4.3.1 Descrição do equipamento utilizado para coleta de alcatrão**

O sistema de coleta foi concebido para medir o teor de alcatrão e de fuligem advindas do gás (gerado, produzido, advindo) no gaseificador. A Figura 27 mostra a localização do ponto de coleta na instalação. O ponto de coleta situa-se na saída do ciclone.

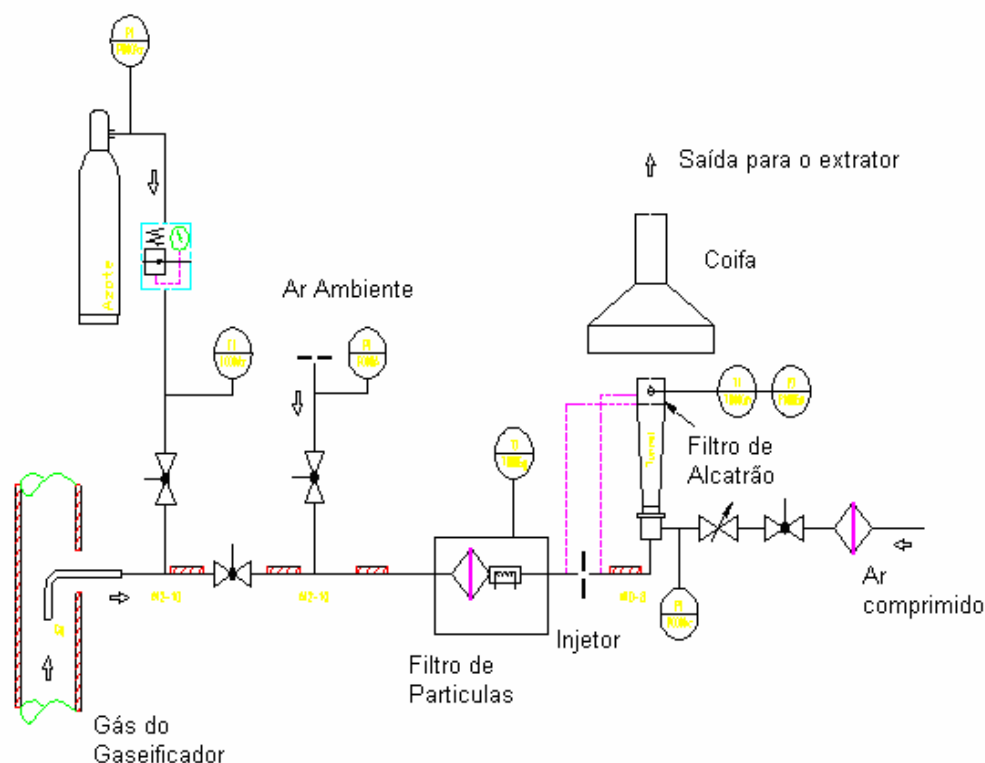


**Figura 27 – Posicionamento do Ponto de Coleta na Instalação**

Fonte: autora

As partes principais do sistema de coleta são: a sonda de coleta, o filtro aquecido para retenção de fuligem e o tubo de diluição. A sonda de coleta é colocada no centro do condutor e projetada de acordo com os Padrões Internacionais ISO 9096 (a seção transversal da sonda não deve exceder 10% da seção transversal do condutor e há um ângulo específico de entrada do bocal).

O gaseificador é acionado e a coleta do alcatrão inicia-se após a temperatura do gás na saída do equipamento atingir o mínimo de 350°C, o que previne que haja condensação do alcatrão. Para cada coleta, um conjunto de dois filtros é utilizado. Um filtro é utilizado para coleta de fuligem e outro para coleta do alcatrão. Um volume do gás advindo do gaseificador é aspirado pela sonda, passando primeiro pelo porta filtro de fuligem aquecido, que retém partículas maiores que 1,3 µm. Em seguida o gás é misturado com o ar comprimido no tubo de diluição. A vazão do gás advindo do gaseificador que passa através do sistema de coleta é 15 vezes menor que a vazão de ar. O gás então é diluído e resfriado ao mesmo tempo. A temperatura da mistura na saída do sistema não excede 35°C. Cada filtro fica exposto por cerca de 5 minutos e, posteriormente são novamente pesados. A diferença de peso em cada filtro antes e depois do procedimento representa a quantidade de fuligem e alcatrão, presentes no gás, e com base nesta informação é possível deduzir o conteúdo de cada um deles.



**Figura 28- Esquema do Sistema de Coleta**

O sistema de tubos entre a sonda de coleta e o filtro aquecido é conectado em três dispositivos: um cilindro de nitrogênio, um diafragma calibrado e uma válvula de alta temperatura.

O cilindro de nitrogênio é usado antes da coleta de amostra, quando a válvula de alta temperatura está fechada, para retirada de pequenas partículas do ponto de coleta de amostra. Este procedimento limpa a sonda de coleta após um período inativo, onde há o risco de depósito das partículas devido à orientação da sonda no condutor.

Existem dois caminhos possíveis a serem seguidos pelo gás após sua saída do ciclone: ou a amostra de gás proveniente da gaseificação da madeira passa através do sistema (a válvula de alta temperatura está aberta) ou o ar ambiente passa através do sistema (a válvula de alta temperatura está fechada). Para que o sistema seja calibrado, utiliza-se o ar ambiente, pois seu fluxo volumétrico é recalculado para as condições do gás. O diafragma é ligado a um manômetro para medidas de perda de pressão do fluxo do ar ambiente, ou seja, ajuda a medir o volume do ar ambiente que passa através do sistema. O volume de gás do gaseificador coletado é calculado novamente com base no conhecimento dos parâmetros do ar ambiente e o gás do

gaseificador (principalmente a temperatura, as composições e a massa molar). A vazão é calculada como o volume coletado dividido pelo tempo de coletas. As medidas são feitas sistematicamente antes e após cada coleta de amostra do gás do gaseificador.

A aspiração do gás é assegurada pela injeção do ar comprimido no tubo de diluição. A temperatura dos tubos e o filtro de partículas é mantida a 350 °C. O tubo entre o filtro aquecido e o capilar de diluição possui um jato calibrador, que determina a sucção do fluxo de gás advindo da gaseificação da madeira. Dois tubos são alocados a montante e a jusante do jato e são conectados na parte superior do capilar de diluição, onde se encontra uma válvula de regulação que é conectada à membrana. A membrana provoca um movimento na válvula, dependendo da condição do jato calibrador. A válvula de regulação mantém o fluxo de gás advindo do gaseificador a um valor constante. O sistema na sua saída é munido de uma coifa que aspira os gases para o extrator.

O sistema de coleta funciona nas condições quase cinéticas – a velocidade de aspiração do gás pela sonda de coleta é igual à velocidade de escoamento do gás do gaseificador no condutor.

O conjunto de válvulas permite que ora passe o ar ambiente, ora o gás do gaseificador pelo sistema de coleta, ou ainda que sejam retiradas as partículas depositadas na sonda pelo nitrogênio em contracorrente. O injetor é escolhido de acordo com a necessidade, pois ele determina a vazão do gás coletado do gaseificador. Para manter a vazão do gás do gaseificador constante, a válvula reguladora é colocada no orifício na saída do tubo de diluição. A válvula controla a vazão de gás com a ajuda membrana, cujo um lado é conectado antes e outro após o injetor.



**Figura 29 – Sistema de coleta**

Fonte: autora



**Figura 30 – Porta filtro com o filtro de fuligem**

Fonte: autora

#### **4.3.2 Detalhes do Experimento**

A operação do gaseificador UCL/TERM é totalmente automatizada. Todos os elementos chaves do gaseificador são eletronicamente monitorados e manuseados. Assim, o gaseificador é ligado a um computador que controla toda a operação. Para acionar o gaseificador, dois programas diferentes são utilizados. Um é somente supervisor do gaseificador, com função principal de mostrar e armazenar dados, ligar e desligar o gaseificador; o outro Controlador Lógico Programável (PLC) é o software de controle, que comanda todo o sistema. Este programa pode abrir válvulas, ligar e desligar bombas, suprir o gaseificador de madeira, regular temperaturas, etc. Todas as entradas e saídas de comandos e dados de operação são armazenados, e assim a análise das operações pode ser feita facilmente. Temperatura, vazão, perda de carga e concentração do gás são informações essenciais sobre o processo.

O gaseificador UCL/TERM está sob operação automática desde o início de 2005 e uma série de testes foram realizados para comprovar a confiabilidade do sistema de comando lógico programável. Os resultados mostraram que o sistema é altamente confiável e auto-operacional.

Mais de 2 toneladas de madeira foram gaseificadas durante a etapa experimental no gaseificador pra cumprir as demandas do estudo de caso em tela, provendo mais de 200 amostras. Durante a operação do gaseificador a vazão de ar primário foi mantida constante. O consumo de ar do gaseificador é de 30 m<sup>3</sup>/h, o que representa aproximadamente 100 kWt (entrada) de potencia térmica. Os cavacos de madeira eram estocados dentro do gaseificador quando a temperatura do funil de alimentação excedia 75°C. Este procedimento representava um período de alimentação de 40 minutos e um consumo de 22kg de madeira por hora.

Os procedimentos do experimento consideraram duas alternativas operacionais concernentes a riqueza do leito, no que tange a presença de carbono: leito rico e leito pobre. Essas alternativas eram obtidas através da variação do tempo de rotação do raspador de carvão. O leito pobre em carbono representava menos de 30% de carbono no carvão no depósito de cinzas, o leito rico em carbono representava mais de 60% de carbono no carvão no depósito de cinzas. Aumentando a frequência de rotação diminuía-se a quantidade de carvão presente no leito.

O período de evacuação foi estabelecido em 1200 segundos (1<sup>a</sup> série, leito rico em carbono) e 400 segundos (2<sup>a</sup> série, leito pobre em carbono). Foram empregados quatro diferentes divisões do tamanho da madeira: pequeno, médio, grande e misturado. Os filtros Whatman utilizados para a coleta de amostra tinha as seguintes características:

- 100% borosilicato - fibra de vidro
- Quimicamente inerte
- Resistente à temperaturas até a 500 °C
- Retenção 1,6µm
- Espessura 0,26 mm
- Peso 53 g/m<sup>2</sup>
- Circular:
- Diâmetro 90 mm para o alcatrão,

- Diâmetro 70 mm para as fuligens.

Os filtros guardados em pote de vidro com a tampa eram postos na estufa aquecida à 105 °C por no mínimo 12 horas antes da sua utilização. Os filtros saídos da estufa eram resfriados à temperatura ambiente e em seguida pesados. Os filtros eram novamente pesados após a sua utilização, as Figura 31 – O estoque de filtro  
Figura 32 – O filtro de alcatrão

mostram tais filtros.



Figura 31 – O estoque de filtro

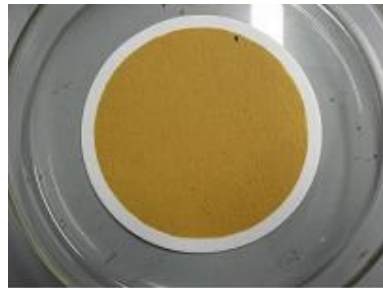


Figura 32 – O filtro de alcatrão

#### **4.4 Resultados e discussão do experimento**

Embora os dados armazenados provenham de mais de 200 diferentes leituras, sua análise mostrou que a maior parte deles não tem conexão visível com o conteúdo de alcatrão. Nesse contexto, somente uma pequena parte dos dados disponíveis foi útil para os propósitos geradores do presente estudo de caso, sendo que somente a composição do gás mostrou uma clara vinculação com a quantidade de alcatrão após a análise estatística. O mesmo pode ser afirmado para perda de carga no gaseificador e a temperatura do gás do gaseificador.

Exceto pelos parâmetros designados para sofrerem alterações, as outras condições operacionais foram mantidas constantes, tais como homogeneização da matéria prima, as condições de umidade e a vazão de ar

Em que pese as tentativas de harmonização das condições operacionais, para que essas fossem consideradas constante, foram observadas variações nos parâmetros operacionais do gaseificador. Este fenômeno é causado pela heterogeneidade do leito de madeira e possivelmente pela diferença na estrutura interna das partículas de madeira e seu tamanho. Embora o gaseificador seja equipado com mecanismos que tentam impedir a formação de pontes e manter o leito uniforme, ocorrem não homogeneidades dentro do gaseificador. E, além disso, as partículas de madeira não são homogêneas, ou seja, seu tamanho varia dentro de um intervalo específico. A seguir faz-se uma breve discussão dos resultados encontrados na análise dos principais parâmetros do experimento.

##### **4.4.1 Perda de carga**

Variações na perda de carga foram originadas em função das diferenças no tamanho da partícula e isso pode ser facilmente comprovado uma vez que as partículas grandes apresentaram os menores valores de perda de carga. O comportamento da perda de carga pode ser justificado pela porosidade do leito de carvão dentro do gaseificador. A maior perda de carga foi atribuída às partículas menores, seguidas pela madeira misturada, médias e grandes partículas. A Tabela 12 mostra a variação da perda de carga em função do tamanho da partícula.

#### 4.4.2 Poder calorífico inferior

Pode ser também observado que o LHV (poder calorífico inferior [PCI] – *low heating value*) bem como o conteúdo de alcatrão diminuem com o aumento do tamanho do cavaco de madeira.

A qualidade do gás advindo do gaseificador, verificada unicamente pelo PCI, pode levar a um entendimento errôneo, embora o mesmo seja sempre um importante parâmetro de análise da qualidade do gás. Ressalta-se que o gás obtido não pode ser qualificado somente pelos valores do PCI, uma vez que esse procedimento não leva em consideração a quantidade de alcatrão. Até hoje não existem indicativos confiáveis do registro de uma correlação pré-estabelecida entre LHV e alcatrão.

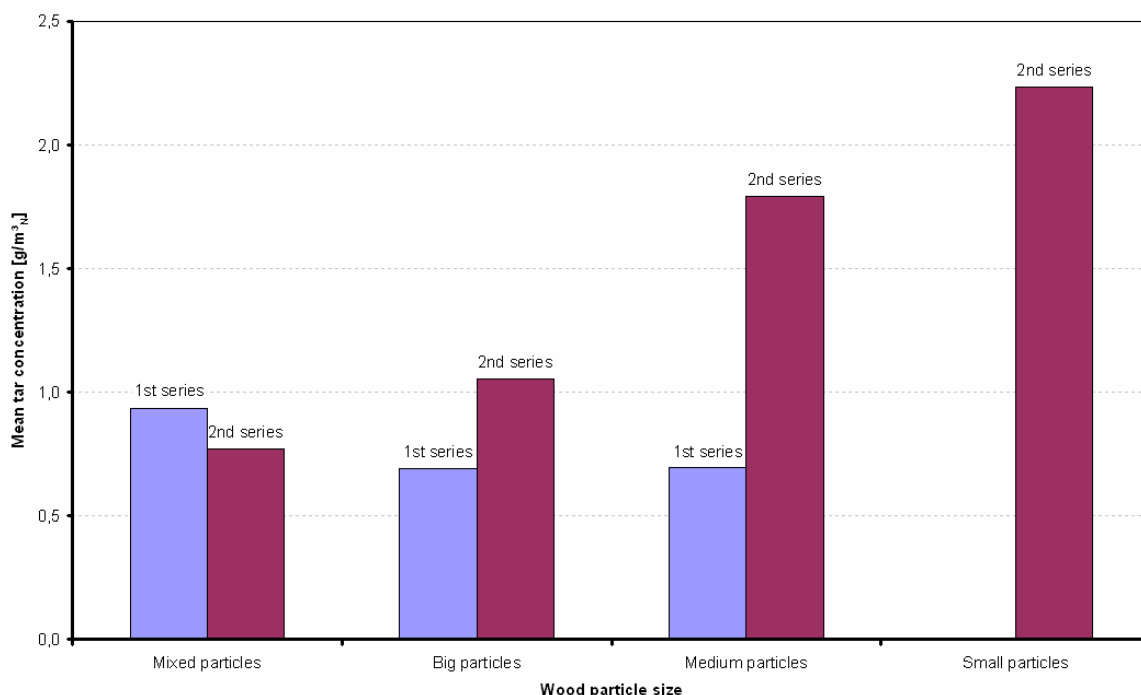
No experimento foi observado que, quando a qualidade do gás do gaseificador aumentava, a quantidade de alcatrão também crescia. Assim, o gás com menor poder calorífico também é o que tem menor quantidade de alcatrão. Considerando a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, registra-se que as maiores partículas são as que produzem um gás com menor concentração de CH<sub>4</sub> no gás do gaseificador. O PCI não aumenta somente com o aumento da concentração de CH<sub>4</sub>, mas também com a concentração de CO.

Como também pode ser inferido na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o PCI muda bastante nos diferentes tamanhos de madeira. O valor médio do PCI variou entre 4.200 e 4.800 kJ/Nm<sup>3</sup>. As menores partículas forneceram o maior valor de PCI obtido do gás do gaseificador.

**Tabela 12 – Valores dos parâmetros de acordo com o tamanho das partículas**

Tamanho das Partículas	PCI kJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	Perda de Carga Pa	CO %	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	Alcatrão mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Misturadas	4.406 ± 410	600 ± 220	19,4 ± 2,0	11,1 ± 1,3	11,7 ± 1,1	1,9 ± 0,4	0,77 ± 0,41
Pequenas	4.757 ± 830	1.750 ± 390	21,0 ± 1,8	11,8 ± 1,0	11,8 ± 1,2	2,3 ± 0,5	1,40 ± 0,48
Médias	4.606 ± 210	450 ± 110	21,0 ± 1,3	11,2 ± 0,7	11,2 ± 1,0	2,1 ± 0,3	1,38 ± 0,45
Grandes	4.205 ± 390	400 ± 70	18,2 ± 2,3	12,0 ± 1,2	11,7 ± 0,9	1,8 ± 0,2	0,87 ± 0,28

Conforme ilustrado no Gráfico 6 a seguir, os experimentos apontam para uma relação entre o tamanho das partículas e a quantidade de alcatrão produzida. Observa-se que ao se diminuir o tamanho das partículas eleva-se a quantidade (em gramas) de alcatrão presente por metro cúbico de gás produzido.



**Gráfico 6 – Produção de Alcatrão versus tamanho da partícula, em duas séries de experimento**

A primeira série de testes efetuada não demonstrou, de forma clara as tendências esperadas por GRØNLI (1996). Pode-se então afirmar que a quantidade de alcatrão medida experimentalmente cresceu em proporções inversas. Partículas de tamanho misturado têm um teor de alcatrão mais elevado que cavacos de madeira grandes e médios.

A segunda série de testes conformou mais claramente as tendências para a madeira triada. A maior quantidade de alcatrão foi observada quando partículas pequenas de cavaco de madeira foram usadas, grandes partículas tiveram a menor quantidade de alcatrão e as partículas médias tiveram um comportamento intermediário. Surpreendentemente, as partículas com tamanhos misturados tiveram uma concentração de alcatrão ainda menor que as partículas grandes. Então o melhor resultado sob a ótica da quantidade de alcatrão foi obtido pelas partículas misturadas.

#### 4.4.3 Metano

Embora a concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ) adapte-se bem na conclusão prévia, generalizações sobre toda a composição do gás e sua variação não estão claras. Quanto maior o tamanho do cavaco de madeira verificou-se uma menor concentração de  $\text{CH}_4$  e sua variação. Resultados contrários foram desenvolvidos por CEMIG (1986),

onde quanto maior o tamanho da partícula maior a concentração de metano, conforme observado na Tabela 13.

**Tabela 13 – Influencia da Granulometria da Madeira na composição do gás**

Características do Gás	Blocos	Cavacos	Serragem
	Composição (%v)		
CO	29,0	21,0	18,20
CO <sub>2</sub>	6,6	10,0	12,2
H <sub>2</sub>	13,0	18,0	10,2
CH <sub>4</sub>	4,2	3,6	3,2
N <sub>2</sub>	47,0	46,6	55,4
O <sub>2</sub>	0,2	0,6	0,8
PCI (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1570	1406	1090

Fonte: CEMIG, 1986

#### 4.4.4 Composição do Gás

Os Gráfico 7, Gráfico 8, Gráfico 9 e Gráfico 10 seguintes mostram o comportamento da composição do gás, perda de carga, PCI e produção de alcatrão. Todas as variáveis apresentadas nos gráficos referidos estão na mesma escala, exceto para o indicador de perda de carga. No eixo da esquerda pode ser observada a composição do gás (%), perda de carga e PCI, e no eixo da direita a quantidade de alcatrão. O eixo horizontal apresenta o tempo em segundos.

O Gráfico 7 mostra o histórico de algumas operações do gaseificador durante testes com a madeira misturada. Neste caso a quantidade de H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> é quase a mesma; variando entre 10% e 15% em volume. O CH<sub>4</sub> não vai além de 5% em volume e o poder calorífico ficou entre 3.750 e 6.250 kJ/m<sup>3</sup>N. O CO<sub>2</sub> variou entre 17% e 25%. A perda de carga começou em 1,0 kPa e atingiu no final dos ensaios o valor aproximado de 2,0 kPa. O valor médio da concentração de alcatrão se mostrou um pouco maior que 0,75 g/m<sup>3</sup>N.

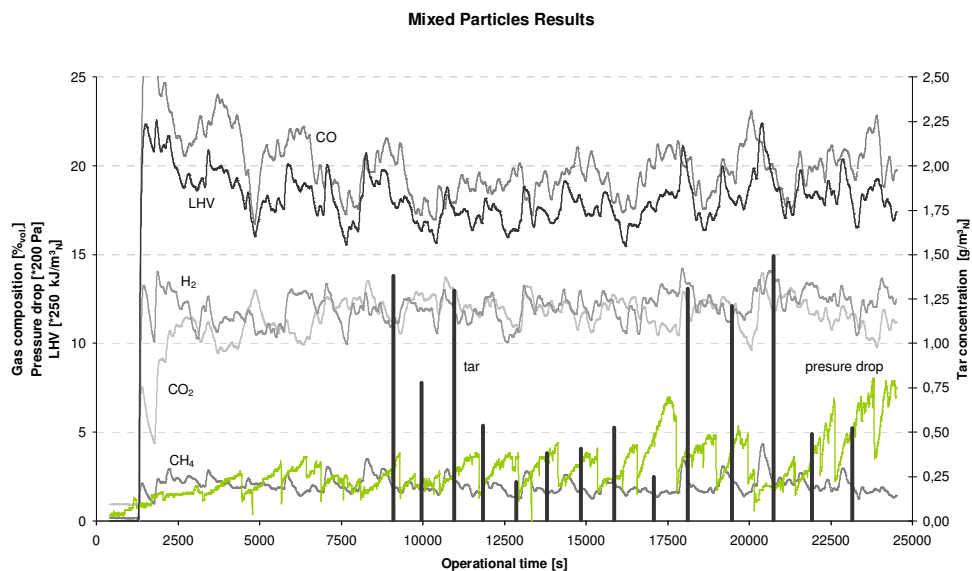
Considerando os gases CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, pode ser observado nos gráficos que alguns desses elementos têm comportamento similar, independente do tamanho dos cavacos. A presença de CO no gás produzido guia o PCI, então quando a concentração de CO aumenta, o PCI também apresenta um crescimento.

CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> apresentam quase a mesma média percentual para todos os tamanhos de partícula. No entanto, para as partículas menores existe uma grande variação da quantidade de alcatrão, com máximos e mínimos muito díspares. A perda de carga se comporta conforme descrito na bibliografia: pequenas partículas aumentam a perda de carga e a média é significativamente menor para partículas maiores.

Uma importante ressalva do experimento diz respeito ao comportamento das partículas misturadas. A quantidade de alcatrão pode ser comparável com o de partículas grandes, e em alguns casos é até menor. O PCI tem valores consideráveis e a concentração de CO acompanha o comportamento da curva de PCI, e pode ser observado que esta tem um perfil estável. A média do PCI é próxima à curva das partículas pequenas. Considerando a perda de carga, o valor obtido no início do processo é até menor para as partículas misturadas que para as grandes partículas. No entanto o valor da perda de carga aumenta durante o experimento e pode ser observado que no fim este pode ser tão elevado quanto para pequenas partículas. Este comportamento não é explicado somente pelas variações de temperaturas, e este experimento não forneceu dados suficientes para uma explicação plausível.

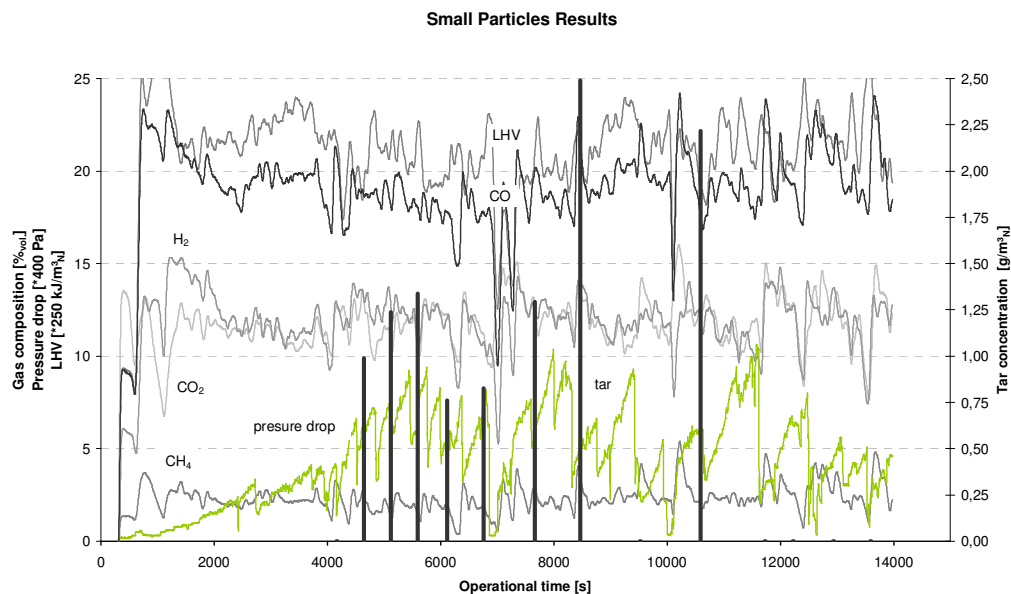
#### **4.4.5 Quantidade de Alcatrão**

Pela observação dos gráficos a seguir pode ser visto que a quantidade de alcatrão apresenta grande variação durante um mesmo dia de experimento. Quando comparado à quantidade de alcatrão e a composição do gás do gaseificador, encontra-se uma grande diferença proporcional. O alcatrão representa somente uma pequena fração do gás advindo da gaseificação da madeira, então ele é muito sensível às mudanças da composição deste gás. Mesmo que a composição do gás aparente ser estável, a quantidade de alcatrão varia consideravelmente.



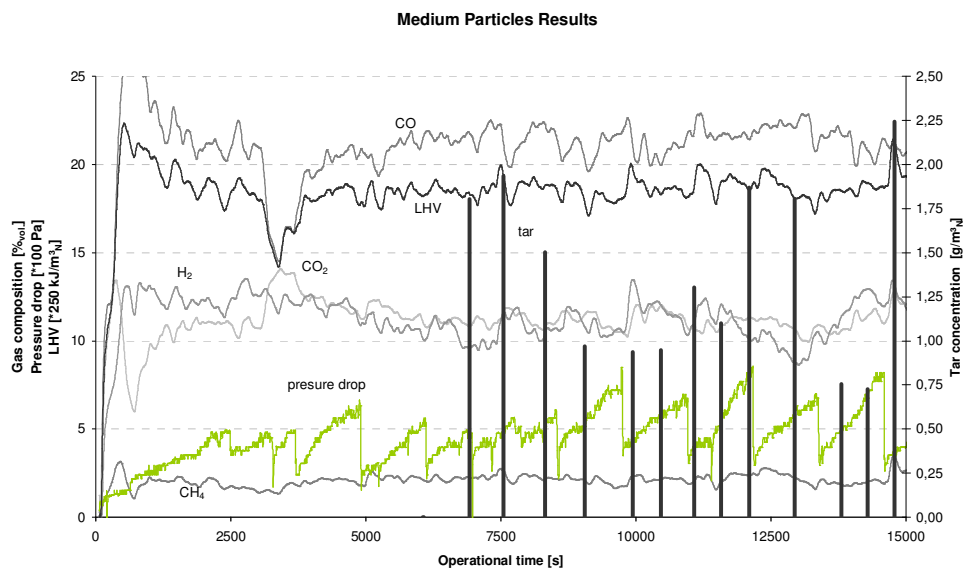
**Gráfico 7– Perda de Carga, composição do gás, poder calorífico e concentração de alcatrão para partículas misturadas**

Partículas Misturadas: elevado valor de LHV, baixa quantidade de alcatrão, aumento da perda de carga.



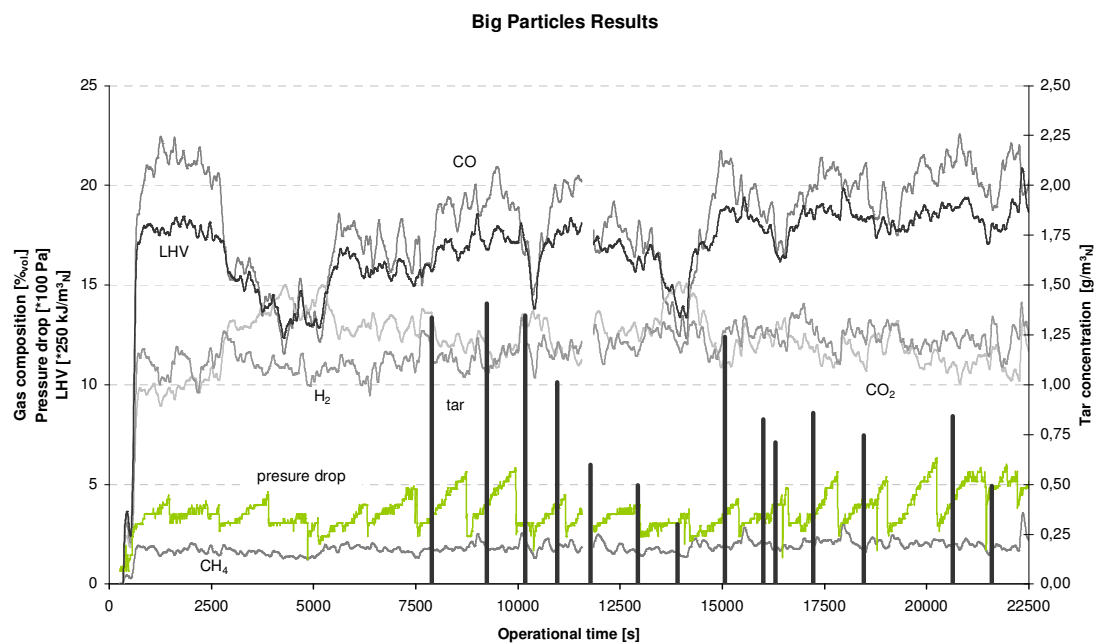
**Gráfico 8– Perda de Carga, composição do gás, poder calorífico e concentração de alcatrão para partículas pequenas**

Pequenas partículas: elevado valor de LHV, elevada quantidade de alcatrão, elevada perda de carga



**Gráfico 9– Perda de Carga, composição do gás, poder calorífico e concentração de alcatrão para partículas médias**

Partículas médias: baixo valor de LHV, média quantidade de alcatrão, elevada perda de carga



**Gráfico 10 – Perda de Carga, composição do gás, poder calorífico e concentração de alcatrão para partículas grandes**

Partículas Grandes: baixos valores de LHV, baixa quantidade de alcatrão, baixa perda de carga.

As tabelas Tabela 14 e Tabela 15 mostram a média de alcatrão com seu valor de deflexão médio para diferentes dias de operação, diferentes tamanhos de partículas e diferentes séries. Estas tabelas contêm também informações sobre o número de coletas de amostras. A quantidade média de alcatrão varia fortemente mesmo dentro de uma mesma série e no mesmo range de tamanho de partículas.

A relação existente entre o conteúdo de alcatrão e a taxa molar de CH<sub>4</sub> foi examinada pelo enquadramento linear com coeficiente independente. Os resultados estão apresentados nas Tabela 14 e Tabela 15. Nesta o valor x representa o logaritmo da taxa molar de CH<sub>4</sub>, y representa o logaritmo de uma quantidade relevante de alcatrão. Baseado na evolução registrada, uma relação entre a taxa molar de CH<sub>4</sub> e o conteúdo de alcatrão foi encontrado. Esta relação é expressa pela equação exponencial  $C_{\text{alcatrão}} = 0,07 * M_{\text{taxa CH}_4}^{3,5}$ .

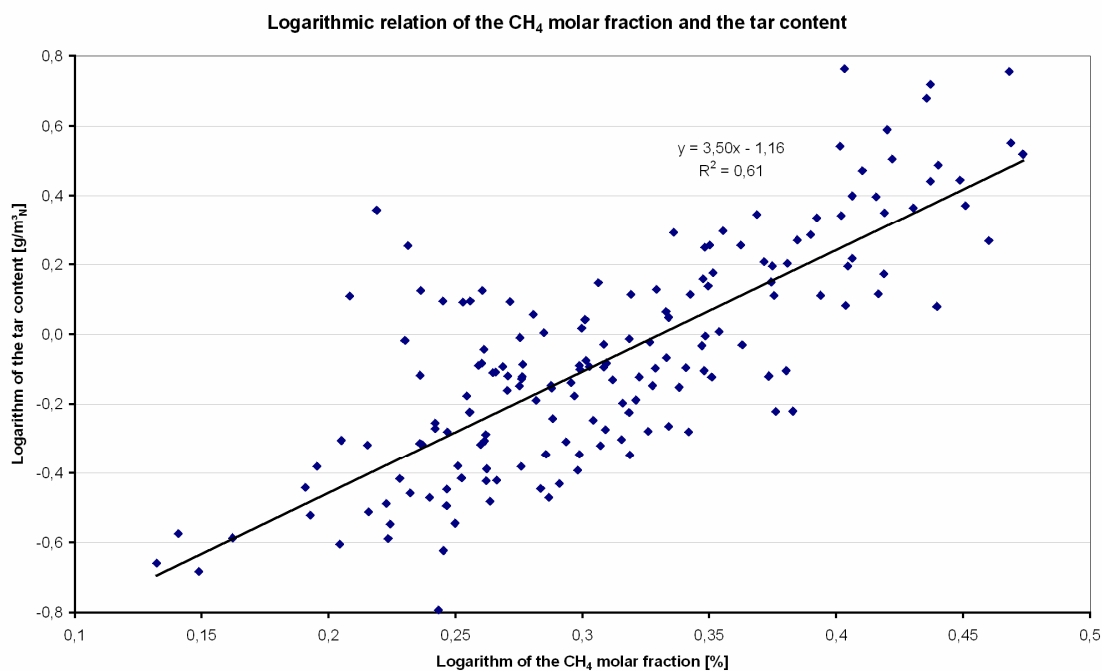
**Tabela 14 – Tamanho dos cavacos, série executada, concentração de alcatrão e número de amostras**

Tipo de Madeira	Concentração Alcatrão (g/m³N)	Média de	Número de Amostras	
Madeira Misturada 1ª série	1,186	±	0,397	3
Madeira Misturada 1ª série	1,087	±	0,398	5
Madeira Misturada 1ª série	0,529	±	0,225	4
Madeira Misturada 1ª série	0,950	±	0,605	7
Madeira Misturada 2ª série	0,772	±	0,405	14
Partículas Grandes 1ª série	0,548	±	0,247	10
Partículas Grandes 1ª série	0,552	±	0,225	14
Partículas Grandes 1ª série	1,545	±	0,497	4
Partículas Grandes 2ª série	0,872	±	0,283	14
Partículas Grandes 2ª série	1,516	±	0,681	12
Partículas Grandes 2ª série	0,937	±	0,621	26
Partículas Médias 1ª série	0,595	±	0,308	7
Partículas Médias 1ª série	0,772	±	0,362	9
Partículas Médias 2ª série	2,280	±	0,774	11
Partículas Médias 2ª série	1,377	±	0,446	13
Partículas Pequenas 2ª série	1,396	±	0,484	8
Partículas Pequenas 2ª série	3,076	±	1,938	8

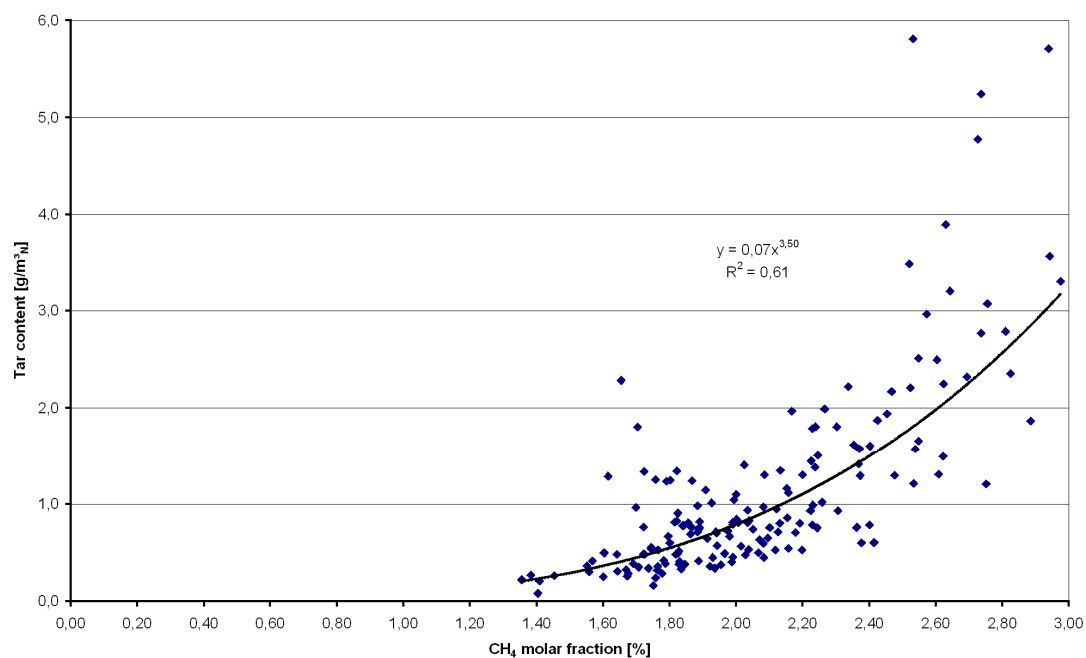
**Tabela 15 – Grupos de cavacos, concentração de alcatrão e número de amostras**

Tipo de Madeira	Concentração Média de Alcatrão (g/m³N)			Número de Amostras
Madeira Misturada	0,866	±	0,441	33
Partículas Grandes	0,927	±	0,540	80
Partículas Médias	1,352	±	0,777	40
Partículas Pequenas	2,236	±	1,423	16

Os Gráfico 11 e Gráfico 12 mostram esta relação em coordenadas logarítmicas e exponencial.



**Gráfico 11– Relação logarítmica da fração molar de metano (CH<sub>4</sub>) e a quantidade de alcatrão**



**Gráfico 12– Relação exponencial da fração molar de metano (CH<sub>4</sub>) e a quantidade de alcatrão**

No que concerne às fontes para produção de alcatrão, GRØNLI (1996) afirma que moléculas (celulose e hemicelulose), que são a matéria prima para formação do alcatrão são também responsáveis pela formação de metano. Assim, elevada quantidade de metano no gás está relacionada a maior quantidade de alcatrão e também a um gás com maior poder calorífico, dado que este varia diretamente com a concentração de CO e CH<sub>4</sub>. A quantidade de alcatrão tem sua maior média para as menores partículas, mas é também considerável para as médias. De acordo com o mesmo autor, o tamanho é muito importante para a formação de alcatrão uma vez que dentro das partículas de madeira é onde ocorre a quebra da molécula. Quando a partícula é muito pequena, não há espaço ou calor suficiente para que ocorra a quebra da molécula em tamanhos menores, mas quando as partículas aumentam em tamanho, elas retêm maior quantidade de calor e isso ajuda na quebra da molécula, diminuindo assim a formação de alcatrão.

#### **4.5 Conclusões Preliminares**

Durante o experimento foram considerados constantes alguns parâmetros de processo, a saber: vazão de ar primário, a perda de carga no leito do gaseificador, o número de acionamentos do raspador. No entanto, a composição do gás obtido mantinha-se instável ao longo do processo. A concentração do alcatrão também varia muito durante cada ensaio efetuado, dado que a concentração do alcatrão representa uma fração irrisória (em massa) do gás produzido e por isso obter uma medida acurada representa um grande desafio.

As series de coletas de alcatrão de gás de madeira foram desenvolvidas na planta piloto de gaseificação, nos laboratórios da TERM/UCL. Para este propósito, um instrumento feito sob medida para este experimento foi elaborado, testado e utilizado. Duas séries de dados foram inferidas durante o experimento, no que diz respeito à operação do gaseificador: uma contendo um leito pobre em carvão (o acionamento do raspador de fundo era feito a cada 400 segundo) e leito rico em carvão (acionamento do raspador de fundo a cada 1200 segundos). Para o primeiro modo de funcionamento, as diferenças de concentração de alcatrão foram mínimas entre os diferentes tipos de madeira, enquanto que grandes diferenças foram observadas para o segundo modo de funcionamento. A gaseificação da madeira misturada apresentou uma taxa de alcatrão muito elevada no primeiro modo de funcionamento, já o segundo modo de funcionamento se mostrou mais favorável.

O teste proveu muitos parâmetros operacionais do gaseificador, os quais foram objetos de análises detalhadas. A qualidade do gás de madeira obtido do gaseificador foi observado e confrontado com a quantidade de alcatrão encontrada. Foi analisado que o gás de síntese com elevado PCI também possui elevada quantidade de alcatrão.

Pode-se aferir por esta correlação que o componente presente na madeira que origina o alcatrão é o mesmo que serve como reagente para formação de metano. Assim, elevadas concentrações de metano indicam maior quantidade de alcatrão. A relação referente ao poder calorífico reflete a importância do metano no conteúdo energético do mesmo.

A relação entre a fração molar de  $\text{CH}_4$  e a quantidade foi encontrada pelo enquadramento linear com coeficiente independente e expressa na seguinte equação exponencial  $C_{\text{alcatrão}} = 0,07 * M_{\text{taxa}} \text{CH}_4^{3,5}$ . A produção de alcatrão é também dependente do tamanho dos cavacos de madeira, o que foi provado pela série de testes com diferentes faixas de tamanho de partículas, do mesmo tipo de madeira. Grandes partículas de madeira produziram menos alcatrão que as pequenas partículas. Mas nas partículas de madeira de tamanhos variados, a produção de alcatrão foi ainda menor que nas partículas de tamanho grande.

## **5 Potencial Nacional de Geração de Energia Elétrica com Gaseificação de biomassa**

O Brasil é um país com elevada capacidade para geração de energia a partir de fontes renováveis, enfatizada pela sua enorme potencialidade territorial e climática. A ampla diversidade de matérias-primas e a oportunidade de explorar o sinergismo entre as diversas fontes (i.e., hidráulica, solar, eólica, biomassa), colocam o Brasil em uma posição privilegiada para a definição de uma matriz energética predominantemente renovável. (DOMINGOS, WILHELM, RAMOS, 2006; KRAUSE, 1990).

Com base no Censo Agropecuário de 2006, (IBGE, 2008) observa-se que a área destinada à agropecuária no Brasil era de aproximadamente 290 milhões de hectares em 1970, e hoje corresponde a pouco mais de 350 milhões de hectares. Deste total, 49,4% é atualmente destinada à pastagem, abrigando um número aproximado de 170 milhões de cabeças de gado. O percentual destinado à lavoura quase dobrou sua participação (de 13,8% em 1970 para 22% em 2006). No entanto, em valores absolutos, a área destinada à lavouras teve seu montante mais que duplicado, passando de quase 34 milhões de hectares em 1970 para mais de 76 milhões de hectares em 2006.

A biomassa, que compreende toda energia proveniente das plantas, posiciona o Brasil em elevado patamar de aproveitamento, pois o país apresenta condições privilegiadas para viabilizar o máximo aproveitamento desta capacidade (COSCORELLI, 2001). Sob esta ótica, o aproveitamento energético, tendo como insumo a biomassa consolida este cenário, e, no estudo presente, dar-se-á ênfase ao conteúdo energético do cavaco de madeira, bagaço de cana, lixo urbano, tortas de mamona (insumos para biodiesel) e casca de arroz, como matéria prima para geração de energia elétrica. A escolha destes insumos deu-se por eles já serem utilizados como fonte de energia em sua unidade de beneficiamento ou centrais termelétricas a biomassa (ANEEL, 2009), ainda que não em sua totalidade, mas o suficiente para ilustrar sua viabilidade, salvo o caso dos resíduos urbanos, que representam um problema latente em sua gestão urbana e a apresentação de soluções neste sentido são benéficas.

Destarte, a tecnologia de gaseificação é o processo utilizado para cálculo da potencial energia elétrica gerada com os insumos citados e, ao fim deste capítulo, obter-se-á o montante de energia elétrica potencialmente atingido.

## **5.1 Combustíveis para Gaseificação**

A proposta de analisar os insumos energéticos residuais da cadeia produtiva aqui presente partiu da premissa que esse material encontra-se à margem do aproveitamento do seu potencial. Resíduos oriundos de processos agroindustriais de larga escala tornam-se atraentes sob o ponto de vista energético devido à sua escala de produção e concentração logística. No entanto, nem todos os resíduos são aproveitáveis para o processo de gaseificação uma vez que o teor de umidade do mesmo ou poder calorífico podem se configurar em empecilhos. Além disso, existem insumos que são subprodutos da plantação principal, mas de alto valor agregado e com boa cotação de mercado e por isso não se apresentam como matéria prima para geração de energia elétrica. Assim, optou-se por explorar nesta tese o conteúdo energético de alguns insumos que, segundo a ótica do aproveitamento da gaseificação, são viáveis.

Dentre as culturas com potencial para gaseificação, esta tese tem convergiu seu foco para os cavaco de madeira, bagaço de cana, lixo urbano, torta de mamona e casca de arroz. A grande maioria das tortas de biodiesel tem seu farelo utilizado para consumo animal (caso do girassol, algodão, soja, etc). Mas no caso da mamona este farelo é inapropriado para esta aplicação animal devido à presença da ricina, substância venenosa. O uso destas tortas para gaseificação torna mais atrativo o uso da oleaginosa citada para produção de biodiesel.

O caso da cana de açúcar é diferente, uma vez que existe um forte aproveitamento desta biomassa para geração de energia na própria indústria sucro-alcooleira. No entanto, cabe aqui fazer uma avaliação deste potencial para geração de energia com gaseificação.

O dendê insere-se a este rol por apresentar um enorme potencial de crescimento da sua produção em curto prazo e destino inadequado para os seus resíduos, face a quantidade a ser gerenciada. Parte dos seus resíduos já é aproveitado nas unidades de beneficiamento, porém existe ainda um significativo potencial a ser explorado.

Cavacos de madeira também foram analisados, uma vez que a área de floresta plantada no Brasil vem aumentando ao longo do tempo e tem-se intensificado o uso de eucalipto para fins energético (e.g. indústria siderúrgica). Assim, a quantidade de resíduos desta biomassa deve crescer com o tempo e o emprego destes passam a ter importância estratégica.

As cascas de arroz representam uma outra face destas alternativas. De produção localizada, estes resíduos quando incinerados produzem uma cinza rica em sílica (cerca de 90% em peso), que pode ser utilizada na produção de sílica gel, cerâmicas resistentes, carga em compostos de borracha natural dentre outras (HOFFMANN et al. 2002). Seu uso como biomassa para gaseificação almeja vislumbrar o potencial deste resíduo na geração de energia.

Para os resíduos sólidos urbanos o potencial de geração de energia com este insumo é encarado como uma factível solução para o que hoje considera-se um grande entrave sócio-ambiental. Além de um destino de menor impacto ambiental, o aproveitamento energético de resíduos possibilita uma diversificação da matriz energética e dá um passo no que se considera o ideal de desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável.

No experimento apresentado no capítulo anterior foi possível inferir como o tamanho da partícula do insumo utilizado influencia na quantidade de alcatrão gerada e no poder calorífico do gás obtido no processo. Esta informação de relevada importância deve ser considerada quando do desenvolvimento do gaseificador onde o aproveitamento energético da biomassa será efetuado. Assim, no caso brasileiro, pela sua diversidade de insumo, o experimento – pioneiro – adiciona a curva de conhecimento da tecnologia da gaseificação no país informações que contribuirão para a alavancagem deste processo.

### **5.1.1 Cavaco de madeira**

O território brasileiro, que tem 846 milhões de hectares, é composto por aproximadamente 544 milhões de hectares de florestas nativas e 5,7 milhões com florestas plantadas, formando o ecossistema florestal do Brasil, conforme evidencia a Tabela 16. De modo geral, a exploração das florestas nativas tem sido realizada de forma largamente predatória, visto que a adoção do manejo florestal é recente e ainda representa uma pequena fração de toda a produção das matas nativas do Brasil. As florestas brasileiras caracterizam-se por sua diversidade biológica, englobando diferentes biomas e a ocorrência de espécies de alto valor econômico, cultural e ecológico (ABIMCI, 2007; ABRAF, 2007).

**Tabela 16 – Cobertura Florestal Brasileira**

Tipo	Área (1000 ha)	Participação (%)
Nativa	543.905	99,0
Plantada	5.744	1,0
Total	549.649	100,0

\*Floresta Plantada com pinus, eucalipto e outras espécies

Fonte: ABIMCI, 2007

A produção de cavaco de madeira advém principalmente dos resíduos de eucalipto, pinus e a acácia-negra, que são as espécies mais importantes para o fornecimento de madeira, no Brasil. O eucalipto se destaca pelo rápido crescimento, boa adaptação e pelas características edafo-climática (relativo ao tipo de solo) e também pelo baixo custo de produção.

A madeira é um material sólido, orgânico higroscópico (absorve água) e ortotrópico (crescimento diferente nas dimensões espaciais), as plantas que não produzem madeira são chamadas de herbáceas. A madeira é um tecido formado com uma função de sustentação e, por isso, ela é utilizada, freqüentemente, como um material estrutural eficiente pela humanidade, é constituída de fibras de celulose unidas por lignina, o que classifica a como madeira dura ou macia.

Quanto mais folhas uma árvore suportar, mais vigoroso é o seu crescimento, maior o volume de borne<sup>21</sup> necessário, e as árvores que crescem em clareiras podem desenvolver um tamanho considerável de 30 cm ou mais em diâmetro (NEUTZLING, 2007).

Além de ser o país com a segunda maior superfície plantada com o gênero *Eucalyptus* do mundo, o Brasil detém hoje a tecnologia mais avançada de formação, manejo e colheita de plantações florestais. Associando as variáveis ambientais com as características de determinada espécie, e levando em conta a finalidade da matéria-prima, obtém-se a definição das espécies de maior potencial. Para uso energético em uma mesma região, as espécies de madeira de maior densidade básica apresentam maior rendimento, em função da idade e da taxa de crescimento, além da influência exercida pelo solo e clima. (ABIMCI, 2007)

O eucalipto plantado no Brasil, cuja madeira é de baixa densidade, vem sendo utilizado predominantemente para a produção de celulose, chapas e móveis. Para a

---

<sup>21</sup> Borne: O alburno, ou borne, é a porção viva do xilema ao longo da qual se processa a circulação de água e de nutrientes entre a raiz e os tecidos ativos da planta

geração de energia, as principais espécies de madeiras são *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus tereticornis*. (MAGALHÃES, 2001)

A história do eucalipto no Brasil coincide com a formação de plantações florestais para fins energéticos. As primeiras referências ao gênero *Eucalyptus*, inicialmente utilizado para fins ornamentais, datam do século XIX. Por volta de 1860, o eucalipto foi introduzido no Rio Grande do Sul pelos jesuítas e em 1871 diversas árvores foram plantadas no Jardim Público da cidade de Vassouras (Estado do Rio de Janeiro).

O plantio com objetivos econômicos remete ao início do século XX, quando a Cia. Paulista de Estrada de Ferro precisou replantar suas terras com árvores de rápido crescimento para suprir com madeiras as locomotivas a vapor, o mais importante meio de transporte de passageiros e carga à época. (MAGALHÃES, 2001)

Nos anos 1990, o cultivo de eucalipto no Brasil era utilizado predominantemente com o uso de sementes importadas, especialmente de países africanos. Isso originou plantios de larga escala com material heterogêneo, contribuindo para melhorar a atual performance dos povoamentos em termos de produtividade, características da madeira, resistência a pragas e doenças. Desde então, surgiram híbridos naturais, que foram estabilizados e multiplicados em grande escala, através da clonagem. Observa-se na Tabela 17 a variação da taxa de crescimento do eucalipto em diferentes regiões. (idem)

**Tabela 17 – Taxa de crescimento do eucalipto no Brasil comparado a outros países.**

Localização	m <sup>3</sup> /ha/Ano
Sul da Bahia	50
Chile	35
Portugal	12
Espanha	12
Média Brasil (plantio tecnificado)	40

Fonte: (NEUTZLING, 2007)

De acordo com a FAO (*Food and Agriculture Organization*), atualmente o eucalipto está presente nos cinco continentes, em cerca de 100 países. Em mais da metade deles, é plantado em larga escala. O Brasil atingiu a marca de 10.650.000 toneladas de madeira plantada. (FAO, 2008). O ecossistema florestal brasileiro, levando em consideração apenas plantios das espécies mais significativas em termos econômicos em 2006, atingiu 5.743.936 hectares de florestas plantadas, o que representa um aumento de 3,2% em relação ao total de plantios florestais em 2005 (5.567.950 ha).

Diante disso, Brasil é o sétimo país com maior volume de plantios florestais, representando uma participação de 3% no total mundial (192,1 milhões de ha). Do total de hectares de floresta plantada, 3.549.147 ha são de eucalipto e 1.824.270 há são de pinus. (ABIMCI, 2007; ABRAF, 2007), conforme observado na Tabela 18.

**Tabela 18 – Áreas com Florestas Plantadas de Pinus e Eucalipto no Brasil**

Região	Estados com Maior Área Plantada	Áreas / Espécies (10 <sup>3</sup> ha)		
		Eucalipto	Pinus	TOTAL
Sudeste	Minas Gerais	1.083,74	152,00	1.235,74
	São Paulo	816,88	146,47	963,35
	Espírito Santo	207,80	4,41	212,21
	Outros	9,76		9,76
<b>Subtotal</b>		<b>2.118,18</b>	<b>302,88</b>	<b>2.421,06</b>
Sul	Paraná	121,91	686,45	808,36
	Santa Catarina	70,34	530,99	601,33
	Rio Grande do Sul	184,25	181,38	365,62
<b>Subtotal</b>		<b>376,49</b>	<b>1.398,82</b>	<b>1.775,32</b>
Nordeste	Bahia	540,17	54,82	594,99
	Maranhão	93,29		93,29
	Outros	7,79		7,79
<b>Subtotal</b>		<b>641,25</b>	<b>54,82</b>	<b>696,07</b>
Centro-Oeste	Mato Grosso do Sul	119,32	28,50	147,82
	Góias	49,64	14,41	64,05
	Mato Grosso	46,15	0,01	46,15
	Outros		-	
<b>Subtotal</b>		<b>215,10</b>	<b>42,92</b>	<b>258,02</b>
Norte	Pará	115,81	0,15	115,96
	Amapá	58,47	20,49	78,96
	Outros	23,84	4,19	28,03
<b>Subtotal</b>		<b>198,12</b>	<b>24,83</b>	<b>222,95</b>

Fonte: ABRAF, 2006

O volume de produção sustentada<sup>22</sup> indica a quantidade ofertada anualmente pelas florestas em regime de manejo sustentado. A Tabela 19 destaca uma produção sustentada superior a 160.000 mil m<sup>3</sup> por ano das principais espécies utilizadas para plantio no Brasil (eucalipto, pinus e acácia) (ABIMCI, 2007).

<sup>22</sup> Produção Sustentada: quando a extração de recursos naturais finitos é feita de forma que haja uma área destinada à recuperação do mesmo tamanho da área onde ocorreu a extração dos recursos.

**Tabela 19 – Produtividade e Produção sustentada de Florestas Plantadas no Brasil (2006)**

Espécie	Área (ha)	IMA* (m³/ha.ano)	Produção Sustentada (1.000m³/ano)
Eucalipto	3.549.147	33	117.122
Pinus	1.824.270	25	45.607
Acácia	184.363	18	3.319
Teca	42.496	9	382
Paricá	41.100	25	1.028
Outras**	102.559	10	1.026
Total	5.743.935	-	168.483

\*IMA- Incremento Médio Anual – Volume de madeira produzida por unidade de área (hectares) no período de um ano; trata-se de um indicador de rendimento florestal.

\*\*Outras espécies: seringueira, araucária e populus

Fonte:ABIMCI, 2007

O processamento da madeira gera uma grande quantidade de resíduos, tanto na indústria quanto na floresta, os quais são considerados biocombustíveis. Estatísticas apontam que cerca de 20% da massa de uma árvore pinus, por exemplo, é deixado no campo após o corte – que além do desperdício que representa, pode dificultar os tratamentos subsequentes. (ABIMCI, 2007)

Já na fase de transformação industrial, apenas 40% a 60% do volume da tora<sup>23</sup> é aproveitado. Essa grande quantidade de resíduos pode representar um grave problema pela dificuldade de armazenamento, dispersão e dificuldade no manuseio. Dentre os diversos tipos de resíduos de madeira destacam-se a maravalha, as aparas, os pellets, os cavacos e os briquetes. A Figura 33 traz alguns exemplos desses resíduos que estão inseridos no processo de geração de energia. (idem)

<sup>23</sup>

Compreende-se por tora um grande tronco de madeira ou partes do tronco.



**Figura 33 – Exemplos de Bicombustíveis de madeira**

Dentre os derivados da madeira destacam-se o carvão vegetal, madeira para construção civil e o cavaco de madeira (*Woodchips*) – lascas cisalhadas obtidas a partir de toras de madeira que passará pelo processo de cozimento para obter a celulose. Existem três tipos de cavacos de madeira e são cortados em três modalidades: o corte 90-0 (Tipo I), corte 90-90 (Tipo II) e corte 0-90 (Tipo III). (NEUTZLING, 2007)

- Tipo I: o cavaco é formado à frente da aresta de corte da ferramenta à primeira ruptura se dá por fendilhamento e o cavaco se separa da peça por ruptura a flexão, como uma viga engastada.
- Tipo II: o cavaco é formado quando a ruptura da madeira se produz ao longo de uma linha que se estende a partir da aresta de corte da ferramenta: a ruptura se dá por cisalhamento diagonal e forma um cavaco contínuo. É o tipo de cavaco relacionado à melhor qualidade de superfície.
- Tipo III: as forças de corte produzem ruptura por compressão paralela e cisalhamento longitudinal, diante da aresta da ferramenta de corte: o cavaco não tem forma definida e é reduzido a fragmentos.

A qualidade do cavaco é proveniente do tipo de corte, pois não existe um padrão definido em função do cisalhamento, mas o tamanho é importante (idem).

Dado os aspectos físicos, vale caracterizar os aspectos físico-químicos, através do seu potencial calórico ou poder calorífico<sup>24</sup>. O poder calorífico apresenta-se de duas formas, devido ao teor de umidade do combustível em questão: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).

O poder calorífico superior é dado pela soma da energia libertada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma na reação de oxidação do hidrogênio presente no combustível. O PCI só considera o primeiro termo, isto é, a energia libertada na forma de calor. A diferença entre PCS e PCI é o calor latente de vaporização da água.

Para combustíveis que não contenham hidrogênio na sua composição, o valor de PCS é igual ao do PCI, porque não há a formação de água e conseqüentemente não há energia gasta na sua vaporização. Assim, o PCS é sempre maior ou igual ao PCI. a Tabela 20 apresenta as características de cavacos de madeira de duas fontes diferentes. Observa-se que há pequena variação quanto à umidade e poder calorífico.

**Tabela 20 – Características do Cavaco de Madeira**

Cavaco	Florestal	de Serrarias
Origem	Resíduos do manejo dos reflorestamentos (galhos e ponteiros)	Costaneiras e sobras de madeira das serrarias
Madeira	Pinus ou Eucaliptus	Pinus ou Eucaliptus
Granulometria	2 x 4 x 8cm	2 x 4 x 8cm
Umidade	16 a 30%	35 a 45%
Poder Calorífico - PCI	2.600 a 3.600 kcal / kg	2.100 a 2.400 kcal / kg
Peso específico	220 a 330 kg / m <sup>3</sup>	360 a 400 kg / m <sup>3</sup>
Obs	Pode ter até 20% entre folhas e cascas	Pode conter até 30% de serragem
Locais disponíveis	São Paulo, Sul de Minas Gerais e Goiás	Todo o estado de São Paulo, Sul de Minas, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná

Fonte: (OPÇÃO VERDE, 2008)

A composição química e o potencial calórico são fundamentais para determinação da potencialidade do combustível e avaliar se sua utilização ocorre em sua capacidade plena. São características fundamentais para esta análise a composição elementar, a composição imediata e poder calorífico.

A composição elementar de um combustível é o conteúdo em percentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W)

<sup>24</sup> Define-se como poder calorífico a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) libertada na oxidação completa de um determinado combustível.

e material residual ou cinzas (A). Considera-se a composição elementar a característica técnica mais importante do combustível, compondo a base para análise dos processos de combustão.

Já o conteúdo em percentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A) de um combustível é conhecida como composição imediata. Os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais e combustão da biomassa. (CORRÊA NETO, 2001)

Para o caso dos cavacos de madeira, observa-se que a lenha possui uma composição variada conforme a espécie vegetal, contendo majoritariamente celulose, hemicelulose e lignina, e substâncias menores, como resinas, nutrientes da planta e dentre outras. (FERREIRA, 2006)

Considerando como matéria prima o *Eucalyptus grandis*, sua composição média encontra-se conforme ilustra a Tabela 21.

**Tabela 21 – Características físico-químicas da lenha seca de *Eucalyptus Grandis***

Constituinte	Carbono	Oxigênio	Hidrogênio
Teor % em massa	50	44	6

Fonte: FERREIRA, 2006

Estimativas indicam um potencial energético de 10GW (35EJ) por ano dos resíduos da extração florestal no mundo. Grande parte desses resíduos é obtida de forma segura nas plantas de processamento de madeira e obtenção de celulose e papel. O poder calorífico inferior da madeira pode variar entre 11,3 MJ/kg e 8,8 MJ/kg, considerando a madeira nativa e plantada, respectivamente. (PNAE, 2005). Segundo o Balanço Energético Nacional (2007) a lenha catada e a plantada têm poder calorífico inferior de 3.100 kcal/kg (ou aproximadamente 13,0 MJ/kg). Já o Plano Nacional de Energia (2007 b) estima o poder calorífico superior de 19,0 MJ/kg para eucalipto e de 19,3 MJ/kg para pinus.

Para avaliar o potencial brasileiro de geração de energia elétrica com cavaco de madeira, considerou-se os dados advindos da indústria de celulose e papel que gera, aproximadamente, 5,0 Mtoe de resíduos sem aproveitamento energético. Parcela considerável dos resíduos permanece no campo, na forma de galhadas e restos de tronco, após o corte das árvores, necessitando de profundos estudos para viabilizar seu aproveitamento energético. (FERREIRA, 2006).

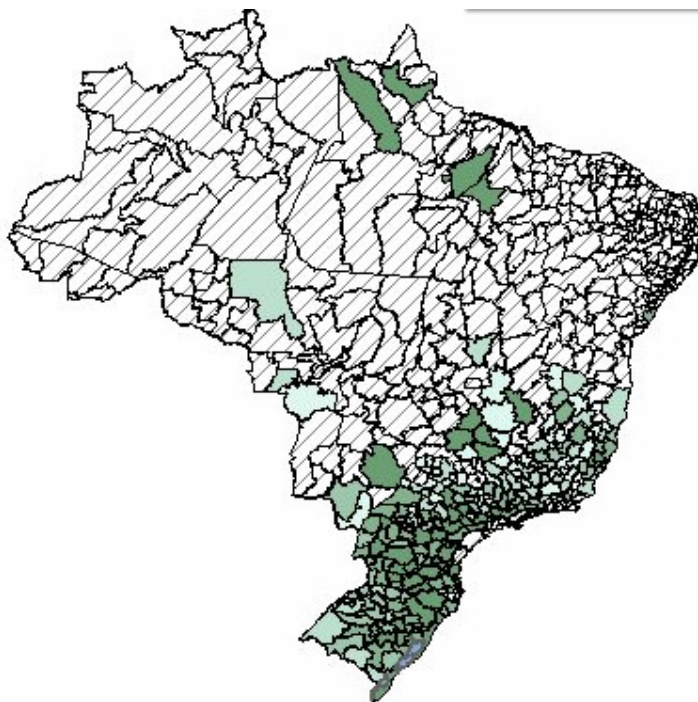
Para a avaliação do potencial de geração elétrica no segmento madeireiro no Brasil, optou-se por considerar o caso das indústrias que processam madeira em tora na produção de compensados e serrados, nas quais se origina o maior volume dos resíduos do segmento. Nas etapas iniciais de fabricação destes produtos – descascamento, corte em serras ou laminação das toras – são geradas grandes quantidades de casca e cavaco, que podem ser aproveitadas na geração de energia elétrica no próprio local, ou ainda transportadas com relativa facilidade caso sejam comercializadas, pois possuem dimensões que facilitam o seu armazenamento e manipulação.

Por outro lado, empresas que processam a madeira serrada para a fabricação de produtos de maior valor agregado tendem a produzir resíduos em menor quantidade e com dimensões mais reduzidas, como a serragem e o pó de madeira, que podem ser aproveitados localmente devido a maior dificuldade de transporte.

Na Tabela 22 e na Figura 34 observa-se a produção de madeira no Brasil no ano de 2006 e sua distribuição geográfica. Segundo dados do IBGE (2003), os Estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul têm maiores áreas de madeira plantada e os Estados do Pará e Mato Grosso de madeira nativa. Ressalta-se a produção de aproximadamente 3,2 milhões de m<sup>3</sup> de madeira na silvicultura.

**Tabela 22 – Produção de Madeira, Brasil 2006**

Legenda				
Variável = Quantidade produzida na silvicultura (Metro cúbico)				
Tipo de produto da silvicultura = 1.3.2 – Madeira em tora para outras finalidades				
Ano = 2006				
Nível Territorial = Microrregião Geográfica				
Cor	De	Até	Frequência %	
	5	2.095	47	13,3
	2.388	9.047	44	12,4
	9.147	38.595	44	12,4
	40.032	159.570	44	12,4
	164.687	3.263.800	45	12,7
///// Ausência de dados, (-) ou valor desidentificado			130	36,7
Fonte: IBGE - Silvicultura				



**Figura 34 – Produção de Madeira, Brasil 2006**

### **5.1.2 Bagaço de Cana**

A cana-de-açúcar, nome comum de uma herbácea vivaz, é uma planta que pertence ao gênero *Saccharum L.*, da família das gramíneas, espécie *Saccharum officinarum*, originária da Ásia Meridional. Há pelo menos seis espécies do gênero, sendo a cana-de-açúcar cultivada um híbrido multiespecífico, recebendo a designação *Saccharum spp.* Ela é muito cultivada em países tropicais e subtropicais, onde se alternam as estações secas e úmidas, para obtenção do açúcar, do álcool e da aguardente, devido à sacarose contida em seu caule, formado por numerosos nós.

A cana de açúcar é uma planta da família *Poaceae*, representada pelo milho, sorgo, arroz e muitas outras gramas. As principais características dessa família são a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos, e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta.

Os colmos, caracterizados por nós bem marcados e entrenós distintos, quase sempre fistulosos<sup>25</sup>, são espessos e repletos de suco açucarado. As flores, muito pequenas, formam espigas florais, agrupadas em panículas e rodeadas por longas fibras

---

<sup>25</sup> Provido de cavidade central alongada (FERREIRA, 2004)

sedosas, congregando-se em enormes pendões terminais, de coloração cinzento-prateado.

Existem diversas variedades cultivadas de cana-de-açúcar, que se distinguem pela cor e pela altura do caule, que atinge entre 3 e 6 m de altura, por 2 a 5 cm de diâmetro, sendo sua multiplicação feita, desde a antiguidade, a partir de estacas (algumas variedades não produzem sementes férteis). Sua floração, em geral, começa no outono e a colheita se dá na estação seca, durante um período de 3 a 6 meses.

A cana-de-açúcar foi introduzida na China antes do início da era cristã. Seu uso no Oriente, provavelmente na forma de xarope, data da mais remota antiguidade. Foi introduzida na Europa pelos árabes, que iniciaram seu cultivo na Andaluzia. No século XIV, já era cultivada em toda a região mediterrânea, mas a produção era insuficiente, levando os europeus a importarem o produto do Oriente. A guerra entre Veneza, que monopolizava o comércio do açúcar, e os turcos levou à procura de outras fontes de abastecimento, e a cana começou a ser cultivada na Ilha da Madeira pelos portugueses e nas Ilhas Canárias pelos espanhóis.

O descobrimento da América permitiu extraordinária expansão das áreas de cultura da cana. As primeiras mudas, trazidas da Madeira, chegaram ao Brasil em 1502, e, já em 1550, numerosos engenhos espalhados pelo litoral produziam açúcar de qualidade equivalente ao verificado na Índia. Incentivado o cultivo da cana por Portugal, com isenção do imposto de exportação e outras regalias, o Brasil tornou-se, em meados do século XVII, o maior produtor de açúcar de cana do mundo. A indústria do açúcar no país, que surgia nos meados do século XVI, deu início a um ciclo que durou 150 anos. Após este período, o Brasil deixou de ser o maior produtor por muitos anos, mas com o advento do Pro-Álcool (Programa Nacional do Álcool) na década de 1970, o início da produção de álcool combustível fez com que a cultura da cana-de-açúcar expandisse novamente e o Brasil voltasse a ser o maior produtor mundial, sendo pioneiro no uso, em larga escala, deste álcool como combustível automotivo.

O bagaço é o material fibroso residual obtido após a extração do caldo de cana num terreno de moendas, é aproveitado quando hidrolisado, juntamente com a levedura da cana (resíduo da fermentação), em rações para a alimentação do gado confinado. A vinhaça ou vinhoto, outro resíduo, também pode ser usada como adubo, mas no Brasil muitas vezes é lançada aos rios, apesar da proibição, causando grave poluição e mortandade de peixes.

Desde a sua implantação e em maior escala a partir da metade do século XX, e intensificada com o Pró-Álcool, as indústrias do setor sucroalcooleiro desenvolveram instalações próprias de geração elétrica, seja através de pequenos aproveitamentos hidrelétricos, óleo diesel, e depois face à indisponibilidade de energia elétrica e aos seus custos, adotaram-se sistemas de geração, em processo de cogeração, ajustados às necessidades do processamento industrial da cana de açúcar, utilizando o bagaço.

Mas como a quantidade do bagaço produzida é muito elevada (aproximadamente 30% da cana moída), existe um grande potencial para geração de eletricidade para venda comercial .

#### **5.1.2.1 Os resíduos da indústria canavieira**

As usinas açucareiras e destilarias produzem, como resíduos sólido, o bagaço de cana, a torta de filtro (resíduo obtido após a filtração do caldo de cana). Ao sair, o bagaço possui aproximadamente 30% da massa da cana e cerca de 50% em umidade. (SILVA, 2007) O processamento de 1000 toneladas de cana de açúcar rende, em usinas açucareiras, em média, 280 toneladas de bagaço e 35 toneladas de torta de filtro em base úmida. (MATOS, 2005). Estima-se que a cada ano sejam produzidos entre 5 e 12 milhões de toneladas desta biomassa, correspondendo a cerca de 30% do total da cana moída. (SILVA, 2007)

Segundo dados da Coopersucar (2008) a safra 2006/2007 foi responsável pela produção de 58,6 milhões de toneladas de cana de açúcar, o que gerou algo em torno de 16 milhões de toneladas de bagaço.

Por outro lado, em sua tese de mestrado CORRÊA NETO (2001) baseia-se em uma metodologia desenvolvida por Lora *et al* (1997) onde se estima a quantidade de biomassa na cultura de cana de açúcar. Nesta metodologia define-se o coeficiente de resíduos (CR), o coeficiente de disponibilidade (CD) e a quantidade total de resíduos (CRE).:

Coeficiente de Resíduos (CR): relação entre a quantidade de resíduo total (em base seca) e a massa da colheita com umidade do campo (MC);

Coeficiente de Disponibilidade (CD): relação entre a quantidade de resíduo disponível (em base seca) e a massa total de resíduos, em %;

Quantidade Total de Resíduos (CRE):

$$CRE = MC \times CR$$

Estes valores variam com as práticas culturais e peculiaridades regionais. Para a cultura da cana-de-açúcar, tendo o colmo da cana como produto, encontra-se como valor de referência um coeficiente de resíduo entre 0,25 e 0,30 e um coeficiente de disponibilidade de 100 %, quando se considera apenas o bagaço como resíduo.

Se forem avaliadas também como resíduos a biomassa da folhagem da planta, a palha e as pontas da cana, tem-se o coeficiente de resíduo entre 0,70 e 0,90 e o coeficiente de disponibilidade variando de 35 % ao máximo de 100% (quando apenas o bagaço estiver realmente disponível e quando toda a biomassa encontra condições técnico-econômicas de aproveitamento, respectivamente). A Tabela 23 ilustra os diferentes coeficientes de acordo com a biomassa residual analisada.

**Tabela 23 – Disponibilidade de Resíduos de Cana de Açúcar**

Biomassa Residual	Coeficiente de Resíduo ( $C_R$ )	Coeficiente de Disponibilidade ( $C_D$ ) (%)	Quantidade Total de Biomassa* ( $C_{RE}$ ) ( $kg_{biomassa}/t_{cana}$ )
Bagaço	0,125 a 0,15	100	125 a 150
Bagaço, pontas e palha	0,35 a 0,45	35 (só bagaço)	125 a 150
		50 (parcial)	175 a 255
		100 (integral)	350 a 450

\* Todos os valores em base seca. Fonte: CORRÊA NETO, 2001

Ressalta-se que, mesmo diante de uma cultura com elevado coeficiente de resíduos, sua utilização somente torna-se viável na presença de tecnologias e infra-estrutura de processamento e transporte.

Para o bagaço de cana, o coeficiente de resíduos é o parâmetro fundamental, pois ele é determinado pela variedade da cana-de-açúcar e sua proporção de fibras. O coeficiente de disponibilidade do bagaço de cana é de 100%, já que ele se encontra no pátio da usina e a quantidade total de biomassa varia entre 125 e 150  $kg_{Bagaço}/t_{cana}$ , em base seca, ou 250 a 300  $kg_{Bagaço}/t_{cana}$ , com 50 % de umidade. (CORRÊA NETO, 2001). Segundo SILVA (2007), o bagaço de cana é o resíduo agroindustrial produzido em maior quantidade no Brasil, com produção aproximada de 280  $kg_{biomassa}/t_{cana}$ . A Tabela 24 apresenta o teor de fibras médias presentes nas regiões N/NE, Centro/sul e do Brasil.

**Tabela 24– Características da Cana-de-açúcar por Região**

	Norte/Nordeste	Centro/Sul	Brasil
Teor de Fibras Médio (%)	16,15	13,22	13,35

Fonte: CORRÊA NETO, 2001

Nesta tese será adotado o valor de 270 kg<sub>bagaço</sub>/t<sub>cana</sub>, com 50% de umidade para quantidade total de biomassa na forma de bagaço, obtidos através dos valores presentes da Tabela 24, aplicada na metodologia de cálculo demonstrada a seguir:

$$Mb = \frac{Mc * Xf}{(1 - a)}$$

Onde:

Mb = quantidade Total de bagaço disponível (t)

Mc – quantidade Total de cana moída (t)

Xf – Teor de fibra da cana (t<sub>fibra</sub>/t<sub>cana</sub>)

a – teor de umidade do bagaço (t<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>bagaço úmido</sub>)

O aproveitamento da palha e das pontas é determinado pelo coeficiente de disponibilidade, que tem inúmeras variáveis, a saber: condição de topologia da área plantada, tipo de colheita (mecanizada ou manual), se houve queima, qual a disponibilidade de tecnologias e infra-estrutura de processamento e transporte. Adiciona-se ainda a variabilidade da quantidade de biomassa que é deixada no campo para adubar e/ou proteger as características do solo, em virtude da inúmera variedade de tipos de solo onde a cana é plantada.

Na determinação do coeficiente de disponibilidade, deve-se considerar a relação existente entre mecanização do processo de colheita e a disponibilidade da palha e pontas. Destarte, influirá de forma determinante neste coeficiente a quantidade de área mecanizada e a tecnologia empregada para viabilizar a coleta, enfardamento e transporte da palha e pontas até a usina.

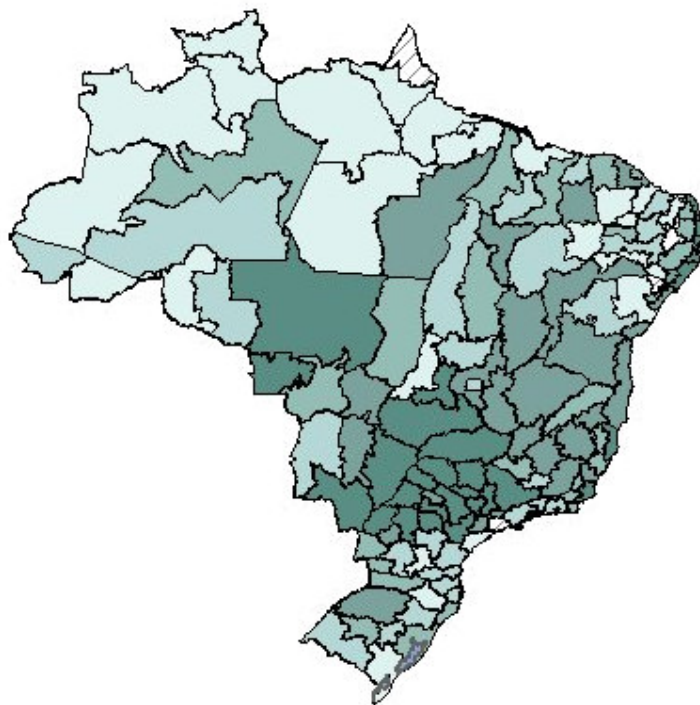
Estudos desenvolvidos pela COOPERSUCAR estimaram os valores para este coeficiente, com o objetivo de prever coerentemente o potencial de resíduo da colheita da cana sem queima e as tecnologias de colheita, e avaliar a viabilidade técnica e econômica de efetuar a colheita mecanizada e de recolher a palha deixada no campo após a colheita da cana crua. Resultados apontaram o insumo energético disponível corresponde a 30% da biomassa composta por palhas e pontas. (CORRÊA NETO, 2001)

Considerando o coeficiente de resíduo 0,4 e o coeficiente de disponibilidade 53%, tem-se como quantidade total de biomassa  $212 \text{ kg}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{cana}}$  em base seca e  $425 \text{ kg}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{cana}}$  com 50% de umidade,  $270 \text{ kg}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{cana}}$  de bagaço de cana e  $155 \text{ kg}_{\text{biomassa}}/\text{t}_{\text{cana}}$  de palha e ponta (CORRÊA NETO, 2001). O Plano Nacional de Energia (2007 a) estima entre 125 e 150 kg de bagaço para cada tonelada de cana em base seca, sendo que o valor adotado por eles é de 135 kg de bagaço em base seca para cada tonelada de cana de açúcar.

Na Tabela 25 e Figura 35 observa-se onde se concentra a produção de cana de açúcar no Brasil. É possível notar que esta se dá principalmente no estado de São Paulo e parte dos estados vizinhos.

**Tabela 25 – Produção de Cana de Açúcar, Brasil 2006**

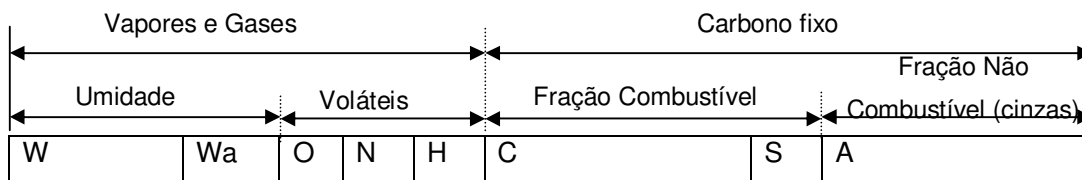
Legenda				
Variável = Quantidade produzida (Tonelada)				
Lavoura temporária = Cana-de-açúcar				
Ano = 2006				
Nível Territorial = Mesorregião Geográfica				
Cor	De	Até	Frequência	%
	288	22.763	26	19,0
	23.859	90.057	27	19,7
	91.470	454.496	26	19,0
	512.785	2.388.793	27	19,7
	2.737.062	84.058.409	27	19,7
/////	Ausência de dados, (-) ou valor desidentificado		4	2,9
Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal				



**Figura 35 – Produção de Cana de Açúcar, Brasil 2006**

Fonte: IBGE, 2008

Conforme já mencionado, a composição química da biomassa é fundamental para determinação do poder calorífico. Em relação ao bagaço de cana, o poder calorífico é função do teor de açúcar e da umidade e, sendo assim, a aplicação desta biomassa como recurso energético está relacionada a esses dois fatores. Uma vez que o teor de açúcar é normalmente baixo, a umidade passa a ser o fator limitante do poder calorífico. (CORRÊA NETO, 2001). No caso da cana de açúcar, a Figura 36 ilustra como se dá a relação entre composição elementar e composição imediata. Em ambos os casos, antes da realização das análises, deve-se determinar o teor de umidade da amostra através de secagem. O bagaço de cana apresenta características técnicas estáveis, e seu teor de umidade após a extração do caldo oscila entre 45 e 50%. A umidade interfere diretamente na combustão, influenciando a temperatura de ignição e a temperatura da chama. Ele apresenta também um baixo teor de carbono fixo. O elevado conteúdo de voláteis é um fator que deve ser considerado durante sua queima total e/ou gaseificação.



**Figura 36 – Relação entre composição elementar e imediata de um combustível**

Fonte: Lora *et al* (1997)

Devido a pouca umidade e a facilidade em serem pré-processados, os resíduos de biomassa da cana de açúcar podem ser preparados de forma relativamente fácil para obtenção de energia. A natureza do bagaço de cana o constituiu como matéria prima fibrosa, que contém, as seguintes substâncias em base seca conforme observado na Tabela 26 (CORRÊA NETO, 2001, SILVA 2007):

**Tabela 26 - Composição média da fibra do bagaço (%)**

Compostos	%	Fonte
celulose	50 ~ 60	CORRÊA NETO, 2001
	26,6 ~ 54,3	SILVA 2007
hemicelulose	20 ~ 25	CORRÊA NETO, 2001
	14,3 ~ 24,4	SILVA 2007
lignina	20 ~ 25%	CORRÊA NETO, 2001
	22,7 ~ 29,7	SILVA 2007

Fonte: elaboração própria

A Tabela 27 sumariza as informações concernentes ao bagaço de cana.

**Tabela 27 – Composição Imediata, elementar e Poder Calorífico do Bagaço de Cana**

Composição Imediata (% massa, base seca)			Composição Elementar (% massa, base seca)			Poder Calorífico (MJ/kg, base seca)		Fonte		
C fixo	Voláteis	cinzas	C	H	O	S	N	Superior	Inferior	
13	83	4,0	46,3	6,4	43,3	< 1,0	-	18,9	17,5	CORRÊA NETO, 2001
ND	ND	0,0 - 0,3	39,7 - 49	5,5 - 7,4	40 - 46	ND	0,0 - 0,3	ND	ND	SILVA 2007

ND = Não disponível

As palhas e pontas da cana de açúcar mereceram uma especial atenção em estudo realizado pela COPERSUCAR em 1998. Os componentes que compõem a palha (folhas verdes e folhas secas) e as pontas apresentaram diferenças importantes durante a análise de sua umidade, teor de álcalis e outras características, mesmo tendo composição básica semelhante, i.e., celulose, hemicelulose e lignina. Suas características são fortemente influenciadas por fatores tais como a variedade da cana, idade, número de cortes, o uso ou não do vinhoto na fertirrigação e do campo.

No entanto, o poder calorífico superior e a composição imediata não são influenciados pela variedade da cana nem pelo número de cortes, mas estes influenciam os teores de álcalis, fósforo e cálcio. Pela Tabela 28 observa-se uma variação dentre os valores de umidade nos diferentes componentes da palha e ponta colhida, já os valores de cinzas, voláteis, carbono fixo e poder calorífico (base seca) variam muito pouco.

**Tabela 28 – Média da Composição Imediata e Poder Calorífico Superior da Cana de açúcar**

Material	Composição Imediata (% m/m)				Poder Calorífico Superior* (MJ/kg)
	Cinzas*	Voláteis*	Carbono Fixo*	Teor de Umidade	
Folhas Secas	3,3	85,8	10,8	11,3	17,36
Folhas Verdes	3,2	85,2	11,7	66,7	17,38
Pontas	4,3	84,1	11,6	82,5	16,27

\*base seca, Fonte: CORRÊA NETO, 2001

Para o bagaço de cana, o poder calorífico considerado pelo BEN (2007) é de 2.130 kcal/kg de bagaço, ou 8,917 MJ/kg, com 50% de umidade. Este, embora abaixo de alguns valores encontrados nas referências, será adotado como valor padrão para esta tese.

### 5.1.3 Resíduos do Dendê

Em documento produzido pela Embrapa Amazônia Oriental em parceria com a Agroindustrial Palmasa S/A em 2006 (EMBRAPA, 2006), ressalta-se a perspectiva de um acelerado desenvolvimento da região da Amazônia Oriental devido a um programa de agroenergia, tendo como vetor principal a produção de dendê e extração de seu óleo para produção de biodiesel. Assim, a preocupação para que haja uma destinação apropriada para os subprodutos e resíduos desta indústria tornam-se latentes.

Soma-se a isto o fato de uma demanda insatisfeita da ordem de 500.000 toneladas de óleo de dendê e de importações que se situam entre 100 e 150 mil toneladas, a preocupação com o futuro dos resíduos de dendê são justificadas. (SOUZA, 2000)

Palmeira de origem africana, o dendezeiro (*Elaeis guineensis*), também conhecido como palmeira-de-óleo-africana, aavora, palma-de-guiné, palma, dendém (em Angola), palmeira-dendém, coqueiro-de-dendê desenvolve-se em sua máxima potencialidade em regiões tropicais, de clima quente e úmido, com precipitações elevadas e distribuídas uniformemente ao longo do ano. (EMBRAPA, 2008, SOUZA, 2000)

Esta palmeira, que alcança os 15 metros de altura, produz dois tipos de óleo: óleo de dendê ou de palma (*palm oil*) e o óleo de palmiste (*palm kernel oil*). O primeiro é extraído da parte externa do fruto, o mesocarpo; o seguinte é extraído da semente, similar ao óleo de coco e de babaçu. (EMBRAPA, 2008)

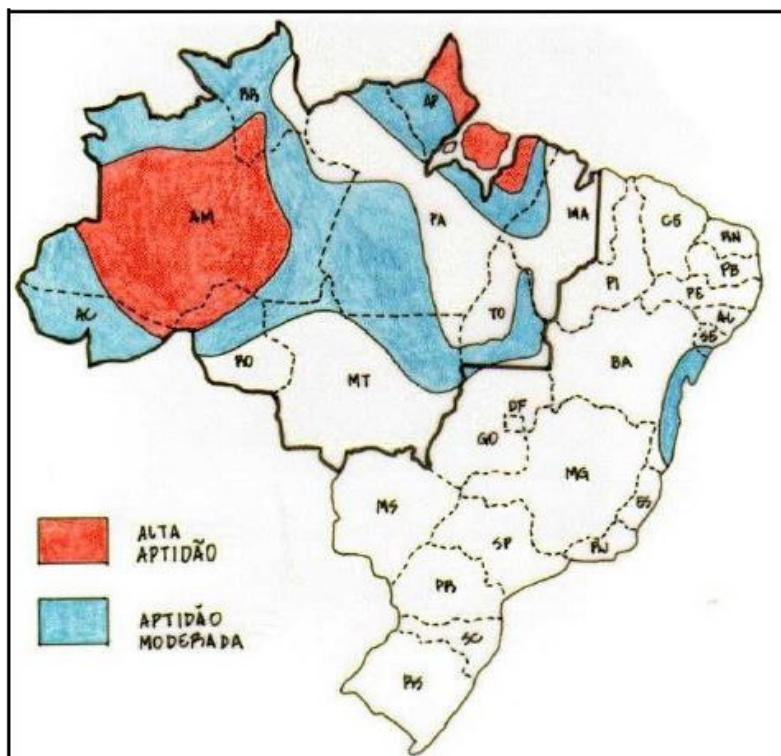
O uso de seu óleo consta nos primórdios das civilizações, desde o tempo dos egípcios. O dendeneiro foi introduzido ao continente americano através do comércio de escravos africanos, tendo chegado ao Brasil em solo baiano no século XVII, onde adaptou-se bem ao clima tropical úmido do litoral da Bahia, que possui uma diversidade edafo-climática particularmente excepcional ao cultivo do dendê.

O início do cultivo industrial do dendê é datado dos primórdios do século XX. No Brasil as plantações tiveram início na Bahia e seguiram para o Pará e Amazonas no início dos anos 60. Anteriormente ao Brasil, a África possuía cerca de 14.000 hectares de plantações comerciais já em 1939, enquanto o Sudeste Asiático (entende-se por Malásia e Indonésia) desde 1935 exportavam para o mundo óleo de palma. (EMBRAPA, 2008) e viabilizou a reforma agrária na Malásia. (RODRIGUES, 2003)

O Brasil apresenta condições atrativas para o plantio do dendê, que é pouco explorado em função da alta disponibilidade de terras aptas para o seu cultivo. Considerando somente a Região Sudeste da Bahia, que depende quase exclusivamente da monocultura do cacau, há cerca de 1 milhão de hectares, remanescentes da mata atlântica, próprios à cultura do dendeneiro, com potencial de produção de 4 a 6 milhões de toneladas de óleo, equivalentes a aproximadamente 25 milhões de barris de petróleo por ano, ou mais de 65 mil barris diários. (CEPLAC, 2008) A Embrapa mapeou as áreas de maiores aptidões e acredita-se que a mesma alcance 69,9 milhões de hectares com alta/média aptidão para o cultivo do dendê em áreas de floresta amazônica degradadas. A Figura 37 ilustra este mapeamento<sup>26</sup>. (RODRIGUES, 2003)

---

<sup>26</sup> Para maiores informações sobre esta figura ver MEDEIROS, 2008



**Figura 37 – Zonas aptas para o cultivo do dendê**

Fonte: RODRIGUES, 2003

A Tabela 29 complementa a informação contida no mapa. A maior área apta para cultivo de dendê concentra-se no estado do Amazonas. As outras áreas são bem menores, porém não negligenciáveis, e distribuem-se majoritariamente entre os Estados do Norte do país.

**Tabela 29 – Áreas de Cultivo de Dendê por Estado**

Estado	Hectares (milhares )
Acre	2,5
Amapá	0,5
Amazonas	54,0
Bahia	0,9
Pará	5,0
Rondônia	2,0
Roraima	4,0
Tocantins	1,0
Total	69,9

Fonte: RODRIGUES, 2003

Como em todo cultivo arbóreo perene, a implantação de dendezaís não é um projeto de maturação econômica imediata. O dendê é uma planta cuja produção se dá somente longo tempo após o plantio. Esta palmeira tem seus frutos em cachos. Uma vez que este seja corretamente conduzido, a produção começa a partir do terceiro ano, onde obtém-se entre 6 e 8 toneladas de cachos/ha, atingindo o pico máximo de produção no oitavo ano, onde pode-se obter 25 toneladas de cacho/ha. Esta produção permanece assim por mais 9 anos, onde se completa 17 anos de plantio. Há um declínio suave até o fim da sua vida útil produtiva, quando a planta está no seu 25º ano de vida. (EMBRAPA, 2008, CEPLAC, 2008)

Esta produtividade é fruto de pesquisa em diversos órgãos ligados à agricultura. A pesquisa agrônômica contribuiu para a expansão mundial da cultura do dendê, culminando em um significativo aumento da produtividade. Entre 1951 e 1991 este incremento chegou a 315%, baseando-se em produções obtidas nas primeiras plantações da variedade tipo *Dura*. Outro fator que levou à melhora da produtividade foi a melhor eficiência no uso dos fertilizantes e potencialização genética das sementes do dendezeiro. (EMBRAPA, 2008).

O estudo para que sua produtividade seja elevada é suscitado pelas características desta palmácea. Dentre as oleaginosas cultivadas, o dendê apresenta-se como particularmente atrativa devido à sua grande produção de óleo por área cultivada. Sob condições extremamente favoráveis, a produção pode alcançar 8 toneladas de óleo por hectare por ano. (idem).

O Plano de Agro Energia elaborado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em parceria com a EMBRAPA (PNAE, 2005) sintetiza algumas características de culturas das principais oleaginosas no Brasil. A Tabela 30 compara suas características, tais como o teor de óleo e o rendimento (em tonelada de óleo por hectare).

**Tabela 30 – Característica das Principais oleaginosas no Brasil**

Espécie	Origem do óleo	Teor do óleo (%)	Meses de Coleita /ano	Rendimento (t óleo/ ha)
Dendê / Palma	Amêndoa	22,0	12	3,0 – 6,0
Coco	Fruto	55,0 – 60,0	12	1,3 – 1,9
Babaçu	Amêndoa	66,0	12	0,1 – 0,3
Girassol	Grão	38,0 - 48,0	3	0,5 – 1,9
Colza / Canola	Grão	40,0 -48,0	3	0,5 - 0,9
Mamona	Grão	45,0 – 50,0	3	0,5 - 0,9
Amendoim	Grão	40,0 – 43,0	3	0,6 – 0,8
Soja	Grão	18	3	0,2 – 0,4
Algodão	Grão	15	3	0,1 - 0,2

Fonte: PNAE, 2005

O consumo de óleo de dendê tem crescido a uma taxa aproximada de 8% nos últimos 30 anos. Entretanto o crescimento acelerado do cultivo desta palmácea traz consigo um grande número de subprodutos, tanto no campo quanto na usina de beneficiamento. Estes podem ser fontes para nutrientes quando reciclados nas plantações, fonte de energia nas usinas ou manufaturados numa série de produtos para agricultura ou para a indústria. A Tabela 31 ilustra a divisão percentual dos produtos e subprodutos do dendê em massa. Além dos subprodutos citados deve-se considerar a produção de efluente líquido, POME (do inglês *Palm Oil Mill Effluent*), um dos grandes problemas desta indústria. Embora rico em nutrientes, o uso do POME como fertilizante pode ser danoso ao meio ambiente. Sua produção varia de acordo com o processo utilizado, chegando a 0,67 toneladas de POME por tonelada de cacho de fruto fresco processado. (EMBRAPA, 2006)

**Tabela 31 – Produtos e Subprodutos do dendê**

Produtos / Subprodutos	Distribuição %
Óleo de palma bruto	20
Óleo de palmiste	1,5
Torta de palmiste	3,5
Engaços	22
Fibras	12
Cascas	5

Fonte: EMBRAPA, 2006

Dentre os resíduos advindos da cultura do dendê destacam-se as folhas e o engaço. As folhas, podadas durante as colheitas e rondas de podas, retornam ao solo onde a decomposição é feita naturalmente. A disponibilidade dos nutrientes é rápida, ocorrendo a mineralização de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) em 24 meses. O engaço é suporte fibroso que sustenta o fruto, e para cada tonelada de óleo produzido é produzida aproximadamente a mesma quantidade de engaço. Dado o enorme volume produzido e o estreitamento da legislação ambiental, as indústrias de óleo de palma têm desenvolvido parceria com centros de pesquisa almejando encontrar alternativas para o destino final deste e outros subprodutos. A decomposição do engaço á céu aberto leva de dois a dois anos e meio para ser completa. A compostagem feita em uma unidade demonstrativa da Agroindústria Palmasa S/A no município de Igarapé-Açu, PA, teve seu processo concluído em um período de 230 dias. (idem)

Assim, em virtude do longo tempo destinado a sua decomposição via compostagem, a gaseificação se apresenta como uma excelente alternativa para seu uso energético. Em base seca, o engaço possui 88% de voláteis e poder calorífico superior a 3.940 kcal/kg (16,5 MJ/kg), com umidade variando de 60 a 75%, totalmente composto por fibras e ainda uma quantidade de aproximadamente 6% de óleo, que absorve durante o processo de esterilização.

Embora presente em menor proporção, a torta de palmiste é resultante da extração do óleo da amêndoa do dendê ou palmiste. Seu elevado conteúdo em fibras e proteínas faz com esta torta se torne atrativa ao consumo animal. Estudos realizados no Brasil avaliaram ser possível substituir em alimentos concentrados 60% do farelo de trigo por torta de amêndoa de dendê. (EMBRAPA, 2006)

Em percentual um pouco mais elevado que a torta, a casca representa em média 5% do fruto do dendezeiro e possui um elevado poder calorífico (4401 kcal/kg, 20% de umidade, ou 18,41 MJ/kg), sendo assim frequentemente utilizada como combustível. Por sua vez, as fibras do mesocarpo<sup>27</sup>, em uma proporção de 12% do cacho do fruto fresco, embora possa ser utilizada como adubo orgânico, também é bastante utilizada como combustível, com seu poder calorífico de 2600 kcal/kg (10,87 MJ/kg) (idem)

Considerando as informações do IBGE (2008), a produção de dendê em 2006 foi de 828.117 toneladas. Considerando a distribuição citada na Tabela 31, a distribuição de produtos e sub-produtos se dá na seguinte proporção, conforme ilustrado na Tabela 32.

**Tabela 32 – Quantidade de produtos e subprodutos gerados em 2006**

Produtos / Subprodutos	Produção 2006 (t)
Óleo de palma bruto	165.623,40
Óleo de palmiste	2.421,76
Torta de palmiste	28.984,10
Engaços	182.185,74
Fibras	99.374,04
Cascas	41.405,85

Fonte: elaboração própria

Tomando os elementos que podem vir a ser insumos energéticos, i.e., engaço, casca e fibras do mesocarpo, a quantidade chega a mais de 300 mil toneladas considerando a produção registrada em 2006. A Tabela 33 e Figura 38 ilustram a distribuição da produção de dendê no Brasil. Nota-se que ela concentra-se no sul da Bahia.

---

<sup>27</sup> Polpa do fruto.

**Tabela 33 – Produção dendê Brasil 2006**

Legenda				
Variável = Quantidade produzida (Tonelada)				
Lavoura permanente = Dendê (coco)				
Ano = 2006				
Nível Territorial = Microrregião Geográfica				
Cor	De	Até	Frequência	%
	59	183	2	0,4
	1.565	3.126	2	0,4
	16.593	24.580	2	0,4
	50.500	71.444	2	0,4
	77.817	828.117	3	0,5
/////	Ausência de dados, (-) ou valor desidentificado		546	98,0
Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal				



**Figura 38 – Produção de Dendê, Brasil 2006**

Em 2005, a produção brasileira de óleo de dendê foi de 5,6 milhões de m³; de mamona 90 mil m³; girassol, 23 mil m³; algodão, 151 mil m³; e soja, 315 mil m³.(ALGODAO BRAS. 2006)

#### 5.1.4 Torta de Mamona

A mamoneira, cientificamente denominada *Ricinus communis* L., é planta da família euforbiácea, que possui cerca de 7.000 espécies e engloba um vasto número de

plantas nativas da região tropical. A mamoneira destaca-se por ser a única das euforbiáceas que produz um óleo glicérico, solúvel em álcool e com outras propriedades singulares, como o mais viscoso de todos os óleos. Esta planta apresenta variabilidade grande de tipos, com seis subespécies e 25 variedades botânicas, além de milhares de cultivares comerciais simples híbridos em todo o mundo, em especial nos principais países produtores, Índia (produtora milenar da oleaginosa, absorvendo o seu consumo interno 50% da sua produção), China, Brasil e Rússia (EMBRAPA, 2004). É uma planta de hábito arbustivo, de portes diversos, com variadas colorações de caule, folhas e racemos (cachos), podendo ou não possuir cera no caule e pecíolo<sup>28</sup>. As sementes apresentam-se com tamanhos e formatos variados, além de grande variabilidade de coloração (CHIARADIA, 2005). No Brasil, conhece-se a mamona sob as denominações de mamoneira, rícino, carrapateira e palma-criste; na Inglaterra e Estados Unidos, pelo nome de *castor beans* e *castor seed*. Sua origem é contraditória, ora sendo dada como asiática, ora africana e, até mesmo, como planta nativa da América. De qualquer forma, menção à ela é feita desde a mais remota antiguidade. Segundo autores clássicos, já era conhecida à época dos antigos egípcios que a apreciavam como planta milagrosa, sendo igualmente utilizada na Índia desde os tempos imemoriais para os mais diversos fins. No Brasil a mamona é conhecida desde a era colonial quando dela se extraía o óleo para lubrificar as engrenagens e os mancais dos inúmeros engenhos de cana (CRIAR E PLANTAR, 2008).

Sua importância é ressaltada na obra *Historiorum Mundi*, de Plínio, conhecida há 1.900 anos. Neste documento encontra-se o seguinte trecho no qual são descritas as qualidades do óleo da mamona:

*"O óleo de mamona bebe-se com igual quantidade de água morna para purgar o corpo. Diz-se particularmente que purga os intestinos. É útil nas moléstias das articulações, em todas as inflamações ao ouvido e às assaduras. Com a cinza de peixe é usada na cura da sama. Dá boa cor à pele e faz nascer o cabelo abundantemente. Nenhum animal é capaz de comer a semente da qual se extrai o óleo. Das bagas fazem-se lâmpadas de particular claridade. As folhas cozidas no vinho, se usadas como emplastro e açafraão nas inflamações e, colocados por três dias no rosto, por três dias o purgam"* (idem).

---

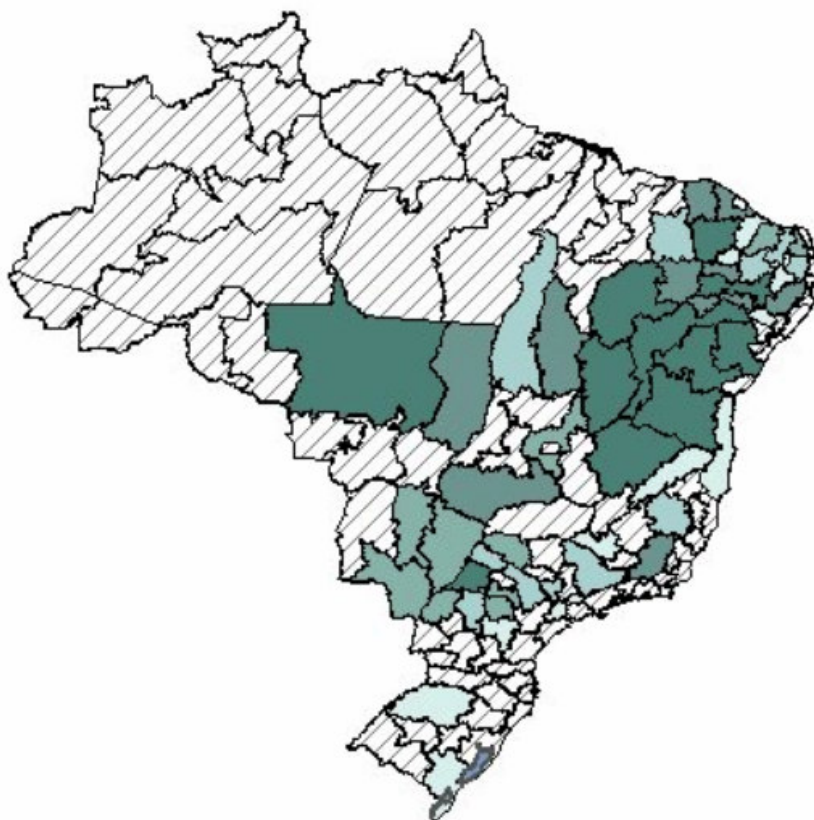
<sup>28</sup>

Pecíolo: haste que sustenta o limbo da folha e a une à bainha ou diretamente ao ramo; pé.

A cultura da mamona no Brasil é tradicional no semi-árido e bastante cultivada por pequenos e médios produtores em quase todos os Estados da Federação. Esta região, que ocupa mais de 900.000 km<sup>2</sup>, possui poucas culturas que se adequariam às suas condições, e dentre elas destaca-se a mamona, que possibilita a produção com rentabilidade. O semi-árido nacional encontra-se, em sua grande parte, na região nordeste do Brasil, e o fato de o nordeste ser o maior produtor também se deve às dificuldades climáticas impossibilitarem a produção de outras culturas conhecidamente mais rentáveis. O Brasil, na década de 70 e 80 do século passado, foi um dos maiores produtores desta euforbiácea no mundo, chegando a colocar no mercado interno e externo anualmente cerca de 200 mil toneladas, o que representava mais de 60% da produção mundial. Hoje o Brasil é o terceiro produtor mundial de bagas e é o segundo exportador mundial de óleo de mamona, e poderia vir a ser o primeiro produtor em pouco tempo, caso mantivesse a produtividade média maior que a do maior produtor atual que é a Índia. No entanto, nos últimos anos a produção brasileira vem sofrendo forte queda, perdendo mercado exterior. A diminuição da produção no Brasil deve-se a uma série de fatores estruturais e conjeturais, internos e externos, que levaram a uma redução significativa na área plantada e no volume de produção. Todavia a mamona ainda representa uma alternativa interessante para a fabricação de biodiesel. Embora seu custo ainda seja elevado, a mamona surge como alternativa viável em função da forte demanda por seu óleo (CHIARADIA, 2005; EMBRAPA 2003; idem 2004, AMORIM, 2005).

Para o seu plantio existem áreas que podem ser direcionadas para este fim. Considerando o solo, que não deve ser sujeito ao encharcamento nem ser sódico nem salino; estima-se que há mais de 4,5 milhões de hectares no Nordeste e na região Norte de Minas Gerais que podem ser ocupados como cultivo da mamoneira, por pequenos e médios produtores. (EMBRAPA 2004).

Espera-se que esta cultura seja fomentada no Nordeste que, além de possuir terra disponível para tal, ao contrário das demais regiões do Brasil não tem muitas opções agrícolas em regime de sequeiro. Dentre as possibilidades destaca-se: algodão e mamona, sendo que o algodão migrou para o Centro-Oeste, ficando muito pouco no Nordeste. Em setembro de 2003 a Embrapa identificou 448 municípios aptos para o cultivo da mamona na região nordeste. Foram identificados nove municípios no Estado de Alagoas, 189 na Bahia, 74 no Ceará, doze no Maranhão, 48 na Paraíba, 45 em Pernambuco, 42 no Piauí, 26 no Rio Grande do Norte e três em Sergipe (AMORIM, 2005).



**Figura 39 – Produção de Mamona no Brasil 2006**

**Tabela 34 – Produção de Mamona no Brasil (t)**

Cor	De	Até	Frequência %	
	4	35	11	8,0
	47	170	11	8,0
	176	322	10	7,3
Fonte	366	1.331	10	7,3

: IBGE – Produção Agrícola Municipal

O Estado da Bahia – principalmente no município de Irecê – é a maior produtora nacional, com mais de 90% da produção. Com exclusão total de plantas daninhas, pragas e doenças, e com um sistema de irrigação com fertilização, a mamoneira pode atingir seu ápice de produção de 8.500 kg de bagas por hectare plantado. No entanto o resto do estado não alcança tal produtividade. Embora o potencial teórico seja de

10.000 kg/ha de bagas, a produção na Bahia, consorciado com feijão de ciclo curto, alcança apenas 10% deste valor, com picos de 1200 kg/ha. Esta produção encontra-se dentro da média mundial que é baixa, menos de 650 kg/ha. Pode-se justificar, em parte, a baixa produtividade ao sistema de agricultura familiar adotado. Esse se caracteriza pelo baixo uso de insumos, sobretudo os mais modernos, como fertilizantes inorgânicos concentrados, herbicidas e inseticidas, entre outros. O uso de máquinas é pequeno, exceto no preparo do solo, em que parte dos produtores usa o trator, mas a maioria, mais de 60%, utiliza o cultivador a tração animal para o preparo do solo, além do cultivo das plantas daninhas dentro das linhas de plantio. Os produtores mais atrasados usam uma mistura de cultivares e de tipos locais na mesma área, o que leva a redução de produtividade (EMBRAPA 2004).

A mamona possibilita uma colheita escalonada, visto que cada cacho (ou racemo) que amadurece segundo a ordem de surgimento na planta, fornece oportunidade de pelo menos cinco colheitas. Sua adaptação no semi – árido deve-se a sua forte resistência à seca, por ser pouco atrativas à pragas e quase não demandar inseticidas. A planta não tolera a salinidade nem a sodicidade do solo necessitando, pra produzir bem, acima de 2.000 kg de bagas por hectare, um índice pluviométrico de 900 mm de chuva/ciclo (ou 9.000 m<sup>3</sup> por hectare). Sua origem tropical faz com que ela necessite de no mínimo 500 mm de chuva/ciclo, temperatura média do ar variando entre 20 °C e 30 °C e altitude de pelo menos 300m, sendo o seu ótimo de 650m. Levando-se em consideração tais aspectos, no ordenamento territorial ou zoneamento agroecológico para esta espécie no Nordeste e na região Norte de Minas Gerais, mais de 500 municípios estão zoneados, ou seja, pode-se plantar a mamona em condições de sequeiro, sem uso da irrigação e ela pode ser plantada também em condições de irrigação, onde a produtividade pode chegar a mais de 6.500 kg de baga/ha, dependendo do cultivar e do sistema de produção em uso.(idem)

No Brasil o mercado de mamona é oligopsônico, o que não permite muita elasticidade de preço pago ao produtor. Embora já existam em grande quantidade, outros produtores continuam surgindo. Além dos pequenos produtores isolados, associações e cooperativas, os assentamentos feitos pelo governo podem tornar-se centros de produção de mamona, com o objetivo de ser matéria-prima para a produção do biodiesel. Acredita-se no forte crescimento deste mercado nos próximos anos, com a redução da área plantada com esta euforbiácea pela China, e a grande possibilidade de se tornar uma das matérias-primas para a produção de biodiesel, com a vantagem de ter elevado rendimento, mais de 99,0% na conversão do óleo em biodiesel. A

reação ocorre a frio devido a solubilidade do óleo da mamona em álcool (metílico ou etílico) e também ser combustível e comburente ao mesmo tempo pois, devido a hidroxila (OH) colocada estrategicamente no carbono 12 do ácido graxo ricinoléico, que somente existe no óleo da mamona. Este ácido graxo, que representa mais de 89% deste óleo, tem mais 5,0% de oxigênio na molécula que os demais óleos que podem ser usados na fabricação do biodiesel, o que fornece a desvantagem de menor cetanagem (EMBRAPA 2004).

O óleo de mamona – ou de rícino, extraído através da prensagem das sementes, contendo 90% de ácido graxo ricinoleico, o que confere ao óleo suas características singulares, possibilitando ampla gama de utilização industrial, tornando a cultura mamoneira importante potencial econômico e estratégico para o país. Sua cadeia carbônica proporciona sítios em que são realizadas reações químicas, obtendo-se assim uma gama variada de produtos, derivados das modificações das cadeias carbônicas, conforme mostra a Figura 40.

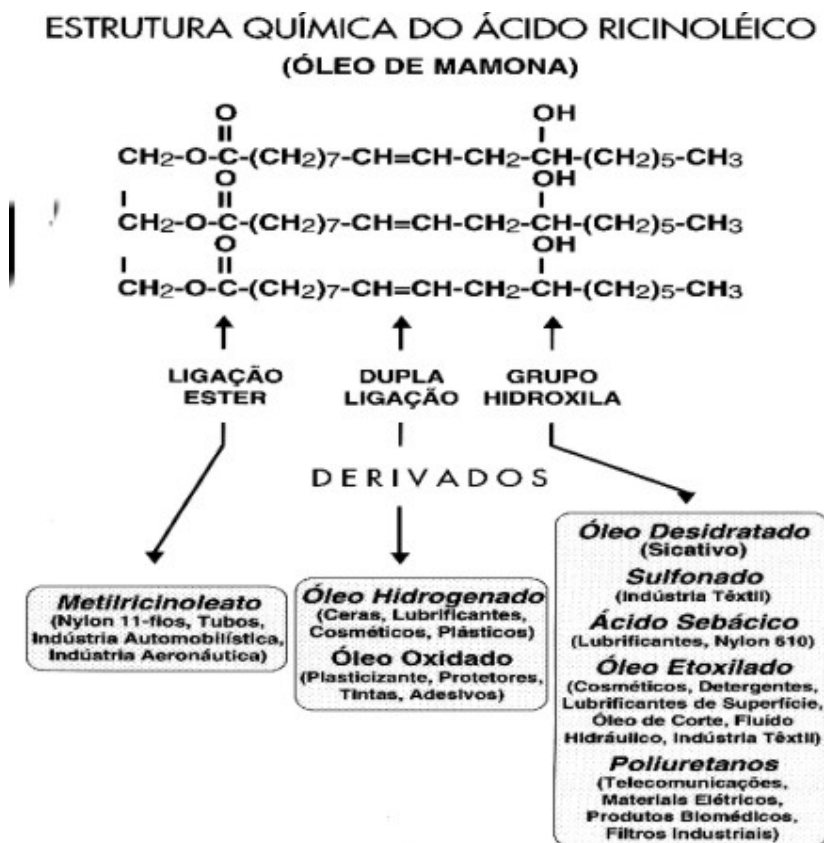


Figura 40 – Estrutura do óleo de Mamona

Fonte: IAC, 2008

A Tabela 35 ilustra algumas das aplicações do óleo de mamona. Em vista das inúmeras e importantes aplicações deste óleo, o seu consumo interno aumentou consideravelmente nestes últimos anos, daí a necessidade do aumento da área de plantio. A consecução desse objetivo destaca-se nas medidas relativas à produção agrícola, principalmente pelos métodos racionais de cultivo e evolução técnica, pelo maior emprego de máquinas e plantio de variedades produtivas e de melhor rendimento em óleo.

**Tabela 35 – Aplicação industrial de derivados de óleo de mamona**

Sítio de Reação Química	Derivado	Aplicação
Ligação Éster	Metilricinoleato	Nylon-11 (Fios, Tubos, Indústria Automobilística, Aeronáutica.)
Dupla Ligação	Óleo Hidrogenado	Ceras, lubrificantes, Cosméticos, Plásticos
	Óleo Oxidado	Plasticizante, Protetores, Tintas, Adesivos
Grupo Hidroxila	Óleo Desidratado	Sicativo
	Óleo Sulfonado	Indústria Têxtil
	Ácido Sebácico	Lubrificantes, Nylon 6-10
	Óleo Etoilado	Cosméticos, Detergentes, Lubrificantes de Superfície, Óleo de Corte, Fluido Hidráulico, Ind. Têxtil
	Poliuretanos	Telecomunicações, Materiais Elétricos, Produtos Biomédicos, Filtros Industriais
	Transesterificação	Biodiesel

Fonte: IAC, 2008

Uma vez extraído o óleo, obtêm-se a torta – principal subproduto da cadeia produtiva da mamona que, apesar da presença de estruturas venenosas, possui grande capacidade de restauração das terras esgotadas depois de retirada a ricina. O óleo de mamona não possui este composto, pois toda a proteína da semente permanece na torta após o processo de extração, uma vez que essa proteína é insolúvel em óleo. A presença da ricina e ao CB-1A (complexo alergênico) dão à torta características antinutricionais. Normalmente utilizada como adubo orgânico, a torta também pode ser empregada como ração animal, depois de extraídos seu caráter alergênico e sua toxicidade. É aconselhável que a torta, mesmo sendo usada como adubo, passe pelo processo de desintoxicação e desalergenização, pois a aplicação deste produto pode causar reações alérgicas aos trabalhadores e aos moradores da proximidade para onde a poeira da torta pode ser levada pelo vento, além de ter potencial de provocar intoxicação de animais domésticos. Por outro lado, a desintoxicação provavelmente diminua o efeito de eliminar pragas do produto que é um importante atrativo (SEVERINO, 2005). Após este processo, a torta passa a assumir um valor comercial significativamente maior, entretanto, é preciso que se desenvolva tecnologia industrial que possibilite a transformação desse produto em um alimento animal seguro (AVZARADEL, 2008).

Atualmente a mamona em baga já não consta mais da pauta de exportação, sendo totalmente industrializada, permanecendo no país a torta de mamona, que apresenta um elevado teor de proteínas (AVZARADEL, 2008). Uma torta de boa qualidade é a obtida pelo processo de extração dupla, isto é, submete-se a mamona à prensa e posteriormente a tratamento por solventes. A torta assim obtida tem baixo teor de óleo residual (1,5%), que favoreceu a sua assimilação rápida pelo solo. Para cada tonelada de semente de mamona processada, são gerados 620 kg de casca e 530 kg de torta de mamona (SEVERINO, 2005). Ou ainda na proporção de 1,2 toneladas de torta para cada tonelada de óleo

A produção brasileira de mamona foi de 98,5 mil toneladas em 2007, e estima-se que tenham sido produzidas aproximadamente 61 mil t de cascas e 52 mil t de torta. Tradicionalmente, estes dois produtos têm sido utilizados como adubo orgânico, sendo a torta comercializada por conter alto teor de nitrogênio e as cascas apenas levadas de volta para dentro da lavoura ou aproveitada na própria fazenda (LIMA *et al.* 2006). A Tabela 36 a seguir ilustra as frações de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio presentes na torta e na casca da mamona. Ao observar-se a quantidade de nitrogênio existente em cada amostra conclui-se que a torta de mamona apresenta boas características para uso como adubo orgânico, principalmente devido ao alto teor de nitrogênio. Já a casca de mamona mostra-se inadequada para uso como adubo orgânico devido à alta relação C/N que induz à carência de nitrogênio.

**Tabela 36 – Teor (%) de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio na casca e na torta da mamona**

Substrato	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio
Casca de Mamona	1,86	0,26	4,50	0,67	0,38
Torta de Mamona	7,54	3,11	0,66	0,75	0,51

Fonte: LIMA *et al.* 2006

Alguns estudos já demonstraram a rapidez com que a torta de mamona se mineraliza e conseqüentemente disponibiliza seus nutrientes. Entre 75 e 100% do nitrogênio da torta de mamona é nitrificado em três meses. Essa velocidade na mineralização, medida pela respiração microbiana, é cerca de seis vezes mais rápida que a do esterco bovino e quatorze vezes mais rápida que a do bagaço de cana.

Quanto ao poder calorífico, estudo realizado por Drummond *et al.* (2006) com diversas espécies de mamona apontaram para um poder calorífico de valor médio de 4.500 kcal/kg de torta (18,84 MJ/kg). A casca de mamona por sua vez possui poder calorífico

16,05 MJ/kg e 15,86 MJ/kg, conforme estudo desenvolvido por RANGEL et al. (2004). Este valor é elevado quando equiparado ao de outras oleaginosas, tais como girassol (1.700 kcal/kg), soja (2.200 kcal/kg) e dendê (4.300 kcal/kg) e até mesmo quando comparado com outras fontes de energia renovável, tais como bagaço de cana de açúcar (2.300 kcal/kg), casca de coco (3.500 kcal/kg), lenha (2.700 kcal/kg), serragem ou cavaco de madeira (2.400 kcal/kg) e eucalipto (4.600 kcal/kg).

### 5.1.5 Casca de Arroz

O arroz é uma planta de produtividade anual, provavelmente originária da China e difundida na Índia. Diversos historiadores apontam o sudeste da Ásia como o local de origem do arroz. Na Índia, uma das regiões onde ocorre a maior diversidade e numerosas variedades endêmicas, as províncias de Bengala e Assam, bem como Mianmar, têm sido referidas como centros de origem desta espécie. (EMBRAPA, 2008a). Essa cultura foi introduzida primeiramente no leste africano e na Síria, e finalmente na América, onde apareceu como planta nativa. Na Europa o arroz chegou ao mediterrâneo pela Síria, trazido pelos Árabes na Idade Média. Os cingaleses distinguem 160 tipos diferentes, dentre os quais 50 ou 60 são cultivados na Índia (BOTANICAL, 2008). O arroz doméstico compreende duas espécies dentro da família das *Poaceae* (grama verdadeira): a *Oryza sativa* (asiático) e a *Oryza glaberrima* (africano). O nome arroz selvagem, *Zizania*, é utilizado para espécies de gênero diferente, formas primitivas e variedades não cultivadas da espécie *Oryza*. O gênero *Oryza* é o mais rico e importante da tribo *Oryzeae*, da subfamília Ehrhartoideae, e engloba cerca de 23 espécies, dispersas espontaneamente nas regiões tropicais da Ásia, África e Américas. A espécie *O. sativa* é considerada polifilética, resultante do cruzamento de formas espontâneas variadas. (EMBRAPA, 2008a)

O arroz cresce como uma planta monocárpica anual, embora em áreas tropicais ele possa sobreviver como uma planta perene e pode produzir uma segunda colheita (soca – segunda produção de arroz depois de colhida a primeira) e sobreviver por até 20 anos. O arroz pode crescer até 1,8 metros de altura, dependendo basicamente da variedade e da fertilidade do solo. A gramínea possui folhas longas (de 50 a 100 cm), com espessura variando entre 2 e 2,5 cm. As pequenas flores são produzidas em galhos arcados em pêndulos de 30 a 50 cm. A semente é um grão de 5 a 12 mm de comprimento e entre 2 e 3 mm de espessura.

O arroz foi, provavelmente, o principal alimento e a primeira planta cultivada na Ásia. As mais antigas referências ao arroz são encontradas há cerca de 5.000 anos na

literatura chinesa. O uso do arroz é muito antigo na Índia, sendo citado em todas as escrituras hindus. Já eram conhecidas, em épocas remotas, as variedades especiais usadas como oferendas em cerimônias religiosas. Certas diferenças entre as formas de arroz cultivadas na Índia e sua classificação em grupos, de acordo com ciclo, exigência hídrica e valor nutritivo, foram mencionadas cerca de 1.000 a.C. Da Índia, essa cultura provavelmente estendeu-se à China e à Pérsia, difundindo-se, mais tarde, para o sul e o leste, passando pelo Arquipélago Malaio, e alcançando a Indonésia, em torno de 1500 A.C. A cultura é muito antiga nas Filipinas e, no Japão, foi introduzida pelos chineses cerca de 100 anos a.C. Até sua introdução pelos árabes no Delta do Nilo, o arroz não era conhecido nos países Mediterrâneos. Os sarracenos levaram-no à Espanha e o espanhóis, por sua vez, à Itália. Os turcos introduziram o arroz no sudeste da Europa, de onde alcançou os Bálcãs. Na Europa, o arroz começou a ser cultivado nos séculos VII e VIII, com a entrada dos árabes na Península Ibérica. Foram, provavelmente, os portugueses quem introduziram esse cereal na África Ocidental, e os espanhóis, os responsáveis pela sua disseminação nas Américas.

Alguns autores apontam o Brasil como o primeiro país a cultivar esse cereal no continente americano. O arroz era o "milho d'água" (abati-uaupé) que os tupis, muito antes de conhecerem os portugueses, já colhiam nos alagados próximos ao litoral. Consta que integrantes da expedição de Pedro Álvares Cabral, após uma peregrinação por cerca de 5 km em solo brasileiro, traziam consigo amostras de arroz, confirmando registros de Américo Vespúcio que trazem referência a esse cereal em grandes áreas alagadas do Amazonas. Em 1587, lavouras arrozeiras já ocupavam terras na Bahia e, por volta de 1745, no Maranhão. Em 1766, a Coroa Portuguesa autorizou a instalação da primeira descascadora de arroz no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. A prática da orizicultura no Brasil, de forma organizada e racional, aconteceu em meados do século XVIII e daquela época até a metade do século XIX, o país foi um grande exportador de arroz.








Com um consumo já pulverizado pelo mundo, sua produção também foi otimizada. A produção mundial de arroz em 2007 foi de aproximadamente 645 milhões de toneladas. No mínimo 114 países cultivam arroz e mais de 50 tem uma produção maior que 100.000 toneladas. Os fazendeiros asiáticos produzem cerca de 90 % do total, sendo que dois países –China e Índia – são responsáveis por mais de metade desta produção.

O consumo *per capita* de arroz no Brasil é de 40,3 kg; na China este valor é de 90,7 kg (ambos os dados de 1999). Este alimento é responsável por suprir 14% das calorias e

10% das proteínas diárias dos brasileiros. Em relação à área plantada, o arroz é a quinta maior colheita do país, atrás somente da soja, milho, cana de açúcar e feijão. Houve queda na área plantada, mas em contra partida houve aumento de produção, o que fez o Brasil permanecer entre os dez maiores produtores de arroz do mundo.

Dados da FAO (2008) ilustram a distribuição da produção entre os países para o ano de 2006. Nota-se que a produção asiática sobressai dentre os 10 maiores produtores de arroz no mundo, para um total mundial de 635 milhões de toneladas.

**Tabela 37 – Produção de arroz no mundo em 2006**

País	Produção (t)	Percentual
 China	184.070.000,00	29%
 Índia	136.510.000,00	22%
 Indonésia	54.400.000,00	9%
 Bangladesh	43.729.000,00	7%
 Vietnam	35.826.800,00	6%
 Tailândia	29.268.959,00	5%
 Mianmar	25.200.000,00	4%
 Filipinas	15.326.706,00	2%
 Brasil	11.505.327,00	2%
 Japão	10.695.000,00	2%

Fonte: FAO, 2008

No Brasil, a produção de arroz concentra-se entre o sul e o centro-oeste. O plantio de arroz alagado e em terras altas tem igual importância no país. A maior parte da plantação irrigada encontra-se em Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e sua produtividade é maior que a média nacional (6,5 t/ha e 3,8 t/ha). Este estado é responsável pela maior parte da colheita no Brasil, 59% da produção. A produção gaúcha destaca-se no Brasil, pois o segundo maior produtor, Santa Catarina, alcança somente 9% da produção nacional, seguida por Mato Grosso e Maranhão, ambos com 6%. O arroz de terras altas encontra-se em sua maioria no cerrado nacional (IRRI, 2008, IBGE, 2007).

**Tabela 38 – Produção de Arroz no Brasil em 2006**

Grandes Regiões e Unidades da Federação produtoras	Área plantada (ha)	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (t)
Brasil	3.008.695,00	2.969.444,00	11.524.434,00
Norte	468.667,00	464.125,00	968.790,00
Rondônia	71.218,00	71.218,00	141.944,00
Acre	25.110,00	24.844,00	32.490,00
Amazonas	13.522,00	13.361,00	19.474,00
Roraima	22.200,00	22.000,00	111.250,00
Pará	209.603,00	208.829,00	398.620,00
Amapá	2.371,00	2.000,00	1.800,00
Tocantins	124.643,00	121.873,00	263.212,00
Nordeste	733.443,00	714.898,00	1.110.479,00
Maranhão	505.972,00	501.752,00	699.875,00
Piauí	148.226,00	135.678,00	192.403,00
Ceará	32.020,00	32.020,00	100.249,00
Rio Grande do Norte	1.452,00	1.452,00	3.608,00
Paraíba	7.401,00	7.399,00	10.421,00
Pernambuco	4.467,00	4.452,00	19.146,00
Alagoas	3.653,00	3.253,00	12.811,00
Sergipe	12.810,00	11.450,00	52.249,00
Bahia	17.442,00	17.442,00	19.717,00
Sudeste	121.636,00	116.327,00	277.827,00
Minas Gerais	86.798,00	81.489,00	176.212,00
Espírito Santo	3.254,00	3.254,00	9.594,00
Rio de Janeiro	2.684,00	2.684,00	9.221,00
São Paulo	28.900,00	28.900,00	82.800,00
Sul	1.237.700,00	1.237.208,00	8.028.982,00
Paraná	59.804,00	59.804,00	173.187,00
Santa Catarina	154.566,00	154.330,00	1.071.559,00
Rio Grande do Sul	1.023.330,00	1.023.074,00	6.784.236,00
Centro-Oeste	447.249,00	436.886,00	1.138.356,00
Mato Grosso do Sul	42.947,00	42.160,00	187.768,00
Mato Grosso	287.974,00	279.813,00	720.834,00
Goiás	116.290,00	114.875,00	229.716,00
Distrito Federal	38,00	38,00	38,00

Fonte: IBGE, 2007

O arroz normalmente é consumido sem sua casca, i.e., parbolizado, e existem processos industriais para removê-la. Sendo assim, a indústria do arroz tem como subproduto mais volumoso as cascas, as quais podem ser aproveitadas de diversas maneiras. As cascas representam de 20 a 22% do peso do arroz (FOLETTTO *et al.*, 2005, AMATO, 2008). Este valor pode variar devido a diversos fatores, começando pela variedade do arroz, e abrangendo condições edafo-climáticas (solo e clima), pois

um inverno mais rigoroso requer uma casca mais grossa, e assim sucessivamente. (AMATO, 2008).

Um fator que deve ser levado em conta, quando considerado o aproveitamento energético deste insumo, é a baixa densidade da casca de arroz, onde um metro cúbico pesa somente 120 kg. Uma solução para este fator é a utilização de briquetadeiras, que mediante pressão exercida por um pistão produzem uma peça cilíndrica com maior densidade. Outra alternativa é a moagem da mesma, onde ocorre a cominuição da casca, incrementando substancialmente sua densidade aparente (*idem*).

Casca de arroz é um dos maiores resíduos agrícolas produzidos em larga escala em países em desenvolvimento (BHAT, BHEEMARASETTI, RAO, 2001). A geração de energia através da combustão (queima ou gaseificação) da casca de arroz é uma alternativa viável do ponto de vista tecnológico e econômico, e ético do ponto de vista ambiental. As cinzas advindas desses processos de combustão podem ser utilizadas, direta ou indiretamente, para algum fim comercial. A cinza representa 18% do peso da casca em média e, se descartada no meio ambiente, devido a grande quantidade de carbono residual aí presente pode causar danos ao solo (FOLETTTO *et al.*, 2005). Devido ao seu elevado teor de sílica (maior que 90%), esta é um resíduo valorizado se tiver alta qualidade (alta superfície específica, tamanho e pureza da partícula). As cinzas têm aplicação em vários ramos da indústria, tais como eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, etc. (FOLETTTO *et al.*, 2005; NATARAJAN, NORDIN, RAO 1998, YIN *et al.*, 2002).

Estudos desenvolvidos por ABE *et al.* (2007) e LIN *et al.* (1998) mostram que cerca de 2 kg de casca de arroz são necessários para geração de um kWh de eletricidade com o processo de gaseificação (leito fixo, ciclo aberto). Para o processo com leito fluidizado, este valor oscila entre 1,7 – 1,9 kg de casca de arroz para cada kWh gerado (YIN *et al.*, 2002). Para suprir a demanda de energia na zona rural do Camboja, onde o estudo de ABE *et al.* (2007) foi realizado, 380 mil toneladas seriam suficientes, e a produção anual do país é três vezes superior que este valor.

A produção nacional de arroz em 2007, segundo o IBGE (2008) foi de 11.041.320 toneladas de arroz em casca, o que resulta em 2.208.264 toneladas de casca de arroz em busca de aproveitamento. A casca contribui com apreciável quantidade de energia, estando disponível de forma homogênea praticamente o ano inteiro. Isto se deve ao fato do arroz em casca ser a melhor forma de armazená-lo, e de acordo com a

demanda pelo produto ao longo do ano ele vai sendo desprovido da casca através do processo de beneficiamento (AMATO, 2008).

Em Diniz *et al.* (2004) observa-se que o poder calorífico da casca de arroz é de aproximadamente 16,33MJ /kg e o gás obtido através da sua gaseificação tem o PCI de 4,24 MJ/Nm<sup>3</sup>. (MURARO, 2006) ou entre 4 – 6 MJ/Nm<sup>3</sup> (NATARAJAN, NORDIN, RAO 1998, YIN *et al.*, 2002). Já Abe *et al.*(2007) sugerem um poder calorífico de 15,38 MJ/kg e Natarajan *et al.* (1998) indicam um valor entre 14,61MJ/kg (PCS) e 11,86 MJ/kg (PCI). Em outro estudo, Natarajan, Nordin e Rao (1998) obtiveram 15,0 MJ/kg. Estudos liderados por LIN *et al.* (1998) apontam para o valor de 14,44 MJ/kg. Observa-se uma enorme divergência dentre os valores de PCI apresentados pela literatura. Isto deve-se talvez ao método empregado para a medição ou alterações físico-químicas do insumo.

O gaseificador indicado para o uso de casca de arroz é o de leito fluidizado, pois a baixa densidade, as características pobres do material e o baixo ponto de fusão das cinzas tornam menos eficientes o uso de outros tipos de tecnologia de gaseificação (NATARAJAN, NORDIN, RAO 1998). A Figura 41 e Tabela 39 indicam a produção de arroz no Brasil e apontam sua concentração no sul e centro-oeste.

**Tabela 39 – Produção de Arroz no Brasil**

Legenda				
Variável = Quantidade produzida (Tonelada)				
Lavoura temporária = Arroz (em casca)				
Ano = 2006				
Nível Territorial = Mesorregião Geográfica				
Cor	De	Até	Frequência	%
	10	877	24	17,5
	1.051	4.748	25	18,2
	5.353	18.530	24	17,5
	18.545	60.817	25	18,2
	64.604	3.144.667	25	18,2
/////	Ausência de dados, (-) ou valor desidentificado		14	10,2
Fonte: IBGE - Produção Agrícola Municipal				



**Figura 41 – Produção de Arroz Brasil 2006**

#### **5.1.6 Resíduos Sólidos**

Um grande desafio com que se defronta a sociedade moderna é o equacionamento da gestão do lixo urbano. Essa gerência sobre os resíduos compreende o não direcionamento destes para lixões, diminuindo assim seu impacto ambiental e sobre a saúde. Na atualidade, pode-se até direcioná-los a tecnologias aptas à geração de energia elétrica, utilizando estes como insumos. Além do expressivo crescimento da geração de resíduos sólidos, sobretudo nos países em desenvolvimento, observa-se, ainda, ao longo dos últimos anos, mudanças significativas em suas características, diminuindo a participação de material orgânico e aumentando a contribuição de material industrializado. Essas mudanças são decorrentes principalmente dos modelos de desenvolvimento adotados e da mudança nos padrões de consumo.

O gerenciamento de resíduos sólidos tornou-se nas últimas décadas um tema de preocupação para os administradores públicos de todo o mundo. Com o aumento da população e o crescente consumo de materiais não-recicláveis, o problema de esgotamento dos aterros sanitários e da poluição gerada pela disposição indevida do lixo cresceu. A disposição do lixo em aterros indevidamente preparados gera danos à

população vizinha, e a má disposição de resíduos propicia o aparecimento de doenças cujos vetores de transmissão se reproduzem na área dos aterros, além de contaminar os lençóis freáticos.

A produção de lixo tem sido diretamente associada ao estágio de desenvolvimento de uma região; em geral, quanto mais evoluída, maior o volume e o peso dos resíduos sólidos. Todavia, há outros fatores que influenciam a geração de lixo, como variações sazonais e climáticas, hábitos e costumes da população, densidade demográfica, leis e regulamentações específicas, entre outros.

Se a composição e a produção de lixo sofrem influência direta dos fatores socioeconômicos, pode-se identificar parte dos padrões de consumo de uma população observando-se alterações significativas na participação de determinados componentes.

Os indicadores mais empregados para comparação acerca dos padrões de consumo através de análise de resíduos são: o peso específico dos resíduos em kg/m<sup>3</sup>, a composição gravimétrica, que traduz a participação dos diferentes materiais no peso total do lixo gerado, e a produção de resíduos sólidos *per capita* por dia (MAY, LUSTOSA, VINHA 2003).

Assim, em geral, quanto mais desenvolvido o país, menor o percentual de matéria orgânica no lixo e conseqüentemente menor o teor de umidade, devido ao maior consumo de alimentos industrializado por parte da população; maiores os percentuais relativos a plásticos e papéis, em decorrência do aumento de embalagens descartáveis para não apenas acondicionamento dos alimentos comprados prontos, como também estocagem, manuseio e transporte de longas distâncias (as cidades mais desenvolvidas são mais dependentes de mercadorias não produzidas *in-loco*); a maior produção de *per capita* de lixo, já que o consumo de bens aumentado em decorrência de um poder aquisitivo mais elevado produz maior quantidade de resíduos associados aos bens adquiridos.

O Banco Mundial apresenta parâmetros para classificar a composição gravimétrica do lixo urbano em função da renda *per capita* de um determinado país. A geração *per capita* de resíduos é diretamente proporcional ao poder econômico das classes de renda. Dessa forma, verifica-se, por exemplo, que enquanto a quantidade de vidro cresce com o poder aquisitivo, a matéria orgânica se comporta de maneira inversa.

A Tabela 40 apresenta uma comparação entre cidades de diversos países quanto a geração de resíduos sólidos urbanos *per capita* por dia. Verifica-se que, de fato, as cidades e/ou países de maior porte e/ou renda *per capita* mais elevada são aqueles cuja produção média de resíduos por habitante, por dia, situa-se em torno de 1,0kg, como é o caso do Rio de Janeiro e do México (em relação à Lima ou São Salvador) e dos Estados Unidos ou do Canadá (com relação à Índia).

**Tabela 40 – Produção média de Resíduos Sólidos Urbanos *per capita* em alguns países e cidades em 1990**

Países	kg/hab/dia	Cidades	kg/hab/dia
Canadá	1,90	México – DF	0,90
Estados Unidos	1,50	Rio de Janeiro	0,90
Holanda	1,30	Buenos Aires	0,80
Japão	1,00	Santiago	0,80
Europa	0,90	São Salvador	0,68
Índia	0,40	Lima	0,50

Fonte: MAY, LUSTOSA, VINHA 2003

No entanto, assim como é o caso para energia, há certas armadilhas ao se caracterizar o grau de desenvolvimento de uma região apenas através do nível de produção média de resíduos *per capita* por dia; o Japão apresentava em 1990, por exemplo, uma produção média de 1,0 kg, enquanto o Canadá, um país tão desenvolvido quanto o primeiro, gerava quase o dobro (1,90 kg) de resíduos sólidos urbanos por habitante por dia. Portanto, como citado anteriormente, outros fatores devem ser levados em conta, neste sentido, a composição dos resíduos é essencial para uma análise mais pormenorizada.

Como mencionado, verifica-se que os países de maior renda *per capita* respondem por um alto percentual de resíduos inorgânicos como vidro, papel, plástico e metal, como é o caso da Áustria ou da França. Ao contrário, os países de menor renda, como Nigéria e Colômbia, apresentam resíduos com alto conteúdo de alimentos (MAY, LUSTOSA, VINHA 2003).

A questão dos resíduos representa apenas parte de um contexto maior, o ambiental, do qual não pode ser dissociada<sup>29</sup>, a sua complexidade pode ser percebida em função da ampla rede de inter-relações, exigindo em sua abordagem um tratamento abrangente, envolvendo desde aspectos sociais, políticos, culturais, tecnológicos,

<sup>29</sup> Mesmo porque a geração de resíduos é, em geral, precedida de uma outra ação sobre o meio ambiente, qual seja, a extração de elementos naturais.

econômicos até aspectos geográficos, regionais, climáticos, “ambientais”, entre outros. (FIGUEIREDO 1994)

A despeito de vários problemas ocorridos ao longo da história, em nenhum momento a questão dos resíduos foi tratada com devida atenção, o que, de certa forma, provocou um aumento gradativo dos problemas a eles associados. Atualmente, por representar uma ameaça real ao meio ambiente e, conseqüentemente, ao próprio homem, os resíduos vêm conquistando a crônica mundial, especialmente no que diz respeito ao processamento, transporte e à disposição final, além do questionamento acerca da intensidade de geração e das possibilidades e limitações no seu reaproveitamento.

Dentre os vários fatores responsáveis pelo agravamento desta questão, dois são particularmente importantes: o aumento do consumo e a produção de materiais “artificiais”. A relevância do primeiro fator está na estreita relação entre o aumento populacional e a geração de resíduos<sup>30</sup>, com o agravante do crescimento na geração *per capita* imposto pelos padrões de consumo das sociedades atuais, firmados em uma racionalidade econômica que não mais se sustenta do ponto de vista ambiental, caracterizados pela adoção, por parte das elites dominantes, de conceitos e programas de desenvolvimento antagônicos a uma relação harmônica do homem com o seu habitat. O segundo fator está relacionado tanto à variedade quanto à “evolução” dos tipos de resíduos gerados em decorrência do desenvolvimento tecnológico. Neste sentido, observa-se que a intensificação tecnológica tem exigido a elaboração de materiais construtivos ou energéticos cada vez mais complexos com relação às suas composições e concentrações. Estes materiais, via de regra, não degradáveis naturalmente em curto período de tempo, apresentam um alto potencial de agressão ao homem e ao meio ambiente, como é o caso de metais pesados e dos materiais radioativos. Desta forma, como regra geral, observa-se uma tendência do homem a alterar as concentrações de elementos em seu ambiente natural, tanto pela extração de materiais de uma certa região, quanto pela deposição destes materiais concentrados (ou seus compostos e derivados) em outras regiões na forma de resíduos.

O que se observa na atualidade é o desenvolvimento de técnicas que buscam apenas “desobstruir o gargalo” que os resíduos representam ao consumo ou, no máximo,

---

<sup>30</sup> Vale lembrar que, uma outra questão importante associada à população diz respeito à sua distribuição espacial. Neste sentido, a urbanização nos dias atuais constitui um forte agravante para a questão dos resíduos, por serem esses gerados de forma concentrada, o que dificulta sua reintegração nos locais de onde os elementos foram extraídos, isso sem contar com o aumento de embalagens requeridas ao consumo urbano, com destinação segura na massa de resíduos da sociedade.

promover o reaproveitamento de materiais atrativos economicamente. Esta prática se adapta perfeitamente ao modelo economicista atual, no qual o meio ambiente é tratado através de uma visão utilitária de curto prazo, e a vida humana se resume à capacidade de acumulo de bens materiais e/ou poder ao longo do ciclo de vida de um indivíduo, sem menor preocupação com a qualidade ou mesmo com a possibilidade de vida das sociedades futuras.

Se são muitos os problemas associados aos aspectos tecnológicos, maiores são as dúvidas com relação aos desdobramentos subliminares destas concepções. Neste sentido, além da preocupação com relação ao crescente consumo energético das sociedades e suas implicações generalizadas no ambiente natural, surge com esta concepção uma preocupação adicional representada pela dependência da geração de energia com o consumo, o que, de uma maneira sintetizada, poderia significar um incentivo ao consumo, particularmente de produtos combustíveis energo-intensivos, uma vez que os resíduos gerados como frutos do consumo estariam contribuindo para a geração de energia. Esta lógica absurda pode ser catastrófica do ponto de vista ambiental, por incentivar a extração de elementos naturais. (FIGUEIREDO, 1994)

Neste cenário, consciente da dificuldade de mudança de padrão de consumo a curto prazo, bem como compreendendo que estas tecnologias não podem ser usadas como incentivo à maior produção de resíduos, surge a oportunidade de se obter energia elétrica com resíduos sólidos. Esta alternativa estaria sendo coerente com as novas tendências ambientais ora em voga, uma vez que direciona os rejeitos para outro fim que não o lixão e assim evita a formação de gases de efeito estufa decorrentes da decomposição anaeróbica da fração orgânica dos resíduos. Além disso, se trata de uma fonte renovável, proporcionando assim uma diminuição na demanda de combustíveis fósseis, contribuindo mais uma vez com a não intensificação dos impactos ambientais globais.

Dentre os métodos de aproveitamento energético direto de resíduos, a incineração vem sendo utilizada há muitos anos na Europa e o desenvolvimento tem sido no sentido de melhorar a eficiência destes processos. Dentre esses esforços, podem ser destacados a busca de uma maior eficiência de combustão e o pré-processamento dos resíduos sólidos de forma a melhorar a homogeneidade e suas características como combustível.

Além de instalações térmicas de resíduos sólidos, que têm sua viabilidade econômica fortemente vinculada aos preços dos energéticos, em particular da energia elétrica, a

produção de combustíveis a partir de resíduos urbanos é uma prática bem difundida na Europa. Em 1985, cerca de 2,84 Mt de resíduos sólidos, representando cerca de 3% da geração total dos resíduos sólidos das comunidades européias, eram destinados a este fim. O desenvolvimento deste tipo de processamento tem sido incentivado através de subsídios e outros atrativos econômicos, de forma que o combustível produzido possa competir com o carvão, embora com níveis de poder calorífico questionáveis. (FIGUEIREDO 1994)

A gaseificação é um outro tipo de aproveitamento de resíduos em desenvolvimento na comunidade européia. Este tipo de reaproveitamento energético é particularmente interessante para o processamento de plástico e borrachas; sua eficiência se aproxima da incineração convencional de resíduos, podendo da mesma forma ser utilizado tanto para produção de vapor ou “calor” quanto para geração de energia elétrica.

A distinção entre os componentes dos resíduos oriundos de produtos importados e produzidos localmente levanta a questão do valor do primeiro, ou seja, o reaproveitamento de elementos residuais gerados a partir destes produtos poderia implicar na redução das importações. Entretanto, os preços praticados pelos países em desenvolvimento, em geral pressionados por vários mecanismos econômicos, tornam mais atrativa a importação que a reutilização dos resíduos produzidos localmente. A deposição desses resíduos de alto conteúdo energético, em regiões pré-determinadas, significa a translação de “jazidas” de elementos com alto grau de pureza e conteúdo energético aos países ricos, que, num dado momento estratégico, estariam aptos a lançar mão dessas “reservas” sem maiores problemas ambientais locais a um custo reduzido.

Nos Estados Unidos as técnicas de aterragem foram substituídas predominantemente pela incineração, e no início de 1987 cerca de 90 instalações se encontravam em construção ou operação nos EUA, com um processamento diário de 30.000 a 35.000 toneladas de resíduos, utilizados como combustíveis. Além dessas instalações, estavam previstas para operação a partir de 1990 cerca de 100 novas usinas, com um processamento aproximado de 50.000 t/dia de resíduos. Com este nível de produção, cerca de 18% de toda geração de resíduos dos EUA estaria sendo utilizada na produção de energia via conversão térmica e, para a virada do século, é estimado um percentual de 25%. (idem)

No Brasil, além dos problemas relacionados à urbanização em si, com relação à geração e ao processamento dos resíduos urbanos houve pouca preocupação em se

estabelecer uma política abrangente para o tratamento da questão, e as poucas experiências realizadas até o momento, tanto com relação ao aproveitamento energético quanto a outras formas de processamento e destinação final, têm se caracterizado como iniciativas isoladas e de abrangência limitada quando observadas em termos de país, região, estado, ou mesmo cidade.

A exemplo do ocorrido em vários países em desenvolvimento, o rápido processo de urbanização brasileiro pegou as cidades despreparadas<sup>31</sup> e sem estruturas referentes aos serviços básicos como transportes, saúde, educação, saneamento básico e, principalmente, infra-estrutura para a condução da questão dos resíduos. Somados à escassez dos recursos financeiros, os problemas se agravaram a ponto de tornar muito difícil a vida da maior parcela da população dos grandes centros urbanos. (FIGUEIREDO 1994)

Neste sentido, o aproveitamento dos resíduos mostra-se não só como uma alternativa ambiental, mas, sobretudo energética, uma vez que possibilita a diversificação na matriz. Com o prognóstico de aumento crescente de sua produção e cada vez maior consciência do dano ambiental ocasionado pelo seu mau direcionamento (quando este ocorre em aterros sem preparo), utilizar resíduos como insumos energéticos mostra-se como uma alternativa de múltiplos ganhos para a sociedade.

#### **5.1.6.1 Quantidade de Resíduos no Brasil**

A produção de resíduos no Brasil vem sendo acompanhada pelas Pesquisas Nacionais de Saneamento Básico (PNSB), que desde 1983 contempla a questão de limpeza urbana e a coleta de lixo. Ao longo do tempo foi aprimorando-se e tornou-se, a partir da versão publicada em 1989, uma referência nacional e fonte principal de fornecimento de dados para trabalhos concernentes a este tema (HENRIQUES, 2004).

Desde a publicação da PNSB de 2000 não há atualização de dados e uma nova publicação deverá ser lançada em breve pelo IBGE. Assim, as informações referentes à produção de resíduos em âmbito nacional possui um hiato de 8 anos sem atualizações. Naquele ano, a população nacional era de 169.799.170 indivíduos, com uma produção diária de resíduos de 161.827,1 toneladas, em 5.507 municípios. (IBGE, 2008)

---

<sup>31</sup>

Em especial as de médio porte

A taxa média de crescimento da população vem mostrando uma tendência regular ao declínio desde a década de 60 (em 1960 a taxa foi de 2,89%, em 1970 foi de 2,48%, caindo para 1,93% em 1980). No último período censitário (1991 a 1996) chegou a 1,38%. Dados atuais remetem a uma população de 183.987.291 brasileiros, recenseados em 2007, nos atuais 5.564 municípios que hoje compõem a unidade federativa. Assim, a quantidade de resíduos também aumentou. Para os cálculos eventualmente realizados nesta tese, será considerada uma relação linear entre o aumento da população e a quantidade de resíduos. Portanto a quantidade de resíduos considerada será de 175.349 toneladas diárias de resíduos. Para cálculos anuais este número será de 64 milhões de toneladas.

O aproveitamento dos resíduos se dá via seu poder calorífico, e este varia muito nos resíduos, devido a sua composição heterogênea. Estudo realizado pela USINA VERDE em 2000 mostrou que o poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos varia de 9,57 MJ/kg para o material seco sem umidade, até 2,52 MJ/kg para o material sem secagem prévia (HENRIQUES, 2004). A Usina Verde é uma planta piloto de incineração de resíduos construída no campus da UFRJ que hoje funciona com a queima de resíduos e gás natural. A Figura 42 apresenta a concentração de resíduos sólidos no Brasil. Os pontos em azul escuro representam uma maior concentração, que diminui com a menor intensidade do azul até os pontos de menor concentração de resíduos em amarelo. Este mapa é resultado de um *software* desenvolvido na COPPE/UFRJ que visa otimizar a distribuição de resíduos para geração de energia elétrica. (OLIVEIRA, 2004)

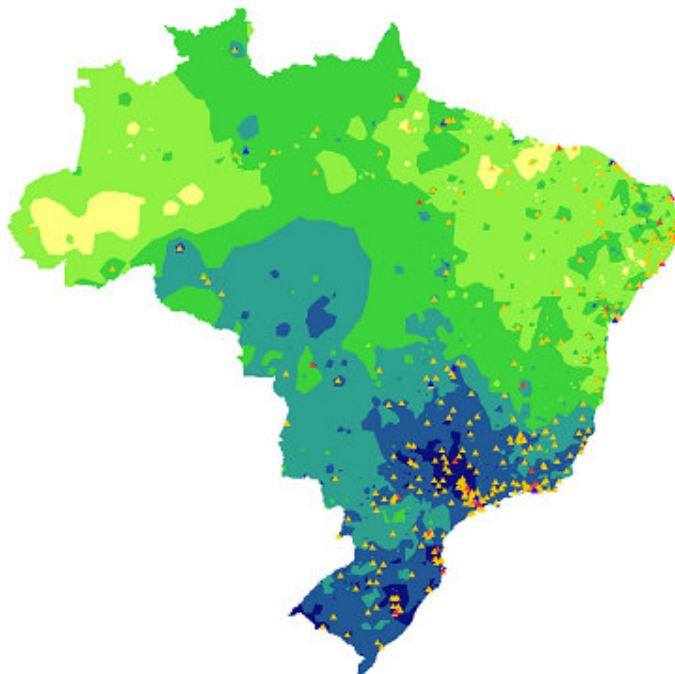


Figura 42 – Concentração de resíduos sólidos no Brasil

## ***5.2 Geração de Energia com Biomassa***

O que pode ser considerado combustível de biomassa para a gaseificação ocorre em uma inúmera variedade de formas. Os principais fabricantes de gaseificadores pregam que estes podem ter como combustível qualquer biomassa, que é uma afirmativa inocente, e pode-se esperar que cada forma apresente problemas específicos. A disparidade do insumo se deve à inúmera variedade de projetos de gaseificadores existentes. Os gaseificadores utilizados amplamente durante a segunda guerra eram especialmente alimentados com blocos de madeira de  $1,0 \times 2,0 \times 2,0 \text{ cm}^3$ . No entanto, estes blocos representam somente uma pequena fração das inúmeras alternativas possíveis para utilização de biomassa para gaseificação.

Como a forma é variável, a propriedade do combustível é muito importante para determinar condições satisfatórias de operação. Assim, desta múltipla diversidade de biomassa, somente uma pequena variedade poderá ser utilizada com especificações controladas. A habilidade em especificar os parâmetros do combustível para o gaseificador é muito importante. Felizmente, uma inúmera quantidade de testes está disponível para biomassa e carvão, e pode ser útil para os que desejam utilizar um gaseificador.

A composição química da biomassa (baseada na cinza livre seca) é mais constante que em muitos carvões (betuminoso, antracito, lignoso). Normalmente a biomassa possui um teor de enxofre e cinzas menor que o carvão. No entanto, diferente deste combustível fóssil, a biomassa existe em uma enorme variedade física, tornando-se necessária a adaptação da sua forma para se adequar às necessidades do gaseificador, equipamento de secagem, sistema de alimentação e equipamento de remoção de cinzas. Desta forma o projeto do gaseificador deve se adequar ao combustível utilizado.

Neste sentido, vale resgatar os resultados obtidos durante a experiência desenvolvida na planta piloto belga. Com o trabalho desenvolvido nesta ocasião, otimizou-se o aproveitamento de um insumo específico, com o objetivo de minimizar impactos negativos gerados durante o processo. Desta forma fica evidente que independente da biomassa utilizada existe uma maneira de melhor adaptá-la ao equipamento utilizado e maximizar o aproveitamento energético.

O gás gerado durante o processo de gaseificação tem um poder calorífico médio. Seu posicionamento face a outros gases pode ser observado a seguir. A Tabela 41 ilustra como variam as composições e o poder calorífico de alguns combustíveis. Variações de poder calorífico aceitáveis em turbinas são da faixa de  $\pm 10\%$ , com base no índice de Wobbe<sup>32</sup>, podendo chegar a  $\pm 20\%$ , em alguns casos.

---

<sup>32</sup> Índice de Wobbe (W) é uma relação de poder calorífico de um gás e sua densidade relativa ao ar, conforme demonstrado na fórmula a seguir. A regulação do índice de Wobbe mantém quase constante a potência fornecida ao queimador para diferentes gases. A regulação é feita controlando-se a taxa de aeração da mistura (CORREA NETO, 2001).

Índice de Wobbe: 
$$W = \frac{PC}{\sqrt{d}}$$

**Tabela 41 – Combustíveis, poder calorífico e composições**

<b>Combustível</b>	<b>Poder Calorífico</b>	<b>Composição</b>
Gás de refinaria	Muito alto: 60 a 186 MJ/Nm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> (50 – 100 %); C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (0 – 40 %)
Gás de re-injeção, plantas de LNG	Alto: 50 a 60 MJ/Nm <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> > 60%; C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> até 25 %; C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> até 15%
Gás Natural Típico	Moderado: de 40 a 50 MJ/Nm <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> 90%; C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> 5%; CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 5%
Gás de síntese de carvão	Médio: 25 a 55 MJ/Nm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> (20 – 50%)
Gás natural “fraco”, gás de aterro	Baixo: 15 a 40 MJ/Nm <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> < 60%; N <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> = 40 – 50%
Gaseificação de algumas biomassas	Muito baixo: 5 a 15 MJ/Nm <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> < 10%; H <sub>2</sub> < 10%; N <sub>2</sub> > 40 – 60%

Fonte: CORRÊA NETO, 2001; JONES, 2006

Grande parte dos gases com alto e médio poder calorífico podem ser queimados nos combustores tradicionais mantendo-se as condições satisfatórias de desempenho. Caso haja um decréscimo do poder calorífico, a revisão do sistema de combustão é necessária, normalmente utilizando-se de um combustível tradicional para a partida e para elevações da carga durante a operação.

Outro ponto importante que deve ser destacado compreende a seleção econômica do combustível. A seleção do combustível a ser utilizado em uma turbina a gás é de suma importância, pois geralmente este é responsável pelo maior custo operacional da instalação. A seleção econômica é feita a partir da consideração de todos os custos envolvidos em sua utilização, tais como:

- Custo do combustível;
- Custo do sistema de manipulação do combustível:
- Custo de investimento, equipamentos para estocagem, limpeza, tratamento, transferência e limpeza da turbina;
- Custos operacionais (mão de obra, energia, água e produtos químicos)
- Modificações e equipamentos especiais para turbinas:
- Sistemas de Combustão
- Manutenção da turbina:
- Frequência de reposição das partes quentes

- Frequência de limpeza da turbina
- Disponibilidade da turbina e paradas não programadas.

Ainda referente ao uso de máquinas para geração de energia elétrica, deve-se destacar os fatores que influenciam a eficiência e a disponibilidade das máquinas motrizes. Os valores nominais de eficiência e potência são determinados sob condições laboratoriais, chamadas de condições ISO. A norma ISO determina que as condições de teste em laboratórios devem ser:

- Pressão atmosférica (sem perda de carga a montante ou a jusante da máquina);
- Temperatura de entrada do ar: 15 °C
- Umidade relativa do ar: 60%
- Altitude: nível do mar
- 100% da carga nominal

Esses fatores são determinados, pois influenciam diretamente o desempenho das máquinas motrizes, com destaque para as turbinas a gás que são muito sensíveis. As condições atmosféricas do local de instalação, bem como sua altitude, as perdas de carga dos filtros de admissão e das caldeiras de recuperação de calor, como também, os fatores de carga e operação da instalação são informações fundamentais para se obter um resultado satisfatório da turbina.

A densidade energética da biomassa é baixa quando comparada com outras fontes de energia, como petróleo, carvão ou gás natural. A baixa densidade energética e a dispersão da produção da biomassa limitam sua aplicação a uma conversão energética realizada em instalações descentralizadas, relativamente pequenas, para evitar elevados custos de transporte. A eficiência média para geração de energia elétrica pela gaseificação de biomassa fica em torno de 25%, devido à tecnologia em constante evolução e limitações econômicas para transporte e armazenagem de combustível. Consequentemente, ocorrem limitações no que diz respeito ao tamanho das plantas de geração e o elevado custo da eletricidade gerada. (FERNANDES, 2000).

Por outro lado, a construção de grandes centrais de geração ou cogeração elétrica a partir da biomassa favorece a economia de escala, que justificam economicamente a produção e distribuição elétrica. Na análise econômica de FERNANDES (2000), verifica-se que o aumento da eficiência acarreta duas conseqüências: reduzir o custo do investimento relativo ao kWh produzido e possível redução da sensibilidade do custo final da eletricidade em relação ao componente combustível do custo.

A tendência de investimento e desenvolvimento de grandes centrais deve diminuir, já que a descentralização não favorece este modelo. Com a disseminação do custo da tecnologia, aumento da eficiência do processo e consolidação do mercado para grandes centrais, pode-se desenvolver plantas geradoras descentralizadas, caso haja interesse político e comercial para isso.

O custo da gaseificação quando comparado com outras tecnologias pode ser avaliado na Tabela 42. Observa-se que o custo da energia elétrica no Brasil é influenciado pela maior ou menor oferta de eletricidade de origem hidrológica. Para a gaseificação pode-se inferir que seu custo encontra-se abaixo de algumas tecnologias importantes (quando não ocorre captura de CO<sub>2</sub>) e ainda é menor que o das centrais eólicas quando ocorre captura de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 42 – Custo da Tecnologia (US\$/MWH)**

Tecnologia	Condição hidrológica	
	Crítica	Média
<sup>2</sup> Gás natural	56,4	40,4
<sup>2</sup> Carvão nacional	44,4	40,5
<sup>2</sup> Carvão importado	56,8	49,3
<sup>2</sup> Nuclear	51,8	50,1
<sup>2</sup> Resíduos urbanos	22	22
<sup>2</sup> Biomassa da cana	23	23
<sup>2</sup> PCH	36	36
<sup>2</sup> Centrais eólicas	75	75
<sup>1</sup> Gaseificação com Captura de CO <sub>2</sub>	62,3 - 57,6	
<sup>1</sup> Gaseificação sem captura de CO <sub>2</sub>	48,7-46,7	

Fonte: (<sup>1</sup>EPA, 2006; <sup>2</sup>PNE, 2007)

O aproveitamento de combustível sólido na termoeletricidade ocorre normalmente a partir da sua queima em caldeiras, estas servindo de fonte quente para o ciclo térmico. (KRAUSE, 1990). Alguns estudos já estimaram o potencial de energia que pode ser gerado com o uso energético da biomassa. De forma ilustrativa tem-se o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE, 2007) que apresenta o potencial de geração de

energia elétrica com cana de açúcar a partir de algumas tecnologias, conforme apresentado na Tabela 43.

**Tabela 43 – Geração Específica de Energia elétrica a partir da Biomassa (Excedente exportável para o sistema elétrico segundo o modo de operação)**

TECNOLOGIA	EM COGERAÇÃO (kWh/t <sub>biomassa</sub> ) <sup>1</sup>	EM GERAÇÃO PURA (kWh/t <sub>biomassa</sub> ) <sup>1</sup>
Ciclo a vapor de baixa eficiência (sistema atualmente utilizado)	15	
Ciclo vapor com turbinas de contrapressão	215	
Ciclo vapor com turbinas de condensação e extração	340	
Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa	1.050	1.150

<sup>1</sup>referência à biomassa com base seca Fonte: PNE, 2007

Segundo o Plano Nacional de Energia, o potencial de energia com bagaço de cana de açúcar será de 1.670 MW em 2010 com equipamentos existentes e, caso fossem construídas novas instalações com turbinas de contrapressão e ciclos de condensação e extração, este potencial poderia chegar a 2.170 MW no mesmo ano. O Plano Nacional de Energia 2030 ainda prognosticou o potencial energético com resíduos sólidos, com as tecnologias de geração de energia através do biogás, da digestão anaeróbica, a incineração e ciclo combinado com complementação de gás natural. Este potencial chega a mais de 12,4 GW em 2020 (PNE, 2007 a).

O Plano Nacional de Energia (PNE, 2007) faz um levantamento do potencial para geração de energia elétrica com alguns resíduos de biomassa. Para a cana de açúcar, além do bagaço residual, ainda é considerado a palha da cana. A palha surge como resíduo deste setor à medida que este passa a ser mais industrializado e não requer a queima para o corte da cana. Estima-se, para 2010, a existência de 142,6 milhões de toneladas de resíduos desta indústria para a geração de energia. Adotando-se maior eficiência dos processos, como a inserção de ciclo a vapor com turbinas de contrapressão e de condensação e extração, além das unidades de processamento já existente, a geração de energia elétrica poderá alcançar o montante de 11.397 GWh/ano, a grande maioria concentrada no sudeste.

Para o arroz, a projeção era de que, em 2005, houvesse 56,88 milhões de toneladas de biomassa em base seca de palha de arroz (poder calorífico inferior de 16,0 MJ/kg de biomassa seca), concentradas principalmente no sul, o que representaria  $910,05 \cdot 10^6$  GJ/ano ( $252,79 \cdot 10^6$  MWh/ano). Já a casca de arroz, estima-se que em 2005 eram 2.381 milhões de toneladas em todo o Brasil, com potencial para  $38,10 \cdot 10^6$  GJ/ano ( $10,58 \cdot 10^6$  MWh/ano) (PNE, 2007).

Este mesmo estudo avança para a produção de resíduos de madeira advindos da indústria de papel e celulose. Inferiu-se que esta indústria produz em média 600 kg de biomassa seca por tonelada de celulose produzida, com o poder calorífico inferior de 12,6 MJ/kg de biomassa seca. O PNE (2007) estimou a produção em 2005 de 6,21 milhões de toneladas de resíduos de madeira, com um potencial de  $78,3 \times 10^6$  GJ/ano ( $21,75 \times 10^6$  MWh/ano). É calculada também a quantidade de madeira excedente da floresta plantada. Os cálculos foram feitos somando a quantidade (em área) de florestas plantadas com eucalipto e *pinus* e o incremento anual, e subtraindo-se o consumo feito no ano. No entanto somente valores teóricos para eucalipto foram calculados, pois o aproveitamento de *pinus* está em sua capacidade máxima, não produzindo excedentes. Desta forma, estimou-se o potencial de  $287,6 \times 10^6$  GJ/ano ( $79,89 \times 10^6$  MWh/ano) com a quantidade de 15 milhões de toneladas de biomassa seca em 2005. De maneira resumida, temos a Tabela 44 a seguir.

**Tabela 44 – Potencial de Conteúdo Energético de algumas biomassas em 2005**

Biomassa	Potencial de Conteúdo Energético ( $10^6$ MWh/ano)
Arroz (palha)	252,78
Arroz (casca)	38,10
Madeira (Ind. Celulose)	78,3
Madeira (excedente produção)	79,89
Total	449,07

Fonte: autora, com dados do PNE (2007)

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2007, ano base 2006 (BEN, 2007), a geração de eletricidade foi de 419,3 TWh. Só em conteúdo energético, a biomassa selecionada acima seria superior a este valor (449.070 GWh). Desta forma destaca-se a importância que a biomassa pode alcançar no cenário nacional para a produção de energia.

O CENBIO (2008) desenvolveu um estudo sobre o potencial nacional de biomassa para geração de energia elétrica, analisando a casca de arroz, casca de coco, casca de amendoim, óleo de dendê, bagaço de cana de açúcar, resíduos de madeira, efluentes líquidos (advindos do esterco suíno, bovino, eqüino, aves em geral, abatedouro e vinhoto além dos esgotos domésticos e comerciais) e resíduos sólidos urbanos. A metodologia utilizada prevê um rendimento de 15% em um sistema de combustão direta, composto de caldeira de 20 bar e turbina de condensador atmosférico. Tomou-se como premissa que este sistema opera em 95% das horas anuais totais, i.e., 8322 horas por ano. Para cana de açúcar foi feita uma distinção, levando em conta as diversas safras. Foram avaliados dois sistemas que operem somente durante a safra: um com 30kWh por tonelada de cana, e outro com 60 kWh

por tonelada de cana. E foi considerado ainda um sistema que opere durante todo o ano com 120 kWh por tonelada de cana. Neste caso, além do bagaço também são considerados a palha e as pontas, resultantes da colheita da cana crua.

Para os resíduos florestais foi concebido que os resíduos deixados no campo após o corte da árvore (15%), os provenientes do preparo da madeira (50%) e os gerados na indústria moveleira (20%). No entanto, somente os resíduos advindos da fase de processamento, que representa 50% em peso da madeira coletada, foram considerados para cálculo. Foi ainda feita uma diferenciação entre um sistema convencional de turbina a vapor (ciclo Rankine) de pequeno porte e de grande porte, com rendimentos de 15% e 30% respectivamente.

Já para os resíduos sólidos urbanos o cálculo para geração de energia foi realizado baseado no potencial de metano que os resíduos podem gerar. Estes cálculos foram desenvolvidos com base na metodologia desenvolvida pelo IPCC<sup>33</sup> para cálculo de inventários nacionais de gases de efeitos estufa. Um resumo dos resultados obtidos pode ser observado na Tabela 45. O total de energia gerada potencialmente com o melhor cenário, i.e., melhor conversão de bagaço, palhas e pontas de cana e melhor conversão na silvicultura, é de 77,52 TWh/ano, o que corresponderia a uma potência instalada de 9,53 GW. O cenário mais conservador, com a pior conversão de bagaço de cana e a menor conversão de silvicultura geraria 27,52 MWh/ano o que corresponderia a uma potência instalada de apenas 4,06 GW. Os gráficos a seguir ilustram a distribuição para algumas biomassas que também são tratadas nesta tese, de acordo com a região onde há o potencial. A síntese deste trabalho encontra-se na Tabela 45 abaixo.

**Tabela 45 – Potencial de Geração de Energia (TWh/ano)**

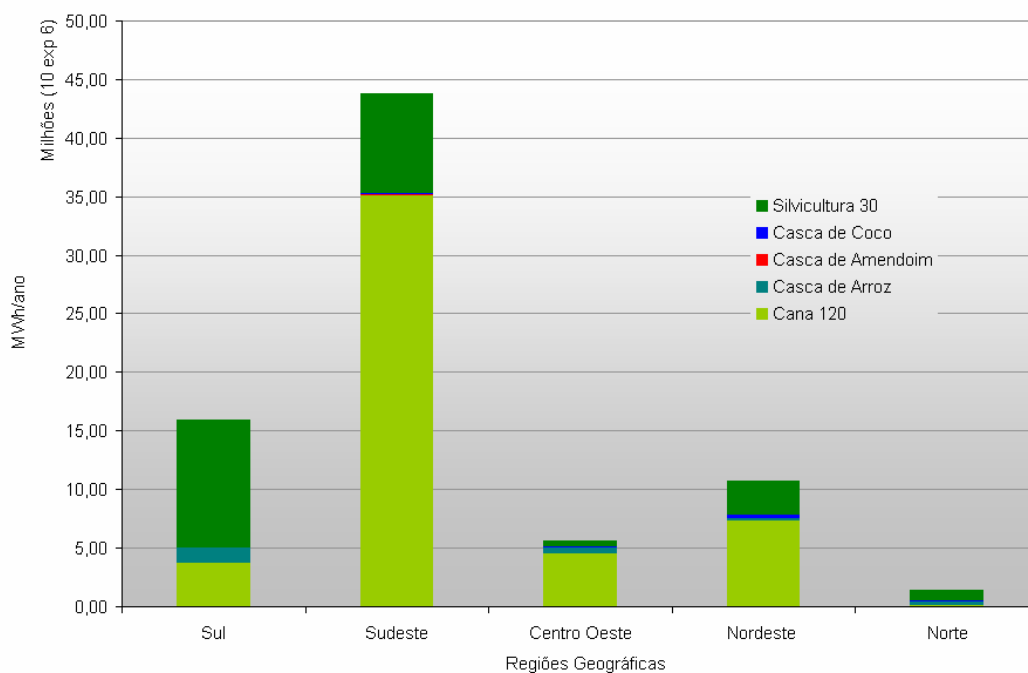
Biomassa	Sul	Sudeste	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Total
Cana 30 <sup>a</sup>	0,94	8,76	1,13	1,83	0,03	12,69
Cana 60 <sup>b</sup>	1,87	17,52	1,80	3,65	0,07	24,91
Cana 120 <sup>c</sup>	3,75	35,04	4,53	7,30	0,13	50,75
Casca de Arroz	1,29	0,06	0,51	0,21	0,26	2,34
Casca de Amendoim	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,07
Casca de Coco	0,00	0,08	0,01	0,34	0,06	0,50
Silvicultura15 <sup>d</sup>	5,47	4,25	0,27	1,45	0,50	11,93
Silvicultura 30 <sup>e</sup>	10,93	8,50	0,53	2,91	0,99	23,87
Sistemas mais eficientes	15,97	43,74	5,59	10,77	1,45	77,52
Sistemas menos eficientes	7,70	13,21	1,93	3,83	0,86	27,52

Fonte: CENBIO, 2008

<sup>33</sup> IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual and Workbook. Revised, 1996

a: geração de 30 kWh/tonelada de cana; b: geração de 60 kWh/ tonelada de cana; c: geração de 120 kWh/ tonelada de cana; d: rendimento do ciclo Rankine de 15%; e: rendimento do ciclo Rankine de 30%;

O Gráfico 13 desmembra o melhor resultado por região, evidenciando o potencial da cana no sudeste do país, mas presente em quase todas as regiões. A silvicultura por sua vez demonstra sua importância no sul do Brasil, mas com forte presença no sudeste e norte. No sul ainda pode-se observar o potencial oferecido através do uso da casca de arroz. As outras fontes (casca de amendoim e coco) têm uma contribuição muito pequena neste cenário.



**Gráfico 13 – Potencial Energético de Biomassa (melhor cenário)**

Fonte: CENBIO, 2008

Observa-se um maior potencial na região sudeste, sobretudo através do bagaço de cana, suas palhas e pontas num sistema que opere a 120 kW/t de cana. As outras regiões, exceto a região norte, apresentam um bom potencial com o bagaço de cana também. A silvicultura mostra-se significativa em todas as regiões, sobretudo na região sul, seguida pela cana em processos menos eficientes e pela silvicultura no processo com menor rendimento.

### 5.2.1 Potencial de geração de energia com gaseificação de biomassa

O estudo aqui apresentado tem por objetivo estimar a energia que poderia ser gerada supondo que houvesse a gaseificação de certas biomassas, para isso utilizando algumas das tecnologias disponíveis.

Durante este trabalho foram inferidas as quantidades dessas biomassas geradas no último ano. Foi considerado que seus resíduos poderiam ser utilizados para geração de energia elétrica. Assim, temos a casca de arroz, os resíduos do dendê (engajo, casca e fibra do mesocarpo), resíduos da mamona (torta e casca), bagaço de cana, cavaco de madeira e resíduos sólidos urbanos.

**Tabela 46 – Energia Disponível para Gaseificação com Resíduos de Biomassa**

Biomassa	Unidade	Quantidade em Massa Disponível	Poder Calorífico (MJ/kg)	Quantidade de Energia Disponível (10 <sup>6</sup> MJ)
Casca de Arroz	t	2.208.264,00	15,00	33.123,96
Dendê				-
Engajo	t	182.185,74	16,50	3.006,06
Casca	t	41.405,85	18,41	762,28
Fibras Mesocarpo	t	99.374,04	10,87	1.080,20
Mamona				-
Torta	t	52.000,00	18,84	979,68
Casca	t	61.000,00	16,05	979,05
Bagaço de Cana	t	8.335.833,00	8,92	74.330,62
Resíduos Sólidos Urbanos	t	64.002.385,00	2,52	161.286,01
Cavaco de Madeira (1)	m <sup>3</sup>	167.867.000,00	13,00	872.908,40
<b>Total</b>				<b>1.148.456,27</b>

Cavaco de madeira com densidade de 400 kg/m<sup>3</sup> Fonte: Autor

Observa-se que a quantidade teórica de bagaço de cana disponível é superior a 15 milhões de toneladas. No entanto, somente uma parte deste total será contabilizado pois, segundo o BEN 2007, já existem mais de 7 milhões de toneladas de bagaço destinadas a geração de energia elétrica. O potencial energético dos resíduos destas biomassas alcançam o montante superior a 1,4 milhões de TJ, sendo o cavaco de madeira responsável por mais de 76%, seguido pelos resíduos sólidos urbanos (14%), bagaço de cana de açúcar (6,5%), casca de arroz (2,9%), resíduos de dendê (0,42%) e resíduos de mamona (0,17%).

A energia elétrica que pode ser gerada com esses resíduos depende do equipamento utilizado e se o ciclo de geração será aberto ou combinado. Para grandes escalas

recomenda-se a tecnologia de leito fluidizado, mas para pequenas potências a tecnologia *downdraft* pode ser bem utilizada. Algumas culturas possuem uma logística que possibilita a geração em grande escala, pois já existe um sistema de concentração de volumes pelos próprios produtores, como ocorre com parte da casca de arroz e do bagaço de cana. Por outro lado, algumas tecnologias se adaptam melhor a um determinado equipamento conforme ilustra a Tabela 47.

**Tabela 47 – Tipos de Gaseificadores e Aplicações**

Matéria Prima	Tipos de tratamento	Leito de Gaseificação	
		Fixo	Fluidizado
Carvão Vegetal	Peneiramento	x	
	Britagem	x	x
	Moagem		x
	Briquetagem	x	
Lenha	Secagem	x	x
	Corte em toras	x	
	Corte em cavacos	x	x
Bagaço de Cana	Secagem	x	x
	Briquetagem	x	
	Moagem		x
Babaçu	Sem preparo	x	
	Moagem		x

Fonte: CEMIG, 1986

Pode-se observar que algumas biomassas, de acordo com o tratamento pelo qual ela passa, podem ser convenientes para gaseificadores tanto de leito fixo quanto de leito fluidizado. Sendo assim, a Tabela 48, com base em DORNBURG e FAAIL (2001), ilustra o montante de energia elétrica que poderia ser gerada com esses resíduos em gaseificadores de leito fixo *downdraft*, com leito fluidizado ligado a uma turbina a vapor e com leito fluidizado ligado a um ciclo combinado, tanto para o gaseificador operando em pressão atmosférica quanto para o gaseificador operando pressurizado. Nota-se que as eficiências para cada sistema variam significativamente, sendo os sistemas que operam em leito fluidizado com ciclo combinado são mais eficientes do que os que operam em ciclo aberto.

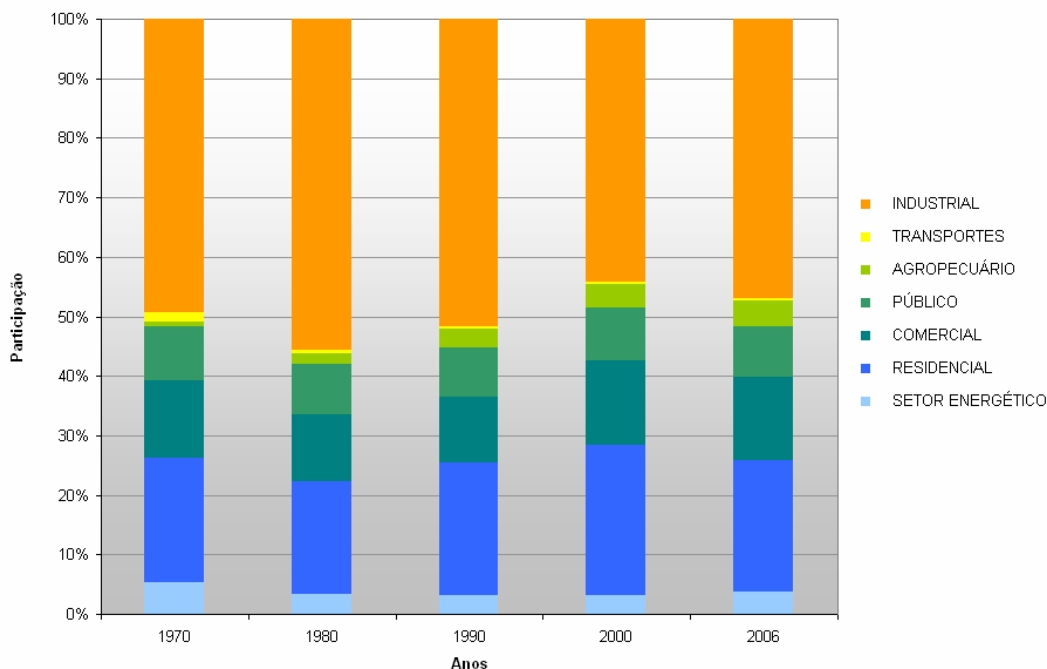
**Tabela 48 – Geração de energia com resíduos de biomassa através da gaseificação**

Biomassa	Quantidade Disponível	Gaseificador <i>downdraft</i> (50MW; $\eta = 33\%$ )	Leito Fluidizado, turbina vapor (100MW; $\eta = 31\%$ )	Leito Fluidizado atm. ciclo combinado (100MW; $\eta = 41\%$ )	Leito Fluidizado press., ciclo combinado (100MW; $\eta = 45\%$ )
	(10 <sup>6</sup> MJ)	ciclo aberto (TWh)	ciclo aberto (TWh)	ciclo combinado (TWh)	ciclo combinado (TWh)
Casca de Arroz	33.123,96	3,04	2,85	3,77	4,14
Dendê	-	-	-	-	-
Engaço	3.006,06	0,27	0,26	0,34	0,38
Casca	762,28	0,07	0,07	0,09	0,10
Fibras Mesocarpo	1.080,20	0,10	0,09	0,12	0,14
Mamona	-	-	-	-	-
Torta	979,68	0,09	0,08	0,11	0,12
Casca	979,05	0,09	0,08	0,11	0,12
Bagaço de Cana	74.330,62	6,61	6,40	8,47	9,29
Resíduos Sólidos Urbanos	161.286,01	14,34	13,89	18,37	20,16
Cavaco de Madeira	872.908,40	77,59	75,17	99,41	109,11
Total	1.148.456,27	102,09	98,89	130,80	143,56

Fonte: autor

A energia gerada por meio desta tecnologia é significativa quando comparada com o consumo de eletricidade nacional. Em 2006, foram consumidos 389,95 TWh de energia elétrica e gerados 419,3 TWh – 4,07% a mais que em 2006 (BEN, 2007). Considerando o valor de energia consumida em 2006, a geração de energia elétrica com a gaseificação equivale aproximadamente a um quarto (23%) da energia elétrica que foi consumida neste ano, com os 98,9 TWh através do processo de gaseificação em leito fluidizado com ciclo aberto. Para o melhor desempenho, com leito fluidizado com ciclo combinado e gaseificador pressurizado, este valor é de 34%. Nota-se um enorme potencial energético que ainda não foi utilizado.

A participação das energias de fontes renováveis (energia hidráulica, lenha, produtos de cana de açúcar e outras renováveis) é responsável por 47,5% da oferta interna de energia em 2006. Dados do mesmo Balanço Energético (BEN, 2007) indicam o crescimento do consumo energético no país. Em 1970 eram consumidos aproximadamente 40 TWh; em 1980 já eram cerca de 123 TWh, quase duplicando em 1990, com 218 TWh e chegando a cerca de 390 TWh em 2006. A distribuição do consumo é observada no Gráfico 14 a seguir, onde evidencia-se que o consumo de energia elétrica passou por algumas alterações ao longo do tempo.



**Gráfico 14 – Consumo setorial de eletricidade ao longo do tempo**

Fonte: BEN, 2007

Pode-se observar que havia um consumo maior de energia elétrica para o setor de transportes, justificado pela presença de bondes no serviço público de transportes. Com o desuso deste meio e a falta de investimentos no setor ferroviário, está cada dia menor a participação dos transportes no consumo de energia elétrica. O setor agropecuário aumentou sua participação principalmente graças a industrialização do setor. Os setores industrial, público, comercial e residencial são os maiores consumidores de energia elétrica. O colapso energético ocorrido no país em 2001 (apagão energético) levou à reflexão esses setores, fazendo com que as residências alterassem seu consumo energético através de medidas de eficiência energética, alguns centros comerciais passaram a gerar sua própria energia assim como algumas empresas. Este fato fez com que a curva de consumo fosse atenuada e somente após alguns anos retomasse o seu ritmo de crescimento.

O Consumo Final de Energia em 2006 foi de 202,9 milhões de tep, montante correspondente a 89,7% da Oferta Interna de Energia e 3,3 vezes superior ao de 1970. O setor industrial com 38%, o setor de transporte com 26% e o setor residencial com 11%, responderam por 75% do consumo final de energia em 2006. A evolução do consumo setorial de energia é mostrada, em valores absolutos, no Gráfico 13. Nas décadas de 70 e 80, o grupo de indústrias energointensivas, composto pelos setores

de aço, ferroligas, alumínio, metais não ferrosos, pelletização e papel e celulose, foi o que apresentou as maiores taxas de crescimento do consumo de energia, de 11,4% a.a. e 3,7% a.a., respectivamente, em comparação com o crescimento médio de 5,3% a.a. e 2% a.a. do consumo final, nos mesmos períodos.

O conjunto das demais indústrias apresentou crescimento médio do consumo de energia de 6,4% a.a. no primeiro período e de -0,25% a.a. no segundo. De 1990 em diante, o consumo das indústrias energointensivas passa a ter desempenho mais próximo do consumo final, de 3,5% a.a. contra 2,93% a.a., respectivamente. Neste mesmo período, o desempenho das outras indústrias, com crescimento de 3,84% a.a., suplanta o desempenho do consumo final de energia.

Nota-se que a década de 1980 foi marcada por grande estagnação das indústrias voltadas para o consumo interno, geradoras de empregos, pouco intensivas em capital e pouco intensivas em energia, tais como têxtil, alimentos, calçados, eletroeletrônica, mecânica, construção civil, móveis, etc., incluídas na curva “indústrias(-)energia”.

No setor residencial, o consumo de energia se mantém estável, com um leve decréscimo em alguns momentos no período em análise, embora o consumo de eletricidade tenha apresentado altas taxas de crescimento. Neste setor, a eficiência média de uso da energia é crescente em razão da substituição de lenha por GLP, com cada tep de GLP substituindo entre 7 e 10 tep de lenha, consequência da maior eficiência dos fogões a GLP. A baixa elasticidade do consumo de energia na cocção em relação à renda familiar contribui, também, para o pouco crescimento do consumo de energia do setor.

Vale lembrar que o Governo Federal, através do Programa Luz para Todos, tinha o objetivo de levar energia elétrica a mais de 2 milhões de domicílios rurais até o final de 2008, contemplando o atendimento das demandas no meio rural mediante uma das 3 (três) possibilidades: extensão de redes de distribuição, sistemas de geração descentralizada com redes isoladas ou sistemas individuais. A gaseificação pode aumentar a oferta de energia elétrica nas áreas rurais através de sistemas individuais, caso a quantidade de biomassa permita é possível criar sistemas descentralizados com redes isoladas, ou até mesmo através de grandes gaseificadores integrando a rede de energia nacional (MME, 2008).

### **5.3 Conclusões Preliminares**

Neste capítulo foi ressaltada a importância energética dos resíduos de algumas culturas. Num primeiro momento foi feita a descrição da silvicultura, das culturas do arroz, dendê, mamona, bagaço de cana e resíduos sólidos urbanos. A quantidade dos resíduos disponíveis para a geração de energia elétrica foi inferida bem como sua localização no território nacional. A condição mínima requerida para que um insumo fosse considerado combustível para gaseificação foi abordada bem como os outros estudos que já tinham efetuado cálculos para a geração de energia com biomassa de formas diversas, não só com a gaseificação.

Comparando o resultado obtido neste estudo com os outros, pode-se dizer que o potencial energético de biomassa encontrado pelo Plano Nacional de Energia (449,07 TWh) é maior do que o encontrado nesta tese (143,56 TWh no máximo). Este fato deve-se à biomassa considerada em cada caso não ser exatamente a mesma. O mesmo ocorre no caso do CENBIO, onde a biomassa utilizada para cálculo de geração de energia elétrica foi diferente da considerada nesta tese, como também a tecnologia de geração de energia analisada. Segundo o CENBIO (2008) a energia elétrica gerada pode variar entre cerca de 7 a 20% do total de energia elétrica consumida no Brasil. Considerando a demanda energética reprimida que ainda existe neste país e seu baixo consumo energético *per capita*, além da possibilidade de atrelar o uso de uma biomassa que iria ser fomentadora de poluição ou produzir metano em aterro, a possibilidade de gerar energia elétrica com biomassa através da gaseificação é altamente recomendável. Com esses insumos poder-se-ia suprir de entre 23% e 34% da energia elétrica nacional.

## 6 Conclusão e Sugestões para Trabalhos futuros

A inserção de uma nova tecnologia para geração de energia elétrica no Brasil vem de encontro a algumas demandas sociais, pela busca de processos mais limpos e que fomentem o desenvolvimento sustentável.

A discussão sobre o que é desenvolvimento sustentável consta na introdução desta tese. Embora haja uma preocupação em atender as necessidades das gerações PRESENTES, as ações que devem ser tomadas no presente para este fim muitas vezes não são realizadas. O padrão de consumo hoje estabelecido não converge com a expectativa de uma mudança no modelo atual de desenvolvimento.

As preocupações vigentes em relação às mudanças climáticas impulsionaram pesquisas em novas fontes de energia. Estas surgiram como uma alternativa ao consumo de combustíveis fósseis, que formam o cerne da oferta de energia no mundo. Assim, além de contribuir para a diminuição dos impactos ambientais globais ainda favorecem a diversificação da matriz energética.

A tecnologia de gaseificação toma impulso neste contexto, i.e., é uma tecnologia que possibilita o uso energético do carvão, combustível fóssil que possui a maior reserva energética do planeta, e pode ser adaptada para ter como insumo a biomassa, recurso de menor impacto ambiental no que concerne a intensificação dos gases de efeito estufa, além de contribuir, de maneira geral, para indicadores sociais. Este panorama foi traçado no Capítulo 2, onde ainda é exposto falta de incentivo legais para que novas tecnologias sejam incorporadas na matriz nacional de energia.

Ainda no Capítulo 2, é mencionada a crescente demanda por energia, principalmente nos países em desenvolvimento (ou emergentes) como China, Índia e Brasil. Esses países, embora estejam elevando o consumo energético a cada ano, ainda possuem um baixo consumo *per capita*. Ressalta-se que existe uma correlação entre consumo energético e grau de desenvolvimento. Assim, para que esses países passem para um patamar mais elevado nos atuais critérios de desenvolvimento, mesmo com recursos de aprimoramento da eficiência energética, o consumo por energia deve aumentar.

O desenvolvimento desta tecnologia ocorre, num primeiro momento, na Europa e depois migra para os Estados Unidos. Este tomou fôlego num momento de escassez

de recursos fósseis e utilização da lenha como fonte energética. O Capítulo 3 descreve os modelos de gaseificadores existentes comercialmente e as reações decorrentes do processo de gaseificação.

Ainda no Capítulo 3 discute-se a eficiência dos diferentes modelos de gaseificadores (que oscilam entre 40% e 27%), e quais os sistemas aplicados para que haja geração de energia elétrica com o gás advindo do gaseificador. As experiências ocorridas no Brasil no que tange esta tecnologia são enumeradas, bem como o estágio de evolução atual, com inovações no sistema de captação de gases e gaseificação *in situ*, dentre outras.

O uso de resíduos de biomassa leva a uma adaptação do processo para que o aproveitamento energético seja otimizado, e os impactos, de qualquer natureza, minimizados. Com este objetivo foi desenvolvida a experiência na planta piloto de gaseificação na Universidade de Louvain la Neuve, Bélgica, apresentado no Capítulo 4. O debate sobre a presença de alcatrão no processo de gaseificação concluiu que sua formação estava relacionada ao tamanho dos insumos (no caso, cavacos de madeira) utilizados durante o processo. Assim, foi elaborado um procedimento experimental no qual se pode comprovar tal hipótese. Diversos ensaios foram realizados e foi possível traçar uma correlação entre o tamanho dos insumos e a quantidade de alcatrão através da concentração de metano existente no gás de síntese obtido, uma vez que a matéria prima que dá origem ao metano é a mesma que origina o alcatrão. Assim, a equação  $C_{\text{alcatrão}} = 0,07 \cdot M_{\text{taxa}} \text{CH}_4^{3,5}$  obtém a relação exponencial entre essas duas grandezas.

Este experimento detalhado no Capítulo 4 mostra que a maior produção de alcatrão ocorre quando partículas pequenas são gaseificadas. No entanto, a menor produção deste composto se dá quando partículas de tamanhos variados são gaseificadas. A interação entre insumos de diferentes tamanhos criou uma sinergia positiva para minimizar a formação do alcatrão.

Resgatando o objetivo inicial da tese, que almejava calcular o potencial de energia elétrica a ser gerada com os resíduos selecionados (silvicultura, arroz, dendê, mamona, bagaço de cana e resíduos sólidos urbanos) chega-se ao Capítulo 5. Neste capítulo, faz-se uma breve descrição das biomassas utilizadas e a caracterização dos seus resíduos. Levando em conta as diferentes tecnologias do processo de gaseificação e as quantidades disponíveis dos resíduos, foi possível calcular o potencial de geração de energia elétricas existente nestas biomassas. Assim,

dependendo da tecnologia empregada, pode-se ter entre 20% e 45% da matriz elétrica brasileira advinda destes insumos através da gaseificação.

Cabe notar que este estudo não é pioneiro nesta estimativa. Nesta tese são citados os cálculos elaborados pelo PNE (2007) e CENBIO (2008), que calculam valores diferentes para a geração de energia elétrica com biomassa. O PNE (2007) estimou a geração de 449,07 TWh, ligeiramente superior aos 419,3 TWh de energia elétrica gerada no Brasil em 2006 do (BEN, 2007). O CENBIO (2008) calculou um potencial na faixa de 7% e 20% da matriz elétrica nacional.

Trabalhos anteriores também expressaram o potencial de geração com resíduos. Oliveira (2004) estimou que entre 20% e 36% da matriz energética à época (entre 16% e 28% da matriz atual) poderia ser suprida com tecnologias de geração de energia elétrica com resíduos (GDL, Dranco, Incineração e BEM), mas consorciadas apenas à geração de energia com biogás dos aterros e à conservação advinda da reciclagem máxima de papéis, plásticos, vidros e metais. Henriques (2004) calculou o potencial para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos, considerando as tecnologias de incineração e digestão anaeróbica (no aterro e acelerada em reatores). Com a tecnologia de melhor rendimento poder-se-ia alcançar cerca de 11% da oferta de energia elétrica daquele ano (10% da matriz atual) utilizando unicamente resíduos sólidos urbanos. Assim evidencia-se que a oferta de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos, na hipótese mais conservadora, poderia suprir 11% da matriz energética nacional.

Com a tecnologia de melhor rendimento, a gaseificação de biomassa poderia suprir quase 50% da matriz elétrica. Se ainda forem considerados outros resíduos agrícolas com potencial de aproveitamento, como a casca do grão da soja e os resíduos do milho, este valor pode ser alterado, mas não foram considerados por não serem atualmente utilizados como fonte de energia elétrica.

Nota-se que há um forte potencial a ser aproveitado e são necessárias medidas de incentivo às tecnologias de aproveitamento energético de resíduos, estudos de novas tecnologias e melhoria dos processos já existentes. Importa dar acento ao papel do Estado no direcionamento de medidas que forcem mudanças drásticas no paradigma do atual aproveitamento energético dos resíduos no Brasil, através de incentivos fiscais e legais.

Ademais, vale ressaltar que existe ainda um número significativo de pessoas sem acesso à eletricidade no país e, por ser um serviço público, é um dever do Estado prover acesso à ela a todos os cidadãos (ROSA, 2002). A geração a partir da gaseificação apresenta-se como mais uma alternativa para este fim. Ainda segundo Rosa (2002):

*“Como a potência média cresce ano a ano, é necessário ampliar sempre a capacidade de geração, construindo novas usinas, hidrelétricas ou termelétricas, além de usar alternativas energéticas, como bagaço de cana e o lixo urbano, promover a conservação para economizar energia aumentando a eficiência, gerar eletricidade distribuída nas empresas usando o gás natural que está sobrando.”*

No que concerne estudos futuros, resalta-se os seguintes pontos:

- Incrementar os resíduos considerados com outros insumos;
- Elaboração de estudo sobrepondo todas as tecnologias alternativas, através do sistema de informações geográficas, considerando a área de concentração de cada biomassa, linhas de transmissão e viabilidade logística para utilização dos insumos;
- Estimar as toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que deixam de ser emitidas na adoção da geração de energia elétrica a partir destes resíduos em relação ao Plano Decenal de Expansão;
- Aprofundar a comparação da gaseificação com outras tecnologias de geração de energia elétrica;
- Dar acento às reações químicas existentes em cada etapa da gaseificação, bem como as possibilidades de melhoras cinéticas das mesmas e a possibilidade da adoção de catalisadores para melhoria do processo;
- Investigar outros parâmetros que se correlacionem com a produção de alcatrão, além da concentração de metano e o tamanho das partículas;
- Testar o comportamento de gaseificadores em outras plantas piloto, com outras biomassa e outras condições de processo.

## 7 Bibliografia

ABE, H.; KATAYAMA, A.; SAH, B.P.; TORIU, T.; SAMY, S.; PHEACH, P.; ADAMS, M.A.; GRIERSON, P.F.; Potential for rural electrification based on biomass gasification in Camboja Biomass & Bioenergy. volume 31, pg. 656 – 664. Elsevier, 2007

ABIMCI – Associação da Indústria da Madeira Processada Mecanicamente. Estudo Setorial 2007. Curitiba 2007. Texto completo em [www.abimci.com.br](http://www.abimci.com.br) Acessado em janeiro de 2008

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantadas. Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2006. Brasília, 2007.

AEO 2007 – Annual Energy Outlook 2007, with projections to 2030. Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting. U.S. Department of Energy. Washington, D.C., Fevereiro 2007

AEO 2008 – Annual Energy Outlook 2008, with projections to 2030. Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting. U.S. Department of Energy. Washington, D.C., Junho 2008

AMATO, G.W., Casca: agregando valor ao arroz. IRGA – Instituto Rio Grandense de Arroz. Disponível em [www.irga.rs.gov.br](http://www.irga.rs.gov.br). Acessado em Maio 2008.

AMORIM, P.Q.R. Perspectiva Histórica da cadeia da mamona e a introdução da produção de biodiesel no semi-árido brasileiro sob o enfoque da teoria dos custos de transação. Monografia. ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Piracicaba, São Paulo, 2005

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração Disponível em [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acessado em janeiro 2009

ANTUNES, P.; SALGUEIRO, A.; SANTOS, R.; et al Estudo Sobre Setor Elétrico e Ambiente – 1º Relatório: Impactos Ambientais do Setor Elétrico CENTRO DE ECONOMIA ECOLÓGICA E GESTÃO DO AMBIENTE - Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa – Lisboa, Portugal 2000

AVZARADEL, A.C. A contribuição da política Estadual para viabilizar a participação da agricultura familiar no programa nacional de produção e uso de biodiesel: o caso da Bahia. Dissertação de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ. Março 2008

BABU, A.V.; CHAURASIA, A.S.; Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle. Chemical Engineering Science, volume 59, n.10, pp 1999-2012. 2004.

BEN – Balanco Energético Nacional 2007 – Ano Base 2006. Ministério de Minas e Energia, 2007

BEN – Balanco Energético Nacional 2006 – Ano Base 2005. Ministério de Minas e Energia, 2006

BHAT, A.; BHEEMARASETTI, J.V.R.; RAO, T.R. Kinetics of rice husk char gasification. Energy Conversion & Management. volume 42, pg: 2061-2069. Pergamon, 2001

BIOMANIA – Bioquímica – Alcatrão. Disponível em [www.biomania.com.br](http://www.biomania.com.br) . Acessado em agosto 2008

BOTANICAL – A modern Herbal, Rice. Disponível em <http://www.botanical.com/botanical/mgmh/r/rice--15.html> . Acessado em julho 2008

BP – BRITISH PETROL Statistical Review of the World Energy June 2008. Disponível em. [www.bp.com](http://www.bp.com). Acessado em junho 2008.

BRIDGWATER, A.V.; TOFT, A.J.; BRAMMER, J.G.; A techno-economic comparison of power production by fast pyrolysis with gasification and combustion. Renewable and Sustainable energy Reviews. Volume 6, pg 181 -248. Pergamon, 2002

BRYDEN, K.M.; HAGGE, M.J.; Modeling the combined impact of moisture and char shrinkage on the pyrolysis of a biomass particle. Fuel, volume 82, 1633:1644. Setembro 2003.

BRYDEN, K.M.; HAGGE, M.J.; Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass. Chemical Engineering Science, volume 57, n.14, pp 2811-2823. Julho 2002.

BRYDEN, K.M.; RAGLAND, K.W.; RUTLAND, C.J.; Modelling thermally thick pyrolysis of wood. Biomass & Bioenergy, volume 22, 41:53. Janeiro 2002.

CAO, Y.; WANG, Y.; RILEY, J.T.; PAN, W.; A novel air gasification process for producing tar-free heating value fuel gas. Fuel Processing Technology, volume 87. 343:353. Abril 2006

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Gaseificação de Biomassa. Superintendência de Desenvolvimento Energético e Mercado. Departamento de Desenvolvimento Energético. Divisão de Análise e Desenvolvimento Energético. Minas Gerais, Belo Horizonte, Junho 1986.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Panorama do Potencial de Biomassa do Brasil. Metodologia de Cálculo para conversão energética. Instituto de Eletrotécnica e Energia – IEE. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, SP, 2008.

CEEGA - Centro de Economia Ecológica e Gestão do Ambiente Estudo sobre Sector Eléctrico e Ambiente 1º Relatório Impactes Ambientais Do Sector Eléctrico Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2000

CEPA – Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, Instituto de Física, USP São Paulo, SP, 2005. Acessado em janeiro de 2008. Disponível em: <http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Refrigeracao/sensivel.htm>.

CEPLAC – Comissão Executiva do Plano de Lavoura Cacaueira. O Dendzeiro como cultura energética para os trópicos úmidos. Artigos técnicos. Acessado em março de 2008. Disponível em <http://www.ceplac.gov.br/radar/semfaz/dendzeiro.htm>

CHIARADIA, J.J. Avaliação agrônômica e fluxo de gases do efeito estufa a partir de solo tratado com resíduos e cultivado com mamona (*Ricinus communis* L.) em área de reforma canavial. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. ESALQ/USP, Piracicaba, 2005

CH2M HILL - IGCC 101 Gasification Technologies Council :Workshop. Denver, Colorado, EUA. Março 2007

COAL-GEN The Gasification Industry: 2007 Status & Forecast Gasification Technologies Council. Milwaukee, WI, EUA. August , 2007

COELHO, S.T. Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo. USP – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia - Instituto de Eletrotécnica e Energia/ Instituto de Física. Escola Politécnica. Faculdade de Economia e Administração. Tese de doutorado. São Paulo, Agosto, 1999

COOPERSUCAR – Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 2008. Acessado em fevereiro de 2008. Disponível em [WWW.copersucar.com.br](http://WWW.copersucar.com.br)

CORREA NETO, V., Análise de viabilidade da Cogeração de Energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana de açúcar e gás natural. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético /COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 2001

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; GÓMEZ, E.O.; (organizadores) Biomassa para energia 1ª edição. Editora da Unicamp, 2008

CORTI, A.; LOMBARDI, L.; Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO<sub>2</sub> emissions: Performance analysis and life cycle assessment (LCA). Energy, volume 29, pg. 2109 – 2124, Elsevier, 2004

COSCORELLI, E.G.V., Pequena história de uma grande floresta In MELLO, M. G., (org) Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais Labmídia/FAFICH. pp.103-114 Editora UFMG, Belo Horizonte, 2001

COSTA, C.V.; Políticas de promoção de fontes novas e renováveis para geração de energia elétrica: lições da experiência européia para o caso brasileiro. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

CRIAR E PLANTAR Mamona – Generalidades. Disponível em <http://www.criareplantar.com.br/agricultura/mamona/mamona.php?tipoConteudo=texto&idConteudo=1348>. Acessado em julho 2008.

DEMIRBAS, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis volume 72, 243:248, 2004.

DESCAMPS, C.; BOUALLOU, C.; KANNICHE, M.; Efficiency of an Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant including CO<sub>2</sub> removal. Energy, volume 33, pg. 874 – 88. Elsevier, 2008.

Di BLASI, C.; Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers. Chemical Engineering Science, volume 35, 2931:2944. Agosto, 2000.

\_\_\_\_\_ Heat, momentum and mass transport through a shrinking biomass particle exposed to thermal radiation. Chemical Engineering Science, volume 51, n.7, pp. 1121-1132, Abril, 1996.

DINIZ, J.; CARDOSO, A.L.; STAHL, J.A.; VILLETI, M.A.; MARTINS, A.F.; Poder Calorífico da casca de arroz, caroço de pêssgo, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise. Ciência e Natura, Universidade Federal de Santa Maria, Volume 26, n°2 pg. 25-32. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

DOMINGOS, A. K., WILHELM, H. M., RAMOS, L.P. Processo de Etanolise em Meio Alcalino do Óleo Bruto de Nabo Forrageiro Centro de Pesquisa em Química Aplicada (CEPESQ), Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curitiba, PR, e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba, 2006

DORNBURG, V.; FAALJ, A.; Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. Biomass and Bioenergy, n°21, pg. 91 – 108, 2001

DRUMMOND, A.R.F.; GAZINEU, M.H.P.; ALMEIDA, L.; MAIOR, A.S. Produção e valor Energético da torta de mamona do agreste pernambucano. 2° Congresso Brasileiro de Mamona. Aracaju, Sergipe, 2006

DUTRA, R.M.; Proposta de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2007

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dendê – Manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos. Embrapa Amazônia Oriental. Documentos 246. Belém, 2006

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Amazônia Ocidental. Dendê Disponível em [www.cpaa.embrapa.br/portfolio/sistemadeproducao/dende](http://www.cpaa.embrapa.br/portfolio/sistemadeproducao/dende) . Acessado em março de 2008

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Arroz e Feijão Origem e História do Arroz. Disponível em <http://www.cnpaf.embrapa.br/arroz/historia.htm> . Acessado em julho de 2008 a

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão. Comunicado Técnico 213 – Informações sobre os Sistemas de Produção Utilizados na Ricinocultura na Região Nordeste, em Especial o Semi-Árido e outros aspectos ligados a sua cadeia. Campina Grande, Paraíba, Julho 2004

\_\_\_\_\_. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão Circular Técnica 70 – Mamona: Árvore do Conhecimento e Sistemas de Produção para o Semi-árido Brasileiro. Campina Grande, Paraíba, Setembro 2003

EIA – Energy Information Administration; Coal Prices 1949 – 2007. Disponível em <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/coal.html> . Acessado em janeiro 2009.

EPA – United States Environmental Protection Agency. Environmental Footprints and Costs of Coal-Based Integrated Gasification Combined Cycle and Pulverized Coal Technologies. Clean Air Markets Division, Office of Atmospheric Programs Washington, DC, USA 2005

EPRI – Electric Power Research Institute IGCC 101 Gasification Technologies Council Workshop. Denver, Colorado, EUA. Março 2007

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT - FAO Statistics Division 2008 Disponível em [www.fao.org](http://www.fao.org) Acessado em fevereiro de 2008.

\_\_\_\_\_. – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Wood gas as engine fuel. Mechanical Wood Products Branch, Forest Industries Division. FAO Forestry Department. FAO Forestry Paper n° 72. Roma, Itália, 1986

FERNANDES, M.C. Avaliação tecno – econômica da gaseificação do capim – elefante para eletrificação rural. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP, Campinas, SP, 2000

FERREIRA, A.B.H.; Novo Dicionário Eletrônico Aurélio, versão 5.11<sup>a</sup>. Edição Eletrônica Positivo Informática Ltda, 2004

FERREIRA, L.C.; VIOLA, E. (organizadores) Incertezas de sustentabilidade na globalização. 2<sup>a</sup> edição, Editora Unicamp, 1996

FERREIRA, O.C., Teor de Carbono em Combustíveis da Biomassa Economia da Energia, Ano X – N° 57: Agosto-Setembro 2006. Disponível em [http://ecen.com/para\\_imprimir/eee57p.pdf](http://ecen.com/para_imprimir/eee57p.pdf) . Acessado em março 2008.

FIGUEIREDO, P.J.M. A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental. Editora UNIMEP. Piracicaba, 1994

FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JR., U. L.; JAHN, S.L.; Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. Revista Química Nova, volume 28, número 6, pg. 1055 – 1060. São Paulo, SP, 2005

FRANCO, C.; PINTO, F.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I.; The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. Fuel, volume 82, pg. 835 – 842, 2003.

GAÑAN, J.; ABDULLA, A. A.; MIRANDA, A. B.; TUREGANO, J.; CORREIA, S.; CUERDA, E. M. Energy Production by means of gasification process of residuals sourced in Extremadura (Spain) Renewable Energy volume 30, n°.11, pg 1759-1769, Setembro 2005

GASNET – Termelétricas a gás natural de ciclo combinado. Disponível em [http://www.gasnet.com.br/gasnet\\_br/termeletricas/ciclo.asp](http://www.gasnet.com.br/gasnet_br/termeletricas/ciclo.asp) . Acessado em julho 2008.

GONÇALVES JUNIOR, D.; Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro: Estratégia de Retomada da Taxa de Acumulação do Capital? Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Engenharia – Instituto de Eletrotécnica e Energia/ Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2002

GRIMONI, J.A.B.; GALVÃO, L.C.R.; UDAETA, M.E.M.:(org) Iniciação a Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP, São Paulo, 2004

GRØNLI, M. A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass. Tese de doutorado. Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Trondheim, 1996

HANSON, S.; PATRICK, J.W.; WALTER, A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification . Fuel v.81, 531:537 (2002)

HENRIQUES, R.M. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma abordagem tecnológica. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ. 2004

HOLLAUER, G.; CRUZ, P.T.A.; A eficiência energética e o Planejamento Energético. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Ministério de Minas e Energia. 4º Congresso Brasileiro de Eficiência Energética e Cogeração de Energia. São Paulo, Maio 2007

HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T. C. Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2002

HORNE, P.A.; WILLIAMS, P.T; Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. Fuel, v.75, n.9, pp 1051-1059. Julho 1996

IAC – Instituto Agrônomo da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Disponível em <http://www.iac.sp.gov.br/tecnologias/mamona/mamona.htm> . Acessado em julho 2008.

IEA – International Energy Agency. Map – Energy – Indicators – Electricity Consumption / population 2005. Disponível em [http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/\\_ele\\_pop.htm](http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/_ele_pop.htm). Acessado em janeiro 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) . Acessado em Março, 2008.

\_\_\_\_\_ – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal – Cereais, Leguminosas e Oleaginosas. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de Agropecuária. Rio de Janeiro, 2007.

IRRI - International Rice Research Institute. Rice Almanac. Third Edition Disponível em [www.irri.org](http://www.irri.org). Acessado em julho 2008.

JANSE, A.M.C.; WESTERHOUT, R.W.J.; PRINS, W.; Modelling of flash pyrolysis of a single wood particle. Chemical Engineering and Processing, volume 39, 239:252, Maio 2000

JONES, B. Gas Turbine fuel flexibility for a carbon constrained world. GE Syngas Power Is. Products. Workshop on Gasification Technologies. Bismarck, North Dakota, USA, Junho 2006

KARELLAS, S.; KARL, J.; KAKARAS, E.; An innovative biomass gasification process and its coupling with microturbine and fuel cell systems. Energy, volume 33, pg.284 – 291. 2008

KLOCK, U. Química da madeira. Universidade Federal do Paraná. Maio 2001. Acessado em abril, 2008. Disponível em: [www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/composicaoquimica.ppt](http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/composicaoquimica.ppt)

KNOEF, H.A.M.; The UNDP/World Bank monitoring program on small scale biomass gasifiers (BTG's experience on tar measurements). Biomass & Bioenergy, volume 18. 39:54. Janeiro 2000.

KRAUSE, G.G., Avaliação da Tecnologia de Sistemas Integrados Gaseificação – Ciclo Combinado para geração termelétrica no Brasil Dissertação de mestrado. PPE/ COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, 1990

LAPUERTA, M.; HERNÁNDEZ, J.J.; PAZO, A.; LÓPEZ, J.; Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. Fuel Processing Technology, doi: 10.1016/j.fuproc.2008.02.001, 2008.

LIMA, R.L.S.; SEVERINO, L.S.; ALBUQUERQUE, R.C., BELTRÃO, N.E.M. Avaliação da casca e da torta de mamona como fertilizante orgânico. 2º Congresso Brasileiro de Mamona. Aracaju, Sergipe, 2006

LIN, K.S.; WANG,H.P.; LIN, C.-J.; JUCH, C.-I.; A process development for gasification of rice husk. Fuel Processing Technology, volume 55, pg. 185 – 192, Elsevier, 1998

LORA, E. S., HAPP, J. F., CORTEZ, L. A. B., Caracterização e Disponibilidade da Biomassa. In: Universidade do Amazonas, AM, Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa, 1 ed., capítulo I, Manaus, Amazonas, 1997

MAGALHÃES, J.G.R., A energia que vem da floresta. In MELLO, M. G., (org) Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais Labmídia/FAFICH. pp.133-162 Editora UFMG, Belo Horizonte, 2001

MARRECO, J.M., Planejamento de longo prazo da expansão da oferta de energia elétrica no Brasil sob uma perspectiva da teoria das opções reais. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ. 2007

MATOS, A.T., Tratamento de Resíduos Industriais. Curso sobre tratamento de Resíduos Agroindustriais. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental. Universidade de Viçosa. Viçosa, 2005

MAY, P., LUSTOSA, M.C.; VINHA, V. Economia do Meio Ambiente: teoria e prática. Editora Campus, Elsevier, 2003

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology, volume 83, pg. 37-46. Maio 2002

MEDEIROS, A.S.; Análise do Potencial do Biodiesel de Dendê para a Geração Elétrica em Sistemas Isolados da Amazônia Dissertação de mestrado. PPE/ COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, Março, 2008

MÉSZÁROS, I.; Para Além do Capital. Editora Boitempo. São Paulo, SP, 2002

MME – Ministério de Minas e Energia. Luz para Todos, Programa Nacional de Universalização do Acesso e uso da Energia Elétrica – Manual de Operacionalização, versão 2.0. Disponível em [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br). Acessado em agosto 2008.

MURARO, W. Avaliação do Funcionamento de Motor Ice com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação de Casca de Arroz. Dissertação de Mestrado UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Térmica dos Fluidos. Campinas, SP, 2006.

NATARAJAN,E.; OHMAN, M.; GABRA, M.; NORDIN, A.; LILIEDAHL, T.; RAO, A.N.; Experimental determination of bed agglomeration tendencies of some common

agricultural residues in fluidized bed combustion and gasification. Biomass and Bioenergy, volume 15, n°2, pg. 163-169. Pergamon, 1998

NATARAJAN, E.; NORDIN, A.; RAO, A.N.; Overview of Combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. Biomass and Bioenergy, volume 14, n°5/6, pg. 533 - 546. Pergamon, 1998

NETL – National Energy Technological Laboratory – DOE (Department of Energy) Gasification Plant Cost and Performance Optimization – Final Report. Setembro 2003

\_\_\_\_\_-CO<sub>2</sub> Capture: Comparison of Cost & Performance of Gasification and Combustion-based Plants Workshop in Gasification Technologies Indianapolis, Indiana, EUA, Junho , 2007a

\_\_\_\_\_- CO<sub>2</sub> Capture: Comparison of Cost & Performance of Gasification and Combustion-based Plants Workshop in Gasification Technologies. Denver, Colorado, EUA. Março 2007b

\_\_\_\_\_- NETL Researchers Focus on Combining Coal and Biomass in Co-Gasification. News Room LabNotes - July 2008. Disponível em <http://www.netl.doe.gov/newsroom/labnotes/07-2008.html>. Acessado em julho 2008

NEUTZLING, F.C., MAUCH PALMEIRA, E.: A competitividade das exportações brasileiras de cavaco de madeira .Observatorio de la Economía Latinoamericana, Número 77, 2007. Acessado em janeiro de 2008. Texto completo em <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/br/>

OLIVEIRA,L.B.; Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético /COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2004

OPÇÃO VERDE RESÍDUOS FLORESTAIS Bioenergia de pinus e eucalipto: lenha, cavaco, serragem.2008 Acessado em janeiro de 2008. Texto completo em [www.opcaoverde.com.br](http://www.opcaoverde.com.br)

PEREIRA, M.A.; Avaliação do impacto dos tributos na incorporação de reservas nas empresas do setor de petróleo. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético /COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2004

PETERS, B.; BRUNCH, C.; Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Volume 70, pg. 233-250. Dezembro 2003

PETROBAS – Petróleo Brasileiro S.A. Comunicação Interna. Acessado em 2008

PIFFER, L., Análise Paramétrica de um Gaseificador de Resíduos de Madeira. Monografia. Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Dezembro, 1999

PINTO, F.; FRANCO, C.; ANDRÉ, R.N.; MIRANDA, M.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I.; Co-gasification study of biomass mixed with plastic waste. Fuel, volume 81, pg. 291 – 297, 2002

PNAE – PLANO NACIONAL DE AGRO ENERGIA 2006 – 2011, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, 2005

PNE – Plano Nacional de Energia 2030. Empresa de Planejamento Energético – EPE. Rio de Janeiro, RJ, 2007

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Atlas do Desenvolvimento Humano. Disponível em [www.pnud.org.br/atlas](http://www.pnud.org.br/atlas) . Acessado em fevereiro 2008.

PONZIO, A.; KALISZ, S.; BLASIAK, W.; Effect of operating conditions on tar and gas composition air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste. Fuel Processing Technology, volume 87, pg. 223-233. Fevereiro 2006

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H.; Energy from Biomass – A Review of combustion and Gasification technologies. World Bank Technical Paper n° 422. Energy Series. Washington D.C., EUA, Março, 1999

RANGEL, L.P.; PERES, S.; CASTELLETTI, C.E.; ALMEIDA, C.H.T.; Estudo da viabilidade técnica para geração de energia elétrica a partir dos resíduos da mamona 1º Congresso Brasileiro de Mamona, Campina Grande, PB, 2004

REED, T.B.; DAS, A. Handbook of Biomass Dawndraft Gasifier Engine System Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, The Biomass Energy Foundation Press. 3rd edition Golden, Colorado, USA, 1988

REIS, L.B.; SILVEIRA, S.:(organizadores) Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável: Introdução de uma visão multidisciplinar. Edusp, São Paulo, SP, 2001

RODRIGUES, R.A. (coordenador) Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial Encarregado de Apresentar Estudos sobre a Viabilidade de Utilização de Óleo Vegetal – Biodiesel Como Fonte Alternativa de Energia. Casa Civil, Brasília, 2003

ROSA, L.P., A Crise de Energia Elétrica: Causas e Medidas de Mitigação. In: BRANCO, A.M.; (org.) Política Energética e Crise de Desenvolvimento, 1ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil. Editora Paz e Terra, 2002

SACHS, I. Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável. Editora Garamond, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

SÁNCHEZ, C.G.; Breve Panorama da tecnologia de Pirólise de Biomassa e Resíduos. 1º Seminário de Tecnologia em Bioeletricidade. São Paulo, SP, Maio 2008

SANTOS,S.M.A., Geração de Eletricidade em Comunidades Isoladas na Região Amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa. Dissertação de Mestrado, PIPGE/FEA/IEE/IF USP, São Paulo, 2006

SCHUBERT, P. Development of the Modern Fischer-Tropsch Process – 2001. Disponível em [http://www.fischer-tropsch.org/primary\\_documents/presentations/](http://www.fischer-tropsch.org/primary_documents/presentations/). Acessado em Julho 2008

SCHRÖDER,E. Experiments on the pyrolysis of large beech wood particles in fixed beds Journal of Analytical and Applied Pyrolysis volume 71, n.2, pp 669 – 694 Junho 2004

SEVERINO, S.L.; O que sabemos sobre a torta de mamona. Embrapa/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Documentos 134. Março 2005

SEYNHAEVE, J.M.; JEANMART, H.; NAVEZ, F. Use of CFD Fluent code to simulate the air flow through a wood particle bed for the design of large downdraft gasifiers

International Conference on Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion;  
Victoria, Canada; 30th August – 2nd September 2004

SHAH, M.; RAYBOLD, T.; JAMAL, A.; DRNEVICH, R.; BONAQUIST, D. (Praxair);  
JONES, R. (GE Energy) IGCC:CO<sub>2</sub> Capture Ready?. Gasification Technologies  
Conference. October, 2005

SIEMENS Soluções para a indústria de óleo & gás. Disponível em  
<http://www.industry.siemens.com/oil-gas/pt/processos/midstream/lng/production.htm> .  
Acessado em julho 2008

SILVA, N.F.; Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor  
Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica. Tese de Doutorado. Programa de  
Planejamento Energético /COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2006

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA O. L. S. Utilização do bagaço de cana de  
açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos Revista  
Eletrônica de Materiais e Processos, v.2, 1 (2007)27-32 Revista de acesso livre no site  
[www.dema.ufcg.edu.br/revista](http://www.dema.ufcg.edu.br/revista)

SIMMONS, G.; GENTRY, M. Particle size limitations due to heat transfer in determining  
pyrolysis kinetics of biomass Journal of Analytical and Applied Pyrolysis volume 10,  
pg.117-127 (1986)

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química.  
3ª edição. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, RJ, 1980.

SOUZA, J. Dendê – Jornal CEPLAC Notícias. Superintendência Regional da Bahia e  
Espírito Santo, Centro de Pesquisa do Cacau (SUBES/CEPEC). Outubro 2000

\_\_\_\_\_ - Dendê – Potencial para produção de energia renovável. Comissão  
Executiva do Plano de Lavoura Cacaueira – CEPLAC, 2004

SOUZA-SANTOS, M.L.; A feasibility study of an alternative power generation system  
base don biomass gasification / gas turbine concept. Fuel, volume 78, pg. 529 – 538,  
1999

STASSEN, H.E.; Small-Scale biomass gasifier for heat and power – A Global Review.  
World Bank Technical Paper n° 296. Energy Series. Washington D.C.EUA, 1995.

STERN, N. Stern Review on the Economics of Climate Change. Her Majesty's Treasury . Cambridge University Press. Outubro 2006SZKLO, A.S. Tendências de desenvolvimento da Cogeração a Gás Natural no Brasil. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Fevereiro 2001

UNDP – United Nations Development Programme, Human Development Indices – Trends HDI, 2008. Disponível em [http://hdr.undp.org/external/flash/hdi\\_map/hdi.html](http://hdr.undp.org/external/flash/hdi_map/hdi.html). Acessado em janeiro 2009.

VEIGA, J.E. Desenvolvimento Sustentável: o desafio do século XXI. Editora Garamond, 3ª edição. Rio de Janeiro, 2008.

WANG, Y.; YOSHIKAWA, K.; NAMIOKA, T.; HASHIMOTO, Y. Performance optimization of two-staged gasification system for woody biomass Fuel Processing Technology n°88, 2007, pág. 243–250

WCI – World Coal Institute Coal: Secure Energy. Section three. Coal – Providing Secure Energy. Disponível em [www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org). Acessado em junho 2008.

WEC – World Energy Council – Survey of Energy Resources 2007. World Energy Council, Londres, Reino Unido, 2007

WORLD BANK – Energy Access, Security, Key to Reducing Poverty. Disponível em [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org). Maio de 2006

WU, C.Z.; HUANG, H.; ZHENG, S.P.; YIN, X.L.; An economic analysis of biomass gasification and power generation in China. Bioresource Technology, volume 83, pg. 65 -70, Elsevier, 2002

YAMAZAKI, T; KOZU, H.; YAMAGATA, S.; MURAO, N.; OHTA, S.; SIYBA, S.; OHBA, T.; Effect os Superficial Velocity on tar from downdraft Gasification of Biomass. Energy & Fuels, volume 19, pg. 1186-1191, 2005.

YIN, X.L.; WU, C.Z.; ZHENG, S.P.; CHEN, Y.; Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. Biomass and Bioenergy, volume 23, pg. 181 – 187, Pergamon, 2002

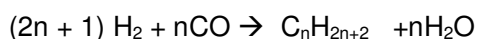
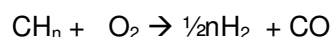
YOSHIKAWA, K.; R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels. Volume 32, pg. 1656 – 1665, Elsevier, 2006



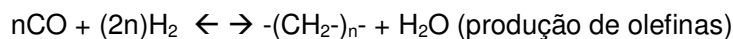
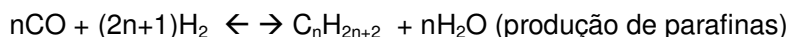
## 8 Anexo I

O processo de Fischer-Tropsch (FT) é um processo químico para produção de hidrocarbonetos líquidos (gasolina, querosene, gasóleo e lubrificantes) a partir de gás de síntese (CO e H<sub>2</sub>). Foi inventado pelos alemães Franz Fischer e Hans Tropsch na década de 1920.

Reações fundamentais

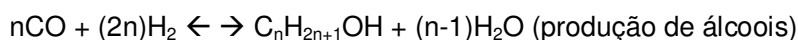
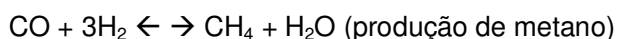


As reações principais são:



Ambas as reações acima são muito exotérmicas, liberando grande quantidade de energia.

Reações secundárias, indesejadas:



A reação ocorre na presença de catalisadores de cobalto ou ferro. Para um bom rendimento se requer alta pressão (tipicamente 20 - 30 bar) e temperatura entre 200 °C e 350°C. Acima dos 400°C a formação de metano resulta excessiva.

### Cinética

As reações principais de Fischer-Tropsch são na realidade reações de polimerização, que consistem em cinco passos básicos:

- Adsorção de CO sobre a superfície do catalisador

- Início de polimerização mediante formação de radical metila (por dissociação do CO e hidrogenação)
- Polimerização por condensação (adição de CO e H<sub>2</sub> e liberação de água)
- Terminação
- Dessorção do produto

A velocidade de reação está limitada pela cinética e em particular pelo passo de polimerização por condensação.

A distribuição de pesos moleculares no produto pode ser predita aproximadamente pelo modelo de Anderson-Schulz-Flory:

$$W_n = n(1-a)^2 a^{(n-1)}$$

onde  $W_n$  é a fração em peso de produto com  $n$  átomos de carbono e  $a$  é a probabilidade de crescimento de cadeia, função das condições de reação (catalisador, temperatura, pressão e composição do gás).

## **Produtos**

O produto obtido à saída de um reator de Fischer-Tropsch consiste em uma mistura de hidrocarbonetos com uma distribuição muito ampla de pesos moleculares, que vão desde os gases até às ceras passando pela gasolina, o querosene e o gasóleo. A natureza e proporção dos produtos depende do tipo de reator e de catalisador. Em geral, os processos que operam a alta temperatura produzem uma maioria de gasolinas olefínicas, enquanto que os de baixa temperatura dão sobretudo gasóleos parafínicos.. Sempre é necessária uma etapa posterior de hidrotratamento para que os produtos alcancem a qualidade exigida pelo mercado.

Fonte: (SCHUBERT, 2008)