

4. PERSPECTIVAS DA UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA COM FINS ENERGÉTICOS.

ELECTO SILVA LORA¹

4.1 CONCEITO DE BIOMASSA, CLASSIFICAÇÃO, DISPONIBILIDADE E CARACTERÍSTICAS.

O termo biomassa abrange a matéria vegetal criada pela fotossíntese e seus derivados, tais como resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos domésticos e municipais. Anualmente na base do processo de fotossíntese são produzidas $220 \cdot 10^9$ toneladas de biomassa (base seca), o que é equivalente a mais de 10 vezes o consumo global atual de energia.

4.1.1 Classificação da biomassa.

Podem ser consideradas duas categorias de biomassa:

- A biomassa tradicional - a lenha, o carvão vegetal, a palha e casca de arroz, resíduos vegetais e animais.
- A biomassa “moderna”- resíduos da utilização industrial da madeira, bagaço de cana, culturas energéticas e resíduos urbanos.

WEREKO-BROBBY & HAGEN (1996) propõem classificar a biomassa em três categorias (biomassa originaria da madeira, biomassa não originaria da madeira e resíduos animais) e sete tipos:

- Florestas e plantações (madeira).
- Plantações agro-industriais: a biomassa originaria da madeira e coletada como subproduto. Por exemplo árvores de chá, café, palmas, coqueiros e bambu.
- Árvores isoladas.
- Culturas agrícolas.
- Resíduos de culturas agrícolas.
- Resíduos de processamento.
- Resíduos animais.

Na atualidade, o 15 % da energia primária consumida no mundo é obtida a partir da biomassa, sendo que nos países em desenvolvimento este índice atinge o 38.1% (LARSON, 1993). Aproximadamente a metade da população da terra depende da biomassa para a cocção de alimentos, aquecimento e iluminação. Na África o consumo percapta de biomassa é o maior do mundo, e atinge 16 GJ/cap em comparação com 6 GJ/cap, que é o valor médio para os países industrializados (HALL et al., 1994). JOHANSSON et al. (1992) estimam que a biomassa pode fornecer aproximadamente o 17 % da eletricidade e o 38 % do consumo direto de combustíveis para o ano 2050.

Em América Latina a utilização da biomassa como combustível corresponde a um 19.1 % do consumo total de energia (cálculo realizado na base de dados da OLADE, 1993). Porém a situação é muito variável em diferentes países e regiões, influenciado pela

¹ Professor Assistente Doutor - Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Faculdade de Engenharia Mecânica. Itajubá-MG FONE (035) 629 1152 - FAX (035) 629 1148

disponibilidade ou não de grandes reservas de combustíveis fósseis, e pela existência de uma indústria açucareira desenvolvida. Assim no Haiti a biomassa responde por 68.4 % do consumo de energia, e na Centroamérica este valor oscila entre 34.2 e 54.2 %, valores relativamente altos. Por outro lado nos países exportadores de petróleo, com pouco interesse no desenvolvimento das fontes renováveis, a biomassa responde só por menos do 10 % do consumo total de energia.

No Brasil a biomassa representa o 20 % do consumo total de energia no país (BEN, 1995), embora este indicador tenha diminuído de um 27 % em 1980, por causa de um intenso processo de urbanização. O Brasil é no mundo o país que mais tem desenvolvido o aproveitamento da biomassa de ciclo curto (cana-de-açúcar) e de ciclo largo (a biomassa florestal), e que ao mesmo tempo possui um parque industrial moderno baseado na utilização da biomassa como combustível. Por estas razões o pesquisador ROSILLO-CALLE (1987) chamou o Brasil de “*biomass society*”. Atualmente os principais programas brasileiros de aproveitamento da biomassa como combustível apresentam uma série de dificuldades que serão discutidas neste trabalho.

Em comparação com os combustíveis fósseis a utilização da biomassa como combustível apresenta as seguintes vantagens:

- É uma fonte de energia renovável, e a sua utilização de maneira sustentável não contribui ao acréscimo da concentração de CO₂ na atmosfera, e conseqüentemente ao efeito estufa.
- A substituição de combustíveis fósseis pela biomassa, representa uma redução líquida das emissões de CO₂.
- As emissões de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e de particulados são muito menores que no caso da utilização de óleo combustível e carvão mineral.
- Os países industrializados podem estimular a criação de florestas energéticas e desta forma eliminar os subsídios as terras improdutivas.
- A bio-energia pode constituir a base da industrialização rural e da modernização da agricultura.

A conversão da biomassa em combustíveis líquidos ou gasosos (tabela 4.1) facilita a sua armazenagem e transporte, além de fazer a sua utilização mais eficiente.

Tabela 4.1- Combustíveis gerados a partir da biomassa.

Tipo de combustível	Combustível
Combustíveis sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Produtos primários - lenha. • Produtos secundários - carvão vegetal e subprodutos da agricultura, silvicultura e das atividades urbanas.
Combustíveis líquidos	<ul style="list-style-type: none"> • Etanol. • Metanol. • Bio-óleos e alcatrão. • Bio-óleos pesados.
Combustíveis gasosos	<ul style="list-style-type: none"> • Biogás. • Gás de gasogênio ou <i>producer gas</i>. • Hidrogênio.

Segundo HALL (1991) os Programas Nacionais de utilização energética da biomassa que tem obtido maior sucesso são:

- O PROÁLCOOL no Brasil.
- A utilização do biogás na China.
- A utilização do carvão vegetal no Brasil.
- As florestas energéticas nos Estados Unidos.
- A utilização da madeira com fins energéticos na Suécia.
- O aproveitamento de resíduos agrícolas na Grã-Bretanha.
- As plantações de eucalipto na Etiópia.
- O aproveitamento do bagaço de cana nas Ilhas Maurício.

4.1.2 Disponibilidade.

Os resíduos de culturas energéticas e de seu processamento constituem uma das maiores fontes de biomassa energética. Para determinar o potencial de fornecimento de um resíduo utiliza-se o denominado coeficiente de resíduos C_R , que calcula-se como a relação entre a quantidade de resíduos base seca C_{RE} , e a massa da colheita com a umidade do campo, é dizer:

$$C_R = \frac{C_{RE}}{M_C}$$

A tabela 4.2 apresenta valores médios do coeficiente de resíduos C_R para diferentes culturas.

Tabela 4.2 - Valores médios do coeficiente de resíduos para algumas culturas (RISSER, 1985; STREHER e STUTZLE, 1987).

Cultura	Produto principal	Resíduo	C_R
<u>Cereais</u>			
Trigo	grão	palha	1.30
Milho	grão	palha	1.00
Arroz	grão	palha	1.43-1.60
		casca	0.18
<u>Tubérculos e raízes</u>			
Batata	tubérculo	rama	0.4-1.40
Amendoim	noz	rama	1.0-1.48
Cacau	noz	casca e fibra exterior	0.20
Cana-de-açúcar	açúcar	bagaço	1.16
Algodão	algodão	rama	2.45

4.1.3 Características técnicas.

As características técnicas mais importantes da biomassa como fonte de energia são:

- Composição química elementar e imediata.
- Poder calorífico.

Vejamos as definições mais importantes:

Composição química elementar: É o conteúdo em porcentagem de massa de carbono C, hidrogênio H, enxofre S, oxigênio O, nitrogênio N, umidade W e cinzas A . Constitui a base para cálculos de combustão e gaseificação.

Composição química imediata: É o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo F, voláteis V, umidade W e cinzas A . O teor de voláteis determina-se como a fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra em atmosfera inerte.

Poder calorífico: É a quantidade de calor (energia térmica) que se libera durante a combustão completa da unidade de massa do combustível (kJ/kg ou kJ/m³). Define-se o poder calorífico inferior PCI, ao invés do poder calorífico superior PCS, quando não se considera o calor latente de condensação da umidade dos produtos da combustão.

A composição elementar, imediata e o PCI de diferentes tipos de biomassa apresentam-se na tabela 4.3 (JENKINS, 1990).

Tabela 4.3 - Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca (JENKINS, 1990).

Tipo de biomassa	Composição elementar, %						Composição imediata, %			PCI, MJ/kg
	C	H	O	N	S	A	V	A	F	
Pinho	49.29	4.99	44.36	0.06	0.03	0.3	82.54	0.29	17.70	20.02
Eucalipto	49.00	4.87	43.97	0.30	0.01	0.72	81.42	0.79	17.82	19.42
Casca de arroz	40.96	4.30	34.86	0.40	0.02	18.34	64.47	17.89	16.67	16.14
Bagaço de cana	44.80	4.35	39.55	0.38	0.01	9.79	73.78	11.27	14.95	17.33
Casca de coco	48.23	4.23	33.19	2.98	0.12	10.25	67.95	8.25	23.8	19.04
Sabugo de milho	46.58	4.87	44.46	0.47	0.01	1.40	80.10	1.36	18.54	18.77
Ramas de algodão	47.05	4.35	40.97	0.65	0.21	4.89	73.29	4.51	21.20	18.26

Dos dados da tabela 4.3 pode-se concluir:

- A biomassa é composta, na sua maior parte, de carbono e oxigênio (cerca de 80 %).
- A maioria dos tipos de biomassa tem um teor de cinzas baixo, com a exceção da casca de arroz e do bagaço de cana.
- O teor de carbono da biomassa é muito menor do que o do carvão mineral e do petróleo.

4.1.4 Florestas energéticas: produtividade e custos.

O Brasil apresenta maior produtividade nas florestas energéticas que outros países destacados nesta atividade (tabela 4.4; SINDIFER, 1994) devido a condições climáticas favoráveis, experiência e capacidade técnica e um processo de seleção de variedades.

Tabela 4.4 - Produtividade de florestas energéticas e absorção de CO₂ em diferentes países (SINDIFER, 1994).

País	Produtividade da floresta, m ³ /ha.ano	Absorção de CO ₂ , t/ha. ano
Finlândia	5	4.0
Portugal	10	8.0
Estados Unidos	15	12.0
África do Sul	18	14.4
Brasil	26*	20.8

* Segundo BETTERS et al. (1991) a produtividade em algumas regiões do Brasil fica na faixa de 35-70 m³/ha.ano.

No Brasil são três as variedades de árvores mais utilizadas em florestas energéticas: o eucalipto, o pinho e a acácia. A tabela 4.5 apresenta dados sobre a produtividade média, máxima e mínima destes tipos de culturas no Brasil. Segundo COUTO et al. (1993) o investimento para a plantação de 1 ha de eucaliptos (com uma rotatividade de 7 anos) fica entre 518.00 e 1171.37 \$ em diferentes regiões do Brasil.

Tabela 4.5 Produtividade dos tipos de culturas energéticas mais utilizados no Brasil (Asoc.Nac.Prod. Pap. e Cel., 1994).

Tipo de cultura energética	Produtividade média, st/ha.ano	Produtividade máxima, st/ha.ano	Produtividade mínima, st/ha.ano
Eucaliptos	46	54	23
Pinho	34	41	17
Acácia	25	-	-

4.2 TECNOLOGIAS PARA A CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA.

Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em dois grupos: processos termoquímicos e biológicos. Os processos termoquímicos incluem a combustão direta, gaseificação, pirólise e liquefação. A fermentação alcoólica e a digestão anaeróbia são os processos de conversão biológica mais utilizados. A figura 4.1 apresenta esquemas dos diferentes processos mostrando os reagentes e principais produtos. No trabalho serão analisadas com mais detalhe as características e parâmetros destes processos assim como as perspectivas da sua implementação no momento atual.

4.3 COMBUSTÃO DIRETA.

É a tecnologia de conversão mais difundida comercialmente, fundamentalmente para resíduos agro-industriais como o bagaço de cana e a casca de arroz. Geralmente as caldeiras fornecem vapor e ar quente para processos tecnológicos e o acoplamento a turbinas de vapor permite gerar energia elétrica. O aumento dos parâmetros do vapor (pressão e temperatura) aumenta a eficiência do ciclo. Assim em caldeiras modernas é comum a geração de vapor a pressões de 7 - 14 MPa e temperatura na faixa de 500 - 550 °C.

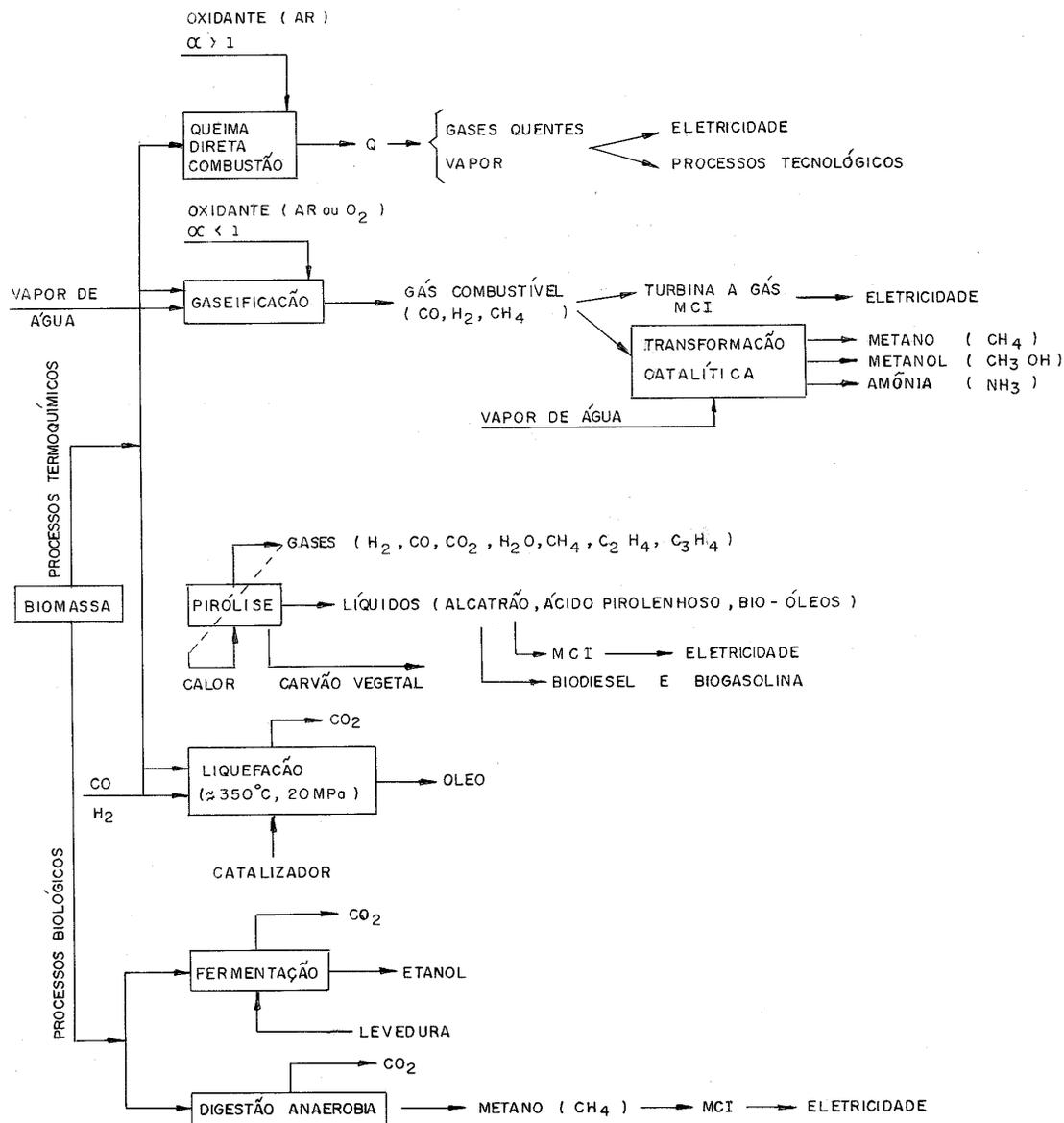


Figura 4.1 - Processos de conversão termoquímica da biomassa.

A figura 4.2 apresenta esquemas dos diferentes tipos de fornalhas utilizadas para a queima de biomassa (as características técnicas das mesmas são mostradas na tabela 4.6). Os parâmetros técnicos mais importantes em fornalhas são a tensão térmica volumétrica - Q_v e a tensão térmica superficial da grelha - Q_f - que definem a quantidade de calor liberada por unidade de volume da fornalha ou de superfície da grelha respectivamente. Q_f e Q_v são importantes parâmetros de projeto pois determinam a quantidade máxima de combustível que é possível queimar numa fornalha. Na tabela 4.6 t_a é a temperatura do ar de combustão na entrada da fornalha.

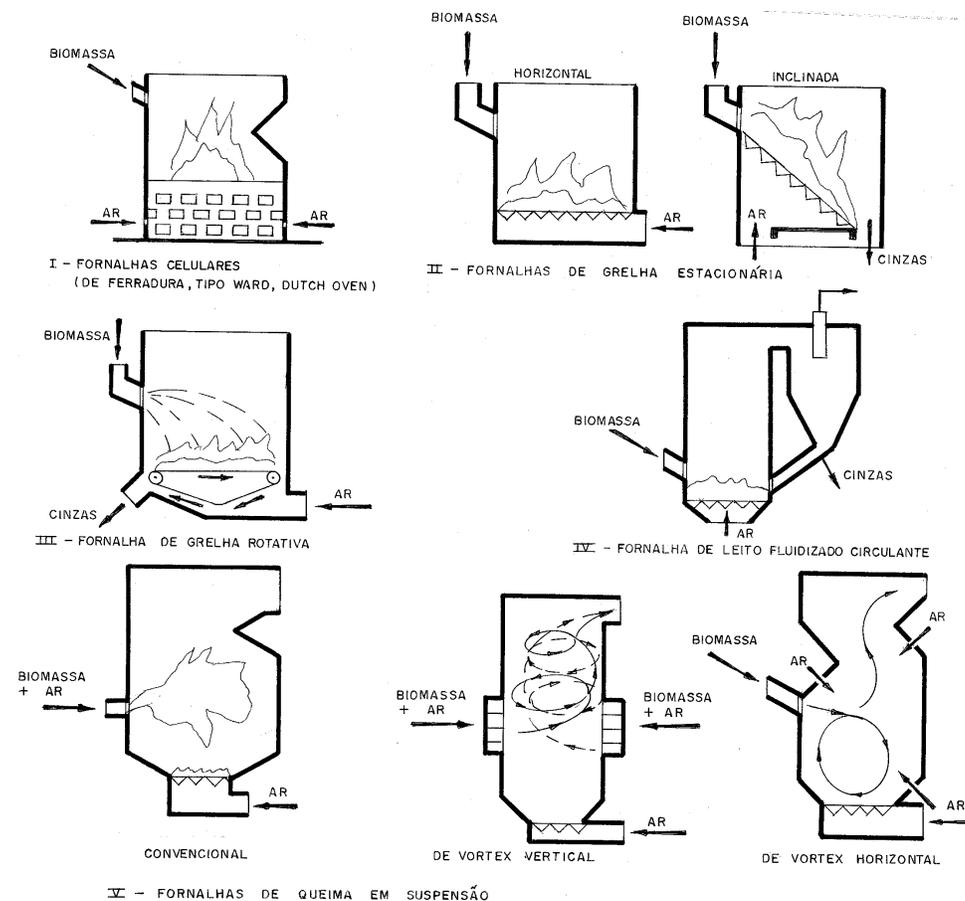


Figura 4.2 - Fornalhas utilizadas para a queima de biomassa.

Tabela 4.6 - Características técnicas das fornalhas utilizadas para a combustão de biomassa.

Tipo de fornalha	Q_A , kW/m ²	Q_V , kW/m ³	Capacidade máxima da caldeira	Umidade máxima da biomassa, %	Comentários
I- Fornalhas celulares.	3.9	-	45	<65	Não são utilizados atualmente.
II- Fornalhas de grelha estacionária.					Inclinação da grelha 37-55°.
a) Horizontal.	0.47	0.10-0.25	50-80	< 60	$t_a = 315-480$ °C.
b) Inclinada.	3.02	0.20-0.35	< 140	< 65	
III- Fornalha de grelha rotativa.	1.30-3.14	0.15-0.55	< 250	<55	t_a , 230-290 °C.
IV- Leito fluidizado circulante.	-	0.53-0.70	> 100	30-50	
V- Fornalhas de queima em suspensão.	2.6-3.7	< 0.41	180-550	< 15	Granulometria do combustível < 6.0-7.0 mm

Fonte: MITRE (1982), PERA (1990), BAZZO (1992), SILVA (1995), TOPLEY (1992) e HUGOT (1986), LEPPA (1982).

O desenvolvimento da tecnologia de construção de caldeiras, o aumento dos parâmetros do vapor e da capacidade fez com que hoje co-existam diferentes tipos construtivos de caldeiras para biomassa (figura 4.3):

- Caldeiras de tubos retos (obsoletas, encontram-se só em usinas de açúcar muito antigas).
- Caldeiras de tubos curvos com vários balões (já praticamente não são fabricadas, embora seja comum encontrá-las em usinas de açúcar).
- Caldeiras convectivas de dois balões.
- Caldeiras radiantes.

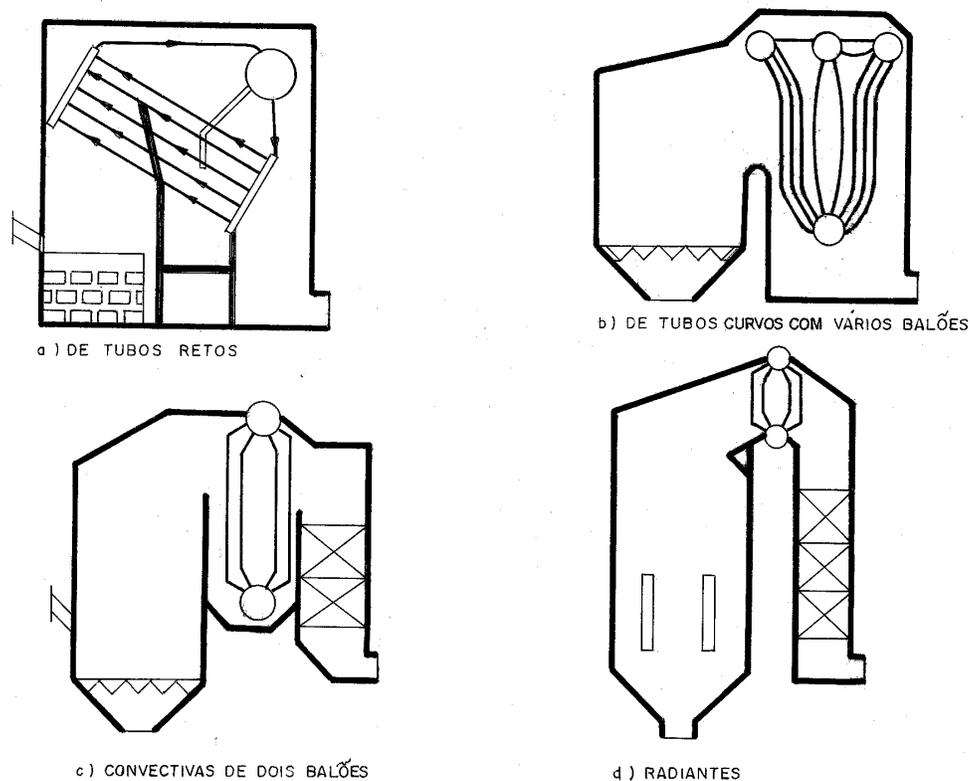


Figura 4.3 - Tipos construtivos de caldeiras para biomassa.

Na tabela 4.7 apresentam-se os dados e parâmetros mais importantes de este tipos de caldeiras.

A tecnologia de combustão, embora muito difundida e desenvolvida, não garante uma ampla utilização da biomassa como combustível para a geração de eletricidade. Isto é consequência de:

- O ciclo de vapor para os parâmetros de operação comuns em caldeiras para biomassa apresenta uma eficiência de aproximadamente 15-25 %, e um custo do kWh produzido

de 8 - 10 ctvs, muito maior que o custo de geração em termelétricas a combustíveis fósseis, que fica na faixa de 3 - 4 ctvs. Isto faz com que a geração de energia elétrica mediante a conversão da biomassa por combustão seja economicamente rentável, só naqueles países, onde existem tarifas ou incentivos especiais para a eletricidade gerada a partir da biomassa, como é o caso das Ilhas Hawai, e da Califórnia nos Estados unidos.

- Muitos tipos de biomassa apresentam uma disponibilidade temporária o que não justifica o investimento em instalações com altos parâmetros do vapor.

Tabela 4.7 - Dados e parâmetros mais importantes dos diferentes tipos de caldeiras para biomassa.

Dados e parâmetros	Tipos de caldeiras			
	De tubos retos	De tubos curvos com varios balões	Convectivas de dois balões	Radiantes
Figuras	4.2- a)	4.2- b)	4.2- c)	4.2- d)
Tipo de fornalha	<ul style="list-style-type: none"> • Ferradura. • De grelha inclinada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Grelha basculante 	<ul style="list-style-type: none"> • Grelha basculante. • Grelha rotativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Queima em suspensão. • Leito fluidizado.
Eficiência	50-60	50-70	70-80	80-87
Temperatura de vapor, °C	300	320	320-510	400-549
Pressão do vapor, MPa	1.8	1.8-3.0	1.8-14.0	7.0-13.0
Geração máxima de vapor, t/h	35	60	80	até 550

Fonte: PRIETO (1982), BARROSO (1988), e diferentes fabricantes (CBC, DEDINI, BABCOCK & WILCOX e D.B. RILEY).

4.4 GASEIFICAÇÃO.

É a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, num gás combustível, conhecido como *producer gas*, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas. O teor médio de compostos combustíveis no gás obtido é: CO = 10 - 15 %, H₂ = 15 - 20 % e CH₄ = 3 - 5 %.

A gaseificação apresenta uma série de vantagens em comparação com a combustão direta:

- A geração de eletricidade a pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo de vapor, utilizando o gás produto da gaseificação num motor de combustão interna.
- É possível a combustão do gás em fornos e fornalhas de geradores de vapor, projetados originalmente para combustíveis líquidos e gasosos derivados de petróleo, sem grandes modificações no equipamento.

- A utilização de ciclos combinados com gaseificadores e turbinas a gás, conhecidos como sistemas BIG/GT (Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine) permite a conversão da energia química da biomassa em eletricidade com eficiência igual ou maior que durante a geração elétrica com combustíveis fósseis, com um custo do kWh competitivo. Assim a biomassa deixa de ser um combustível secundário de uso doméstico e industrial para se converter numa fonte de energia moderna. Com a utilização da tecnologia BIG/GT setores com ampla disponibilidade de biomassa, como é o caso da indústria açucareira, podem-se converter em grandes produtores de eletricidade.

4.4.1 Tipos de gaseificadores.

Os gaseificadores para biomassa podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores:

Poder calorífico do gás produzido:

- Gás de baixo poder calorífico - até 5 MJ/Nm³.
- Gás de médio poder calorífico - de 5 a 10 MJ/Nm³.
- Gás de alto poder calorífico - de 10 a 40 MJ/Nm³.

Tipo de agente de gaseificação:

- Ar.
- Vapor de água.
- Oxigênio.

Pressão de trabalho:

- Baixa pressão (atmosférica).
- Pressurizados (até 3 MPa).

Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação (ver figura 4.4).

- Leito movente a contrafluxo (contracorrente).
- Leito movente em fluxo direto (concorrente).
- Leito fluidizado.

O poder calorífico do gás obtido depende do tipo de agente de gaseificação e da pressão de operação (figura 4.5). Um outro fator que afeta o poder calorífico do gás é a umidade da biomassa, a que se recomenda seja menor de 20 %.

Os gaseificadores de leito movente apresentam as seguintes vantagens em comparação com os de leito fluidizado:

- Unidades simples e baratas.
- Alta eficiência térmica (leito a contracorrente).
- Alta eficiência de conversão de carbono.

O baixo teor de alcatrão no gás, nos gaseificadores de leito concorrente, é consequência do craqueamento do alcatrão presente no gás na zona de oxidação. Isto faz com que os gaseificadores de leito concorrente sejam os mais utilizados para biomassa.

Como desvantagens podemos assinalar:

- A necessidade de uniformidade nas dimensões das partículas de combustível (≈ 10 mm), a fim de garantir a movimentação da biomassa no reator, e a passagem do ar e dos gases. Assim os gaseificadores de leito movente são mais convenientes para madeira em toras. O gaseificador de topo aberto é uma modificação dos gaseificadores de leito

- concorrente que permite utilizar alguns tipos de resíduos agrícolas e industriais como combustível.

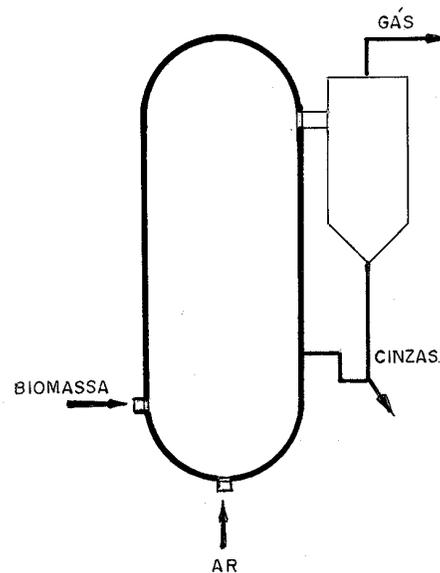
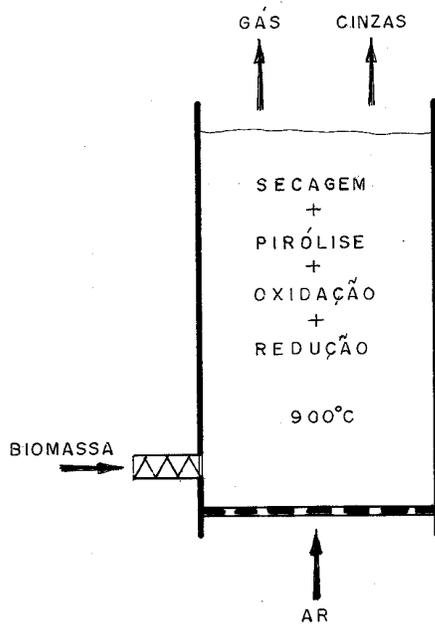
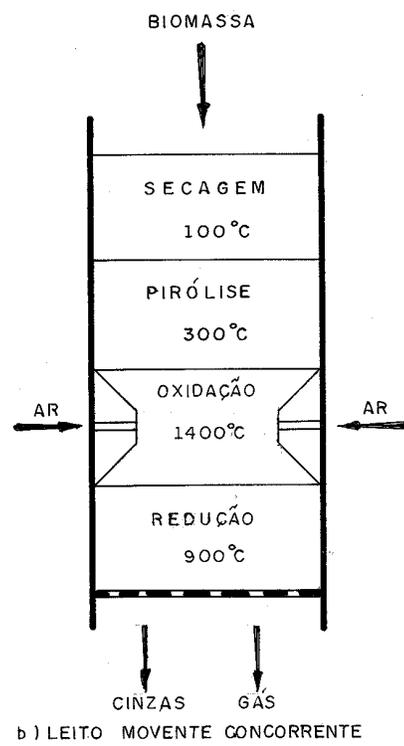
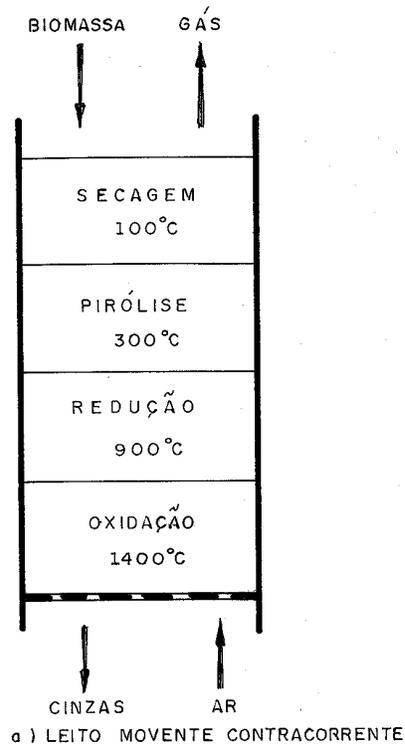


Figura 4.4 - Tipos de gaseificadores para biomassa.

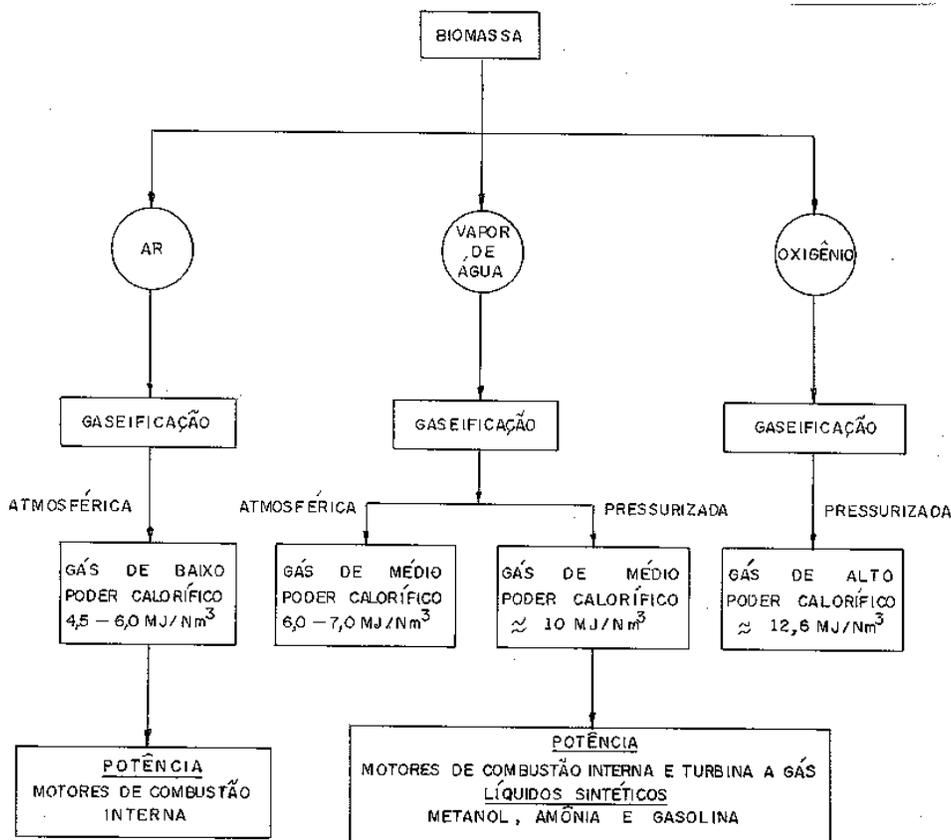


Figura 4.5 - Dependência entre o tipo de agente de gaseificação utilizado, o poder calorífico do gás obtido e a sua possível aplicação.

- O alto teor de alcatrão no gás nos gaseificadores de leito contracorrente.
- As dificuldades de escalado nos gaseificadores tipo concorrente. O diâmetro da garganta na região de oxidação está limitado pela necessidade de atingir em toda a seção transversal temperaturas homogêneas da ordem de 1400 °C, o que garante uma alta eficiência no craqueamento do alcatrão.

Os gaseificadores de leito fluidizado consideram-se mais convenientes para aplicações de alta capacidade em sistemas BIG/GT, por causa de sua alta flexibilidade em relação ao combustível (permite utilizar combustíveis de baixa densidade e granulometria fina), assim como pela facilidade de escalado. Os sistemas pressurizados permitem ter instalações mais compactas, embora o sistema de alimentação da biomassa fique mais complicado. Segundo a Studsvik as vantagens da alta pressão são evidentes para instalações de potência maior de 50 - 80 MWe (BLACKADDER et al., 1993). Na tabela 4.8 apresenta-se um resumo dos parâmetros de operação e eficiência dos projetos

demonstrativos envolvendo a gaseificação de biomassa em leito fluidizado. Na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas, já faz vários anos, realizam-se pesquisas no tema de gaseificação da biomassa em leito fluidizado (SANCHEZ e SILVA, 1995). Atualmente trabalha-se no projeto temático “Planta Piloto de gaseificação de bagaço de cana em leito fluidizado.

Tabela 4.8 - Parâmetros de operação e eficiência em projetos demonstrativos de gaseificação de biomassa em leito fluidizado circulante (OLIVARES et al., 1995).

Firma e tipo de biomassa	Capacidade, MW _{th}	Pressão de operação, MPa	Temperatura do leito, °C	PCI do gás, MJ/Nm ³	Eficiência do gaseificador, %
Bioflow	18	2.40	950-1000	4.00	82-83
TPS	65	0.18	-	-	43
Lurgi	16	0.10	800	-	-
Studsvik ¹	20	-	800-900	7.0-8.50	94-96
Omnifuel ²	23	0.1	760	4.99	-

1- A biomassa gaseificada são pelets de lixo.

2- O gaseificador da Omifuel é de leito fluidizado convencional.

BÜLHER (1994) considera que na faixa de potência de 100 kWe até 2 MWe é mais comum encontrar aplicações envolvendo gaseificadores de leito movente e motores de combustão interna. Para potências superiores a 5 MWe já predominam os gaseificadores de leito fluidizado. Porém segundo BRIDGWATER (1995) é possível encontrar motogeradores de até 50 MWe, e turbinas a gás tem sido aplicadas para gás de baixo PCI e potência de 3 MWe. Um problema a resolver é garantir a limpeza do gás até os limites permissíveis por motores de combustão interna ou turbinas a gás.

Entre as aplicações de sucesso da gaseificação de biomassa a pequena escala podemos assinalar:

- Gaseificador de topo aberto do Indian Institute of Science. Atualmente existe uma planta piloto de 100 kWe em operação. A eficiência do gaseificador é de aproximadamente 80 %. O custo do kWh produzido pelo conjunto gaseificador - motor de combustão interna é de 7.3 ctvs (BULHER, 1994; MUKUNDA et al., 1993).
- Gaseificador comercial chinês para casca de arroz. Estão instaladas umas 100 unidades na China. O consumo específico de combustível num gaseificador deste tipo testado em Mali foi de 3.75 - 4.0 kg casca/kWh, embora reportem-se dados na faixa de 2.0 - 2.5 kg/kWh para gaseificadores operando na China (MAHIN, 1990).

Porém é preciso assinalar que a maioria dos programas de geração de eletricidade a pequena escala em base a tecnologia de gaseificação tem fracassado, e atualmente é raro encontrar gaseificadores em operação. Em 1983 o Banco Mundial começou o “Programa de monitoramento de gaseificadores de pequena escala para biomassa”. Os dados e conclusões deste programa concluído em 1993 são (STASSEN & KNOEF, 1995):

- O consumo específico médio de biomassa dos gaseificadores em operação é de 1.1 - 1.4 kg/kWh em aqueles que utilizam madeira, 0.9 kg/kWh nos que utilizam carvão vegetal e 2.0 - 3.5 kg/kWh, quando o combustível é casca de arroz.

- A eficiência média do sistema gaseificador - motor de combustão interna é de 13 %, menor que o prometido pela maioria dos fabricantes.
- A fração de diesel substituído pelo gás é de 40 - 70 %.
- O investimento específico em gaseificadores de fabricação local é de 400 - 1550 US \$/kWe, e em gaseificadores importados 850 -4200 US \$/kWe.
- Os gaseificadores de biomassa para geração de potência em geral não são uma opção economicamente atrativa (se requer um aumento do preço do petróleo em 1.5 - 2.0 vezes). Em certas condições os gaseificadores de baixo custo que utilizam madeira como combustível podem ser rentáveis, ao igual que os gaseificadores para casca de arroz.

As causas de fracassos e sucessos em programas de gaseificação de biomassa a pequena escala, segundo STASSEN & KNOEF (1995) apresentam-se na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Causas de fracassos e sucessos em programas de gaseificação a pequena escala (STASSEN & KNOEF, 1995).

Razões	Fracassos	Sucessos
Razões técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades operacionais por problemas técnicos do projeto. • Pouca experiência dos operadores. • Ajuste inadequado da capacidade no sistema gaseificador - motor. • Alto valor das emissões. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia bem desenvolvida. • Disponibilidade de peças de reposição.
Razões financeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo dos gaseificadores importados. • Equipamento antigo e pouca motivação do pessoal. • Aumento de preços da biomassa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Operadores bem treinados e motivados. • Apoio técnico constante.
Razões institucionais	<ul style="list-style-type: none"> • Apoio insuficiente. • Instalação dos gaseificadores em lugares inadequados, e sem interesse comercial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Apoio intenso. • Presença de expertos em gaseificação para treinamento do pessoal e manutenção.

4.5 PIRÓLISE.

É a degradação térmica de materiais orgânicos em ausência total de agente oxidante a temperaturas relativamente baixas (500 - 1000 °C). As versões atuais da tecnologia de pirólise são apresentadas na tabela 4.10).

Como produtos da pirólise temos: gases, líquidos (alcatrão, ácido pirolenhoso, bio-óleos, etc), e carvão vegetal. Os fatores que influem sobre a fração obtida de cada produto são a temperatura de operação, o tempo de residência e em menor medida a pressão de operação.

4.4.1 Produção e utilização do carvão vegetal.

A produção mundial de carvão vegetal em 1989 foi de $21.4 \cdot 10^6$ toneladas. Em 1993 o Brasil produziu $8.29 \cdot 10^6$ toneladas de carvão vegetal, o que leva ao desmatamento de 610 434 hectares anuais de floresta nativa. É bom assinalar que existe um programa de reflorestamento intenso, e assim no período de 1967 - 1989 foram reflorestadas $6.78 \cdot 10^6$ hectares (MEDEIROS, 1996).

Tabela 4.10 - Versões da tecnologia de pirólise (BRIDGEWATER, 1991).

Tecnologia	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura máxima, °C	Produto principal
Carbonização	horas - dias	muito pequena	400	carvão vegetal
Convencional	5 - 30 min.	Pequena	600	bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0.5 - 5 s	intermediária	650	bio-óleo
Flash	< 1 s	alta	< 650	bio-óleo, produtos químicos.
Ultra	< 0.5 s	muito alta	1000	produtos químicos
Ao vacuum	2 - 30 s	intermediária	400	bio-óleo

O Brasil é o único país do mundo onde o carvão vegetal tem uma aplicação industrial considerável. Aproximadamente o 40 % do ferro-gusa e das aleações ferrosas produzidas no país baseiam-se na utilização do carvão vegetal como combustível (REZENDE et al., 1993). Segundo a Associação Brasileira de Carvão Vegetal - ABRACAVE (1992) o 40 % do carvão fabricado no Brasil é fabricado de madeira de florestas plantadas. A figura 4.6 mostra o esquema de suprimento de carvão vegetal no Brasil (MEDEIROS, 1996).

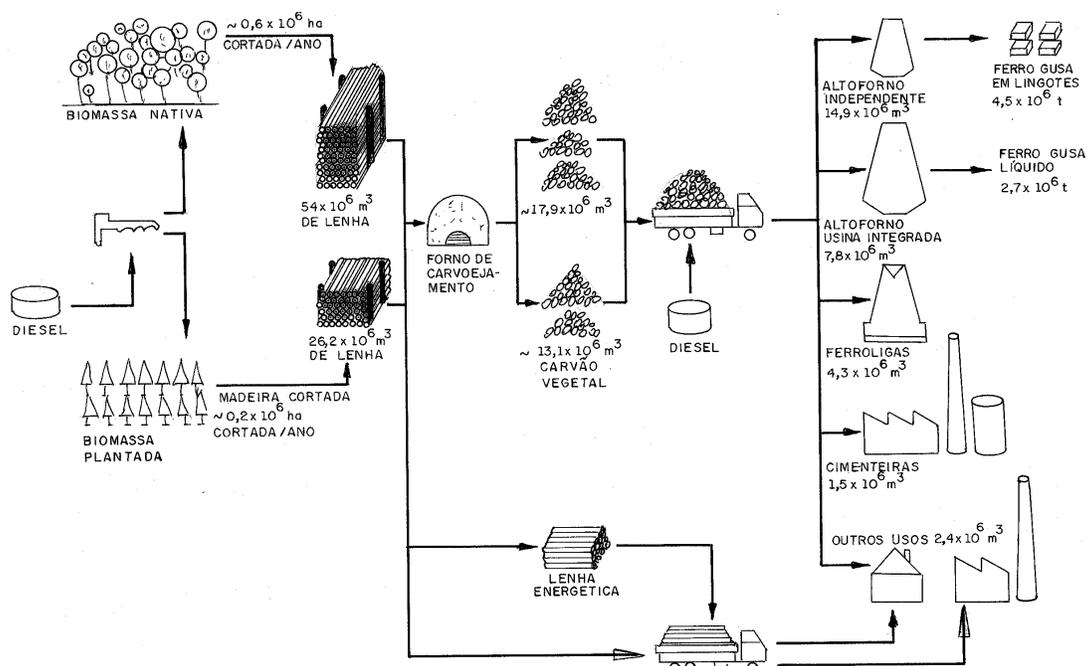


Figura 4.6 - Esquema de suprimento do carvão vegetal no Brasil (MEDEIROS, 1996).

Os métodos de carvoejamento utilizados no Brasil descrevem-se na tabela 4.11.

Tabela 4.11- Métodos de carvoejamento utilizados no Brasil (MEDEIROS, 1996).

Tipo de floresta	Método de carvoejamento
Em matas nativas $\approx 1.7 \text{ t carvão / ha.ano}$	<ul style="list-style-type: none"> Carvoejamento em fornos tipo trincheira. Caracterizam-se pela baixa eficiência e qualidade do carvão. Fração em massa de carvão vegetal - 15 - 20 %. Carvoejamento em fornos de superfície tipo “rabo quente”, construídos de tijolos comuns, de formato cilíndrico, e fechados no topo com uma abóboda também de tijolos. Geralmente possuem 3.5 m de diâmetro, e o índice de conversão é de 2 - 3 m³ st de lenha / m³ de carvão vegetal.
Em florestas plantadas $\approx 4-6 \text{ t carvão/ha.ano}$	<ul style="list-style-type: none"> Unidades de pequeno porte (praças de fornos com até 10 unidades). São fornos de até 4.0 m de diâmetro com um índice de conversão de 1.8 - 2.0 m³ st de lenha / m³ de carvão vegetal (30 % do peso inicial de madeira). Unidades de grande porte (praças de até 100 unidades). O índice de conversão é de 2 m³ st de lenha / m³ de carvão.

Outras tecnologias disponíveis são:

- Fornos metálicos móveis com tempo de carbonização de 24 horas.

- Forno de carbonização contínua da ACESITA Energética S/A . Neste tipo de forno recuperam-se os subprodutos do processo. Assim por cada tonelada de carvão vegetal são obtidos 400 kg de alcatrão, 60 kg de metanol, 140 g de ácido acético e 4.0 GJ de gases de baixo poder calorífico. Este tipo de forno exige um investimento muito maior que os convencionais (50 - 100 US \$ / t de carvão e 2 - 6 US \$ / t de carvão respectivamente).

Atualmente o programa de utilização de carvão vegetal na indústria metalúrgica Brasileira esta sendo ameaçado pela importação de coque de África do Sul e Austrália a preços competitivos. Porém Rezende et al., concluem que é possível “administrar” o custo de produção do carvão mineral, a fim de que este seja competitivo com o coque. Isto através do desenvolvimento tecnológico e o incentivo á produção sustentável a partir de florestas plantadas.

O carvão vegetal no Brasil está associado também a aspectos sociais dramáticos a consequência do trabalho em jornadas de 12 - 18 horas diárias, frequentemente escravo, dos carvoeiros e suas famílias.

4.4.2 A pirólise rápida e a obtenção de bio-óleos.

Realiza-se em equipamentos que permitem altas velocidades de aquecimento e curtos tempos de residência. Isto incrementa a quebra das macromoléculas, maximizando a produção de compostos orgânicos líquidos e gasosos O rendimento de líquidos em diferentes processo de pirólise rápida fica na faixa 50 - 75 % em massa da biomassa original (base seca). Os líquidos obtidos neste processo denominam-se óleos primários, e são muito diferentes dos obtidos num processo de pirólise lenta (óleos secundários ou alcatrões). Os óleos primários caracterizam-se pela sua menor densidade, maior homogeneidade e maior estabilidade em condições ambiente que os óleos secundários. O poder calorífico destes óleos obtidos em diferentes plantas fica na faixa 22-24 MJ/kg (bases seca).

Existem duas tecnologias perspectivas para a realização da pirólise rápida:

- A pirólise ablativa (o aquecimento da biomassa acontece por contato com uma parede a alta temperatura).
- A pirólise em leito fluidizado ou durante o transporte pneumático.

Uma opção perspectiva para a geração de energia elétrica a partir da biomassa é a utilização de bio-óleos em motores de combustão interna. Esta pode ser uma opção mais econômica que a gaseificação para uma faixa intermediária de potências.

As principais instituições que desenvolvem projetos demonstrativos e de pesquisa no tema de pirólise de biomassa no mundo são:

- ENSYN - Canadá. Possui três plantas em operação com capacidade de 10, 25 e 80 t/h de biomassa (base seca).
- Interchem - Estados Unidos. Esta em operação um pirolisador ablativo de 1360 kg/h de capacidade.
- Universidade de Waterloo - Canadá. Reatores de leito fluidizado pequenos de 100 g/h a 3 kg/h.
- Unión FENOSA - Espanha. Tem um reator de pirólise rápida em leito fluidizado de 160 kg/h (baseado no processo da Universidade de Waterloo).

- NREL - National Renewable Energy Laboratory - Estados Unidos. Possui dois pirólisadores ablativos e realizam estudos de craqueamento do bio-óleo por zeolitas.
- Universidade de Aston, Grã Bretanha. Realizam pesquisas em pirólise ablativa e em gaseificadores de leito fluidizado.

Os bio-óleos podem ser convertidos em combustíveis tipo hidrocarboneto pelo processo de valorização (*upgrade*).

Valorização	Hidrotratamento	CH ₂ (Produto semelhante á nafta)
	Craqueamento com zeolitas	CH _{1,2} (Produto aromático)

Os bio-óleos e produtos de sua valorização não tem encontrado ainda grande difusão o que deve-se a:

- Os bio-óleos são corrosivos a consequência de seu baixo valor do PH. Devem ser conservados em recipientes de polipropileno ou de aço inox.
- A temperaturas superiores a 100 °C os bio-óleos perdem a estabilidade devido a reações de polimerização.
- O custo de um GJ de energia em bio-óleo é 1.9 vezes maior que o custo do GJ correspondente ao petróleo cru com um custo de \$ 20/barril. Já o bio-óleo valorizado por apresenta um custo por GJ umas 2.7 vezes maior (BRIDGWATER, 1992). Evidentemente para os preços atuais do petróleo os bio-óleos não são ainda competitivos.

4.6 BIODIGESTÃO.

O processo de biodigestão é a decomposição anaeróbia da matéria orgânica, principalmente dejetos animais e resíduos vegetais por bactérias metanogênicas. O biogás obtido como produto é composto de 60-80 % de metano (CH₄) e de 20-40 % de gás carbônico (CO₂). O sulfeto de hidrogênio está presente só num 1.5 %, porém pelas afetações que provoca em motores de combustão interna e outros equipamentos, faz-se necessária a sua remoção. A biodigestão deve ser vista como uma tecnologia integrada de produção de energia, tratamento de resíduos orgânicos e produção de fertilizante. Os equivalentes caloríficos do biogás são apresentados na tabela 4.12 (BATISTA, 1981).

Tabela 4.12- Equivalentes caloríficos do biogás (BATISTA, 1981).

Combustível	m ³ equivalentes de biogás
1 kg de GLP	2.33
1 litro de gasolina	1.59
1 litro de óleo diesel	2.10
1 litro de óleo combustível	1.90
1 litro de álcool hidratado	0.91
1 kg de lenha (10 % de umidade)	0.46
1 kWh de eletricidade	1.2

1 HP motor	0.5
------------	-----

Os programas de biodigestão de maior sucesso no mundo são o chinês e o indiano. Na China estão em operação atualmente mais de 5 milhões de biodigestores com uma capacidade de 6-8 m³ cada um. Existem ademais 10000 biodigestores de grande e media capacidade operando em indústrias alimentarias, fazendas, destilarias etc. A capacidade total instalada para a geração de eletricidade a partir do biogás é de 7.8 MW (HALL e HOUSE, 1995), sendo que a produção total de biogás é de 1 10⁹ m³. A chave do sucesso do programa chinês basea-se em três princípios:

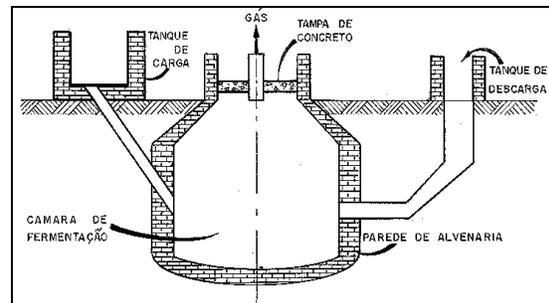
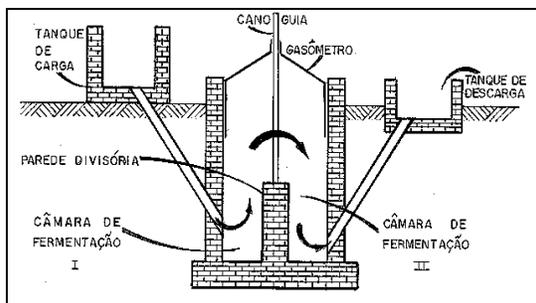
- Eficiente assessoria técnico-econômica.
- Alta qualidade das instalações, standardização dos projetos e da produção.
- Aceitação das tecnologias pelas pessoas.

Na Índia estão em operação mais de 1 10⁶ biodigestores, prevendo-se para o ano 2000 que estejam em operação 12 10⁶ unidades. Em América latina foram construídos até 1992 aproximadamente 9000 biodigestores, localizados fundamentalmente no Brasil, Guatemala, Cuba e Colômbia. Atualmente são poucos aqueles que estão em operação.

4.6.1 Biodigestores.

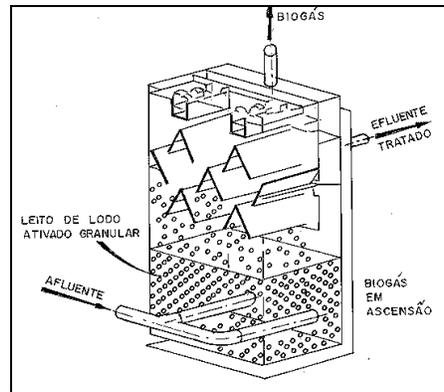
Os tipos de biodigestores mais utilizados são (figura 4.7):

- Tipo Indiano. Constituído por duas câmaras de digestão separadas por uma parede divisória, tudo em alvenaria. A cúpula móvel ou gasômetro pode ser feita em aço, fibra de vidro ou mesmo plástico, e é utilizada para o armazenamento do gás. Este biodigestor fornece o gás a pressão constante, tem um bom isolamento térmico e não apresenta vazamentos. É o tipo de biodigestor mais utilizado no Brasil.
- Tipo chinês. É formado por uma câmara cilíndrica, onde acontece a digestão, com um teto abobadado destinado ao armazenamento do gás. Este biodigestor não apresenta partes móveis, e é construído exclusivamente de alvenaria. O fato de prescindir do gasômetro faz com que os digestores chineses sejam mais baratos, embora durante a sua construção precisa-se de cuidados especiais para evitar vazamentos.
- De leito ascendente (UASB- Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Tecnologia moderna para tratamento de resíduos com teor de sólidos abaixo de 2 %. O principio de tratamento baseia-se na passagem do resíduo por um leito de lodo ativado granular (bactérias) no sentido ascendente. Por apresentarem um baixo tempo de retenção e serem adequados ao tratamento de resíduos líquidos representam ma alternativa para aplicações agro-industriais como o tratamento de vinhoto.



a: Biodigestor indiano.

b: Biodigestor chinês.



c: Biodigestor de fluxo ascendente (tipo UASB).

Figura 4.7 Tipos de biodigestores.

4.6.2 Alguns exemplos de aplicação da tecnologia de biodigestão.

Planta comunitária de biogás na aldeia Pura (RAJABAPAIH et al., 1993): A planta de biogás possui 2 digestores de 4.1 m de diâmetro e 4.2 de profundidade. A produção de biogás por m³ de volume do digestor é de 0.50 m³. Diariamente fornece-se 1.25 toneladas de excretas de vaca e 1.25 m³ de água ao digestor. A produção de biogás é de 42.5 m³ e como resíduo são obtidas 1.2 toneladas de lodo/dia. O biogás é utilizado num motor de combustão interna de 4.2 kW para a geração de eletricidade. Atualmente o sistema opera só durante 4.2 horas/dias, sendo o custo da energia elétrica de \$ 0.25/kWh.

Fazenda Fushan em Hangzhou (CHANGDA et al., 1994): Esta fazenda possui 32.3 ha cultivadas de arroz, 4 ha de chá, 1.2 há de uvas e 9.3 hectares de lagoas para criação de peixes. Além disto criam-se anualmente 30000 pintinhos, 150000 frangos e 8500 porcos. Diariamente a fazenda produz 15 toneladas de esterco e 70 toneladas de efluentes líquidos. A planta de biodigestão é do tipo UASB com uma produção diária de biogás de 720 m³/d, equivalente a 520 toneladas de carvão.

A produção da planta de biogás é destinada para:

- Combustível para 263 moradias.
- Combustível para o bandeirão dos trabalhadores (180 pessoas).
- Combustível para o processamento de 2500 kg de chá.
- Aquecimento do galpão dos pintinhos.
- O efluente líquido residual é utilizado como alimento para os porcos e peixes.
- Os resíduos sólidos do biodigestor são utilizados como fertilizante.

Pode-se concluir que a biodigestão precisa ser utilizada como uma tecnologia integrada de tratamento de resíduos e produção de energia. Se vista só como uma tecnologia de produção de energia a biodigestão é extremamente cara, especialmente para os pequenos produtores.

4.7 PRODUÇÃO DE ÁLCOOL.

4.7.1 *Perspectivas do Programa Nacional do Alcool - PROALCOOL no Brasil.*

O Proalcool é o maior e mais bem sucedido programa comercial de utilização da biomassa com fins energéticos no mundo. Foi criado em 1975 durante o Governo Geisel, sofrendo algumas adaptações no governo de Figueiredo em 1979. Estas datas coincidem com a 1ra e 2da crises de petróleo. Já a partir de 1985 a queda dos preços internacionais do petróleo desestimulou a produção do álcool, e governo Collor em 1991 começou um processo de revogação do PROALCOOL. Atualmente o Brasil fabrica o 57.0 % de todo o álcool combustível produzido no mundo.

Para poder avaliar a importância e grandeza deste programa e interessante analisar os dados providenciados pela Comissão Interministerial do álcool - CINAL (CINAL, 1995) e COPERSUCAR (COPERSUCAR, 1995):

- O parque nacional instalado possui 346 indústrias: 143 destilarias autônomas e 203 usinas de açúcar. Produção de 11.2 milhões de toneladas de açúcar e 13.1 bilhões de litros de álcool.
- O faturamento agregado do setor sucroalcooleiro na base da safra 95/96 foi de 4.5 bilhões de reais através do álcool combustível e 3.5 bilhões através do açúcar.
- 242 milhões de toneladas de cana esmagada.
- A frota nacional de veículos movidos a álcool é de 4.2 milhões de carros.
- O PROALCOOL emprega 1.04 milhão de trabalhadores e reduz a importação de 200 mil barris de petróleo por dia, além de reduzir a poluição nos grandes centros urbanos.

Atualmente o PROALCOOL está sendo fortemente questionado por diferentes setores e instituições, devido a necessidade de subsidiar o preço do álcool e as falhas no fornecimento deste combustível que aconteceram em 1989 e 1990. Isto fez com que a produção de carros a álcool caísse enormemente, sendo atualmente de só um 5 % dos carros novos. Em 1990 segundo dados da COPERSUCAR (GOLDEMBERG et al., 1993) o custo médio de produção do álcool foi de 0.208 US \$ / litro, equivalente a \$ 7.9 / GJ (para o petróleo cru com um preço de \$ 20/bbl, o GJ custa 3.45 \$) . Segundo esses mesmos autores existe um potencial de redução do custo do álcool de 23.1 %. Em 1989 no Estado de São Paulo eram obtidos 4700 litros de álcool por hectare.

Segundo LARSON (1996) a introdução de ciclos combinados com turbinas de gás (sistemas BIG/GT) para a geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana nas destilarias influiria positivamente sobre o custo de produção do álcool. Assim seria possível a geração de eletricidade com um custo de 4.5-4.5 c/kWh, para um custo de produção do álcool de 10 c/litro, competitivo com a gasolina. Isto conseguiria-se a partir da “venda” do bagaço para o cogeador.

Se considerar, além de tudo o dito, fatores ambientais como a redução das emissões de CO₂ à atmosfera, e uma menor emissão de poluentes pelos carros movidos a álcool é evidente que o PROALCOOL merece ser conservado. Por outro lado é pouco provável que os preços do petróleo se mantenham ao nível atual por muito tempo, se considerar que as reservas conhecidas do mesmo só seriam suficientes para alguns decênios. Então se o PROALCOOL não sobrevive a presente crise o Brasil veria-se obrigado a “reinventa-lo” de aqui a 20-30 anos.

4.8 PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE E COGERAÇÃO.

A produção de eletricidade a partir da biomassa é limitada, por causa do alto custo da energia elétrica obtida com as tecnologias disponíveis no mercado. Em 1994 no Brasil a geração de eletricidade a partir da biomassa representou apenas o 2.0 % da geração total de eletricidade (BEN). Nos Estados Unidos a capacidade instalada de geração elétrica a partir da biomassa nos inícios dos anos 90 era de 8.4 GWe (WILLIAMS e LARSON, 1993). Segundo PATTERSON (1994) 6.5 GWe correspondem a plantas que queimam biomassa vegetal (resíduos agrícolas e florestais) e 2.5 GWe a instalações de queima de resíduos sólidos urbanos. A eficiência destes sistemas fica na faixa 18-26 %, os custos de investimento 1300-1500 US\$/kW, e o custo da eletricidade 6.5-8.0 c/kWh. O Departamento de Energia do governo dos EUA - DOE planeja para o ano 2000 uma capacidade instalada de 12 GWe, chegando em 2030 a 100 GWe (MUTANEN, 1993).

As vias tecnológicas principais para a obtenção de energia a partir da biomassa são:

- Ciclos de vapor baseados na combustão da biomassa em caldeiras convencionais. Tecnologia difundida nos sistemas de cogeração das usinas de açúcar.
- Gaseificadores (geralmente de leito movente) acoplados a motores de combustão interna.
- Sistemas BIG/GT. Tecnologia perspectiva, ainda na fase de plantas demonstrativas, que permite obter eficiências na faixa dos 40 % utilizando a biomassa como combustível. Esta tecnologia deve constituir a base da ampla utilização da biomassa como combustível energético para a geração de eletricidade.

Na figura 4.8 é mostrada a dependência do custo da energia elétrica obtida a partir da biomassa do tipo de tecnologia empregada e da capacidade da instalação (BRIDGWATER, 1995). Assim para capacidades menores de 10 MWe o custo da eletricidade obtida em sistemas gaseificador-MCI é menor que com as outras tecnologias propostas. Para capacidades de cerca de 100 MWe os sistemas BIG/GT podem produzir energia elétrica com um custo competitivo, em comparação com a eletricidade gerada a partir de combustíveis fósseis. O ciclo de vapor caracteriza-se em toda a faixa de capacidade por custos de geração muito altos.

A tecnologia BIG/GT não está ainda em estágio comercial. Os principais problemas a resolver são os seguintes:

- O gás obtido no gaseificador precisa ser limpo a quente para remover os particulados, alcatrão, metais alcalinos e outros compostos que podem afetar a operação da turbina a gás.
- As turbinas a gás são projetadas para operar com gás natural, que possui um poder calorífico varias vezes maior que o poder calorífico do gás produto da gaseificação da biomassa. Assim a turbina a gás precisa de modificações construtivas na câmara de combustão, a fim de operar com um maior volume de gás.
- Em gaseificadores pressurizados a alimentação da biomassa pode apresentar dificuldades.

Atualmente na Europa e nos EUA encontram-se em construção varias plantas demonstrativas, durante a operação das quais espera-se resolver os problemas indicados. Em julho de 1991 foi iniciado no Brasil o projeto Wood Biomass Project / Sistema Integrado de Gaseificação de Madeira para a Produção de Eletricidade (WBP / SIGAME)

a fim de demonstrar a viabilidade da geração comercial de eletricidade a partir da madeira (eucalipto) com a tecnologia BIG/GT. Este projeto é financiado pelo Global Environmental Fund (GEF) do Banco Mundial. A capacidade prevista da planta é de 30 MWe, e a eficiência de 43 %.

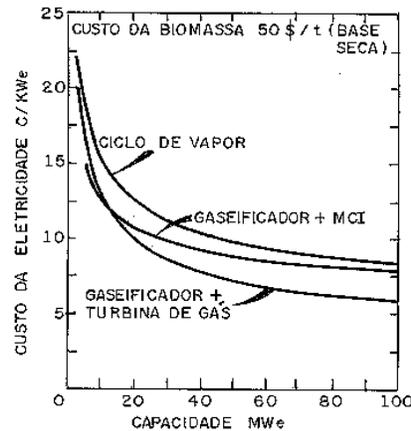


Figura 4.8- Dependência do custo da eletricidade do tipo de tecnologia e a capacidade em instalações para biomassa (BRIDGWATER, 1995).

4.8.1 A cogeração na indústria açucareira.

Segundo BOUVET (1991) nos 60 países que cultivam a cana de açúcar são produzidas anualmente $69 \cdot 10^6$ toneladas de açúcar a partir de $621 \cdot 10^6$ toneladas de cana. As usinas de açúcar são auto-suficientes desde o ponto de vista energético, já que o bagaço de cana é utilizado como combustível para a geração do vapor e da eletricidade que precisa o processo de fabricação de açúcar. Uma usina de açúcar típica consome 550 kg de vapor por tonelada de cana moída, gerando 20 kWh de eletricidade. Em usinas modernas estes indicadores são de 350 kg/tc e 50 kWh/tc respectivamente. A nível mundial esta eficiência significaria uma geração excedente de eletricidade de 50 TWh (KINOSHITA, 1991). Nas Ilhas Hawai e Maurício tem se desenvolvido com sucesso programas para o aumento da geração de eletricidade a partir da cana de açúcar. As usinas de açúcar no Hawai geram, como valor médio, 60 kWh/tc, e algumas 100 kWh/tc ou mais. Isto foi conseguido passando a operar as plantas de cogeração das usinas de açúcar com parâmetros de vapor de 50 bars e 400 °C (KINOSHITA, 1991).

Uma grande expectativa existe ao redor da possibilidade de utilizar os sistemas BIG/GT para a cogeração em usinas de açúcar e álcool (figura 4.9; LARSON et al., 1990). O bagaço de cana é introduzido no gaseificador, junto com ar e vapor de água. Como resultado da conversão termoquímica é obtido um gás combustível, que logo após ser submetido a um processo de limpeza a quente, é injetado na câmara de combustão da turbina a gás. A energia residual dos gases de exaustão da turbina a gás é utilizada numa caldeira recuperativa para a geração de vapor. Cálculos iniciais mostravam a possibilidade de gerar 450 kWh/tc utilizando os resíduos agrícolas da cana (folhas e pontas) para a geração de eletricidade fora do período de colheita. Para destilarias de álcool LARSON (1996) indica valores máximos de 200 kWh/tc, se o sistema opera só

A utilização da biomassa com fins industriais e como combustível doméstico tem provocado o desmatamento de vastas regiões do planeta. Isto tem um efeito global constituindo uma das causas do acréscimo do teor de CO₂ na atmosfera e consequentemente do efeito estufa. HALL et al. (1994) caracterizam o período 1970-1990 como a era do desmatamento massivo, com uma média de 20 Mha desmatadas por ano. As emissões de CO₂ causadas pelo desmatamento correspondem a aproximadamente 2.8 Gt C/ano.

Por outro lado o uso da biomassa como combustível, de uma maneira sustentável, não incrementa o teor de CO₂ na atmosfera. O CO₂ é produzido durante a combustão numa quantidade que se equilibra com o CO₂ consumido durante a fotossíntese. Alguns pesquisadores consideram que as florestas podem ter um papel importante na diminuição do teor de CO₂ na atmosfera. Assim as plantas fixam uma quantidade líquida de CO₂ que corresponde a diferença entre a quantidade absorvida pela fotossíntese e as perdas pela respiração. Segundo ELLIOT e BOOTH (1990) as emissões por respiração ficam na faixa de 25-75 % do total captado durante a fotossíntese, considerando-se 40 % como um valor médio. Segundo os mesmos autores as florestas tropicais podem fixar aproximadamente 10 ton/ha.ano de carbono proveniente da atmosfera. Assim plantações de 100 Mha poderiam absorver mais de 1 Gt de carbono atmosférico por ano, GREGORY et al. (1994) apresentam dados mais conservadores sobre a taxa de captação de CO₂, na faixa 1 - 6 t C/ha.ano, dependendo da espécie vegetal e da localização da floresta. As emissões de CO₂ de uma termelétrica a carvão de 500 MW de potência requereriam de 0.2 Mha de floresta tropical para a fixação.

Um problema sério neste sentido é a necessidade de enormes recursos financeiros para programas de reflorestamento. MOREIRA e SERRASQUEIRO (1992) apresentam um valor de 10 dólares por tonelada de carbono, o que equivale a US \$ 1500 por hectare de plantação de eucalipto em regiões chuvosas do Brasil. GREGORY et al. Apresentam um custo de 17 dólares por tonelada de carbono “sequestrada” em regiões tropicais.

A substituição de combustíveis fósseis pela biomassa utilizando técnicas modernas de conversão energética constitui uma variante de redução das emissões de CO₂.

4.9.2 Emissões produto da queima da biomassa com fins energéticos. Controle.

A combustão da biomassa nas fornalhas de caldeiras de vapor constitui uma fonte de emissões de particulados e óxidos de nitrogênio. Geralmente as caldeiras a biomassa dispõem de multiciclones ou lavadores de gás para a remoção dos particulados. Porém os padrões de emissão são cada vez mais rigorosos, o que tem levado a generalização da utilização de lavadores de gás, e em alguns casos à instalação de filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos (SILVA e OLIVARES, 1995).

A queima da cana-de-açúcar antes da colheita constitui a causa da emissão de particulados, CO, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio. A solução radical deste problema é o passo à colheita da cana verde, embora a consideração de fatores meteorológicos durante o planejamento da queima pode atenuar o efeito das emissões sobre a saúde dos moradores das regiões localizadas perto das áreas de corte.

4.9.3 O custo da bio-energia. Perspectivas.

A bio-energia, como tem sido analisado ao longo deste trabalho, não é, em geral, competitiva com a energia obtida a partir de combustíveis fósseis, e constitui ainda uma opção cara de fornecimento de energia. Porém algumas tecnologias de conversão podem ser rentáveis em condições específicas. Incentivos fiscais e subvenções podem fazer com que seja possível manter os programas atuais, surgidos durante as crises do petróleo, e desenvolver novos, o que é importante desde o ponto de vista ambiental e estratégico. Segundo a OLADE (1994) as reservas atuais de petróleo, mantendo-se o nível de consumo atual, seriam suficientes para 43 anos, sendo evidente que a era do petróleo barato deve acabar em alguns decênios. Isto faria economicamente rentáveis processos e tecnologias de conversão da biomassa considerados hoje caros.

Um outro fator a considerar é a internalização dos custos ambientais dos combustíveis fósseis com a implementação de taxas sobre as emissões, um processo que se desenvolve rapidamente na Europa e nos Estados Unidos. O papel da biomassa na redução das emissões de CO₂ e no sequestro do carbono atmosférico constitui um forte argumento para o desenvolvimento de programas de reflorestamento e de geração de energia elétrica na base deste combustível.

Finalmente novas tecnologias como os sistemas BIG/GT podem fazer a bio-energia competitiva, ainda para os preços atuais dos combustíveis fósseis.

O Brasil acumula uma enorme experiência na utilização da bio-energia. O PROALCOOL e a utilização do carvão mineral estão entre os maiores programas de aproveitamento de energias renováveis no mundo. É preciso analisar e otimizar estes programas a fim de garantir a sua sobrevivência nas condições atuais e seu desenvolvimento posterior em condições econômicas e tecnológicas mais favoráveis..

No próximo século a bio-energia deve chegar a representar um porcentagem considerável do consumo total de energia. O Brasil e outros países em desenvolvimento tem um papel importante a realizar neste sentido.

4.10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACAVE - Associação Brasileira de carvão vegetal. *Statistical yearbook*. Belo Horizonte. Brasil, 1992.

ANTAL J.R., M.J., RICHARD, J.R., Thermogravimetric studies of charcoal formation from cellulose at elevated pressures, In: ADVANCES IN THERMOCHEMICAL BIOMASS CONVERSION, Interlaken, Suíça. *Proceedings...*, 1992. v. II, p. 784 - 784.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE PAPEL E CELULOSE, *Statistical Forest Report: GT - 7 Reforestation and correlation*. SãoPaulo, 1994.

BARROSO, J., BARREDA, F. Sobre la realización de pruebas termotécnicas a los generadores de vapor que combustionan bagazo, *Ingenieria Energética*, n.5, p.14-27, 1984.

BATISTA, L.F. Construção e operação de biodigestores - modelo indiano. *Energia, Fontes Alternativa*, v.3, n.15, p.38-56, 1981.

- BEN, *Boletim do Balanço Energético Nacional*, Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Energia, República Federativa do Brasil. Brasília, 1994.
- BETTERS, D.R., WRIGHT, L.L., COUTO, L. Short rotation woody crop plantation in Brazil and the United States. *Biomass for Energy*, v. 6, No. 1, pp. 305-316, 1991.
- BLACKADDER, W.H., RENSFELT, E., WALDHEIM, L. Heat and power production in the range 5-50 MW. In: ADVANCES IN THERMOCHEMICAL BIOMASS CONVERSION. 1992, Interlaken, Suíça. *Proceedings....* 1993. v. II, p. 449-474.
- BRIDGWATER, A.V., BRIDGE, S.A. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technology, In: BIOMASS PYROLYSIS LIQUIDS UPGRADING AND UTILIZATION. *Proceedings...* Elsevier Applied Science, New York, 1991. v. 1, p. 11-93,.
- BRIDGWATER, A V., COTTAM, M.L. Opportunities for biomass pyrolysis liquids production and upgrading. *Energy & Fuels*, v. 6, p. 113-120, 1992.
- BRIDGWATER, A.V.. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation, *Fuel*, v.74, n.5, p.631-653, 1994.
- BOUVET, E.P. Cane-based power for export: overview and Hawaii experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FROM SUGARCANE: PROGRESS AND PROSPECTS, 1991, Hilo, Hawaii. *Proceedings....* 1991, p.67-128.
- BULHER, R. State of Technology in wood gasifying. In: 3 HOLZENERGIE - SYMPOSIUM: NEUE ERKENNTNISSE ZUR TERMISHEN NUTZUNG VON HOLTZ, 1994. (Nota prévia).
- CHANGDA, C., XIANG, Z., FENG, S., WU, H. Utilization of the bio-wastes on Fushan farm in Hangzhou. In: BIORESOURCES'94, 1994, Bangalore, India. (Nota prévia).
- COPERSUCAR. O programa nacional do álcool. Documento apresentado na reunião do CINAL. Outubro/94.
- COUTO, S.L., GRACA, L.R., BETTERS, D.R. Energy from biomass: The experience of the Brazilian forest. In: FIRST BIOMASS CONFERENCE OF THE AMERICAS, 1993, Burlington, Vermont. *Proceedings....* 1993, v. 1. p. 42-53.
- CINAL- Comissão Interministerial do álcool. Ministerio da Indústria, do Comercio e do Turismo, Brasília, Outubro de 1994.
- DEGLISE, X., MAGNE, P. Pyrolysis and industrial charcoal, In: HALL, D.O., OVEREND, R.P. (Ed.). *Biomass regenerable energy*,. John Wiley & Sons, 1987. p.329-348.

- ELLIOT, P., BOOTH, R., Sustainable biomass energy, *Shell selected papers*, December, 1990.
- GOLDEMBERG, J., MONACO, L.C., MACEDO, I.C. The Brazilian fuel alcohol program. In: T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993. Cap. 20, p. 841-864.
- GREGORY, K., MATTHEWS, A., SARROF, L. Alternative greenhouse gas mitigation technologies, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 1994.
- HALL, D.O. Biomass Energy. *Energy Policy*, p.711-737, October, 1991.
- HALL, D.O., HOUSE, J. Biomass: na environmentally acceptable fuel for the future. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, v.209, p.203-213, 1994.
- HALL, D.O., ROSILLO-CALLE, F., WOODS, J. Biomass utilization in households & industry: energy use and development. *Chemosphere*, v. 29, p.1099-1119, 1994.
- HALL, D.O., ROSILLO-CALLE, F., WILLIAMS, R.H., WOODS, J. Biomass for energy supply prospects. In: T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993. Cap. 14, p. 593-651.
- HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering. Sugar series 7*, Elsevier Science Publishing, 1986.
- JENKINS, B.M. Fuel properties for biomass materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE OF BIOMASS FUELS, *Preprint...* Delhi, India, 21-23, May, 1990.
- JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N., WILLIAMS, R.H. Renewable fuels and electricity for a growing world economy: defining and achieving the potential. In: T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM. (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993, p. 1-72.
- KINOSHITA, C.M. Potential for cane energy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FROM SUGARCANE: PROGRESS AND PROSPECTS, 1991, Hilo, Hawaii. *Proceedings....* 1991, p.41-66.
- LARSON, E.D. Technology for electricity and fuels from biomass. *Annual Review in Energy and Environment*, v. 18, p. 567-630, 1993.

- LARSON, E.D. Cogeração de eletricidade na indústria sucroalcooleira. In: *Perspectivas do álcool combustível no Brasil*. São Paulo: USP - Instituto de Electrotécnica e Energia, 1996, p. 77-87.
- LARSON, E.D., OGDEN, J.M., WILLIAMS, R.H., HYLTON, M.G. Biomass-fired steam injected gas-turbine cogeneration for the cane sugar industry. *International Sugar Journal*, v.92, n.1095, p.49-54, 1990.
- LEPPA, K. A comparison of European and US combustion systems, In: PROGRESS IN BIOMASS CONVERSION, 1982, *Proceedings*.. 1982, p. 77-104.
- MAHIN, D.B. *Energy from rice residues, Bioenergy Systems Report*, Winrock International, 1990.
- MEDEIROS, J.X. *Energia renovável na indústria: Análise sócio-econômica da produção de carvão vegetal para os altos fornos de Minas Gerais*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1994. (Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica).
- MITRE, M.N. Caldeiras para a queima de madeira e bagaço. In: *Produção e utilização do carvão vegetal*, Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 1982, p. 320-348.
- MOREIRA, J.R., SERRASQUEIRO, M.A. A BUN paper: strategies for biomass implementation, *Network News - Biomass Users Network*, v.8, n.1, p.9-10, 1994.
- MUKUNDA, H.S., DAAPPA, S., SHRINIVASA, U. Open-top wood gasifiers. In: T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A. K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM. (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993. Cap. 16, p. 699 - 728.
- MUTANEN, K. Oportunities for bioenergy in power generation. In: ELECTRIC UTILITY CONGRESS 93, Boston, Massachusetts, 1993. (Nota prévia).
- OLADE. Seção Estadística da América Latina, *Revista Energética*, 1994, v. 18, No. 2.
- OLIVARES, E., SILVA, E., CORTEZ, L.A.B. Constructive features, operation and sizing of fluidized bed gasifiers for biomass, *Energy for sustainable development*, v.2, n.4, p. 52-57, 1994.
- OGDEN, J.M., HOCHGREB, S., HYLTON, M.G. Steam economy and cogeneration in cane sugar factories. *International Sugar Journal*, v.92, n.1099, p. 441-451, 1990.
- PATTERSON, W. *Power from plants*, London: Earthscan Publications Ltd., 1994.

- PERA, H. *Geração de vapor*, Florianópolis-SC: Editora da UFSC, 1992.
- RAJABAPAI AH, P., JAYAKUMAR, S., REDDY, A.K.N. Biogas electricity - the Pura village case study. In T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM. (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993, p. 787-816.
- REZENDE, M.E., PASA, V.M.D., LESSA, A. Continuous charcoal production: A brazilian experience. In: ADVANCES IN THERMOCHEMICAL BIOMASS CONVERSION. 1992, Interlaken, Suíça. *Proceedings....* 1993. v. II, p. 1289 -1298.
- REZENDE, M.E., LESSA, A., PASA, V., Comercial charcoal manufacture in Brazil. In: FIRST BIOMASS CONFERENCE OF THE AMERICAS: ENERGY. Burlington, Vermont, 1993, *Proceedings...* 1993. V. II, p. 1456-1471.
- RISSER, P. Resíduos agrícolas e florestais, In: *A biomassa como fonte de energia*, Moscou: Ed. Mir, 1985, p. 25-45 (Original em russo).
- ROSILLO-CALLE, F. Brazil a biomass society. In: HALL, D.O., OVEREND, R.P., (Ed.) *Biomass regenerable energy*, John Wiley & Sons, 1987, p. 329-348.
- SANCHEZ, C.G., SILVA, E. Fluidized bed gasification research in the State University of Campinas. *Energy for Sustainable Development*, 1994, v. 1, n. 4, p. 31-34.
- SILVA, E. Development of the Cuban bagasse boiler practice. In: SECOND BIOMASS CONFERENCE OF THE AMERICAS. Portland, Oregon, 1995, *Proceedings...* 1995, p. 1732-1741.
- SILVA, E., OLIVARES, G. Bagasse suspension burning and air pollution. *International Sugar Journal*, 1995, v.97, n.1164, p.683-694.
- SINDIFER. *Multiple use reforestation project*. São Paulo, 1994.
- STASSEN, H. E., *UNDP/WB small scale biomass gasifier monitoring report*. World Bank, BTG Biomass Technology Group, September, 1993.
- STASSEN, H. E., KNOEF, H.A.M. UNDP/WORLD BANK small-scale gasifier monitoring programme - final findings. *Energy for sustainable development*, v.2, n. 1, p. 41-47, 1994.
- STREHER, A. STUTZLE, W. Biomass residues, In: HALL, D.O., OVEREND, R.P. (Ed.). *Biomass regenerable energy*, John Wiley & Sons, 1987. p. 329-348.

TOPLEY, A.W. Bioenergy for steam generation, Babcock & Wilcox Technical Paper, 1992.

WEREKO-BROBBY, C.Y., HAGEN, E.B. *Biomass conversion and technology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltda. 1996. p. 203. UNESCO Energy Engineering Series, Energy Engineering Learning Package.

WILLIAMS, R.H., LARSON, E.D. Advanced gasification-based biomass power generation. In: T.B. JOHANSSON, H. KELLY, A K.N. REDDY, R.H. WILLIAMS, L. BURNHAM. (Ed.). *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*. Washington D.C: Island Press, 1993. Cap. 17, p. 729-786.