



**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso

Gaseificação de Biomassa

Aluno: Jaderson Eli Maciel F. Nascimento

Campina Grande

**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso

Gaseificação de Biomassa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Capina Grande, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aluno: Jaderson Eli Maciel F. Nascimento

Professor Orientador: Leimar de Oliveira

Campina Grande

JADERSON ELI MACIEL FRUTUOSO DO NASCIMENTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Aprovado em _____ de _____ de 2009

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Leimar de Oliveira

Professor Convidado:

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais, Sr. Elias Frutuoso do Nascimento e Sra. Edilene Maciel Silva Frutuoso. E a todos aqueles que me deram forças e coragem para alcançar este objetivo, em especial meus avós, José Pedro da Silva (*in memoriam*) e Maria da Paz Silva, meus irmãos Jônatas Elim Maciel F. Nascimento e Elias Frutuoso do Nascimento Filho e minha noiva Joana Tárzia Pereira dos Anjos.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade e forças para seguir em busca de meus objetivos, e aos meus familiares e amigos por seu apoio incondicional.

Agradeço a Universidade Federal pela oferta do conhecimento científico por meio dos docentes do curso de Engenharia Elétrica e ao Professor Leimar de Oliveira, pela orientação, pelo conhecimento passado e pela confiança depositada na aceitação de ser meu orientador neste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus amigos da turma de Engenharia pelo acolhimento e companheirismo na lida acadêmica.

A Coordenação do curso pelas políticas de incentivo a produção acadêmica e inserção social.

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Jaderson Eli Maciel F. Nascimento

Abril/2009

Orientador: Prof. Leimar de Oliveira.

Área de Concentração: Geração de Energia.

Palavras-chave: **Gaseificação, Gaseificador, Biomassa.**

Número de Páginas: 76

RESUMO: O presente trabalho aborda a geração de energia elétrica a partir da utilização da matéria orgânica vegetal, ou seja, da biomassa. Dentre as variadas formas de obtenção de eletricidade com este tipo de insumo, a gaseificação será o objetivo do presente estudo. Aqui, é apresentada uma breve análise do funcionamento dos diferentes tipos de reatores químicos nos quais ocorrem as diversas reações inerentes ao processo de gaseificação. Uma comparação é feita entre esses reatores com a apresentação das vantagens e desvantagens de cada configuração. Também é feito um estudo do funcionamento dos equipamentos energéticos que utilizam o gás produto da gaseificação para geração de energia e dos tratamentos necessários para diminuição do nível de impurezas para que o mesmo possa então ser utilizado. Por fim, são mostradas algumas plantas de gaseificação em funcionamento no mundo e os principais centros de pesquisa no Brasil onde se busca um maior desenvolvimento dessa tecnologia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aplicações da Gaseificação de biomassa em dependência do poder calorífico do gás.....	19
Figura 2.2 - Classificação dos gaseificadores atendendo à direção relativa de movimentação do gás e da biomassa.....	21
Figura 2.3 - Desenvolvimento tecnológico e atratividade dos diferentes tipos de gaseificadores.....	21
Figura 2.4 - Faixa de variação do teor de alcatrão e particulados no gás obtido em diferentes tipos de gaseificadores.....	22
Figura 2.5 - Diagrama do processo de gaseificação.....	23
Figura 3.1 - Fotos de veículos adaptados para operar com Gasogêneos.....	27
Figura 3.2 – Esquema de um gaseificador Contracorrente.....	29
Figura 3.3 - Gaseificador Contracorrente Atmosférico.....	31
Figura 3.4 – Gaseificador Contracorrente Pressurizado.....	32
Figura 3.5 – Esquema de um gaseificador Concorrente.....	33
Figura 3.6 - Diagrama da garganta de um gaseificador concorrente.....	34
Figura 3.7 - Fotos de veículos adaptados para operar com Gasogêneos.....	35
Figura 3.8 - Evolução da Pressão na base de um Leito de Material Particulado com o aumento da vazão do ar.....	36
Figura 3.9 - Gaseificador de Leito Borbulhante.....	37
Figura 3.10 - Gaseificador de Leito Circulante.....	38
Figura 4.1 – Variação do teor de alcatrão no gás em função da temperatura do leito.....	43

Figura 4.2 - Motor de combustão interna (Caterpillar).....	46
Figura 4.3 - Eficiência do motor para utilização de diesel e a mistura diesel + gás de biomassa como combustível com relação variação de potência do motor.....	47
Figura 4.4 - Esquema de acoplamento gaseificador motor de combustão interna.....	48
Figura 4.5 - Motor Stirling.....	49
Figura 4.6 - Sistema gaseificador acoplado a motor Stirling.....	50
Figura 4.7 - Principais partes de uma micro-turbina.....	52
Figura 4.8 - Influência da temperatura na eficiência de uma micro-turbina de 30 kW.....	52
Figura 4.9 - Esquema básico do funcionamento de uma célula combustível.....	54
Figura 5.1 - Planta de Gaseificação de Arbre.....	60
Figura 5.2 - Instalação da Planta de Gaseificação de Värnamo na Suécia.....	60
Figura 5.3 - Gaseificador de Leito Fluidizado Instalado no IPT.....	62
Figura 5.4 - Gaseificador de Leito Fixo Instalado no IPT.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Qualidade do gás de biomassa para diferentes aplicações tecnológicas.....	22
Tabela 3.1 - Valores comparativos da composição do gás gerado para diferentes tipos de gaseificadores.....	40
Tabela 3.2 – Influência do agente de gaseificação no gás de biomassa.....	40
Tabela 3.3 – Influência da pressão de operação do gaseificador no gás gerado.....	40
Tabela 4.1 – Comparação entre sistemas de limpeza de gases de biomassa.....	43
Tabela 4.2 - Características de diferentes tipos de células combustíveis.....	55
Tabela 5.1 - Gaseificadores de co-combustão.....	59

Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	11
Capítulo 2: Gaseificação.....	16
2.1 - Técnicas de Conversão.....	17
2.2 - Gaseificação de Biomassa.....	18
2.3 - Reações de Gaseificação.....	23
Capítulo 3: Gaseificadores.....	26
3.1 - Gaseificadores de Leito Fixo.....	28
3.1.1 - Gaseificador Contracorrente.....	29
3.1.2 - Gaseificador de Concorrente.....	32
3.2 - Gaseificador de Leito Fluidizado.....	35
3.3 - Comparação entre os Gaseificadores.....	38
Capítulo 4: Geração de Energia Elétrica.....	41
4.1 - Limpeza do Gás.....	42
4.2 - Aplicação do Gás produzido.....	44
4.2.1 - Aproveitamento Térmico do Gás.....	44
4.2.2 - Acionadores Primários.....	44
Capítulo 5: Projetos em Desenvolvimento.....	57
5.1 - Gaseificadores para Geração de Calor.....	58
5.2 - Gaseificador para co-combustão em Centrais Elétricas.....	59
5.3 - Organizações de Pesquisa no Brasil.....	61
5.3.1 - Universidade de Campinas.....	61
5.3.2 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo....	61
5.3.3 - Universidade Federal do Pará.....	63
5.3.4 - Universidade Federal de Itajubá.....	64
5.4 - Geração de Energia Elétrica a partir da Biomassa no Brasil.....	64
Capítulo 6: Conclusão.....	67
Bibliografia.....	69

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

No mundo, o consumo de energia a partir de combustíveis fósseis é muito grande quando comparado ao consumo proveniente de fontes alternativas. Isso se deve a facilidade do emprego desse tipo de energético e ao grande mercado que se formou em torno do mesmo.

O fato das reservas mundiais de combustíveis fósseis serem finitas, tem feito com que os interesses das nações se voltem cada vez mais para fontes alternativas e principalmente renováveis.

Sendo assim, as pesquisas voltadas para o aproveitamento dos combustíveis renováveis, devem se intensificar ao longo dos próximos anos, principalmente devido à alta do preço do petróleo motivada pelo desenvolvimento econômico que motiva o consumo em países emergentes como China e Índia e pelos crescentes impactos ambientais gerados pelo uso do petróleo que causa a emissão de toneladas de gás carbônico na atmosfera.

Outro fator de suma importância na obtenção de alternativas renováveis é que nas últimas décadas, os custos de instalação e manutenção dessas tecnologias (solar, eólica, biomassa dentre outras) vêm declinando significativamente.

Essa busca por fontes energéticas que causem menores danos ao meio ambiente tem convergido cada vez mais para utilização da bioenergia.

A bioenergia é a energia gerada a partir de material orgânico vegetal, ou seja, da biomassa.

As vantagens do uso da biomassa na produção de energia são: o custo relativamente baixo, o fato de ser renovável, permitir o aproveitamento de resíduos e ser bem menos poluente que outras fontes de energia convencionais.

A renovação da biomassa ocorre através do ciclo do carbono. A queima da biomassa ou de seus derivados provoca a liberação de CO₂ na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, transformam esse CO₂ em hidratos de carbono, liberando oxigênio. Assim, a utilização da biomassa, desde que não seja de forma predatória, não altera a composição da atmosfera.

As biomassas mais utilizadas são: a lenha (já representou 40% da

produção energética primária no Brasil), o bagaço da cana-de-açúcar, galhos e folhas de árvores, papéis, papelão, etc.

Os recursos renováveis representam cerca de 20% do suprimento total de energia no mundo, sendo 14% proveniente de biomassa e 6% de fonte hídrica. No Brasil, a proporção da energia total consumida é de cerca de 35% de origem hídrica e 25% de origem em biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de 2/3 dos requisitos energéticos do país.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa tem sido defendida como uma importante opção para os países em desenvolvimento como o Brasil e mesmo para os países europeus devido a questões ambientais, como por exemplo a necessidade de minimização das emissões globais de CO₂ na atmosfera.

Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos pelo mundo, visando o aumento da eficiência de sistemas para obtenção de energia através da biomassa. Entre os programas nacionais bem sucedidos no mundo pode-se citar:

- O PROÁLCOOL, Brasil;
- Aproveitamento de biogás na China e Índia;
- Aproveitamento de resíduos agrícolas na Grã – Bretanha;
- Aproveitamento do bagaço de cana nas Ilhas Maurício;
- Coque vegetal no Brasil.

No Brasil, o Proálcool objetivava a substituição da gasolina dos veículos leves por álcool, como uma das medidas para minimizar os impactos da alta do preço do petróleo. Esse programa alcançou um patamar impressionante em termos de abrangência do projeto, sendo que em 1985 os carros movidos a álcool representavam 96% da produção nacional.

Recentemente o Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) surgiu como o mais importante programa de incentivo as fontes alternativas do governo desde o Proálcool. O Proinfa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e é executado pela Eletrobrás caracterizando-se como um projeto para diversificação da matriz energética nacional.

No Brasil a biomassa utilizada para produção de energia é sob a forma de:

- Lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas;
- Carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste;
- No sul do país queimam carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para fins carburantes e para indústria química;
- O bagaço de cana e outros resíduos combustíveis são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade, como nas usinas de açúcar e álcool, que não necessitam de outro combustível, pelo contrário ainda sobra bagaço para indústria de celulose.

Nesse cenário extremamente favorável às fontes alternativas, podemos citar a gaseificação de biomassa como uma promissora alternativa de fornecimento de energia.

A gaseificação é uma das várias técnicas de conversão da biomassa bruta em energia. Ela ocorre em reatores químicos denominados gaseificadores e consiste na transformação da biomassa sólida em um gás combustível de baixo poder calorífico que pode ser utilizado de várias formas para produção de energia.

Essa é uma tecnologia importante para o futuro, que poderá contribuir para alcançar as crescentes necessidades de energia nas décadas seguintes.

A realização deste trabalho teve como objetivo a apresentação de uma análise teórica sobre a gaseificação e a produção energética a partir da utilização do gás combustível resultante de tal processo.

No capítulo II deste trabalho são mostradas as técnicas de transformação da biomassa, a qual pode resultar em calor, eletricidade ou biocombustível dependendo da tecnologia utilizada. É apresentado, ainda o conceito de gaseificação e as reações que ocorrem durante a realização do processo.

No capítulo III são ilustrados os tipos de reatores nos quais ocorrem as diversas reações que caracterizam o processo de gaseificação além de uma breve análise do funcionamento de cada gaseificador. É feita também uma

comparação entre eles, apresentando suas respectivas vantagens e desvantagens e a influência na composição do gás gerado de cada tipo de configuração.

No capítulo IV é apresentado o modo como o gás combustível pode ser utilizado para obtenção de energia bem como os cuidados que se deve tomar, em relação à eliminação de impurezas resultantes das reações ocorridas no próprio processo de gaseificação, pois tais impurezas podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos energéticos que fazem uso desse gás para geração de energia.

No capítulo V são mostradas algumas plantas de gaseificação em funcionamento no mundo e os principais centros de pesquisa no Brasil onde se busca um maior desenvolvimento dessa tecnologia.

O capítulo VI é conclusivo e nele se reflete os principais aspectos abordados neste estudo.

CAPÍTULO II
GASEIFICAÇÃO

2 - GASEIFICAÇÃO

2.1 - Técnicas de conversão

Devido à grande diversidade de materiais que podem ser considerados biomassa, existem vários processos onde se transforma a biomassa em energia. Eles são divididos em três tipos: os que envolvem combustão direta, os que envolvem processos termoquímicos (gaseificação, pirólise e transesterificação) e os que envolvem processos biológicos (biodigestores).

Dependendo do processo de conversão, a Biomassa pode ser transformada nos seguintes produtos: eletricidade, calor ou biocombustíveis. As técnicas são as seguintes:

- **Combustão direta:** é a queima da biomassa por aquecimento direto em fornos ou caldeiras na presença de um gás (geralmente o ar), que libera calor. O problema deste tipo de combustão é a baixa eficiência, por causa da umidade (que na lenha pode ser de 20% ou até mais) e da baixa densidade energética dos combustíveis envolvidos neste tipo de geração de energia. Sem contar, que neste tipo de combustão é praticamente impossível obter a queima completa o que pode gerar grandes quantidades de emissões atmosféricas. É a mais simples técnica de aproveitamento energético da Biomassa.
- **Gaseificação:** conversão da Biomassa em um combustível gasoso denominado de gás “pobre”, devido ao seu baixo teor energético, por meio de reações termoquímicas envolvendo ar, vapor ou oxigênio, em quantidades inferiores ao mínimo necessário para a combustão direta, e em seguida utilização do gás obtido, que contém basicamente CO, H₂, CH₄, CO₂ e N₂, para obtenção da energia. Este método é bem mais eficiente que a combustão direta no sentido de produzir emissões atmosféricas mais limpas. O gás obtido a partir deste método pode ser usado em turbinas a gás ou mesmo em motores de combustão interna, comprovando sua maior versatilidade.

- **Pirólise:** é a combustão da biomassa praticamente sem a presença de oxigênio deixando partes sólidas, líquidas e gasosas como produtos. Esse é um processo auto-sustentável sob o ponto de vista energético, pois, a decomposição química pelo calor, praticamente na ausência de oxigênio, produz mais energia do que consome. O processo de pirólise mais usado é a carbonização da madeira para a produção de carvão vegetal.
- **Transesterificação:** processo químico que transforma óleos vegetais ou gorduras animais, na presença de um catalizador, em glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos, conhecidos como biodiesel.
- **Digestão anaeróbia:** também ocorre na ausência de ar, porém o processo de decomposição da biomassa é feito por bactérias, que ao decompor o material (processo que ocorre normalmente com a biomassa, porém nesse caso, é acelerado em um biodigestor), produz o biogás composto por metano e dióxido de carbono que tem um conteúdo energético em torno de 5.500 kcal/m³. É muito usado na conversão de lixo urbano e agrícola em combustível.
- **Fermentação:** outro processo biológico. Os microorganismos conhecidos como leveduras convertem os açúcares de plantas, como a cana de açúcar, em álcool.

2.2 - Gaseificação da Biomassa

A gaseificação pode ser definida como a combustão parcial da biomassa, ou seja, como o processo no qual a matéria orgânica é transformada em um gás combustível através da queima, em elevadas temperaturas, na presença de um agente oxidante em quantidade inferior ao mínimo exigido para combustão direta.

O agente oxidante pode ser o ar, o oxigênio ou mesmo vapor d'água. O gás produzido é de baixo poder calorífico, em torno de 4-7 MJ/m³, se o agente oxidante for ar, ou 10 a 13 MJ/m³, se o agente oxidante for oxigênio ou vapor. Devido a esse baixo poder calorífico o gás resultante do processo de gaseificação é denominado de gás pobre. Na sua composição está presente CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂, entre outros elementos e vários contaminantes como particulados e alcatrão. O gás produzido pode ser usado para acionar um motor de combustão interna, uma turbina a gás, um forno de secagem de revestimento cerâmico, caldeiras etc.

O poder calorífico do gás influi significativamente sobre as possíveis aplicações do mesmo, como indicado na Figura 2.1.

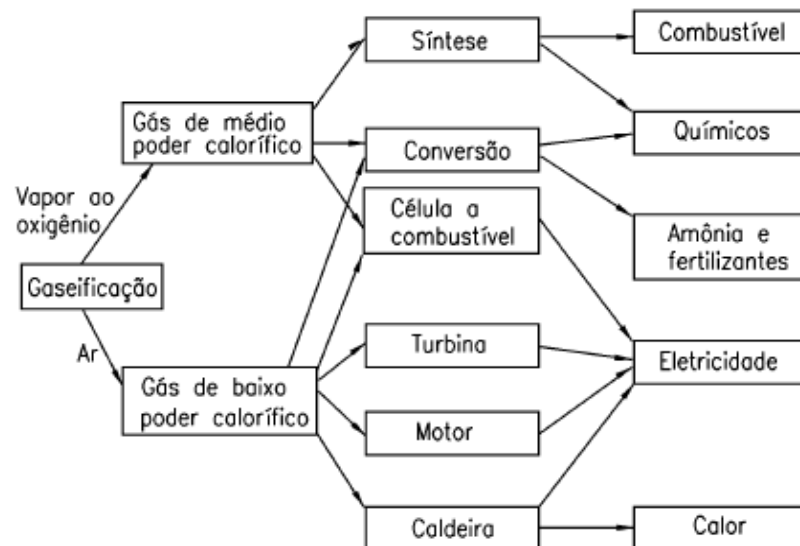


Figura 2.1 - Aplicações da Gaseificação de biomassa em dependência do poder calorífico do gás, (BRIDGWATER, 2003).

Uma grande vantagem da gaseificação em relação à queima direta é a possibilidade da geração de eletricidade em pequena escala sem a necessidade de um ciclo de vapor, utilizando o gás da biomassa diretamente no equipamento energético que faz uso desse combustível.

Logicamente seu uso também possui desvantagens como, por exemplo, a utilização de uma tecnologia mais complexa do que a da queima direta e menor eficiência de conversão.

O processo de gaseificação é realizado por um reator químico denominado de gaseificador, dentro do qual ocorrem as várias reações químicas e físicas necessárias para obtenção do gás combustível.

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

a) Tipo de agente de gaseificação:

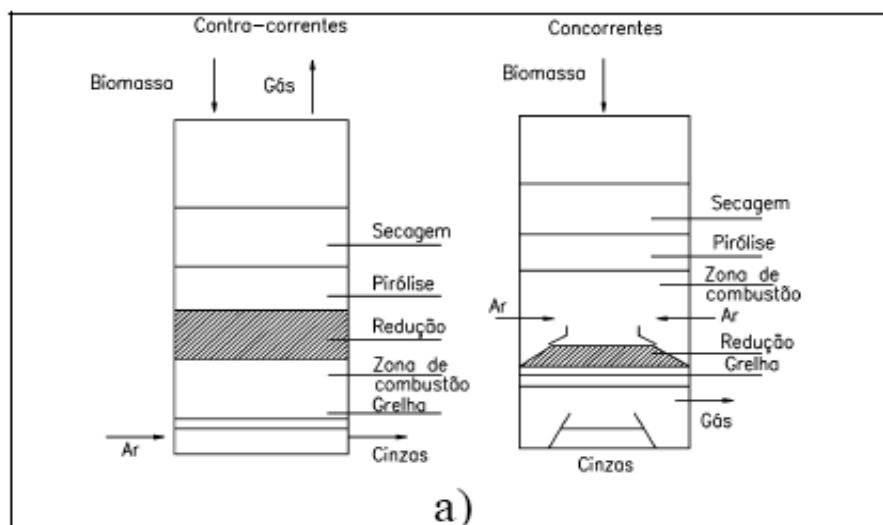
- Ar;
- Vapor d'água;
- Oxigênio.

b) Pressão de trabalho:

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

c) Direção do movimento relativo entre biomassa e do agente de gaseificação (Figura 2.2):

- Leito Fixo Contracorrente;
- Leito Fixo Co-corrente;
- Leito Fluidizado Borbulhante;
- Leito Fluidizado Circulante.



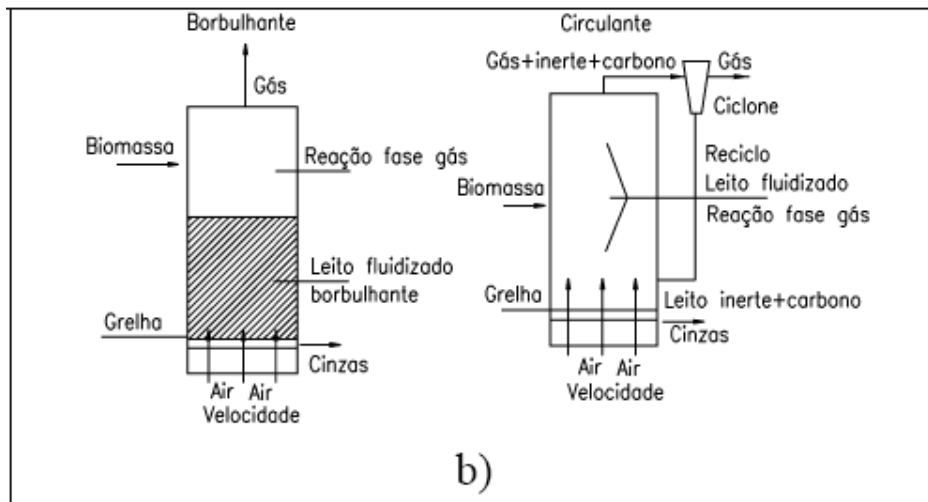


Figura 2.2 - Classificação dos gaseificadores atendendo à direção relativa de movimentação do gás e da biomassa: a) Gaseificadores de leito fixo, b) Gaseificadores de leito fluidizado, (BELGIORNO *et al.*, 2002)

Na Figura 2.3 apresenta-se uma avaliação em relação ao grau de desenvolvimento tecnológico e a atratividade comercial dos diferentes tipos de gaseificadores para biomassa. Os gaseificadores de leito fluidizado e os concorrentes são os que se encontram numa melhor posição para a implementação comercial em grande escala.

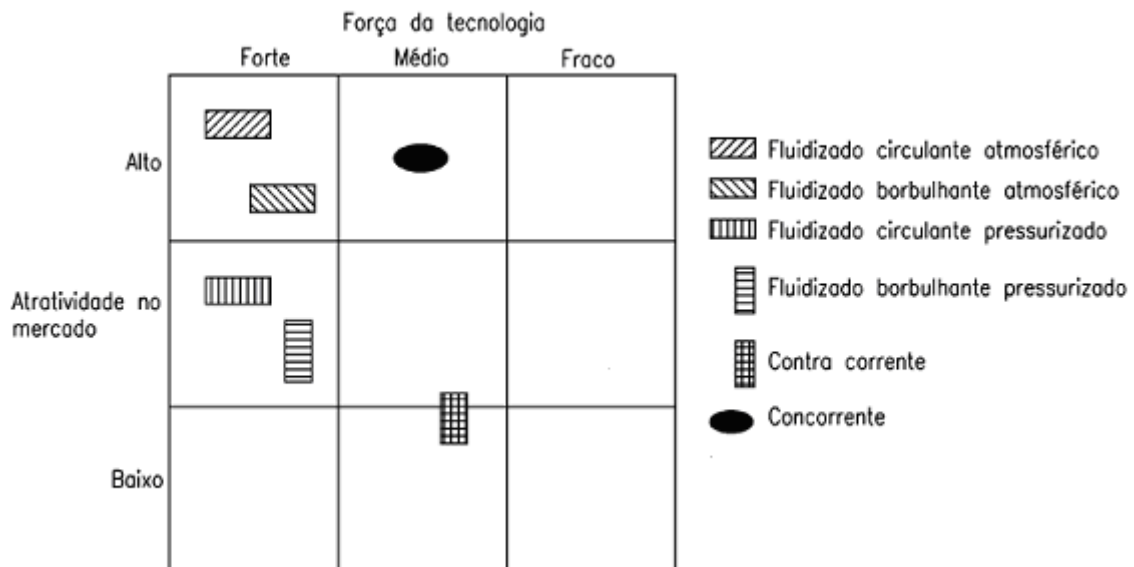


Figura 2.3 - Desenvolvimento tecnológico e atratividade dos diferentes tipos de gaseificadores, (BRIDGWATER, 2003).

O gás produto da gaseificação da biomassa contém impurezas tais como particulados, alcatrão, metais alcalinos, sulfeto de hidrogênio e amônia,

que devem ser removidos, pois podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos energéticos que utilizam o gás. A concentração de contaminantes varia dependendo do tipo de gaseificador (Figura 2.4). A tabela 2.1 indica o teor de alcatrão e particulados no gás obtido nos diferentes tipos de gaseificadores.

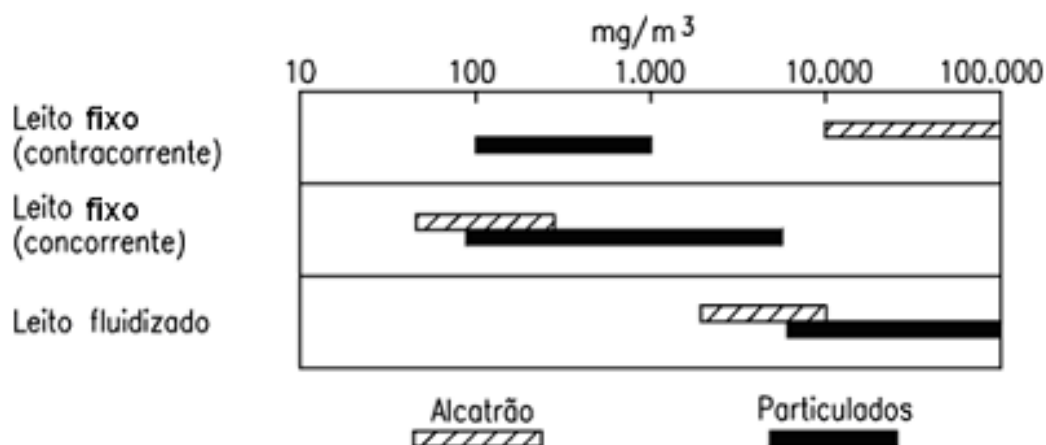


Figura 2.4 - Faixa de variação do teor de alcatrão e particulados no gás obtido em diferentes tipos de gaseificadores, (GUIGON & LARGE, 1990).

Tabela 2.1 - Qualidade do gás de biomassa para diferentes aplicações tecnológicas, (KALTSCHMITT & HARTMANN, 2001).

Teor e características dos compostos	Unidades	Motor de combustão interna	Turbina a gás	Síntese de metanol	Células a combustível
Teor de particulados	mg/m ³	< 50	< 30	< 0,02	
Dimensões das Part.	µm	< 3-10	< 5		
Teor de alcatrão	mg/m ³	< 100		< 0,1	< 1
Teor álcalis	mg/m ³		< 0,25		
Teor de NH ₃	mg/m ³	< 55		< 0,1	< 0,1
Teor de H₂S	mg/m³	< 1150		< 1	< 1

Analisando o gráfico e a tabela apresentados acima, conclui-se que para produção de baixa potência (faixa de 100 kW a 2 MW) é mais viável produzir energia elétrica a partir de biomassa usando gaseificadores de leito fixo, principalmente do tipo concorrente, e motores de combustão interna, por causa do menor teor de alcatrão no gás. Gaseificadores de leito fluidizado são indicados para potências superiores a 3 MW.

2.3 - Reações de Gaseificação

A gaseificação de combustíveis sólidos é um processo bastante antigo e é realizada com o objetivo de produzir um combustível gasoso com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e também que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos.

Nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases cujos principais componentes são: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções.

O processo de gaseificação da biomassa resulta de reações bastante complexas, ainda não muito bem conhecidas em sua totalidade. Porém, de forma introdutória e em termos teóricos, pode ser subdividido em várias etapas, que são: a secagem, a pirólise, a combustão e a redução.

A Figura 2.5 mostra um diagrama do processo de gaseificação.

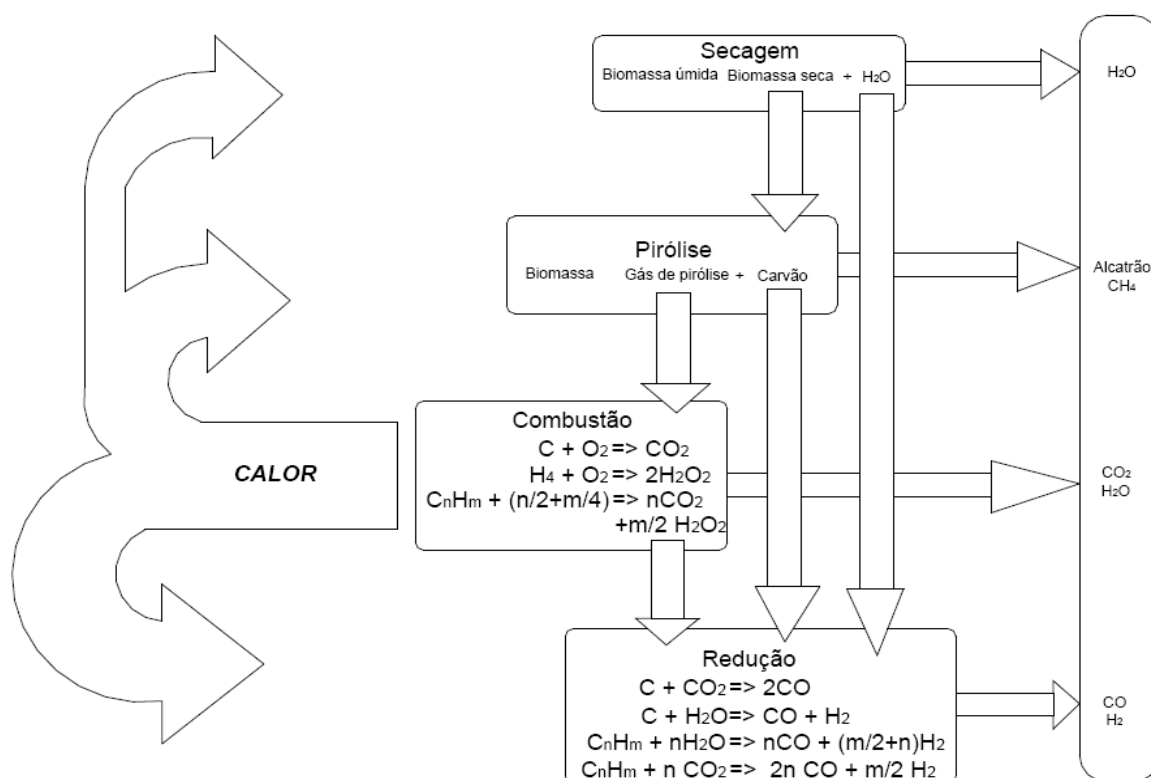


Figura 2.5 - Diagrama do processo de gaseificação, (Rubenildo Vieira de Andrade, 2007).

Cada uma dessas etapas pode ser visualizada como ocorrendo em uma região diferente dentro do equipamento, em uma seqüência determinada pelas características do projeto.

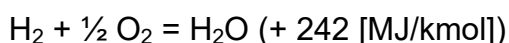
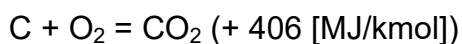
Dependendo da biomassa utilizada ela pode ter um alto grau de umidade a qual começa a ser removida a temperatura de 100°C, caracterizando assim a zona de secagem.

A umidade da biomassa determina o teor de vapor d'água no gás produzido, afetando seu poder calorífico. Quanto maior a porcentagem de vapor d'água, menor a quantidade de energia útil disponível no gás. Em aplicações de gaseificação a umidade deve ter valores entre 10 e 20%, sendo que valores em torno de 10% são preferíveis.

A pirólise é a decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio e ocorre na faixa de temperatura de 280 a 450°C. São três os produtos da pirólise:

- Parte sólida – cinzas, carvão e particulados
- Parte gasosa – monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio;
- Parte líquida – vapores condensados de alcatrão e ácidos.

A combustão se dá a temperaturas da ordem de 800 a 2000°C e é caracterizada pela liberação de energia. O oxigênio, do agente oxidante, reage com o carbono e hidrogênio do combustível resultando em dióxido de carbono e vapor.



A redução é uma reação endotérmica que ocorre a temperaturas de 700 a 1000°C. Nessa etapa, o dióxido de carbono e o vapor são reduzidos a monóxido de carbono e hidrogênio. Abaixo são mencionadas as principais reações que ocorrem durante a redução:

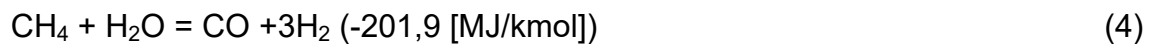
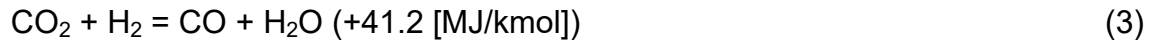
Reação de Boudouard



Reação de deslocamento gás-água



Reação homogênea (fase gasosa)



Reação de formação do Metano



A composição do gás gerado é afetada pelo tipo de gaseificador e por suas condições de operação como temperatura e pressão, pelas características do combustível como umidade, tipo e composição e teor de oxigênio no agente gaseificador.

As equações apresentadas acima representam as reações químicas mais importantes de cada uma das etapas e estão longe de refletir a verdadeira complexidade dos processos que ocorrem durante a gaseificação da biomassa.

CAPÍTULO III
GASEIFICADORES

3 - GASEIFICADORES

A conversão de material orgânico em gás combustível teve origem nas últimas décadas do século XVII onde a forma mais antiga conhecida para produção de gás era a chamada destilação seca, que consistia no aquecimento do combustível em uma redoma, na ausência de oxigênio.

Até o ano de 1830 não existia aplicação, comercial ou doméstica, para o gás combustível (Lipp, 2001). Por volta de 1850, surgiu a primeira aplicação na cidade de Londres, onde a iluminação pública da cidade era feita a partir do gás.

Em 1839 o gaseificador de leito fixo foi desenvolvido por Bishoff. Esse gaseificador foi modificado por Siemens em 1857, sendo utilizado na Europa nos cem anos seguintes (Cortez, 1997).

O auge da produção de gás e conseqüente utilização de gaseificadores ocorreram durante a segunda grande guerra, quando cerca de um milhão de veículos no mundo todo, utilizavam gaseificadores em leito fixo que eram chamados de gasogêneos. No Brasil o número desses veículos era em torno de 20.000 e utilizavam como combustível, pedaços de madeira, coque, turfa e carvão.

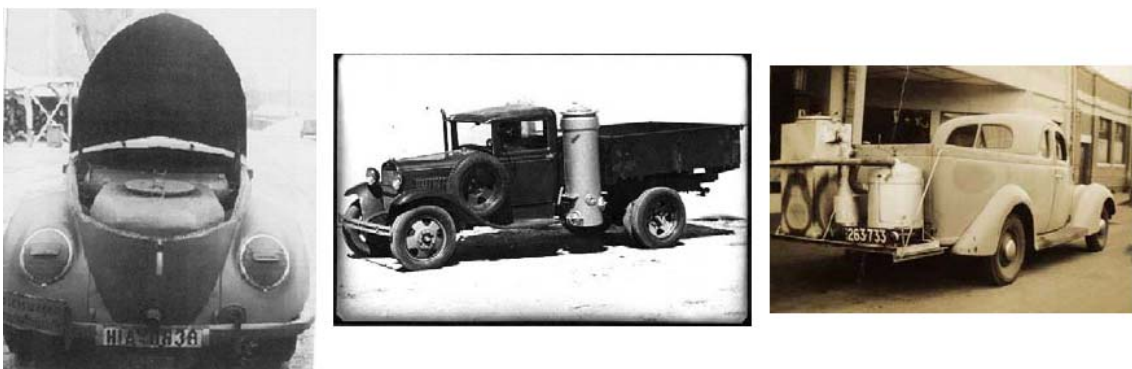


Figura 3.1 - Fotos de veículos adaptados para operar com Gasogêneos. (Rubenildo Vieira Andrade, 2007)

Esses motores podiam operar com cerca de 75% da potência do mesmo motor operando a gasolina. Entretanto, cuidados adicionais com a manutenção eram necessários devido ao alcatrão e particulado presentes no gás.

Foi a partir dos modelos de gasogênio que foram desenvolvidos os modelos de gaseificadores de biomassa.

As crises de petróleo no início da década de 70 foram o argumento para fortalecer linhas de pesquisa voltadas para o aproveitamento sustentável de recursos renováveis, entre eles a biomassa. No Brasil o exemplo mais conhecido foi o lançamento do Proálcool.

É desta época que se iniciou uma investigação mais profunda do uso de gaseificadores para biomassa.

O gaseificador é essencialmente um reator químico onde ocorrem várias reações químicas e físicas. Dentro do reator a biomassa perde umidade, aquece, sofre pirólise, oxida e se reduz por toda a extensão do reator até que chega ao final como uma mistura combustível gasosa. Em linhas gerais as reações típicas que ocorrem dentro do reator são: secagem da biomassa, pirólise, combustão e redução. Embora existam zonas onde mais de uma reação ocorra pode-se dizer que dentro do reator existem regiões bem definidas para cada uma das reações mencionadas.

Do ponto de vista construtivo existem basicamente 2 tipos de gaseificadores (estes ainda divididos em subgrupos) enquadrados segundo o tipo de leito utilizado, em uma das duas concepções a seguir:

- Gaseificador de leito fixo;
 - Contracorrente;
 - Concorrente.

- Gaseificador de leito fluidizado.
 - Circulante;
 - Borbulhante.

3.1 - Gaseificadores de Leito Fixo

É o tipo de gaseificador mais antigo e mais difundido. Segundo MANIATIS (2001), 77,5 % dos projetos de gaseificadores são do tipo de leito fixo, 20 % são do tipo fluidizado e 2,5 % de outros tipos. Esses tipos de

gaseificadores são mais indicados para produção de energia em pequena escala.

Os gaseificadores de leito fixo podem se dividir em dois subgrupos: os de circulação de gases contracorrente e concorrente. Eles utilizam uma tecnologia relativamente simples comparada aos gaseificadores de leito fluidizado e cada tipo tem características específicas associadas ao seu funcionamento.

3.1.1 - Gaseificador Contracorrente

O nome contracorrente se refere ao fato do combustível ser alimentado pelo topo (através de uma válvula rotativa ou porta de alimentação) e desce em contracorrente ao ar ou oxigênio ou vapor d'água, introduzido pela grelha, localizada na base do gaseificador, como mostrado esquematicamente na Figura 3.2. Nesta figura também são apresentadas as regiões normalmente encontradas ao longo da altura do leito de um gaseificador contracorrente típico.

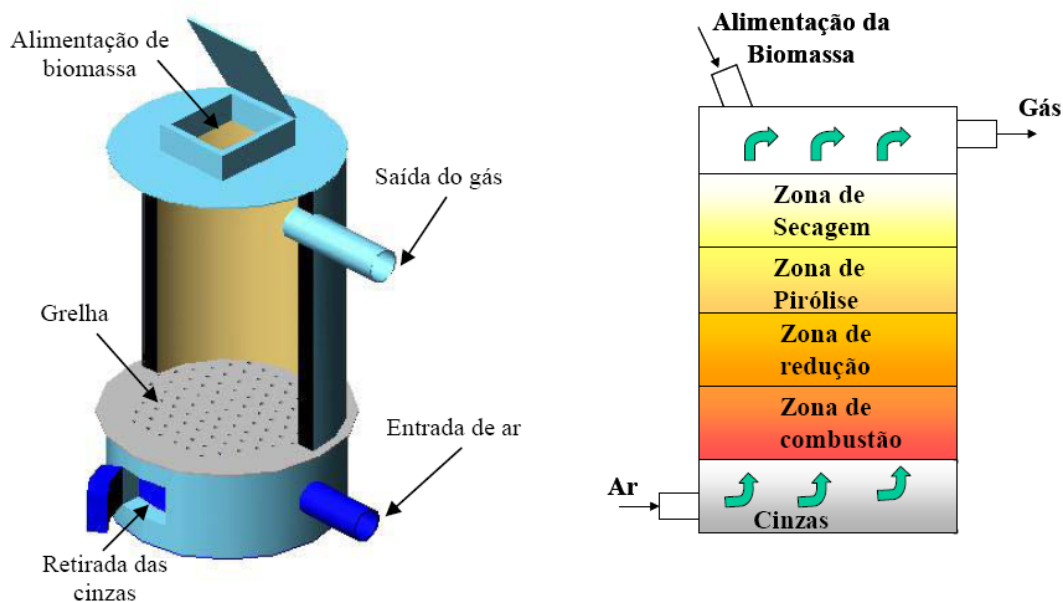


Figura 3.2 – Esquema de um gaseificador Contracorrente, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007).

As primeiras camadas do combustível sólido que ficam apoiadas sobre a grelha e entram em combustão intensa, produzindo CO_2 e H_2O a temperaturas elevadas, que posteriormente são reduzidas a CO e H_2 conforme eles passam pela camada descendente do combustível, resfriando a temperaturas da ordem

de 700 a 1000°C. 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. Na parte de cima do reator ocorrem o aquecimento e a secagem do combustível alimentado, devido ao contato com os gases ascendentes, sendo que sua umidade liberada é também incorporada a corrente gasosa. Os gases, já frios, saem pelo topo do gaseificador. As cinzas do combustível, ainda com uma fração de carbono do combustível não convertido a gás, saem pela base do gaseificador.

Exemplos de gaseificadores do tipo contracorrente são apresentados a seguir. O gaseificador do IPT – Instituto de Pesquisa e Tecnologia do estado de São Paulo (figura 3.3), opera à pressão atmosférica, dispondo de um selo d'água na sua base por onde a cinza e material carbonoso não convertido é removido. No interior da bacia de descarga existe uma grelha cônica, à semelhança da grelha do gaseificador pressurizado fabricado pela empresa Lurgi (Figura 3.4), e que é excêntrica, de tal forma a provocar o revolvimento do material no interior do leito quando a bacia é rotacionada. Este revolvimento é muito importante para garantir um escoamento uniforme de gases e combustível sólido no interior do leito, principalmente para materiais que apresentem tendência à formação de domos ou de aglomeração de particulados.

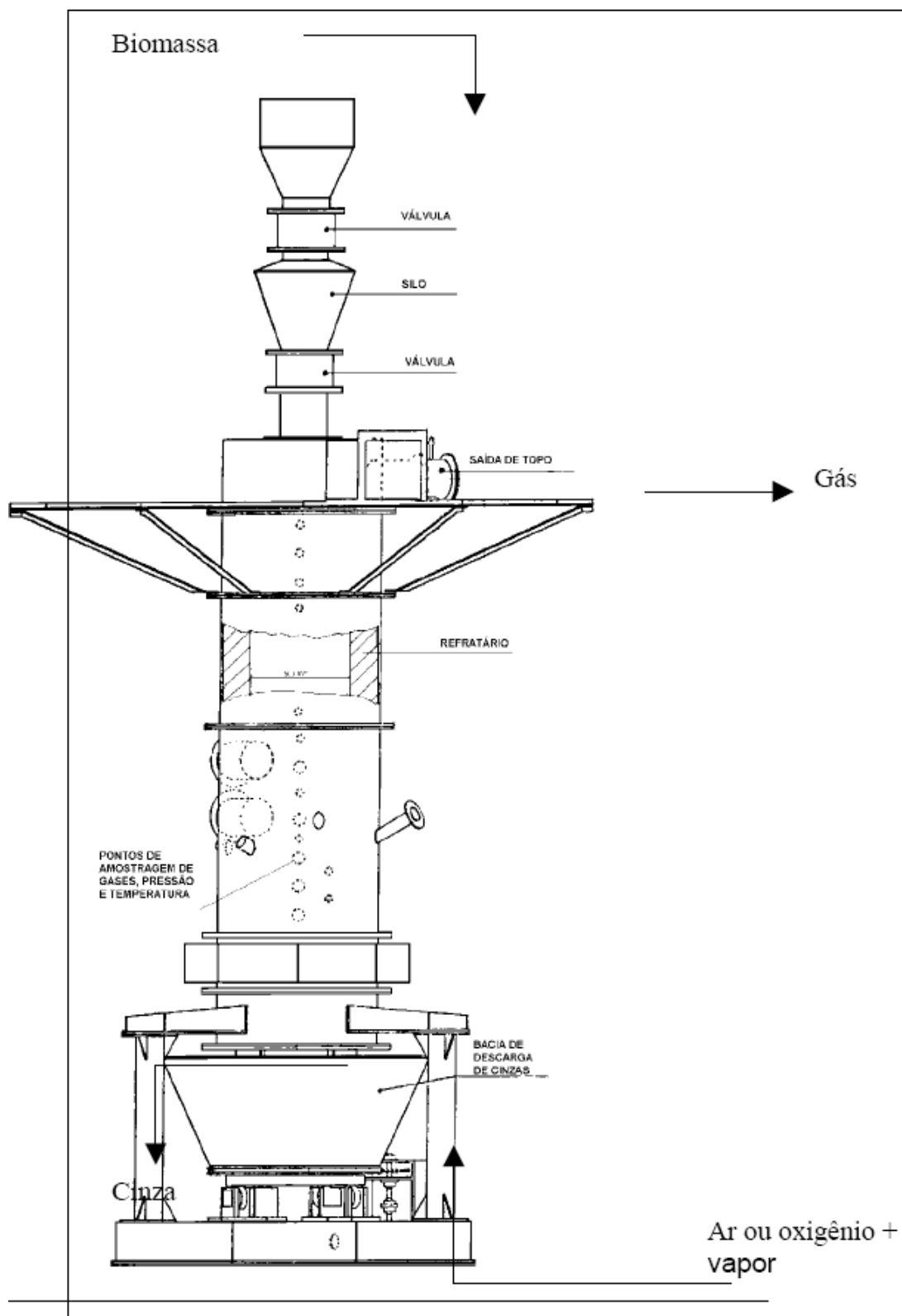


Figura 3.3 - Gaseificador Contracorrente Atmosférico, (USHIMA, 1996)

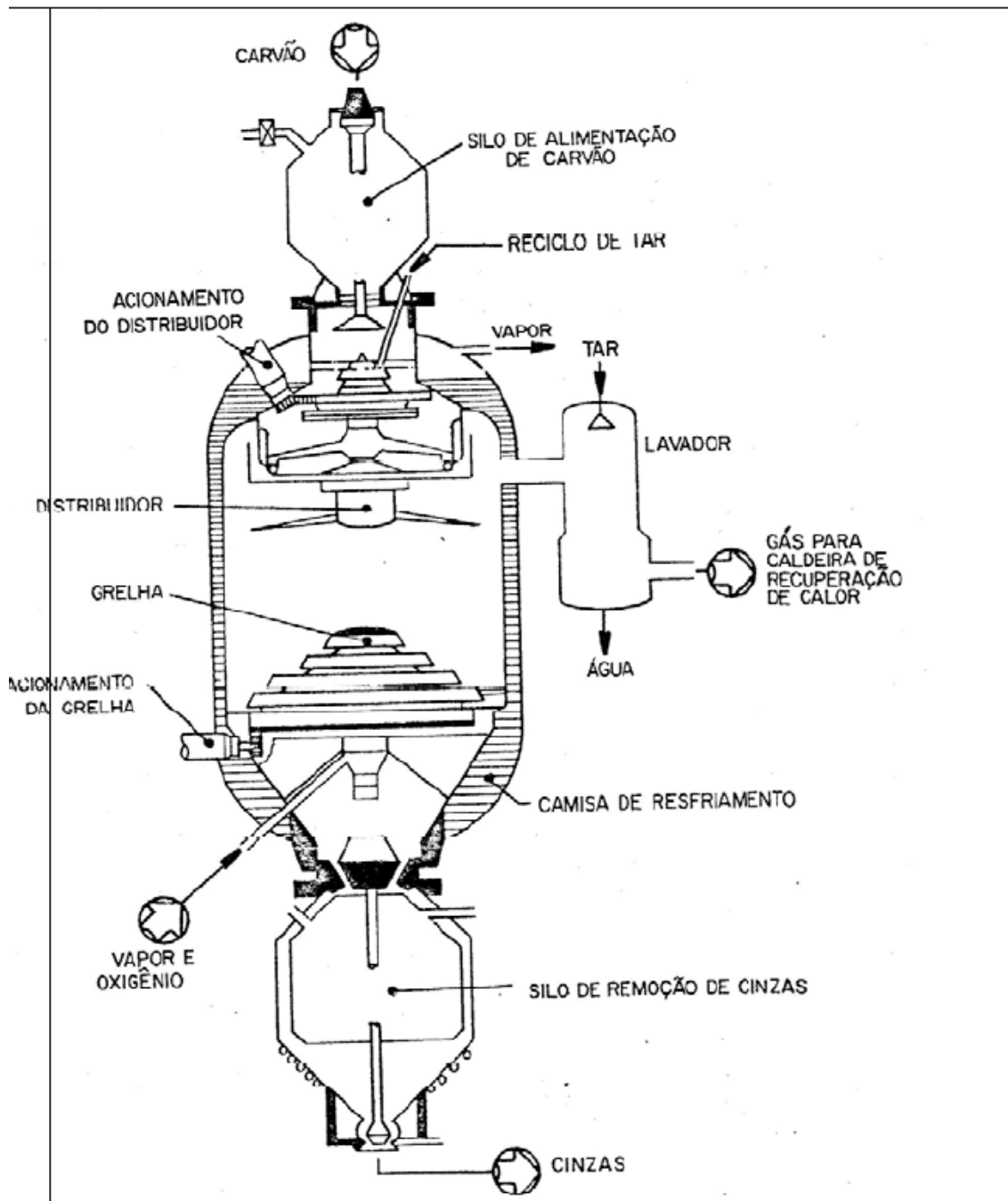


Figura 3.4 – Gaseificador Contracorrente Pressurizado, (USHIMA, 1996)

3.1.2 – Gaseificador Concorrente

O gaseificador concorrente é o tipo de gaseificador de leito fixo mais difundido. Ele se assemelha construtivamente ao gaseificador contracorrente, exceto que a biomassa é alimentada pela parte superior do reator e o ar é fornecido lateralmente. O gás gerado é direcionado para parte inferior do equipamento.

Neste tipo de gaseificador, o ar injetado, pode queimar até 99% do alcatrão liberado pelo combustível, ou seja, seu arranjo lhe permite uma produção de gás relativamente livre de alcatrão.

Um desenho esquemático de um gaseificador operando segundo o princípio concorrente é apresentado a seguir.

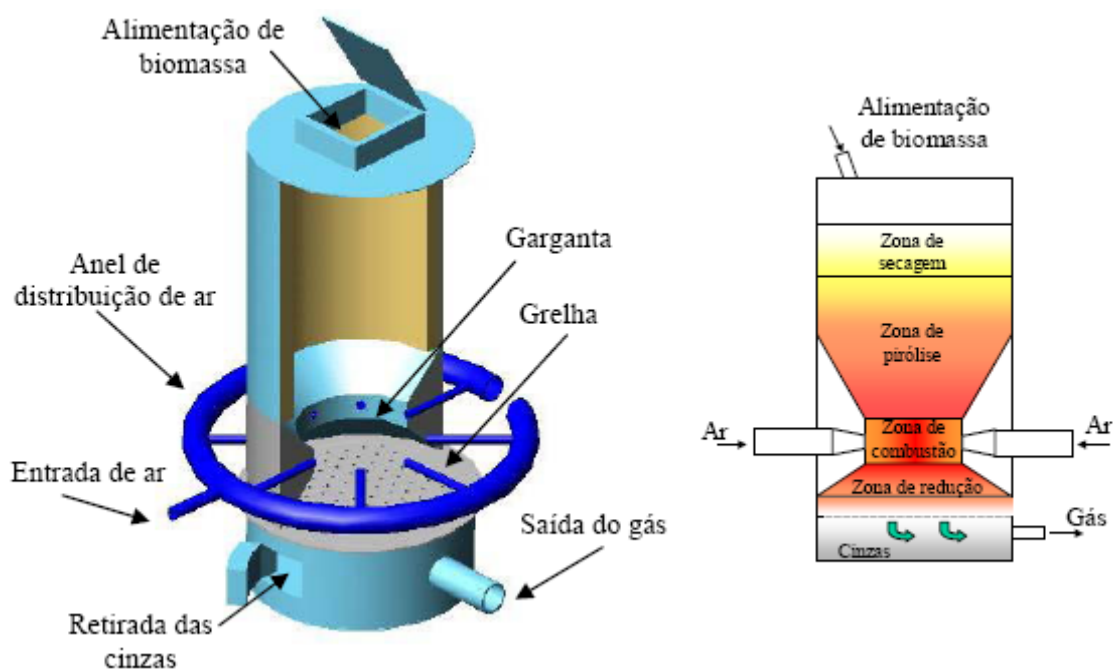


Figura 3.5 – Esquema de um gaseificador Concorrente, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007)

Nesse equipamento, as zonas de reação são bem distintas como no gaseificador contracorrente, no entanto, sua disposição é diferente, onde inicialmente a biomassa passa pela região de secagem, seguindo para a região de pirólise, posteriormente é encaminhada para zona de combustão e finalmente para zona de redução. Nesse último estágio o monóxido de carbono e o hidrogênio, são formados pela reação do carvão, proveniente da zona de pirólise, com o dióxido de carbono e o vapor d'água, vindos da zona de combustão.

Esse tipo de gaseificador tem uma redução do diâmetro interno na região da zona de combustão. Nessa região, chamada de garganta, injetores de ar são posicionados de forma radial (Figura 3.6). Esta configuração tem o objetivo de forçar a passagem dos produtos da pirólise pela zona de

combustão onde a biomassa se encontra incandescente, destruindo termicamente os alcatrões formados, resultando em um gás mais limpo, porém de menor poder calorífico que o produzido em equipamentos contracorrente.

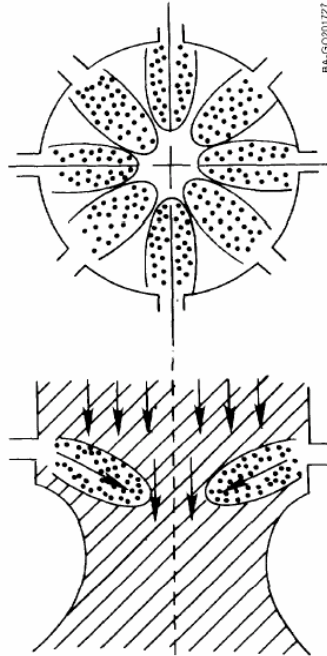


Figura 3.6 - Diagrama da garganta de um gaseificador concorrente, (Solar Energy Research Institute, 1988).

Nesse equipamento o dimensionamento da garganta é um ponto crítico do projeto, pois pode até mesmo, dependendo do tipo de biomassa que se utilize, causar problemas como a restrição do fluxo contínuo do combustível dentro do reator, criando caminhos preferenciais para o ar, o que pode prejudicar o bom andamento do processo de gaseificação.

Este tipo de gaseificador foi largamente empregado na Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, devido ao embargo de derivados de petróleo para serem empenhados na guerra.

A título de ilustração, na Figura 3.7 são apresentadas fotos de veículos adaptados para operar com esse tipo de gaseificador denominado na época de gasogênio. Alguns eram instalados em “trailers” e outros anexados à carroceria do veículo.

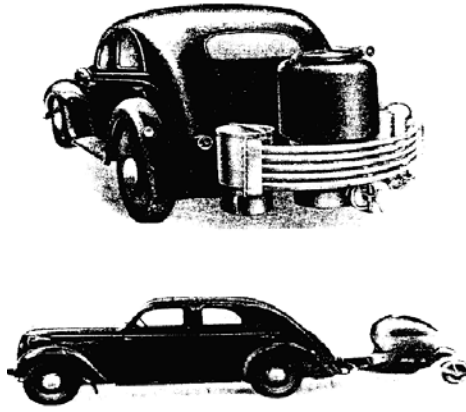


Figura 3.7 - Fotos de veículos adaptados para operar com Gasogêneos, (Generator Gás).

Com o fim da Segunda Guerra e a consolidação do petróleo e gás natural como fontes energéticas, toda esta tecnologia foi abandonada.

3.2 - Gaseificador de Leito Fluidizado

O gaseificador em leito fluidizado é caracterizado por um excelente contato entre sólido e gás favorecendo as reações de transferência de energia e obtendo uma uniformidade na temperatura do leito, de modo que não se distinguem as zonas de reação.

Neste tipo de equipamento utiliza-se um material particulado como areia, para servir de leito, o qual é aquecido e mantido em suspensão por um fluido, que pode ser o ar. A biomassa é introduzida no leito sendo queimada assim que entra em contato com as partículas que o constitui.

O desempenho desse tipo de equipamento depende das características da biomassa que é utilizada, do agente oxidante, bem como dos parâmetros de operação do reator, como: temperatura do leito, velocidade superficial, pressão de trabalho e carga de biomassa.

Antes de entrarmos em mais detalhes nas características desse equipamento de leito fluidizado, é importante entender mais de seu princípio de funcionamento.

Considere-se um leito inicialmente em repouso sobre uma placa distribuidora e contido em um reservatório de diâmetro " d ". Passa-se, então, a encher de ar esse leito através da placa distribuidora. Conforme a velocidade do ar aumenta, a força que ele aplica às partículas do leito tende a se igualar

ao peso. Quando há tendência de sustentação, diz-se que essa é a condição de mínima fluidização.

A velocidade em que é atingida a condição de mínima fluidização é denominada de *velocidade de mínima fluidização* denotada por U_{mf} . Neste ponto as partículas começam a se descolar uma das outras e ficam suspensas, passando a se comportar como um líquido.

O gráfico apresentado na Figura 3.8 mostra esquematicamente esse processo, bem como podem ser visualizados os diferentes regimes de fluidização.

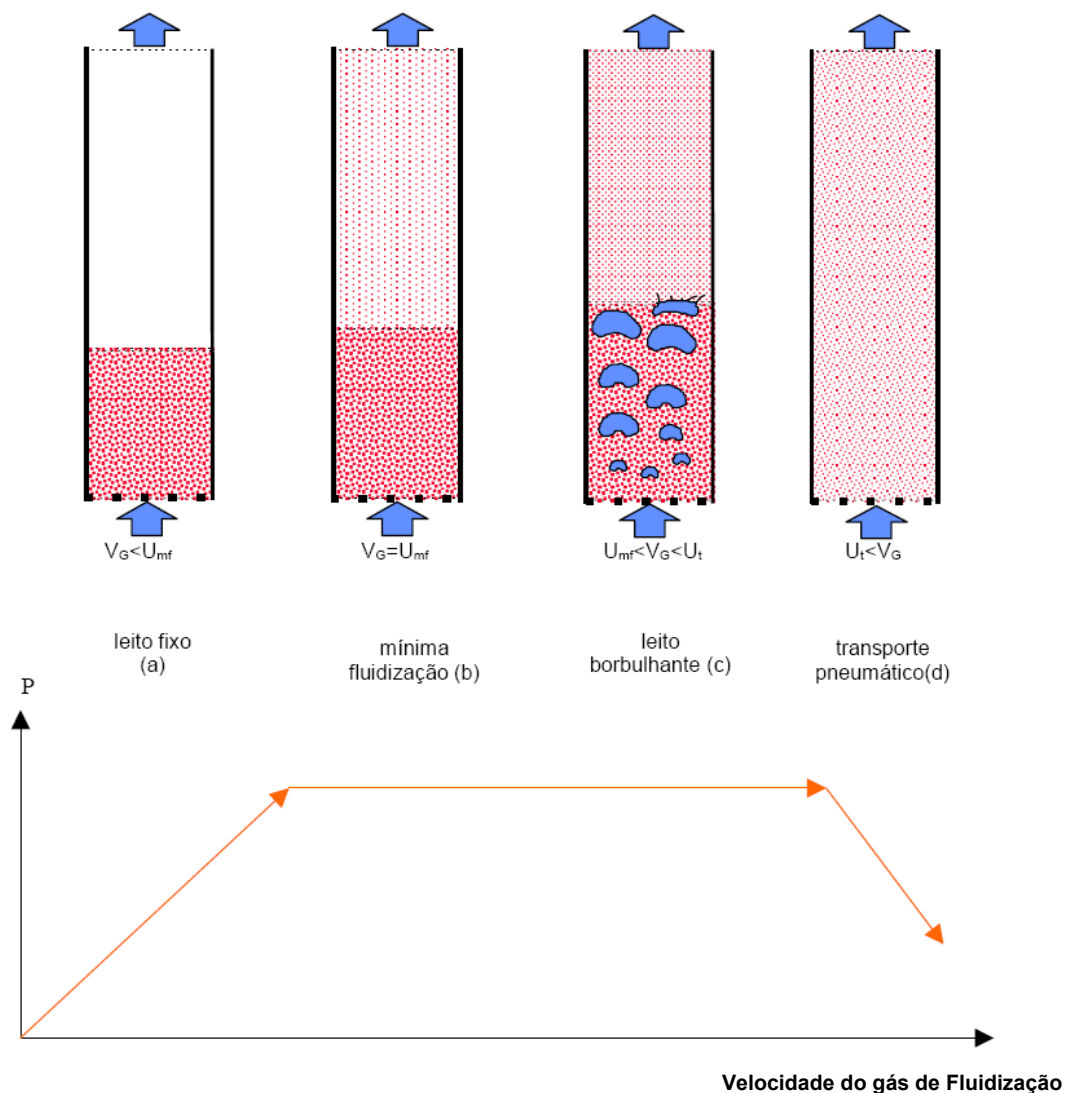


Figura 3.8 - Evolução da Pressão na base de um Leito de Material Particulado com o aumento da vazão do ar, (Cenbio, 2001).

Incrementos de velocidade provocam o surgimento de bolhas de gás no interior do material particulado em suspensão.

As bolhas, ao subirem, aumentam de tamanho, por redução de pressão arrastando grande quantidade de material particulado na sua subida. São elas as responsáveis pela 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, ou outro dispositivo semelhante, e serem devolvidas ao leito, têm-se um leito fluidizado circulante. Quando não há este retorno, tem-se um leito de borbulhante.

Nesse equipamento, a alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito.

O leito é aquecido inicialmente por um combustível auxiliar de qualquer natureza, até que se atinja uma temperatura suficientemente alta para o início do processo de gaseificação. A temperatura de operação é da ordem de 1000°C e o alcatrão é destruído termicamente (craqueamento), resultando em um gás bastante limpo, mas não totalmente. Para produzir um gás completamente isento de alcatrão, são necessárias temperaturas do leito entre 1100 e 1300°C .

Abaixo são mostrados os esquema desses tipos de gaseificadores:

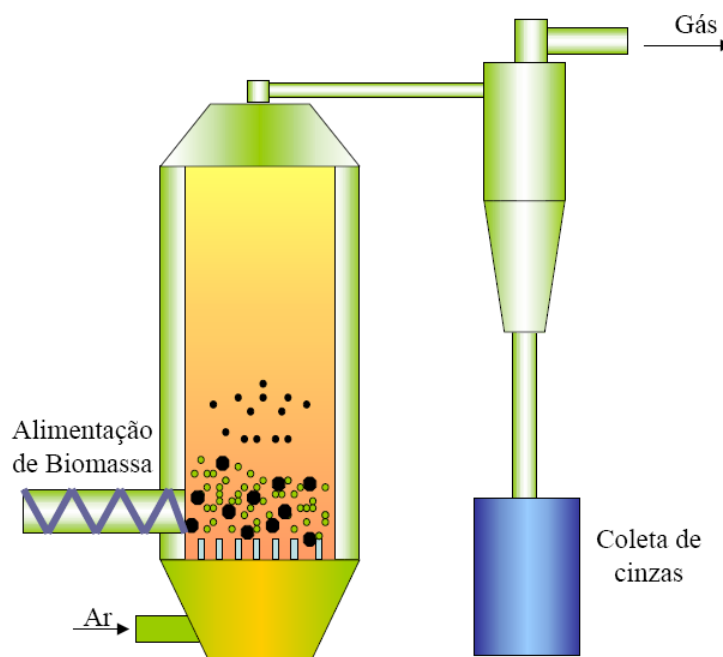


Figura 3.9 - Gaseificador de Leito Borbulhante, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007).

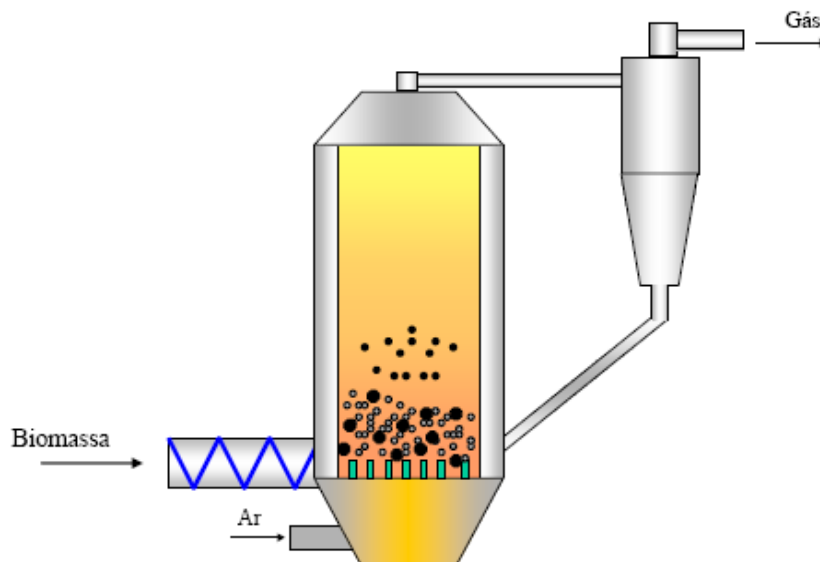


Figura 3.10 - Gaseificador de Leito Circulante, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007).

Além de alguma quantidade de alcatrão, o gás produzido tende a possuir parte das cinzas contidas originalmente no combustível, as quais devem ser removidas por sistemas de limpeza.

Matérias-primas com alto teor de cinzas não podem ser processadas nos gaseificadores hoje disponíveis. As altas temperaturas no interior do equipamento podem provocar a fusão das cinzas, que se solidificam rapidamente nas seções inferiores e provocam obstruções e entupimentos.

Apresenta-se como o mais indicado para instalações de grande capacidade, atingindo potências de até 25 MW.

3.3 - Comparação entre Gaseificadores

Cada tipo de gaseificador, como mostrado anteriormente, possui características específicas que os distinguem uns dos outros, sendo, portanto, necessário para a escolha do tipo que mais se adequa a aplicação desejada, fazer um estudo comparativo entre os esses reatores.

Normalmente, os gaseificadores de leito em fixo têm uma construção mais simples e são mais baratos do que os de leito fluidizado.

Entre os gaseificadores de leito fixo, os reatores contracorrente apresentam elevada eficiência térmica apesar do conteúdo relativamente alto de alcatrão no gás. Já nos gaseificadores de leito concorrente, o conteúdo de

alcatrão é baixo, conseqüência do seu craqueamento na zona de combustão. Um fator limitante do reator concorrente é o teor de umidade da biomassa aceitável, que está na faixa de 30%, devido a instabilidade que o vapor d'água pode provocar na zona de combustão. Assim, é indispensável uma operação de pré-secagem da biomassa que apresenta umidade superior a 30%.

Como principal desvantagem dos gaseificadores concorrente, destaca-se a necessidade de uniformidade granulométrica da biomassa em virtude da redução do diâmetro na região de combustão para formação da "garganta". Nestes equipamentos, as dimensões das partículas de combustível devem ser relativamente homogêneas e de tamanhos pré-estabelecidos no projeto do reator, a fim de garantir o movimento descendente da biomassa ao mesmo tempo em que permite a passagem do ar e dos gases.

Em relação ao Leito fluidizado podemos citar como vantagens a excelente distribuição de temperatura no leito ocasionando moderados níveis de alcatrão no gás. Como desvantagens pode-se citar a não trivialidade da operação desse tipo de reator e o fato da biomassa ter de ser alimentada em dimensões reduzidas para permitir a fluidização.

A principal diferença entre os leitos fluidizados é o fato de que, no reator de leito circulante, as partículas do leito que são arrastadas pelo processo são enviadas de volta promovendo uma maior conversão de carbono devido ao maior tempo de residência dessas partículas e no reator de leito borbulhante, essas partículas não re-circulam.

Outra diferença é a velocidade com que o material atravessa o leito. O leito borbulhante foi o primeiro a ser projetado, com velocidade de 1 m/s. No de leito circulante, resultado de projeto mais recente, o material atravessa em velocidade mais alta (7 a 10 m/s), permitindo melhor mistura do ar com o combustível a ser gaseificado.

O produto desejado de um gaseificador é um gás o mais puro possível e com bom poder calorífico. A concentração de CO, H₂ e CH₄ são os principais componentes, combustíveis, presentes no gás de gaseificação, pois determinam esse poder calorífico do gás enquanto o CO₂ e o N₂ são inertes.

A Tabela 3.1 apresenta alguns valores em termos de composição do gás gerado para gaseificadores operando com ar como agente oxidante. Pode-se

observar que o gaseificador que se destaca é o de leito fixo concorrente, o qual apresenta maior poder calorífico.

Tabela 3.1 - Valores comparativos da composição do gás gerado para diferentes tipos de gaseificadores, (Bridgwater, 1995).

Características do Gás Gerado						
Tipo	Composição do Gás (vol. %)					PC
	H₂	CO	CO₂	CH₄	N₂	MJ/m³
Leito Fluidizado	9	14	20	7	50	5,4
Contracorrente	11	24	9	3	53	5,5
Concorrente	17	21	13	1	48	5,7

As características do gás gerado, em termos de concentração dos componentes combustíveis, podem variar de acordo com o agente de gaseificação e com a pressão de operação do gaseificador como é mostrado na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.2 – Influência do agente de gaseificação no gás de biomassa (Kaltschmitt, 2001).

Componentes	Unidade	Agente de Gaseificação	
		Ar	Vapor/O₂
H ₂	%Vol.	6 – 19	26 – 55
CO	%Vol.	9 – 21	20 – 40
CO ₂	%Vol.	11 – 19	15 – 30
CH ₄	%Vol.	3 – 7	4 – 14
N ₂	%Vol.	42 – 60	0
PC	MJ/m³	3 – 6,5	12 – 16

Tabela 3.3 – Influência da pressão de operação do gaseificador no gás gerado (Kaltschmitt, 2001).

Componentes	Unidade	Tipo de Gaseificador	
		Atmosférico	Pressurizado
H ₂	%Vol.	6 – 19	4 – 15
CO	%Vol.	9 – 21	10 – 19
CO ₂	%Vol.	11 – 19	14 – 19
CH ₄	%Vol.	3 – 7	5 – 9
N ₂	%Vol.	42 – 60	45 – 60
PC	MJ/m³	3 – 6,5	3,5 – 6,5

CAPÍTULO IV
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4 - GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 - Limpeza do Gás

Como já citado, o gás produzido por um sistema de gaseificação contém determinada quantidade de contaminantes e o percentual desses contaminantes é diferente para cada tipo de tecnologia de gaseificação.

Para que o gás possa ser utilizado em um sistema de geração de potência como um motor alternativo ou uma turbina a gás ele deve ser o mais limpo possível.

A escolha do sistema de limpeza dos gases depende de uma série de fatores, como a eficiência, o custo operacional e de investimento, o espaço disponível, a característica do gás, o tamanho das partículas de biomassa, entre outros.

Como exemplo de um sistema de limpeza, podemos citar o uso de um ciclone para a retirada dos particulados e uma torre de lavagem para lavar o gás e retirar o particulado não retido pelo ciclone e para retirada do alcatrão.

O resfriamento do gás é outro método de limpeza e tem por finalidade a remoção do alcatrão pesado pela sua condensação. Todavia, esse tipo de tratamento não é indicado para grandes volumes de gás.

Uma alternativa bastante utilizada é o craqueamento térmico, pois a quantidade de alcatrão presente no gás é inversamente proporcional a temperatura do leito do gaseificador, portanto, quanto maior a temperatura do leito menor será a presença de alcatrão no gás produzido. De acordo com Bridgwater (1995), bons resultados são obtidos para temperaturas entre 1000 e 1300°C.

O gráfico apresentado na Figura 4.1 mostra valores para a variação do teor de alcatrão em função da temperatura do leito. Nesse gráfico é possível verificar essa correlação onde se percebe, efetivamente, a diminuição do teor de alcatrão com relação ao aumento da temperatura do leito.

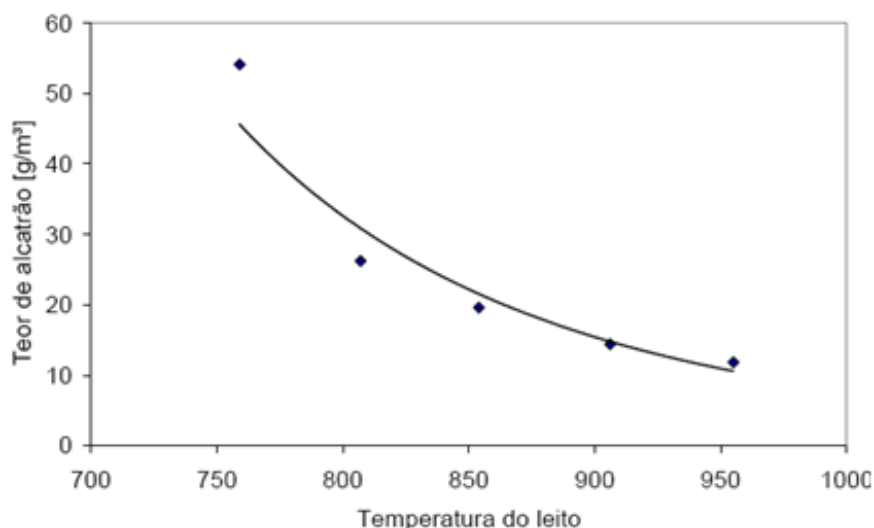


Figura 4.1 – Variação do teor de alcatrão no gás em função da temperatura do leito, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007)

Outro método de limpeza é o tratamento catalítico que também pode ser realizado internamente ao reator sendo os de leito fluidizado os mais indicados para esse tipo de tratamento.

Os catalisadores mais estudados são a *dolomita* (minério de magnésio e cálcio - $MgCO_3$ $CaCO_3$) e a *olivina* (silicatos de magnésio e ferro - $(Mg,Fe)_2SiO_4$) os quais têm obtido resultados significativos na redução do alcatrão.

A decomposição do alcatrão através de catalisadores ocorre em temperaturas controladas e mais baixas que o craqueamento térmico, obtendo-se eficiências de 90 a 95 % para temperaturas entre 800 e 900°C. Esse método de tratamento é chamado de craqueamento catalítico.

A Tabela 4.1 mostra um resumo das vantagens e desvantagens de alguns métodos utilizados no tratamento do gás de biomassa.

Tabela 4.1 - Comparação entre sistemas de limpeza de gases de biomassa (Belgiorno, 2003).

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Craqueamento Térmico	Controle Simples; Baixo Custo.	Perda no poder calorífico; Baixa Eficiência.
Craqueamento Catalítico	Não altera o poder calorífico; Não há resfriamento do gás.	Preço do Catalisador; Difícil Controle.
Lavadores	Fácil Controle; Controle da Poluição do ar.	Perdas no Poder Calorífico; Resfriamento do Gás.

4.2 - Aplicação do Gás Produzido

O gás combustível gerado nos gaseificadores pode ser utilizado para diversas finalidades, entre as quais podem ser citadas: a queima em caldeiras para geração de calor (aproveitamento térmico); geração de energia elétrica e síntese de combustíveis.

Para o aproveitamento da sua energia térmica, o gás não necessita de tratamento prévio podendo ser utilizado diretamente como sai do gaseificador.

Para geração de energia elétrica, equipamentos como turbina a gás e motores alternativos podem ser utilizados como acionadores primários, porém o gás necessita de tratamento para adequar os percentuais de alcatrão e particulado aos padrões aceitáveis do equipamento.

Combustíveis como o hidrogênio e o metanol podem ser processados a partir do gás de biomassa através do processo denominado reforma a vapor.

4.2.1 - Aproveitamento térmico do gás de biomassa (queima direta)

A queima do gás para geração de calor é a forma mais direta de utilização do gás de biomassa. Essa forma de aproveitamento pode ser utilizada para geração de ciclos de potência e para secagem.

A co-combustão é outra alternativa bem interessante da utilização do gás de biomassa para a geração de calor. Na co-combustão o gás é utilizado em conjunto com outro combustível, a fim de complementar a energia necessária ao processo. Essa aplicação possibilita a diminuição das emissões de poluentes atmosféricos como o NO_x (óxido de nitrogênio) quando comparada à queima exclusiva de um combustível fóssil.

4.2.2 - Acionadores Primários

A utilização do gás de biomassa para geração de energia elétrica pode ser feita através de diferentes tipos de acionadores (Motor de Combustão Interna, Motor de Combustão Externa, Célula Combustível e Micro-turbinas), todavia algumas alternativas podem ser mais atrativas que outras devido ao tratamento que esse gás necessite para ser utilizado.

Diferente das tecnologias centralizadas, como as grandes plantas de geração de energia, esses acionadores podem ser alocados próximo ao consumidor onde a energia será consumida, permitem o controle local da geração de potência, um uso mais eficiente do calor residual e a redução das emissões de poluentes atmosféricos.

A geração combinada de potência mecânica e térmica, proporcionada por esses acionadores é denominada de co-geração.

A co-geração é aplicável em instalações que necessitem simultaneamente de energia térmica e elétrica, em diversos segmentos:

- **Indústria:** alimentos, bebidas, química, petroquímica, papel e celulose, cerâmica, farmacêutica;
- **Comércio:** shopping centers, supermercados, complexos comerciais;
- **Serviços:** hospitais, hotéis, aeroportos, grandes condomínios.

Na co-geração pode-se alcançar um aproveitamento de até 80% de energia contida no combustível.

Abaixo são apresentadas as tecnologias de acionamento primário:

Motor de Combustão Interna

O motor de combustão interna, também chamando de motor de explosão, é uma máquina térmica alternativa, que converte a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. A conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases.

Esses motores podem ser classificados de acordo com o modo de queima do combustível em: *motores com ignição por centelha (motores a gasolina e álcool)*, que são aplicados em carros de passeio e motocicletas, e *motores com ignição por compressão (Motores Diesel)*, que são usados para impulsionar veículos mais pesados .

Motores de combustão interna utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos

de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e finalmente exaustão.

O calor residual da queima de um combustível em um motor de combustão interna pode ser recuperado a partir dos gases de exaustão e do sistema de resfriamento do bloco do motor. Cerca de 60% da energia fornecida pelo combustível é transformada em calor e parte dela pode ser recuperada.

Esse tipo de motor é muito difundido em escala comercial devido ao seu reduzido custo de instalação, sua simplicidade e fácil manutenção, além do fato de poderem ser operados com gás proveniente da biomassa.

A Figura 4.4 apresenta um motor alternativo de combustão interna da Caterpillar. De acordo com Bailey (2002) os motores de combustão interna têm eficiência entre 25 e 50 %.



Figura 4.2 - Motor de combustão interna Caterpillar, (Rubenildo Vieira Andrade, 2007).

A maioria dos projetos envolvendo geração de energia a partir de biomassa gaseificada envolve motores alternativos de combustão interna (MACI) para a geração de potência de eixo que será então transformada em energia elétrica através de um gerador. Os projetos envolvem motores a gasolina, a gás e a diesel.

Os gaseificadores normalmente empregados para esse fim são os concorrente, por possibilitar, devido a sua configuração característica, um gás resultante com uma menor concentração de alcatrão que os gaseificadores contracorrente.

Em relação aos motores a diesel, eles não podem trabalhar somente com o gás de biomassa, podendo o diesel ser substituído em até 85 % e devendo-se na partida utilizar o diesel e introduzir o gás gradativamente.

A eficiência obtida nos motores quando são operados com gás de biomassa é menor comparado aos combustíveis para os quais foram projetados. Isso se deve ao seu baixo poder calorífico, entretanto os índices de emissões de poluentes são menores devido à biomassa possuir valores muito baixos ou nulos de enxofre na sua composição. O percentual de NO_x , também é menor.

A Figura 4.5 apresenta um gráfico que mostra a variação da eficiência em função da potência de um motor diesel funcionando somente com diesel e com a mistura de diesel mais gás de biomassa. A máxima eficiência obtida com a mistura foi de 14,71 % e com diesel puro foi de 22,41 %. Esses dados foram obtidos para um motor Perkins de 49 HP (Bhattacharya, 2001).

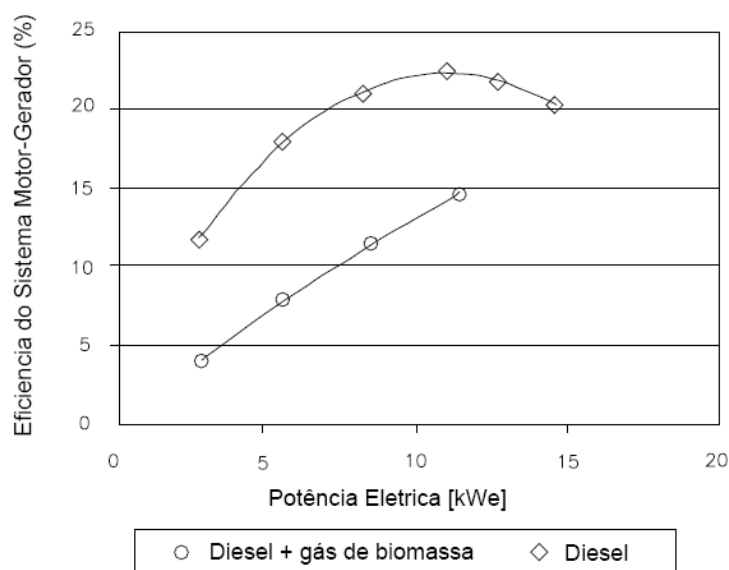


Figura 4.3 - Eficiência do motor para utilização de diesel e a mistura diesel + gás de biomassa como combustível com relação variação de potência do motor (Bhattacharya, 2001).

Em motores a gasolina carburados, a mistura utilizada geralmente é de 1:1, podendo ser introduzida diretamente no local do carburador.

O volume de gás de biomassa que será consumido por um motor é de fundamental importância para o dimensionamento do gaseificador que será utilizado e pode ser determinado pela equação abaixo:

$$Vol_{gas} = \frac{Rotação_{rpm} \cdot 60 \cdot V_c \cdot L_f \cdot G_f}{2 \cdot 1000}$$

Vol_{gás} : Volume do gás consumido

Rotação : Rotação do motor em rpm

V_c : Volume do cilindro do motor (L/ciclo)

L_f : fator de carga do motor ou rendimento volumétrico

G_f : Fração de gás na mistura gás – ar

2 : fator de conversão para motores de 4 tempos (o cilindro é cheio uma vez a cada duas revoluções do eixo).

1000 : fator de conversão de L para m³

A Figura 4.6 mostra uma visão global de como pode ser o arranjo de um sistema de geração de potência utilizando gaseificação e motor de combustão interna. O gaseificador é do tipo concorrente capaz de gerar um gás de baixo teor de alcatrão. O gás passa por um sistema de limpeza composto de um ciclone, um trocador de calor e um filtro, posteriormente o gás é misturado em um carburador e finalmente é admitido na câmara de combustão do motor.

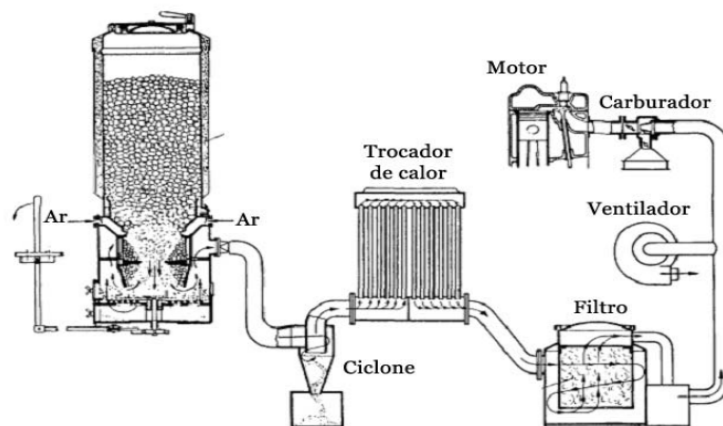


Figura 4.4 - Esquema de acoplamento gaseificador motor de combustão interna (Solar Energy Research Institute, 1988).

A utilização do gás de biomassa em motores de combustão interna já foi bem difundida, principalmente no período da segunda guerra mundial, posteriormente foi gradativamente desaparecendo devido à versatilidade dos motores a gasolina

Motor de Combustão Externa (Motor Stirling)

O motor Stirling é um motor de combustão externa, aperfeiçoado pelo pastor escocês Robert Stirling em 1816.

O motor Stirling consiste de um motor alternativo a pistão onde os processos de combustão ocorrem externamente ao motor (fonte externa de calor). Neste caso, os gases de combustão transferem calor a um segundo fluido que opera como fluido de trabalho, o qual nunca deixa o interior do motor, tratando-se portanto de um motor de ciclo fechado.

Esse acionador primário pode ser movido por qualquer fonte capaz de fornecer calor para seu acionamento, desde combustíveis fósseis até renováveis.

O motor Stirling, por ser uma máquina de combustão externa, não precisa de um gás extremamente limpo, necessitando apenas que tenha a energia adequada para seu funcionamento. Deve-se ressaltar que sua eficiência depende da temperatura do gás. Esses gases deixam o motor à temperatura da ordem de 600°C, tendo assim excelente potencial para co-geração.

Os maiores motores tipo Stirling, que estão sendo desenvolvidos estão na faixa de 10 a 40 kW.

A figura abaixo mostra um motor Stirling de 3 kW desenvolvido pelo centro de pesquisas Joanneum Research na Áustria:

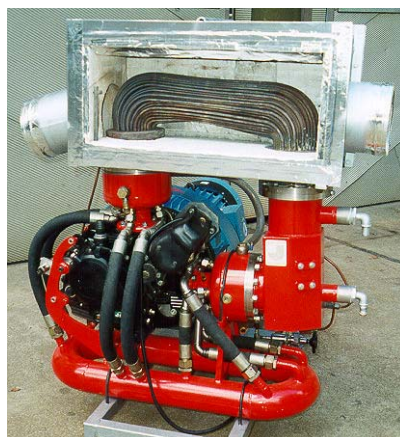


Figura 4.5 – Motor Stirling fabricado pelo centro de pesquisas Joanneum Research na Áustria, (MSc. Vladimir Rafael Melián Cobas).

Jensen (2002) desenvolveu um estudo sobre esse tema onde um esquema do sistema estudado por ele é apresentado na Figura abaixo. Um gaseificador do tipo contracorrente fornece gás para o queimador localizado na parte superior do motor Stirling onde é queimado fornecendo energia para o mesmo.

O ar para combustão utilizado no queimador é pré-aquecido à temperatura de 600°C. Parte do gás de exaustão resultante da queima é utilizado conjuntamente com ar como agente de gaseificação.

Esse sistema gaseificador acoplado ao motor Stirling apresenta eficiência global de 17,7%, sendo a eficiência elétrica do motor Stirling de cerca de 30,6%, uma vez que parte da energia é perdida na etapa de combustão ou na transferência de calor.

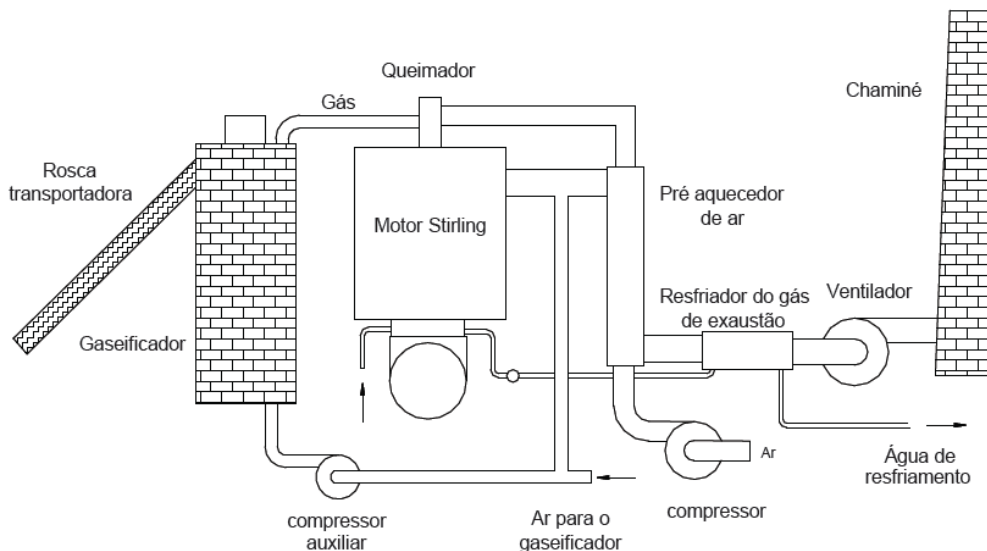


Figura 4.6 - Sistema gaseificador acoplado a motor Stirling, (JENSEN; CARLSEN, 2002)

Atrativos dos Motor Stirling:

- Eficiência global, na faixa dos 30 %;
- A eficiência em cargas parciais tem mostrado ser boa;
- Baixo nível de ruído e operação segura;
- Podem utilizar uma grade variedade de combustíveis;
- Possibilidade de co-geração;
- Alguns fabricantes prevêm uma vida útil de 25000 horas.

Desvantagens:

- Têm sido testadas poucas variedades de combustível;
- Até agora as experiências nos testes se concentram em motores de pequenas potências;
- Os dados de confiabilidade e vida útil são escassos.

Turbina a gás

A turbina a gás é definida como sendo uma máquina térmica de combustão interna não alternativa, onde a energia térmica contida nos gases quentes provenientes de uma combustão é convertida em trabalho mecânico.

Um exemplo do motor de combustão interna as turbinas a gás são acionadas pelos próprios gases quentes, produto da combustão, o que dispensa a utilização de um fluido de trabalho intermediário, como o vapor, ou outro fluido.

As principais partes dessa máquina são: o compressor, a câmara de combustão e a turbina.

Seu funcionamento começa com a admissão de ar em condição ambiente ou refrigerado. O ar entra no compressor, onde ocorre compressão adiabática com aumento de pressão e conseqüentemente também aumento de temperatura. No combustor, este ar é misturado a um combustível, entra em combustão, e a mistura sofre um aumento de volume a pressão constante. Estes gases quentes e pressurizados acionam a turbina de potência, gerando trabalho mecânico. Depois, os gases são finalmente liberados ainda em alta temperatura.

As turbinas apresentam eficiência em torno de 20 a 25%.

As turbinas com capacidade elétrica entre 25 a 250 kW são denominadas de micro-turbinas. Na figura abaixo é apresentada uma micro-turbina com suas principais partes constituintes.

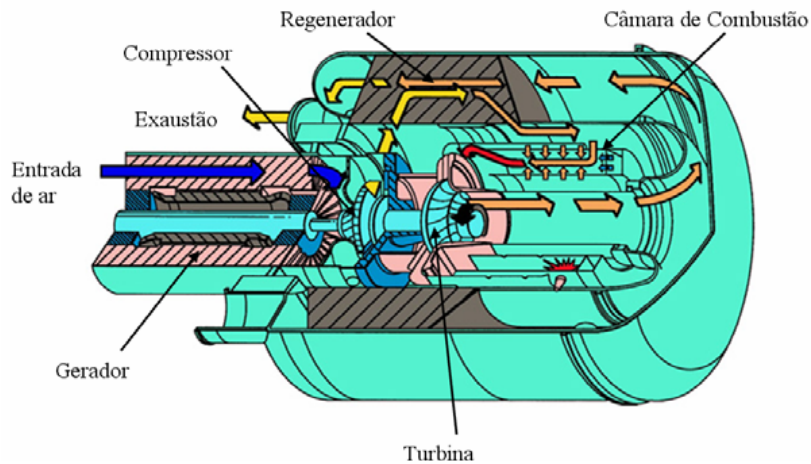


Figura 4.7 – Principais partes de uma micro-turbina, (Rodgers; Arroyo 2000).

A potência desse equipamento sofre influência da temperatura e da pressão ambiente. A Figura 4.10 mostra um gráfico adaptado do manual da Capstone de uma turbina de 30 kW que relaciona a perda de potência da máquina com o aumento da temperatura, onde se observa uma queda na potência da máquina para temperaturas superiores a 15°C. O manual do fabricante diz que há decréscimo na potência em 1% para cada 100 metros acima do nível do mar.

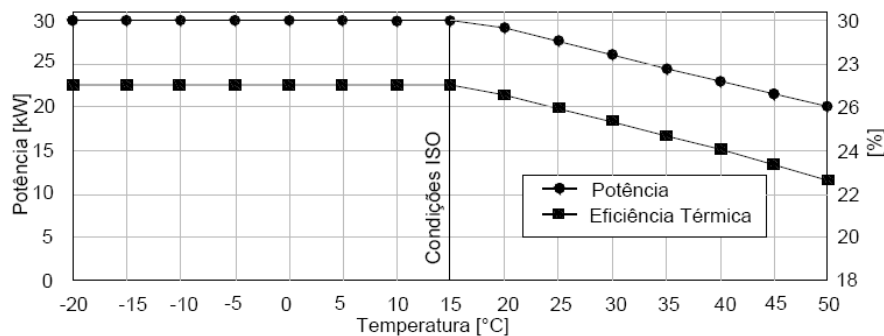


Figura 4.8 - Influência da temperatura na eficiência de uma micro-turbina de 30 kW, (adaptado de: Manual Capstone Microturbine model 330, 2001).

Uma turbina a gás pode ser operada com gás de biomassa, embora a integração entre a turbina e o gaseificador ainda não se apresente em escala comercial, havendo poucos projetos demonstrativos.

A qualidade do gás é um fator importante para a sua utilização como combustível em turbinas a gás. A presença de alcatrão e particulado no gás pode causar uma redução significativa da vida útil de uma turbina devido à

ação corrosiva e abrasiva que os mesmos podem exercer sobre ela diante das altas rotações e temperaturas atingidas durante o seu funcionamento.

A gaseificação aplicada conjuntamente com turbinas a gás é, geralmente, utilizada em ciclo combinado. Onde o gás de biomassa é queimado em uma turbina a gás e os gases de escape são recuperados em uma caldeira de recuperação que irá gerar vapor para um ciclo de potência. Isso é feito para aumentar a eficiência do processo.

Entre os atrativos das Micro-turbinas pode-se mencionar:

- Os custos capitais são relativamente baixos;
- Boa eficiência em torno de 30%;
- Baixas emissões (< 10 ppm de NOx);
- Possibilidade de cogeração;
- Excelente modularidade.

Principais barreiras:

- O custo de manutenção é desconhecido;
- A eficiência a cargas parciais é questionável;
- Limitada experiência de utilização;
- O uso de rolamentos a ar reduz os custos de manutenção, mas é imprescindível o uso de filtros de ar.

Célula Combustível (FC)

As células a combustíveis são dispositivos que convertem a energia química de uma reação, envolvendo hidrogênio (combustível) e ar (agente oxidante) na presença de um catalisador, em eletricidade, ou seja, é basicamente uma bateria em que é consumido um combustível e é liberada energia.

Uma célula consiste de dois eletrodos (anodo e catodo), separados por um eletrólito de diferentes composições químicas, onde o H₂ que passa pelo

ânodo e o ar que passa pelo catodo, são alimentados continuamente, como mostrado na ilustração a seguir:

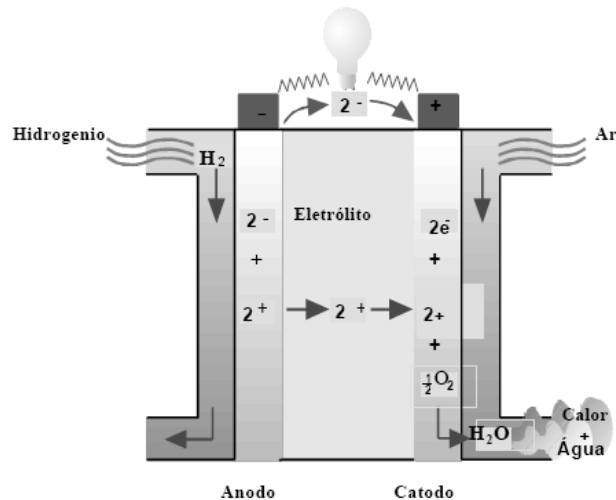


Figura 4.9 – Esquema básico do funcionamento de uma célula combustível, (MSc. Vladimir Rafael Melián Cobas)

O eletrólito tem a função de transportar os íons produzidos no ânodo, ou no cátodo, para o eletrodo contrário, e o catalisador de acelerar as reações eletroquímicas nos eletrodos.

Dos acionadores primários estudados até aqui, a célula a combustível é a mais ambientalmente amigável, operando com baixo nível de ruído e baixas emissões de poluentes, principalmente ao se utilizar hidrogênio puro como combustível, pois terá como único sub-produto a água.

As células combustíveis operam com 40 a 60% de eficiência, sendo que em regime de co-geração, pode chegar a valores em torno de 85 % (Bailey, 2002). Os gases quentes produzidos durante o processo de geração de energia são liberados a temperaturas entre 200 e 1000 °C, dependendo do tipo de célula combustível (Silveira, 1999).

As células combustíveis geralmente são classificadas pelo o tipo de eletrólito utilizado. Abaixo são relacionados os principais tipos de FC:

- Acido fosfórico (PAFC);
- Membrana de troca de prótons (PEMFC);
- Carbonato fundido (MCFC);
- Oxido Sólido (SOFC).

A Tabela 4.3 apresenta as características dos diferentes tipos de células combustíveis.

Tabela 4.2 - Características de diferentes tipos de células combustíveis, Fonte: (FUEL CELL HANDBOOK, 2002).

Tipo de Célula	Alcalina (AFC)	Membrana de Troca de Próton (PEM)	Ácido Fosfórico (PAFC)	Carbonato (MCFC)	Óxido de Sólido (SOFC)
Eletrólito	Solução aquosa alcalina de hidróxido de potássio	Polímero ácido orgânico poli-perfluorosulfônico	Ácido fosfórico estabilizado	Solução carbonato Molten	Eletrólito sólido de cerâmica
Unidade de potência típica (kW)	≤100	0,1-500	5-200 (plantas de até 5.000)	800-2.000 (plantas até 100.000)	2.5-100.000
Eficiência elétrica	até 70%	até 50%	40-45%	50-57%	45-50%
Custo específico (\$ kW ⁻¹)	-	4.000	3.000-3.500	800-2.000	1.300-2.000
Disponibilidade comercial	Não-disponível para cogeração	P&D	sim	P&D	P&D
Temperatura de operação (°C)	71,11-98,89	48,88-98,89	160-210	676,66	815,55-982,22
Pressão de operação (bar)	-	1,013-5,10	1,013-8,13	1,013-3,033	1,013 ≥ 10,34
Aplicações	Espacial e militar	Geração de energia, ônibus, propulsão automotiva	Geração de energia	Geração de energia	Geração de energia

P&D: Pesquisa e Desenvolvimento

Do mesmo modo que o hidrogênio, o gás de biomassa pode ser utilizado como combustível para este tipo de acionador.

O gás pobre não pode ser usado diretamente em células a combustível havendo a necessidade de um processo de tratamento para converter o metano em monóxido do carbono na presença de vapor através de um processo de reforma, o monóxido de carbono em hidrogênio através da chamada reação de “shift” e o CO₂ ser removido.

Em particular, as células do tipo MCFC (carbonato fundido) e SOFC (óxido sólido) devido operarem a altas temperaturas e por apresentarem tolerância à presença de CO no combustível, o qual diminui a eficiência do catalisador e eletrólito e reduz a vida útil da célula, seriam as mais adequadas à operação com gás de biomassa.

O custo das células combustível ainda é muito elevado para ser competitivo hoje em dia.

As principais barreiras para o uso desses acionadores são:

- Custo – as predições de redução de custos não estão materializadas e os preços de alguns tipos de células ainda não estão definidos;
- Incertezas com relação à manutenção;
- Dificuldades com relação à aceitação do hidrogênio como combustível.

Em contraste com as barreiras mencionadas as FC apresentam características atrativas:

- O único subproduto é a água;
- Elevadas eficiências, 50 a 60 %;
- A possibilidade de cogeração.

CAPÍTULO V
PROJETOS EM DESENVOLVIMENTO

5 - PROJETOS EM DESENVOLVIMENTO

Alguns projetos têm sido desenvolvidos na área de gaseificação de biomassa ao redor do mundo, principalmente na Europa, América do Norte e Ásia.

Muitos desses projetos foram feitos para aplicações específicas sendo utilizados em diversos segmentos.

Atualmente no Brasil estão sendo desenvolvidos vários projetos de gaseificação em centros de pesquisa de algumas universidades, o que faz aumentar o potencial brasileiro para o uso dessa tecnologia.

5.1 - Gaseificadores para geração de calor

Esses tipos de reatores são comercialmente disponíveis sendo os mais conhecidos os das empresas: BIONEER (leito fixo, contracorrente), PRM ENERGY SYSTEMS (leito fixo, contracorrente), a FOSTER WHEELER (antiga AHLSTROM) e LURGI UMWELT (ambos leito fluidizado circulante).

Muitos desses gaseificadores de pequena escala estão instalados em alguns países em desenvolvimento com a finalidade, por exemplo, de suprir calor para fornos cerâmicos.

Cerca de 10 gaseificadores *Bioneer* estão em operação com sucesso, há alguns anos, na Finlândia e Suécia. Em alguns casos o gás gerado é utilizado para queima em caldeiras e para aquecimento distrital. O gaseificador *Bioneer* agora é comercializado pela empresa *Condens Oy da Finlândia*.

A *PRM Energy Systems* tem 18 unidades operando em quatro continentes, gaseificando 500000 toneladas por ano de biomassa, principalmente, casca de arroz. Geralmente, o calor é utilizado para secagem ou para gerar vapor saturado a baixa pressão.

O primeiro gaseificador de leito fluidizado foi instalado pela empresa *Ahlstrom* da Finlândia em meados dos anos 80.

O primeiro gaseificador *Lurgi Umwelt* de leito fluidizado foi construído em 1987 em Pöls, Áustria. Desde 1996 uma planta de gaseificação tipo *Lurgi Umwelt* está em operação em Rüdendorfer Zement GmbH, Alemanha.

5.2 - Gaseificador para co-combustão em Centrais Elétricas

O primeiro gaseificador para co-combustão foi instalado em Zeltweg, Áustria, seguido por outros em Lahti, Finlândia, Amer, Holanda e Vermont nos Estados Unidos. Apesar do sucesso de operação, a planta da Áustria foi recentemente fechada. Lahti e Vermont estão em plena operação, enquanto que o sistema de limpeza de gás da planta de Amer está sendo modificado. A Tabela 8.1 apresenta informações sobre algumas plantas em andamento com esse tipo de tecnologia.

Tabela 5.1 - Gaseificadores de co-combustão, (Cenbio, 2001).

Localização	Planta	Capacidade MWt	Situação
Zeltweg, Áustria	LFC, alimentado diretamente na caldeira de carvão pulverizado.	10	Operacional desde 1998 e recentemente desativada
Lahti, Finlândia	LFC, Foster Wheeler, alimentado diretamente na caldeira de carvão pulverizado.	60	Operacional desde 1998, modificando o sistema de limpeza dos gases.
Amer, Holanda	LFC, Lurgi, com limpeza do gás e remoção de amônia, alimentado diretamente na caldeira de carvão pulverizado.	80	Primeiro teste executado em 2000, sendo trabalhado o sistema de limpeza do gás.
Värnamo, Suécia	LFC pressurizado, limpeza a quente do gás	7	Sendo remodelado para produção de hidrogênio.
Arbre, Yorkshire, UK	LFB com craqueamento do alcatrão	9	EPRI é a nova dona, situação incerta
Gussing, Áustria.	LFC rápido	2	Operacional com motor a gás

LFC – Leito fluidizado Circulante; LFB – Leito Fluidizado Borbulhante.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 podem ser vistas as plantas de Arbre, Yorkshire, UK e Värnamo, Suécia respectivamente. A primeira encontra-se desativada.



Figura 5.1 - Planta de Gaseificação de Arbre, (Cenbio, 2001).



Figura 5.2 - Instalação da Planta de Gaseificação de Värnamo na Suécia, (Cenbio, 2001).

5.3 - Organizações de Pesquisas de Gaseificação no Brasil

5.3.1 - Universidade de Campinas (Unicamp)

A equipe do Laboratório de Combustíveis e Combustão da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp está realizando algumas pesquisas na área de gaseificação de biomassa.

As pesquisas em andamento são:

- Desenvolvimento de gaseificador de biomassa para eletrificação rural (testes em reator de 180 kW; acoplamento a grupo gerador; estudos de viabilidade técnica e econômica; prospecção de mercado para a tecnologia);
- Influência da injeção de vapor na gaseificação de biomassa;
- Cinética química da pirólise de biomassa;
- Secagem de bagaço com gás de gaseificação;
- Cogaseificação de lodo de esgoto.

5.3.2 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Nos últimos anos, a equipe do Laboratório de Combustão e Gaseificação do IPT, projetou e construiu várias instalações piloto, que permanecem montadas no Laboratório para a execução de trabalhos experimentais e para o atendimento de trabalhos de interesse do meio industrial.

Esses equipamentos possuem potência relativamente elevada, e objetivam verificar experimentalmente a maioria dos problemas passíveis de ocorrerem numa instalação de porte industrial, bem como utilizar parâmetros obtidos na sua operação para o dimensionamento de unidades industriais com razoável segurança.

As figuras abaixo mostram alguns dos reatores instalados no laboratório do IPT:

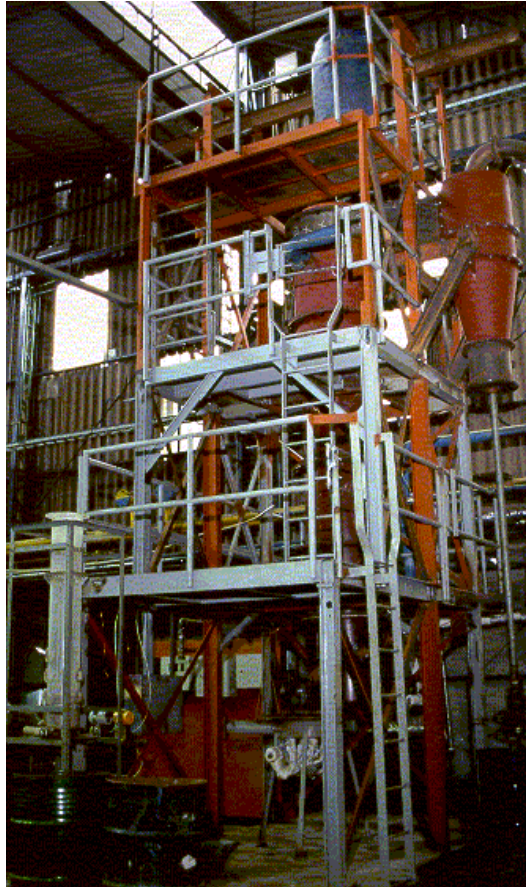


Figura 5.3 - Gaseificador de Leito Fluidizado Instalado no IPT, (Cenbio, 2001).



Figura 5.4 - Gaseificador de Leito Fixo Instalado no IPT, (Cenbio, 2001).

Atualmente o IPT desenvolve em parceria com o CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa), o BUN (Biomass Users Network do Brasil) e a Universidade do Amazonas o projeto GASEIFAMAZ “*Comparação entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa Existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte*”. Esse projeto é patrocinado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) empresa de fomento do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT).

Os resultados esperados do projeto são:

- Fornecer uma alternativa de energia elétrica para as comunidades isoladas da região amazônica;
- Adaptar a tecnologia de gaseificação de biomassa para a região amazônica;
- Capacitar recursos humanos nas áreas de operação, manutenção e construção de gaseificadores de biomassa;
- Desenvolvimento tecnológico que permitirá a expansão desse tipo de tecnologia para toda a região.

5.3.3 - Universidade Federal do Pará

O Departamento de Engenharia Elétrica junto com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA) vem desenvolvendo vários projetos de biomassa, como: Utilização de Resíduos da Flora Paraense para Produção de Briquetes Energéticos, Utilização de Resíduos da Flora Paraense para a Produção de Energia, Utilização de Resíduos de Madeira para a Produção de Vapor, Utilização de Resíduos da Flora Paraense para Obtenção de Produtos de Alto Valor Agregado, Utilização de Resíduos de Capoeiras para produção de Briquetes Energéticos.

Atualmente a UFPA está desenvolvendo o “Programa ENERBIO / UFPA Utilização de Resíduos de Biomassa de Açaí e Cacau para a Produção de Energia”. O projeto consiste em:

- Obtenção do poder calorífico do açaí e do cacau;

- Realização de testes através de gaseificação (gaseificadores importados do Indian Institute of Science);
- Realização de testes de combustão direta;
- Briqueteamento dos resíduos do cacau;
- Briqueteamento dos resíduos do açaí;
- Utilização de briquetes dos resíduos de cacau e açaí para a geração de energia.

Resultados esperados:

- Melhoria na qualidade de vida da população;
- Adequação as normas MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo);
- Limpeza ambiental;
- Geração e manutenção de empregos diretos e indiretos;
- Viabilidade da qualidade de vida para gerações futuras.

5.3.4 - Universidade Federal de Itajubá

A Universidade Federal de Itajubá está trabalhando atualmente em um projeto de gaseificação financiado pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), COPERSUCAR (Cooperativa de Produtos de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo Ltda) e pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos). O gaseificador é de leito fluidizado circulante de 210KW e será alimentado com casca de arroz, serragem e bagaço de cana.

O projeto pretende verificar a operação dos diferentes sistemas e testar a seqüência de partida.

5.4 - Geração de Energia Elétrica a partir da Biomassa no Brasil

A geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil, conta com significativos atrativos:

- País de clima tropical, com elevada taxa de insolação ao longo de todo ano;
- Grande extensão territorial, permitindo a existência de culturas energéticas sem exercer pressão sobre a área de plantio alimentar;
- Potencial de produção alimentar com significativa presença de resíduos vegetais;
- Manutenção do perfil renovável da geração elétrica brasileira;
- A exaustão dos potenciais hidroelétricos das bacias hidrológicas mais próximas dos grandes centros consumidores, elevando os custos de geração e transmissão da energia elétrica;
- A elevação dos custos de instalações hidroelétricas, principalmente a partir da internalização dos custos ambientais;
- Incremento da participação de unidades termelétricas na matriz de geração, aumentando a flexibilidade do sistema e reduzindo sua incerteza hidrológica.

As principais limitações ao emprego de biomassa na produção de eletricidade são:

- Os custos de produção e do transporte da biomassa são determinantes para a viabilidade econômica dos projetos que prevêem seu uso para fins energéticos, impondo a adoção de práticas silviculturais específicas, geralmente através da formação de florestas homogêneas ou, mais raramente, através da introdução de práticas de manejo sustentável de formações nativas. Tais requerimentos adicionais, comparativamente às plantas térmicas convencionais, têm grande relevância ambiental e são um ponto comum de todos os projetos de maior escala para emprego de biomassa;
- A reduzida eficiência de conversão energética da biomassa em eletricidade e a baixa capacidade unitária dos sistemas, considerando as tecnologias convencionais, que estão praticamente limitadas às instalações de potência a vapor, prejudicam a economicidade e reduzem o interesse em sua implementação;

- Há necessidade de que os benefícios ambientais sejam assegurados em toda cadeia de produção de biomassa e eletricidade, dado que a questão ecológica é uma de suas principais justificativas. A produção de culturas energéticas em larga escala pode ter importantes efeitos colaterais, tais como problemas associados a monocultura, perda da biodiversidade, degradação do solo e o possível excesso no uso de defensivos agrícolas;
- Há complexidade, em termos da multidisciplinaridade e da integração dos sistemas que usam biomassa. Essa complexidade deriva da combinação de fatores que não são só técnicos e econômicos, mas abrangem as questões ambientais, políticas, estratégicas, etc.

Tendo em vista a relevância dos aspectos positivos e as perspectivas de eliminação das limitações em um período de médio prazo, vários países têm planos de viabilização de empreendimentos de produção de energia a partir da biomassa.

CAPÍTULO VI
CONCLUSÃO

6 - CONCLUSÃO

Mesmo com uma farta malha hidrográfica que lhe serve de principal meio de geração de energia, a produção energética a partir da gaseificação da biomassa, no Brasil, pode ser vista como uma forma promissora devido a abundância deste insumo existente no país.

Apesar da gaseificação de biomassa ser uma tecnologia já conhecida e dominada, há ainda a necessidade de aperfeiçoamento dos reatores para geração de um gás mais limpo e de maior poder calorífico. Neste sentido numerosos estudos em busca de uma maior desenvolvimento dessas técnicas têm sido realizados ao redor do mundo, principalmente pela preocupação ambiental crescente e com a preocupação do futuro dos combustíveis fósseis, uma vez que eles não são renováveis. Neste contexto o Brasil se encontra um pouco aquém dos níveis tecnológicos dos países desenvolvidos.

No contexto de um desenvolvimento sustentável, a conversão da biomassa bruta em um combustível gasoso, traz uma grande vantagem que são os impactos praticamente nulos à natureza.

Para geração em grande escala (faixa de MW) a utilização da gaseificação de biomassa ainda é muito reduzida, não passando de alguns poucos projetos, muitos dos quais já abandonados.

A viabilidade econômica desta tecnologia dependerá de forma fundamental da internacionalização dos benefícios ambientais e da utilização de mecanismos de incentivo, sejam nacionais ou internacionais para atingir níveis de investimento e custos operacionais mais viáveis.

BIBLIOGRAFIA

Referências Bibliográficas

ABATZOGLOU, N.; BAKER N.; HASLER, P.; KNOEF H. *The development of a draft protocol for the sampling and analysis of particulate and organic contaminants in the gas from small biomass gasifiers*. Biomass and Bioenergy, v. 18, p. 5- 17, 2000.

HORTA NOGUEIRA, L. A., & Et all. *Dendroenergia: Fundamentos e aplicação*, ANEEL, Brasília, 2000.

ALANNE, K.; SAARI, A. *Sustainable small-scale CHP technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 8, p. 401 – 431.

ASDRUBALI, F.; GRIGNAFFINI, S. *Experimental evaluation of the performance of a H₂O-LiBr absorption refrigerator under different service conditions*. International Journal of Refrigeration, v. 28, p. 489-497.

ASHARE 1996 HVAC SYSTEMS AND EQUIPAMENT HANDBOOK, *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*.

BAILEY, O.; OUAGLAL, B.; BARTHOLOMEW, E.; MARNAY, C.; BOURASSA, N. *An Engineering-Economic Analysis of Combined Heat and Power Technologies in a μ Grid Application*, United States Environmental Protection Agency, Berkeley CA.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2005. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>.

BANCO CENTRAL DO BRASIL, *FOCUS*. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/GCI/PORT/focus/I20020228Fim%20do%20Racionamento%20de%20Energia.pdf>>.

BELGIORNO, V.; DE FEO, G.; DELLA ROCCA, C.; NAPOLI, R. M. A. *Energy from gasification of solid wastes*. Waste Management, v. 23, p. 1-15, 2003.

BHATTACHARYA, S. C.; SIDDIQUE, A. H. Md.; PHAM, H. L. *A study on wood gasification for low-tar gas production*. Energy, v. 24, p. 285-296, abril 1999.

BHATTACHARYA, S.C; DUTTA, A. *Two-stage gasification of wood with preheated air supply: a promising technique for producing gas of low tar content*". ISES 99 Solar World Congress, Israel.

BHATTACHARYA, S.C; HLA, S. S.; PHAM, H. *A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system*. Biomass & Bioenergy, v. 21, p. 445-460.

BRANDT, P.; LARSEN, E.; HENRIKSEN, U. *High tar reduction in a two-stage gasifier*. Energy & Fuel, v. 14, p. 816-819, 2000.

BRIDGWATER, A. V. *The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation*. Fuel, v. 74, p. 631 – 653.

BROWN, M. D.; BAKER, E. G.; MUDGE, L. K. *Environmental design considerations for thermochemical biomass energy*. Biomass, v. 11, p. 255 – 270, 1986.

CABALLERO, M. A.; CORELLA, J., AZNAR, M. P.; GIL, J. *Biomass gasification with air in a fluidized bed. Hot gas Cleanup with selected commercial and full-size nickel-based catalysts*. Industrial & Engineering Chemistry Research.

CAO, Y.; WANG, Y.; RILEY, T. J.; PAN, W. *A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas*. Fuel Processing Technology.

CLIMATE CHANGE 2001. Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/>.

Consumo de Energia Pré-apagão só Será Retomado em 2008. Folha "online", 20 dez. 2002. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u60955.shtml>>.

CORELLA, J.; TOLEDO, J. M.; PADILLA, R. *Catalytic hot gas clearing with monolitos in biomasa gasification in fluidized bed. 1. Their effectiveness for tar elimination*. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 43, p. 2433-2445, maio 2004.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E.S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. Universidade do Amazonas/Efei, Manaus, 1997.

CZERNIK, S.; KOEBERLE, P. G.; JOLLEZ, P.; BILODEAU, J. F.; CHORNET, E. *Gasification of residual biomass via the biosyn fluidized bed technology*. In: *Advances in Thermochemical Biomass Conversion, 1992, Glasgow. Proceedings...*, Glasgow: Elsevier Pub, mai. 1992, p. 423-437.

Dayton, D. *A review of the literature on catalytic biomass tar destruction*. National Renewable Energy Laboratory, 2002. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge>>.

DEVI, L.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J.G. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass & Bioenergy*, v. 24, p. 125-140.

FERRERO, G. L.; MANIATIS, K.; BUEKENS, A.; BRIDGWATER, V. *Pirolise and gasification*. In: *International Conference Held, 1998, Luxembourg. Proceedings...*Luxemburgo: 23-25 mai. 1989.

FUEL CELL HANDBOOK 5TH EDITION (2000). Report prepared by EG&G Services, Parsons, Inc. and Science Applications International Corporation under contract no. DE-AM26-99FT40575 for the U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, outubro 2000.

FUEL CELL HANDBOOK, Sexta Edição, US-DOE/NETL, novembro 2002.

GERDART, D. *Gas Fluidization Technology*. London: Wiley & Sons Ltd, 1986, 468 p.

GHOSH, S.; DE, S. *Energy analysis of a cogeneration plant using gasification and solid oxide fuel cell*, *Energy*, v. 31, p. 345-363, 2006.

GIL J., CABALLERO, M. A., MARTIN, J. A., AZNAR, M. P., CORELLA, J., “Biomass Gasification with Air in a Fluidized bed: Effect of the in-Bed Use of Dolomite under Different Operation Conditions”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, p. 4226-4235, 1999.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. *Renewable energy-traditional biomass vs. modern biomass*. *Energy Policy*, v. 32, p. 711-714.

HALL, D. O.; SCRASE, J. I. *Will biomass be the Environmentally friendly fuel of the future?* Biomass and Bioenergy, v. 15, p. 357-367, 1998.

HANDBOOK OF ADVANCED TECHNOLOGIES FOR ENERGY CONVERSION OF

BIOMASS. Sponsored by the European Commission, Editado por R. Sala, Milan, 1996.

HASLER, P.; NUSSBAUMER, Th. *Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification.* Biomass and Bioenergy. v. 16, p. 385 – 395, 1999.

HENRIKSEN, U.; AHRENFELD, J.; JENSEN, T. K.; GOBEL B.; BENTZEN, J. D.;

HINDSGAUL C.; SORENSEN L. H. *The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier.* Energy, v. 31, p. 1542-1553, 2006.

HETSRONI, Gad. *Handbook of multiphase systems.* Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company, 1982.

HWANG, Y.; *Potential energy benefits of integrated refrigeration system with microturbine and absorption chiller.* International Journal of Refrigeration, v. 27, p. 816-829, dezembro 2004.

JIANG, H; ZHU, X.; GUO, Q.; ZHU, Q. *Gasification of rice husk in a fluidized bed gasifier without inert additives.* Industrial and Engineering Chemistry Research, v. 42, p 5745 – 5750, 2003.

JENSEN, N.; WERLING, J.; CALSEN, H.; HENRIKSEN, U. *CHP from updraft gasifier and Stirling engine.* In: European Biomass Conference, 12., 2002, ETA-Florence & WIP-Munich. Proceedings... ETA-Florence & WIP-Munich: 2002, p. 726-729.

KALTSCHMITT, M; HARTMANN, H. *Energie aus biomasse:grundlagen, techniken und verfahren.* Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001.

KUCHONTHARA, P.; BHATTACHARYA, S.; TSUTSUMI, A. *Combination of thermochemical recuperative coal gasification cycle and fuel for power generation*. Fuel, v. 84, p. 1019-1021, 2005.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering: Second Edition*. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991, 491 p.

KWANT, K. W.; KNOEF, H.; Status of gasification in countries participating in the IEA and GasNET activity.

LV, P. M.; XIONG, Z. H.; CHANG, J.; WU, C. Z.; CHEN, Y.; ZHU, J. X. *An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed*. Bioresource Technology, v. 95, p. 95-101, outubro 2004.

MANIATIS, K.; BRIDGEWATER, A. V.; BUEKENS, A. *Fluidized bed gasification of wood: performance and demonstration plant*. In: *Research in Thermochemical Biomass Conversion*, ed. By Bridgwater A. V. and Kuester J. L., Elsevier App. Sc., pg 274-281, 1988.

MANSARAY, K. G.; GHALY, A. E.; TAWHEEL, A. M. A.; HAMDULLAHPUR, F. *Air gasification of rice husk in a dual distribution type fluidized bed gasifier*. Biomass and Bioenergy, v.17, p. 315-332, outubro 1999.

MCKENDRY, P. *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*. Bioresource Technology, v. 83, p. 55-63, maio 2002.

McKEEN, T.; PUGSLEY, T. *Simulation and experimental validation of a freely bubbling bed of FCC catalyst*. Powder Technology, v. 129, p. 139-152, 2003.

MENDIS. M. S; STASSEN, H. E. M.; STILES, H. N. *Biomass gasification: field monitoring results*. Biomass, v. 19, p. 19-35, 1989.

NARVÁEZ, I.; ORIO, A.; AZNAR, M. P.; CORELLA, J. *Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas*. Industrial & Engineering Chemistry Research., v. 35, p. 2110-2120, julho 1996.

OCAMPO, A.; ARENAS, E.; CHEJNE, F.; ESPINEL, J.; LONDOÑO, C.; AGUIRRE, J.; PEREZ, J. D. *An experimental study on gasification of colombian coal in fluidized bed*. Fuel, v. 82, p. 161-164, janeiro 2003.

OLIVEIRA, M. E.; NETO, W. G. *O programa nacional do álcool (Proálcool): um estudo realizado através da imprensa uberlandense*.

OMOSUN, A. O.; BAUEN, A.; BRANDON, N.P.; ADJIMAN, C. S.; HART, D. *Modelling system efficiencies and costs of two biomass- fuelled SOFC systems*. Journal of Power Sources, v. 131, p. 96 – 106, 2004.

ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I. *Residential cogeneration systems: review of the current technology*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 10, p. 389-431, outubro 2006.

PAN, Y.G.; ROCA, X.; VELO, E.; PUINGJANER, L. *Removal of tar secondary air in fluidized bed gasification of residual biomass and coal*. Fuel, v. 78, p. 1703-1709, novembro 1999.

PANOPOULOS, K. D.; FRYDA, L.E.; KARL, J.; POULOU, S.; KAKARAS, E. *Hight temperature solid fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification part I: modelling and feasibility study*. Journal of Power Source. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>.

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, USA, 1999.

RAVANSHI, N. A. Biomass Gasification. Disponível em: <<http://nariphaltan.virtualave.net/gasbook.pdf>>.

SANCHES, C. G; ELECTO, S. L. *Biomass fluidized bed gasification research in the University of Campinas*. Energy for Sustainable Development, v. 1, n° 4, 1994.

SCOTT, P. E. *The International Energy Agency's (IEA) work In harmonising sampling and analytical protocols related to municipal solid waste (Msw) conversion to energy*, Biomassa and Bioenergy, v. 9, p. 415-439, março 1995.

SILVEIRA, J. L.; GOMES, L. A. *Fuel cell cogeneration system: a cases of technoeconomic analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 3, p. 233-242, junho 1999.

SYSTEM MANUAL CAPSTONE MICROTURBINE MODEL 330. Califórnia – EUA: mar. 2001.

SMEENK, J.; BROWN, R.C. *Experience with Atmospheric Fluidized Bed Gasification of Switchgrass*.

SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine system*, Washington DC, 1988.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, DOE. *Review of combined heat and power technologies*. Disponível em: <[http:// www.distributed-generation.com/Library.htm](http://www.distributed-generation.com/Library.htm)>. Acesso em: 2005.

VAN PAASEN, S. V. B.; KIEL, J. H. A.; NEEFT, J. P. A.; KNOEF, H. A. M.; ZIELKE, U.; SJÖSTRÖM, K.; HASLER, P.; SIMELL, P. A.; DORRINGTON, M. A.; THOMAS, L.; ABATZOGLOU, N.; BUFFINGA, G. J.; BRAGE, C.; SUOMALAINEN, M. *Guideline for sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases*.

YIN, L. X.; WU, C. Z.; ZHENG, S. P.; CHEN, Y. *Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk*. Biomass & Bioenergy, v. 23, p. 181- 187, 2002.