

# **ESTUDO DE CASOS DAS ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DEJETOS DE MATRIZES SUÍNAS NA QUALIDADE DO BIOGÁS GERADA POR BIODIGESTOR**

**JOHNSON PONTES DE MOURA<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>ENGENHEIRO QUÍMICO, DOUTORANDO EM ENGENHARIA MECÂNICA-UFPE**

**EMAIL: johnsonmoura@gmail.com**

## **RESUMO**

A disponibilidade de biomassa e a falta de gás natural ou diesel favorecem o aparecimento de alternativas tecnológicas sustentáveis para geração de energia elétrica. A indisponibilidade de gás faz com que grandes ativos de geração de energia termelétrica fiquem ociosos, podendo acarretar em aumento da indisponibilidade das usinas, pelo fato de partes dos equipamentos estarem parados.

A alternativa de pirolisar a biomassa, transformando o seu potencial em gás e posteriormente em combustível para uma usina termelétrica que não dispõe de outro combustível fóssil, torna-se uma alternativa atraente. A pirólise é uma reação de análise ou decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. Ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. Este sistema é bastante utilizado pela indústria petroquímica e na fabricação de fibra de carbono.

Outra aplicação da pirólise se dá no tratamento do lixo. O processo é auto-sustentável sob o ponto de vista energético, pois, a decomposição química pelo calor na ausência de oxigênio, produz mais energia do que consome. O processo de pirólise produz biocombustíveis líquidos e gasosos como o Bio-Óleo e o gás de síntese.

A Biomassa é uma das maiores fontes de energia disponíveis nas áreas rurais e agroindustriais. A mesma aparece na forma de resíduos vegetais e animais, tais como restos colheita, esterco animal, plantações energéticas e efluentes agroindustriais. Estes resíduos podem ser utilizados pelo produtor rural ou agroindústria para a queima direta, visando produção de calor ou produção de biogás em biodigestores. Nas propriedades agrícolas, onde se desenvolve a atividade de suinocultura, ocorre à disponibilidade desses resíduos, caracterizando num grande potencial energético. A adoção de sistemas

confinados de produção de suínos, juntamente com o emprego de tecnologia para aprimorar esses sistemas, tem levado a um aumento considerável do uso de água nessas instalações e, conseqüentemente, a produção cada vez maior de dejetos, os quais constituem o resíduo proveniente da atividade suinocultora. A utilização de processos anaeróbios para reduzir o poder poluente de resíduos líquidos vem se destacando, pois além de reduzir a poluição ambiental, recuperam o potencial energético do resíduo em forma de fertilizante e biogás.

O objetivo deste trabalho é através de estudos de casos da literatura científica das rotas tecnológicas para produção de biogás, discorrer e responder às seguintes questões como forma de Revisão da Literatura (Estado da Arte) para a escrita da Tese de Doutorado:

(1)- No sistema de conversão de energia elétrica a partir do biogás, o conjunto motor-gerador apresenta requisitos importantes para garantir que o processo de conversão seja completo e atenda concomitantemente as necessidades da carga e de cada um dos sistemas.

Apresente os principais requisitos que devem ser observados por cada um dos componentes do conjunto motor-gerador.

(2)- Quais as principais características do ambiente que devem ser observadas na instalação de um grupo motor-gerador.

(3)- Um grupo gerador encontra-se instalado em uma propriedade rural, funcionando de forma isolada da rede de distribuição. Esta instalação apresenta como cargas típicas um conjunto de motores de indução de baixa potência, iluminação fluorescente e incandescente e alguns eletrodomésticos. Após a instalação do sistema, os motores passaram a apresentar problemas de funcionamento com o torque das cargas mecânicas, aquecimento excessivo e, em alguns casos houve a queima do motor.

Baseando-se nos requisitos das cargas elétricas que deve ser observado pelo gerador, avalie a situação e indique o problema provocado pelo gerador.

**Palavras-chave: Pirólise; Energia alternativa; Resíduos agrícolas; Biodigestores.**

## ESTADO DA ARTE: Estudos das rotas tecnológicas para Produção de Biogás

### 1. Energia Renovável: Gestão de Resíduos

Por biomassa entende-se toda a matéria de origem vegetal, seja ela a floresta nativa ou plantada, as culturas agrícolas e seus resíduos, como bagaço de cana, casca de arroz ou de café, galhos de árvores, óleos vegetais, ou de espécies plantadas, além do lixo urbano e do esterco de animais. O Brasil é um país naturalmente rico em biomassa. Os processos de transformação desses recursos em energia, combustíveis e produtos como alimentos e materiais são inúmeros. A pirólise, também chamada de carbonização, pertence a um grupo de processos denominado: Conversão Termoquímica (Destilação Destrutiva). O processo pode produzir energia e produtos sólidos (Carvão vegetal), líquidos (Bioóleo ou Alcatrão) e gases (Gases Pobres).

#### 1.1. Produção de energia através de resíduos orgânicos

- **Biomassa**

A biomassa é, portanto, toda matéria viva presente em um lugar, um combustível fóssil de origem biológica, onde através dele, é possível produzir a chamada energia renovável. O termo biomassa cobre uma extensa categoria de materiais, incluindo:

- Madeira;
- Resíduos de vegetais;
- Resíduos de origem animal;
- Resíduos industriais;
- Resíduos sólidos urbanos.

Os estudos sobre biomassa revelam que, atualmente um sétimo da energia mundial está sendo obtida por esse processo, e venha a ter cada vez mais importância no contexto energético global. Através da sua transformação, pode-se produzir biocombustíveis líquidos ou gasosos por sua queima direta.

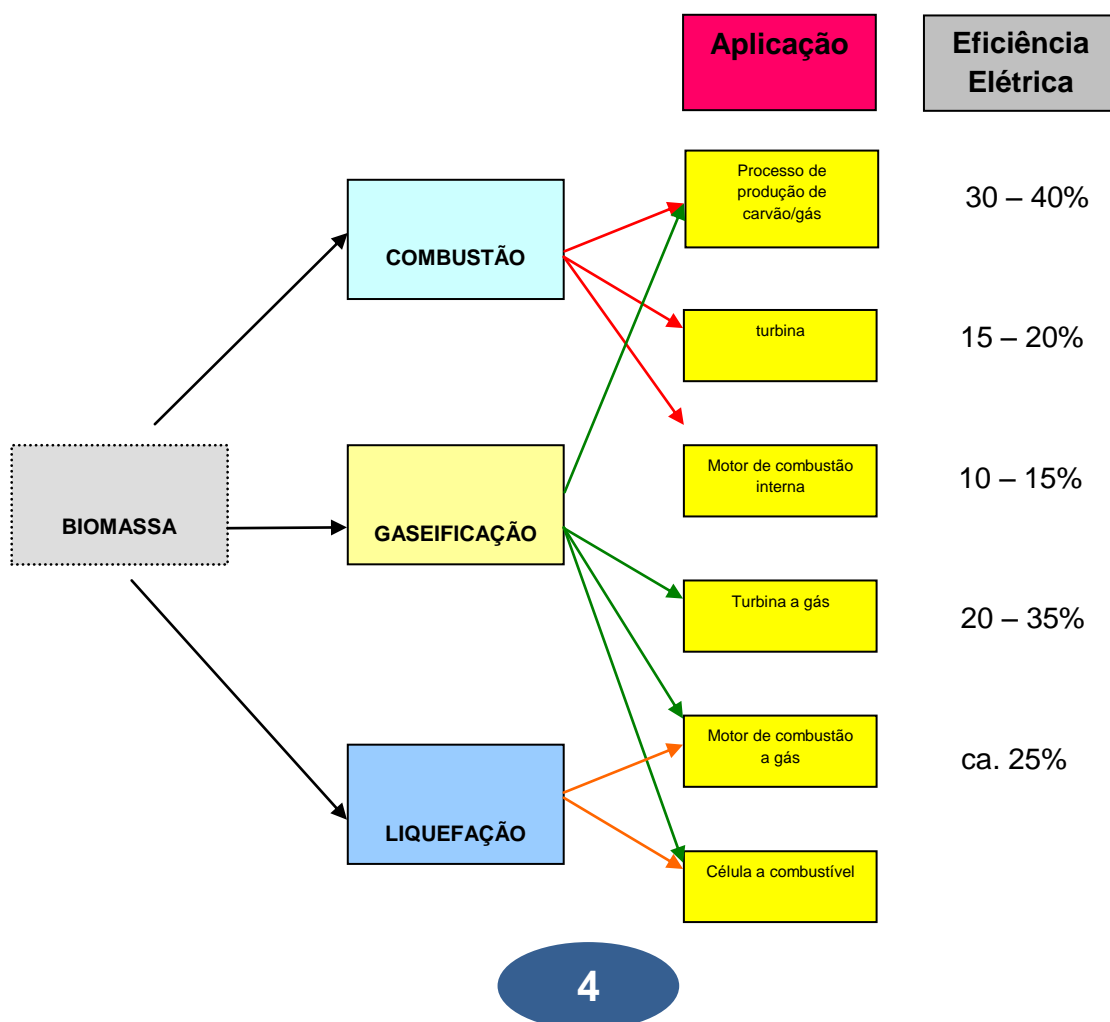
Vários estudos já foram realizados para produção de energia através da transformação da biomassa. A tabela abaixo mostra as principais tecnologias de conversão da biomassa em energia.

Técnicas de conversão	Temperatura (°C)	Pressão	Produtos principais
Combustão	800 - 1400	atmosférica - alta	calor

Pirólise	400 - 800	atmosférica - alta	Líquidos, gases
Gaseificação	650 - 110	atmosférica - alta	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
Upgrade hidrotérmico	250 - 600	muito alta	Líquidos, gases
Fermentação aeróbica	<<100	atmosférica	etanol
Fermentação anaeróbica	<100	atmosférica	CH <sub>4</sub>

Os combustíveis gasosos podem ser produzidos a partir da madeira e de outros tipos de biomassa.

Métodos de produção de energia através da biomassa:



Segundo o fluxograma acima, é possível realizar 3 principais transformações de biomassa em energia, como: combustão, gaseificação e liquefação. Primeiramente, é necessário estudar a espécie de biomassa a ser utilizada e em seguida aplicá-la aos métodos existentes na literatura.

### **1.1.1. JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA DO ESTUDO PROPOSTO**

A grande necessidade de preservação dos recursos hídricos não só do Brasil, mas de todo o planeta tem gerado discussões sobre o problema há muito tempo, visto a ocorrência cada vez maior da contaminação das águas de córregos, rios e mares, como por exemplo, acidentes ecológicos com, a contaminação pela descarga de toneladas de resíduos de esgoto industrial e domiciliar, dentre outros. Todos são alerta mais do que eloqüentes do risco que a humanidade corre de, num futuro bem próximo, enfrentar uma escassez insolúvel de água potável.

Apesar de a indústria representar o setor poluidor mais ativo, não é a única vilã no processo. Além da atividade poluidora das grandes cidades, a área rural, também participa ativamente neste processo negativo, pois por estarem localizadas em regiões próximas a córregos, lagoas ou rios, as propriedades rurais sejam estas criadoras de animais e aves ou dedicadas somente à agricultura também contribuem para a contaminação dos lençóis freáticos, que são indispensáveis ao abastecimento de água potável das populações rural e urbana (Gaspar, 2003).

Algumas propriedades rurais criadoras de aves, bovinos, suínos e outros, utilizam parte dos dejetos desses animais para a adubação de plantações, porém esta adubação é feita pela mera aspersão do material orgânico sobre as plantas, ou por sepultamento na área a ser semeada posteriormente. Esses procedimentos apresentam grande potencial poluidor, uma vez que a aspersão a céu aberto atrai insetos, além disso, os detritos colocados dentro da terra são mais facilmente transportados para os lençóis freáticos pela ação da infiltração das chuvas. Alguns critérios devem se adotados para a sua utilização como fertilizante, evitando que sejam aplicados em excesso no solo e cause poluição, grande maioria das propriedades deposita seus resíduos no meio-ambiente como em rios, ribeirões, açudes ou no meio de matas.

Devido ao potencial altamente poluidor apresentado pelos dejetos de suínos foi realizada uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso sobre a viabilidade econômica a respeito dos biodigestores e sua contribuição para a redução da contaminação causada pelos dejetos suínos, além disso, foi realizado um estudo a cerca das rotas tecnológicas para produção de biogás.

- **Produção de biogás**

**Definição:**

Atribui-se o nome de biogás à mistura gasosa (combustível), resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica. A proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros, como o tipo de digestor e o substrato a digerir. De qualquer forma, esta mistura é essencialmente constituída por metano ( $\text{CH}_4$ ) e por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), estando o seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa.

Os processos de fermentação anaeróbia que produzem metano foram desde sempre, utilizados pelo Homem para o tratamento dos esgotos, nos sistemas conhecidos por "fossas sépticas". Estas serviam tanto para tratar os esgotos domésticos de pequenas comunidades, quanto os resíduos da indústria agro-alimentar ou agro-pecuária. Com o passar dos tempos estes sistemas simplificados de tratamento evoluíram nos países desenvolvidos, quando começaram a ser utilizados os chamados "digestores", para efetuar a estabilização das lamas resultantes da sedimentação primária e do tratamento biológico aeróbio dos esgotos.

Neste momento, existem duas situações possíveis para o aproveitamento do biogás: O primeiro caso consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras); O segundo caso diz respeito à conversão de biogás em eletricidade. Isto significa que o biogás permite a produção de energia elétrica e térmica. Assim, os sistemas que produzem o biogás, podem tornar a exploração pecuária auto-suficiente em termos energéticos, assim como contribuir para a resolução de problemas de poluição de efluentes. Os efluentes obtidos são normalmente tratados em sistemas de lagunagem, sendo depois utilizados em rega de terrenos agrícolas ou lançados em linhas de água. Nas restantes instalações, onde este tratamento não existe, o efluente é, em regra, utilizado diretamente na agricultura, ou lançado em linhas de água.

Atualmente existem vários estudos sobre produção de energia a partir de biogás, dos quais a grande maioria sobre o aproveitamento de lixo doméstico para geração de energia.

**Processo de produção de biogás:**

O biogás é produzido através da degradação da matéria orgânica por bactérias. A digestão anaeróbia é um processo segundo o qual, algumas espécies de bactérias, que atuam na

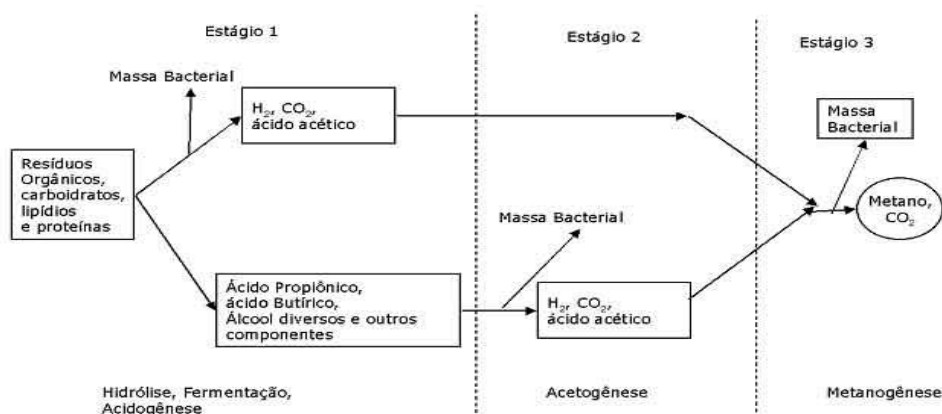
ausência de oxigênio, atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos para produzir compostos simples: metano, dióxido de carbono, água, etc, extraíndo simultâneamente a energia e os compostos necessários para o seu próprio crescimento. A transformação da matéria orgânica em diversas substâncias químicas, no decurso da fermentação anaeróbica, processa-se através de uma cadeia de degradações sucessivas devidas a diferentes tipos de bactérias. Essencialmente, distinguem-se duas fases nos processos de fermentação metanogênica. A primeira fase é uma transformação das moléculas orgânicas em ácidos, sais ou gases e a segunda, é a transformação destes numa mistura gasosa essencialmente constituída por metano e dióxido de carbono.

A atividade enzimática das bactérias depende intimamente da temperatura, variando de espécie para espécie existindo sempre uma temperatura ótima. Ela é fraca a 10°C e nula acima dos 65°C. A faixa dos 20°C a 45°C, corresponde à fase mesófila, enquanto que entre os 50°C e os 65°C, temos a fase termófila. A opção por uma temperatura ótima de trabalho terá de resultar do compromisso entre o volume de gás a produzir, o grau de fermentação e o tempo de retenção. Na fase mesófila, as variações de temperatura são aceitáveis desde que não sejam bruscas. O mesmo não acontece com a fase termófila, onde as variações não são aconselháveis, todavia, ela permite cargas mais elevadas e um tempo de retenção menor, com maiores taxas de produção de gás.

Outro parâmetro que influencia a digestão anaeróbica é o pH do meio. Em meio ácido, a atividade enzimática das bactérias é anulada. Num meio alcalino, a fermentação produz anidrido sulfuroso e hidrogênio. A digestão pode efetuar-se entre os pH de 6,6 e 7,6 , encontrando-se o ótimo a pH=7. Para valores abaixo de 6,5 , a acidez aumenta rapidamente e a fermentação pára. Em relação à matéria a fermentar, há que levar em consideração a relação carbono/nitrogênio (C/N), que deve ter um valor compreendido entre 30 e 35. Acima deste valor, o processo é pouco eficaz, já que as bactérias não tem possibilidade de utilizar todo o carbono disponível. Para um valor baixo corre-se o perigo de aumentar a quantidade de amoníaco, que pode atingir os limites da toxicidade. Deve-se considerar também a presença de fósforo no meio de cultivo, já que a sua ausência, conduz à uma parada da fermentação.

A presença de matérias tóxicas, detergentes e outros produtos químicos, deve ser evitada ao máximo, pois basta uma concentração muito baixa destes produtos, para provocar a intoxicação e morte das bactérias.

A **figura 1** abaixo ilustra todos os estágios necessários para a formação do biogás.



## **FIGURA 1 – Processo de produção de biogás**

**Fonte: PIPGE – IEE/USP**

O biogás, apesar de ser constituído principalmente de metano, ele apresenta a seguinte composição:

- Metano ( $\text{CH}_4$ ) 50 a 75 %
- Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) 25 a 40 %
- Hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) 1 a 3 %
- Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) 0.5 a 2.5 %
- Oxigênio ( $\text{O}_2$ ) 0.1 a 1 %
- Sulfeto de Hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 0.1 a 0.5 %
- Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) 0.1 a 0.5 %
- Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ) 0 a 0.1 %
- Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) Variável

1m<sup>3</sup> de biogás produzido equivale a 5500 kcal e é equivalente a:

- 1,7 m<sup>3</sup> de metano
- 1,5 m<sup>3</sup> de gás de cidade
- 0,8 L de gasolina
- 1,3 L de álcool
- 2 kg de carbonato de cálcio
- 0,7 L de gasóleo
- 7 kw/h de eletricidade
- 2,7 kg de madeira
- 1,4 kg de carvão de madeira
- 0,2 m<sup>3</sup> de butano
- 0,25 m<sup>3</sup> de propano



Por estes valores é que faz o biogás atualmente uma fonte de pesquisas sobre fontes renováveis de energia.

#### 1.1.1.2. BIOMASSA E ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Gaspar (2003) a denominação de biomassa se dá a quaisquer materiais passíveis de serem decompostos por causas biológicas, ou seja, pela ação de diferentes tipos de bactérias, matéria essa encontrada em abundância em todos os lugares do planeta. A biomassa decomposta sob a ação de bactérias metano gênicas (produtoras de metano) produz biogás em maior ou menor quantidade, em virtude de fatores como: temperatura, presença ou não de oxigênio, nível de umidade, quantidade de bactérias versus volume e tipo de biomassa, entre outros.

De acordo com Oliveira (1994) as observações dos técnicos das cooperativas e associações de criadores de animais e especialistas dos órgãos ligados ao ministério da Agricultura, concluíram que um animal qualquer produz, em média, em torno de 19 gramas de dejetos por cada quilo de peso do animal, durante um período de 24 horas. Com base nestes dados, é possível calcular multiplicando o peso do animal por 0.0019 a quantidade média de estrume produzida por cada animal no período de um dia.. A tabela 1 mostra a produção média diária de dejetos de um animal adulto.

**Tabela 1 - Produção diária de dejetos por animal.**

TIPO DE ANIMAL	MÉDIA DE PRODUÇÃO DE DEJETOS (em Kg por dia)
Bovino	10,00
Suíno	2,25
Aviários	0,18
Equino	10,00

Fonte: Sganzerla, (1983).

Pesquisas mostram que os dejetos bovinos propiciam rápida proliferação das bactérias metanogênicas, sendo recomendado que a primeira carga nos biodigestores seja feita com esterco bovino.

Como pode ser visto na Tabela 2, os dejetos de suínos apresentam uma grande capacidade de produção de biogás, superior aos de aves, e muito próximo dos ovinos, perdendo apenas para bovinos e eqüinos, que são os que apresentam maior capacidade de produção de biogás. Uma das dificuldades principais na utilização do estrume de suínos é que seu processo de fermentação é mais lento que os dos demais.

Os dados presentes na tabela 2, mostra as diferentes produções de biogás de cada biomassa, bem como a concentração de metano. Nota-se, também, que os dejetos suínos é a biomassa com melhor rendimento, biogás/tonelada, cerca de 560m<sup>3</sup> de biogás, e apresentando um ótimo nível de gás metano (50%). Apenas como comparação, convém notar que os dejetos de bovinos produzem apenas 270 m<sup>3</sup> de biogás/tonelada, sendo o índice de presença de metano neste biogás de 55%, ou seja, apenas 5% a mais que o índice alcançado pelo estrume de suínos, isso prova a excelente produção de biogás a partir de dejetos suínos é o fator que melhor compensa a demora destes dejetos em produzir o biogás.

**Tabela 2 – Expectativa de produção de biogás por biomassa.**

BIOMASSA UTILIZADA (DEJETOS)	PRODUÇÃO DE BIOGÁS (a partir de material seco em m <sup>3</sup> por tonelada)	PERCENTUAL DE GÁS METANO PRODUZIDO
Bovinos	270	55%
Suínos	560	50%
Eqüinos	260	Variável
Ovinos	250	50%
Aves	285	Variável

Fonte: Sganzerla, Edílio. (1983).

O principal componente do biogás é o metano representando cerca de 60 a 80% na composição do total de mistura. O metano é um gás incolor, altamente combustível,

queimado com chama azul lilás, sem deixar fuligem e com um mínimo de poluição. Em função da porcentagem com que o metano participa na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal por metro cúbico uma vez eliminado todo o gás carbônico da mistura.

A quantidade percentual de água contida na biomassa utilizada nos biodigestores deve situar em 90% do peso total, essa porcentagem é dependente do tipo de biomassa utilizada, a falta ou excesso dessa é prejudicial à produção de biogás, a temperatura também é de grande influência para produção uma vez que os microorganismos metanogênicos são extremamente sensíveis a alterações bruscas de temperatura que deve situar em 20 a 45°.

Segundo Seixas et al (1980) quando as especificações de qualidade de vida dos microrganismos são atendidas, o biogás obtido deve ser composto de uma mistura de gases, com cerca de 60 ou 65% do volume total consistindo em metano, enquanto os 35 ou 40% restantes consistirem, principalmente, em gás carbônico, e quantidades menores de outros gases. Contudo, a composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e quantidade de biomassa empregada, os fatores climáticos e as dimensões do biodigestor, entre outros.

O componente principal a ser obtido na produção do biogás é o metano, ele apresenta características de ser um gás incolor, inodoro, altamente combustível. Sua combustão apresenta uma chama azul-lilás e, às vezes, com pequenas manchas vermelhas. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha.

A porcentagem de metano confere ao biogás um alto poder calorífico, o qual varia de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico, e que, submetido a um alto índice de purificação, pode gerar um índice de até 12.000 kcal por metro cúbico, podendo ser obtido através de filtragem do gás pelos chamados filtros úmidos que consiste na passagem do gás por filtros de água e outros como os de limalha de ferro.

Com a eminência de uma crise energética cada vez mais próxima e a privatização das companhias estatais do setor energético, tendo como conseqüência a retirada gradual de subsídios da energia elétrica para o setor agrícola, a geração de energia elétrica, nas propriedades, tendo como combustível o biogás, passa a ser uma alternativa viável. Os sistemas de produção de suínos geram grandes quantidades de dejetos que podem ser

tratados convertendo matéria orgânica em biogás, que é uma fonte alternativa de energia, de fácil utilização, com a simultânea remoção e estabilização das cargas poluentes. Salienta-se, porém, que apesar das perspectivas favoráveis, a utilização de biodigestores em propriedades rurais não foi bem difundida, devido à falta de conhecimento e de informação tecnológica ao seu respeito (Oliveira, 2004).

Segundo Oliveira (2004), a geração de energia elétrica, com o uso de biogás como combustível, pode ser dividida nas seguintes tecnologias disponíveis no momento:

Conjunto Gerador de Eletricidade – Consiste em um motor de combustão interna ciclo Otto (álcool, gasolina ou diesel) adaptado para o uso do biogás como combustível, acoplado a um gerador de eletricidade, independente da rede de energia elétrica da concessionária local.

Conjunto Gerador Economizador de Eletricidade – Consiste em um motor de combustão interna ciclo Otto (álcool, gasolina ou diesel) adaptado para o uso do biogás como combustível, acoplado a um motor assíncrono, 2 ou 4 pólos, que passa a gerar energia ao ser conectado à rede de energia elétrica da concessionária local.

No primeiro caso, o conjunto é independente de rede de energia elétrica local, gerando energia dentro da propriedade com o sistema de distribuição interno isolado. No segundo caso, gerador economizador de eletricidade, o equipamento gera energia somente se estiver conectado à rede de distribuição da concessionária de energia somente se estiver conectado à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica, deixando de funcionar se a mesma sofrer interrupção, ou manutenção nas redes elétricas externas. Neste caso a energia gerada é distribuída na propriedade e na rede externa até o transformador mais próximo (Oliveira, 2004).

Estudo desenvolvido por Oliveira (2004), avaliando o potencial de produção de energia elétrica tendo como fonte de energia o biogás, na região do meio oeste catarinense, concluiu que o consumo médio de energia nas propriedades é de (600 a 1.800KWh/mês). Tomando como base uma granja de produção de suínos com capacidade para produzir em média de 50m<sup>3</sup> biogás/dia, então sua capacidade de gerar energia é de 2.700KVAh/mês, o que equivale aproximadamente 2.160 KWh/mês. Propriedades com esta capacidade de geração de biogás podem se tornar auto-suficientes em energia elétrica, adotando um sistema que seja capaz de gerar 25KVA/h de potência elétrica. O consumo de biogás observado gira entre 16 a 25 m<sup>3</sup>/hora no sistema/motor estacionário para a geração de energia elétrica, dependendo da potência elétrica gerada.

O rendimento da transformação da energia contida no biogás em energia elétrica gira em torno de 25%, contra 65% quando transformada em energia térmica.

Em síntese são grandes os benefícios atribuídos ao uso do biogás, tanto pela preservação dos recursos locais, como a retirada de lenha próxima à residência rural evitando problemas como erosão do solo, por ser um gás higiênico produz menos fumaça quando comparado ao gás de bujão, evitando assim resíduos de fuligem nas panelas e demais utensílios de cozinha. Podendo também agregar valores econômicos a propriedade suinocultoras.

- **Gaseificação**

A gaseificação de combustíveis sólidos é um processo bastante antigo, 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. Basicamente, a *gaseificação* é a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas. Este gás é conhecido como gás pobre ou “*producer gas*”. O conteúdo médio dos compostos combustíveis no gás resultante da biomassa é para o CO entre 15 e 30 %, para o H<sub>2</sub> entre 12 e 40% e para o CH<sub>4</sub> entre 4,5 e 9%. O poder calorífico do gás fica na faixa entre 4 e 13 MJ/m<sup>3</sup>. Os menores valores correspondem à gaseificação com ar e os maiores à gaseificação com adição de vapor de água ou oxigênio. A gaseificação, embora tecnologicamente mais complicada, apresenta algumas vantagens em comparação com a combustão direta; A geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo de vapor, utilizando o gás da biomassa diretamente em um motor de combustão interna ou, em perspectiva, num motor Stirling, microturbina a gás ou célula combustível. Deve-se destacar que é possível obter eficiências comparáveis com as de centrais térmicas a carvão, fato este que constitui uma quebra de paradigmas.

#### **Gaseificadores:**

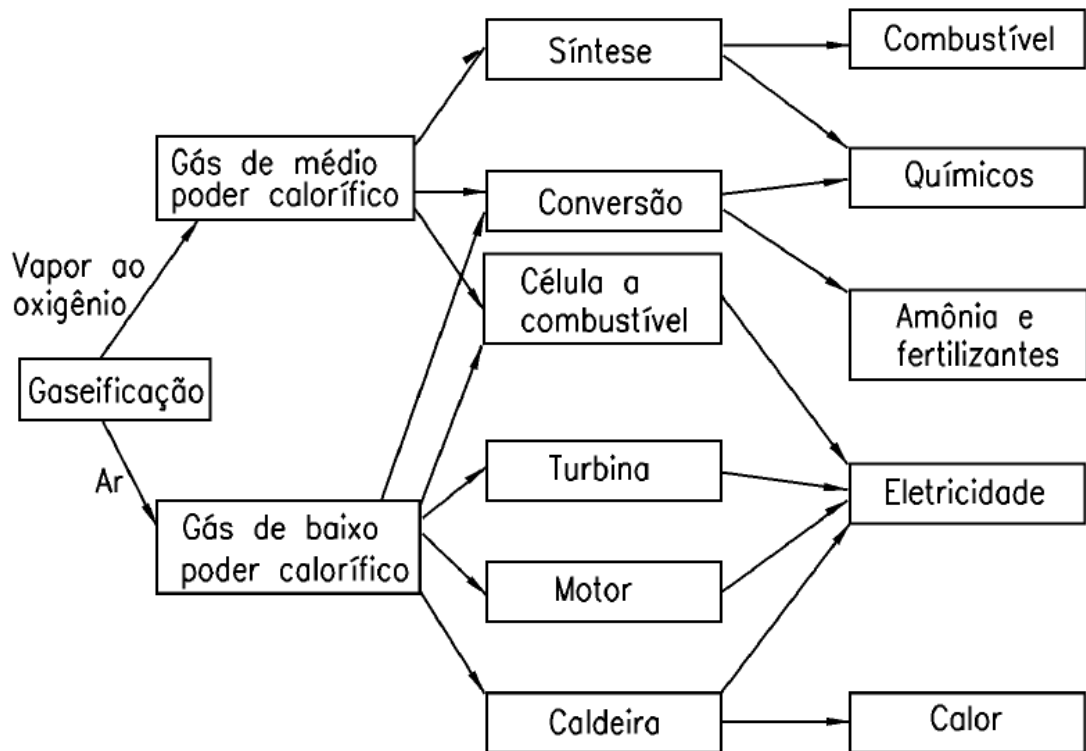
Os gaseificadores são os equipamentos onde se realiza a conversão da biomassa em gás e são classificados segundo os seguintes parâmetros:

a) Poder calorífico do gás produzido:

- Gás de baixo poder calorífico até 5 MJ/Nm<sup>3</sup>.
- Gás de médio poder calorífico de 5 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup>.

- Gás de alto poder calorífico de 10 a 40 MJ/Nm<sup>3</sup>.

O poder calorífico do gás influi significativamente sobre a possível aplicação do mesmo, como indicado na **Figura 3**.



**FIGURA 3 - Aplicações da gaseificação de biomassa em dependência do poder calorífico do gás**

Fonte: NEST/UNIFEI

b) Tipo de agente de gaseificação:

- Ar.

- Vapor de água.

- Oxigênio.

c) Pressão de trabalho:

- Baixa pressão (atmosférica).

- Pressurizados (até 3 MPa).

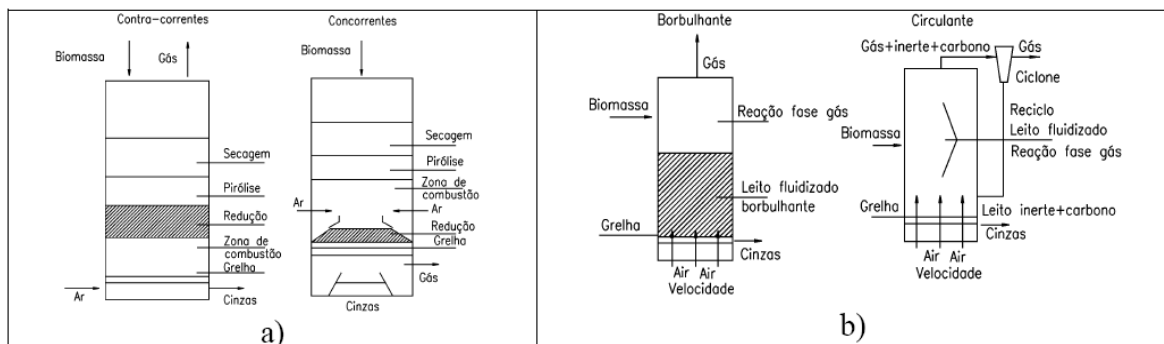
d) Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação (**Figura 4**):

- Leito em movimento a contrafluxo com o gás (contracorrente).

- Leito em movimento a fluxo direto com o gás (concorrente).

- Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás (fluxo cruzado).

- Leito fluidizado.



**FIGURA 4 - Classificação dos gaseificadores atendendo à direção relativa de movimentação do gás e da biomassa: a) Gaseificadores de leito fixo, b) Gaseificadores de leito fluidizado.**

**Fonte: NEST/UNIFEI**

## Pirólise

O termo pirólise é utilizado para caracterizar a decomposição térmica de materiais contendo carbono, na ausência de oxigênio. Assim, madeira, resíduos agrícolas, ou outro qualquer tipo de material orgânico se decompõe, dando origem a três fases: uma sólida, o carvão vegetal; outra gasosa e finalmente, outra líquida, comumente designada de fração pirolenhosa (extrato ou bioóleo). A proporção relativa das fases varia como função da temperatura, do processo e do tipo de equipamento empregado. Geralmente a temperatura situa-se na faixa de 400°C a 1000°C. A presença de oxigênio é variável pelo tipo de matéria orgânica empregada no processo, sendo que a introdução de oxigênio permite a continuidade do processo de pirólise com aumento de rendimentos. Observa-se um melhor rendimento na recuperação de subprodutos, baixo impacto ambiental, e aplicabilidade do bioóleo em escala industrial. É interessante ressaltar que a definição dada para o processo de pirólise exclui a presença de oxigênio, embora na prática muitos processos de pirólise sejam conduzidos com alimentação de ar. Isto se justifica pelo fato de que sendo o processo como um todo endotérmico, calor é requerido para o seu pleno desenvolvimento. Nada mais lógico portanto, que tentar conduzir o processo de tal forma que o oxigênio adicionado possibilite a combustão de parte dos produtos combustíveis formados, gerando portanto o calor necessário ao processo. A grande aplicação do processo de pirólise tem sido na produção de carvão vegetal, cujo rendimento pode chegar até 40% em peso, em relação à matéria-prima. O bioóleo, principal sub-produto e composto basicamente de alcatrões solúveis e insolúveis e ácido pirolenhoso que contém produtos químicos valiosos como o ácido acético, metanol e acetona. Na grande maioria dos processos pirolíticos a fase gasosa é utilizada como fonte de energia suplementar ao processo e o seu rendimento pode variar desde 5% a 20% em peso, dependendo da temperatura em que o processo se realiza.

Os trabalhos de P&D em pirólise, ao contrário da gaseificação - que já atingiu a fase de desenvolvimento de sistemas de maior porte - ainda está na etapa de teste de pequenas unidades. Ainda existem incertezas quanto à essa rota, mesmo porque têm sido identificados problemas de contaminação com álcalis e de instabilidade química dos óleos por efeito da temperatura (BRIDGWATER, 1995).

## Bioóleo

O bioóleo (líquido de fumaça) é conhecido no meio científico por extrato pirolenhoso, trata-se de uma solução orgânica originada da carbonização da madeira. No extrato pirolenhoso são encontradas algumas substâncias como ácidos, cetonas, compostos fenólicos, etc. No extrato pirolenhoso há uma alta exposição de grupos fenólicos e carboxílicos de baixo peso molecular. O bioóleo é obtido a partir de um processo denominado pirólise rápida - a queima (degradação térmica) de resíduos agrícolas de pequeno tamanho como bagaço de cana, casca de arroz, capim, casca de café e serragem.

## O processo



O reator pirolítico possui três zonas específicas a saber:

- zona de secagem: os resíduos que irão alimentar o reator, nesta zona as temperaturas estão na ordem dos 100° a 150° C (vale lembrar que esta etapa é de suma importância, pois a umidade pode interagir negativamente com os resultados do processo).

- zona de pirólise: ocorrerá as reações propriamente ditas, sendo elas a volatilização, oxidação e a fusão, as temperaturas nesta fase variam de 150° a 450° C, é onde são coletados os produtos (alcoóis, óleo combustível, alcatrão, etc);

- zona de resfriamento: nesta fase os resíduos gerados pelo processo são coletados no final do processo: carvão, cinzas e bioóleo).

## 2. Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

O Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) é um biodigestor que, segundo Souza (1982), consiste basicamente de um tanque no fundo do qual se localiza o sistema biodigestor propriamente dito e, na parte superior, existe um sedimentador precedido de um sistema para a separação do gás. O resíduo líquido a ser tratado é distribuído, uniformemente, no fundo do reator e passa através de uma camada biológica de lodo, que transforma o material orgânico em biogás.

É uma opção bastante interessante que vem sendo mais e mais empregada. Estes reatores se baseiam no princípio de separação das fases sólida, líquida e gasosa, fazendo com que o lodo se acumule e se mantenha no tanque de tratamento, com tempos de residência celular bastante superiores aos tempos de residência hidráulica.

Os reatores RAFA são sistemas compactos e de alta taxa digestão, indicados para a recuperação eficiente do gás metano. Este é o modelo utilizado no estudo de caso apresentado neste trabalho (**Figura 5**).



## **Figura 5- Biodigestor Modelo RAFA.**

**(COELHO ET al, 2003 a.)**

### **3. Biogás**

Biogás é uma mistura resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lodo de esgoto, lixo ou efluentes industriais, como vinhaça, restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos (GIACAGLIA; SILVA DIAS, 1993). A composição típica do biogás é cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio (WEREKO-BROBBY; HAGEN, 2000). Dependendo da eficiência do processo, influenciado por fatores como carga orgânica, pressão e temperatura durante a fermentação, o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano.

#### **3.1. Atividades Realizadas**

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica consubstanciada sobre as tecnologias de geração de gás sintético. O desenvolvimento histórico dos processos de geração de gás sintético, as formas de conversão de biomassa, os tipos de pirolisadores e gaseificadores e o estudo da viabilidade técnico-econômica são algumas dos temas que serão abordados neste projeto.

##### **3.1.1. Desenvolvimento Histórico**

Gaseificação e pirólise são processos de geração de energia que vêm sendo explorados há mais de um século para converter matéria-prima sólida em combustível gasoso.

A primeira patente para um gaseificador foi lançada na Inglaterra, no final do século XVIII, e o gás produzido foi usado inicialmente para iluminação e preparo de alimentos; na metade do século XIX, já era possível clarear as ruas da capital inglesa Londres com o gás manufaturado. Mesmo considerado caro, levava vantagens sobre os concorrentes candelabros e carvão bruto. Uma desvantagem se referia ao fato de ser economicamente inviável o seu transporte por grandes distâncias, além de haver sério risco de explosão. Problemas com a fabricação de

equipamentos, tubulação e conexões que não deixassem o gás vazarem eram as principais razões pelas quais os processos de produção e transporte eram mantidos a pressões iguais ou menores que 2 bar (GERALDO et al., 2010).

Já no começo do século XX, a geração de eletricidade e as aplicações automotivas (por meio de motores de combustão interna) passaram a ser as principais aplicações do *town gas*. Entre 1930 e 1940, com a exceção da Inglaterra, toda a Europa e os Estados Unidos começaram a descobrir reservas de gás natural que, devido à limpeza e qualidade superior, tornaram obsoleto o processo de gaseificação do carvão. Nesse período, a gaseificação foi também gradualmente sendo suplantada pelo uso de combustíveis líquidos de maior densidade de energia, ficando confinada apenas a áreas onde o suprimento de combustíveis derivados do petróleo era muito caro ou inviável.

Entretanto, os esforços de pesquisa na tecnologia da gaseificação e pirólise persistiram, voltados principalmente para a busca de tecnologias de geração de eletricidade. Com a primeira crise do petróleo, no início da década de 1970, foi renovado o interesse pela geração de gás sintético para produção de combustíveis líquidos e gasosos, a serem utilizados nos meios de transporte; o embargo do petróleo pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), em 1973, gerou um aumento de custo e crise no abastecimento. A adoção de medidas severas de proteção por parte dos grandes consumidores e a descoberta de novas jazidas de óleo bruto, na década de 1980, fizeram com que as pesquisas nas áreas de gaseificação e liquefação sofressem novo refluxo.

Nos anos 90, a geração em massa de rejeitos sólidos municipais atraiu progressivo interesse como fonte alternativa para produção de energia. A gaseificação ou pirólise destes resíduos permite a conversão de matéria orgânica de origem animal ou vegetal em um combustível gasoso propício para ser usado em equipamentos industriais convencionais (como caldeiras, motores e turbinas) ou equipamentos avançados ainda em fases de teste (como as células de combustível), para a geração de calor e/ou eletricidade.

A história comprova que o desenvolvimento de novas tecnologias é pouco impulsionado em períodos estáveis. Já em tempos de desestabilidades, de emergências, nossas prioridades mudam drasticamente e novas rotas tecnológicas

aparecem. Por exemplo, pequenos gaseificadores foram desenvolvidos rapidamente durante os anos críticos da Segunda Guerra Mundial (quando os combustíveis derivados do petróleo se tornaram escassos para a população civil) para servirem como fonte de energia veicular e mais rapidamente ainda desapareceram quando a gasolina voltou a ser competitiva no mercado.

Nos dias de hoje, entretanto, o pensamento de que apenas a economia move os interesses tecnológicos está ultrapassado. O foco atual é o desenvolvimento sustentável, ou seja, um desenvolvimento que não prejudique a saúde do planeta. Os problemas relacionados com a questão ambiental, especificamente o aquecimento global e o combate à emissão de poluentes na atmosfera, incentivam empresas a financiarem novas pesquisas em processos de gaseificação e pirólise de biomassa, como o projeto aqui apresentado.

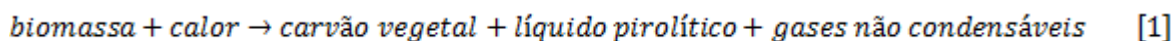
Uma vez submetida à ação do calor, a conversão térmica da biomassa vai envolver um ou todos dos seguintes processos: pirólise, gaseificação e combustão. Cada um desses processos conduz a um conjunto de produtos e utilizam diferentes configurações de equipamentos (ROCHA et al., 2004). Dos três processos de conversão, os dois últimos são mais complexos, possuem maior rendimento e poluem menos (REED e DAS, 1988). Uma apresentação detalhada dos dois processos de conversão de biomassa, temas deste trabalho, é feita a seguir.

### **3.2. Pirólise**

A pirólise é um processo termoquímico que consiste na decomposição térmica da biomassa, na ausência total ou em quantidades muito pequenas de oxigênio, a temperaturas relativamente baixas (PÉREZ, 2006). LORA (2004) afirma que a formação dos produtos depende das características e do tempo de residência do combustível, logo, não há como definir uma temperatura exata para a decomposição.

A pirólise implica na ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio. Por se tratar de uma reação de oxirredução, uma parte da biomassa é reduzida a carbono enquanto que outra parte sofre oxidação e

hidrólise, dando origem a condensado (líquido) e gás (ROCHA et al., 2004). Em outras palavras, quando a biomassa é aquecida na ausência (total ou parcial) de oxigênio, são três as etapas conhecidas: a evaporação da água, a decomposição dos carboidratos (celulose, hemicelulose e lignina) e produção de alcatrão e ácidos leves (LORA, 2008). A Equação [1] descreve o processo de pirólise:



Os gases, líquidos e sólidos são gerados em proporções diferentes; dependem dos parâmetros considerados no processo, como a temperatura final do processo, a pressão de operação do reator e o tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator (VALLIYAPPAN, 2005).

Todo gaseificador tem como primeira etapa o processo de pirólise, antecedendo a etapa de gaseificação. Vale ressaltar, entretanto, o fato de pirólise e gaseificação serem processos distintos na geração de energia através de biomassa. Segundo alguns autores, pirólise é o nome que se dá ao processo termoquímico com ausência total de oxigênio e que utiliza fontes externas de combustível para realizar as reações endotérmicas. Já na gaseificação, utiliza-se teor de oxigênio insuficiente e não há aporte externo (REIGEL et al, 2008).

### 3.2.1. O líquido pirolítico

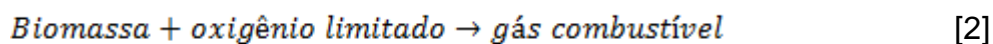
O condensado (ou líquido pirolítico) é também encontrado na literatura técnica como óleo de pirólise ou bio-óleo bruto. Embora não se saiba a composição exata nem detalhes do processo de sua formação, o bio-óleo é uma mistura complexa de compostos orgânicos que, apesar de ter composição química diferente da do combustível fóssil, pode ser considerado um petróleo vegetal (ROCHA et al, 2004).

O tipo de pirólise (lenta ou rápida, de acordo com o tempo de residência dos vapores e biomassa dentro do reator) vai determinar o maior ou menor peso molecular dos produtos. As moléculas maiores provocam uma maior viscosidade no líquido pirolítico. Os bio-óleos leves são mais atraentes para o mercado consumidor, pois encontram oportunidades de aplicação como resinas e combustíveis.

Atualmente, um dos principais objetivos é a produção em escala industrial do bio-óleo para aplicação como combustível em caldeiras, fornos e demais sistemas estacionários de geração de energia.

### 3.3. Gaseificação

Define-se gaseificação como um processo no qual haverá produção de gás combustível a partir do aquecimento de insumos líquidos ou sólidos; a oxidação é parcial, abaixo da estequiométrica (LORA, 2008). É realizado em temperatura intermediária, ou seja, acima daquela recomendada nos processos de pirólise e abaixo daquela sugerida nos processos de combustão (KINTO, 2002). REED e DAS (1988) descreveram o processo de gaseificação através da Equação [2]:



Vários sistemas de gaseificação de biomassa, de pequeno e grande porte, integrados com equipamentos de geração de eletricidade vêm sendo construídos e comercializados (BAUEN, 2004). A geração de eletricidade usando motores a gás que queimam combustível produzido por gaseificação de biomassa é igualmente aplicável em países desenvolvidos (como meio de redução do efeito estufa pela substituição de combustíveis fósseis) e para os países em desenvolvimento (proporcionando eletricidade em áreas rurais).

A utilização da gaseificação da biomassa integrada aos ciclos Rankine e Brayton, que utilizam turbinas a gás ou a vapor, respectivamente, pode produzir um sistema moderno, eficiente e limpo na geração de calor e eletricidade. Segundo MCKENDRY (2002), a conversão de biomassa em combustíveis gasosos utilizáveis em motores a gás aumenta enormemente a potencialidade do uso de biomassa como recurso renovável. A gaseificação utiliza uma tecnologia robusta e comprovada que pode ser operada tanto em sistemas de pouca tecnologia (como os gaseificadores de leito fixo), quanto em sistemas mais sofisticados, que usam a tecnologia de leito-fluidizado. Os tipos de gaseificadores serão detalhados mais adiante, em seção específica.

Em linhas gerais, o processo de produção de energia elétrica através da gaseificação da biomassa ocorre da seguinte forma:

- ✓ A biomassa, previamente tratada ou não, entra no gaseificador;
- ✓ No gaseificador, sofre reações químicas e dá origem a um gás energético combustível, o gás de síntese (syngas);
- ✓ Este gás é injetado na câmara de combustão, onde é queimado, gerando os gases de combustão. Estes gases então acionam uma turbina a gás (TG) num ciclo Brayton; ou alternativamente, o syngas é injetado e queimado no cilindro de um motor de combustão interna que opera no ciclo Otto, para geração energia mecânica.

Entre outras aplicações, pode ser citada, a geração de energia térmica mediante combustão direta em caldeiras e a produção de hidrogênio ao ser usado como gás de síntese. Neste sentido, cada tipo de reator tem suas próprias vantagens e desvantagens nas qualidades e características do gás produzido (SALES, 2004).

O principal objetivo do processo de gaseificação é converter eficientemente o máximo do combustível sólido em combustível gasoso. Para isso, o principal agente oxidante mais utilizado é o ar, mas o oxigênio como agente oxidante e o processo de hidrogenização também são encontrados em plantas de gaseificação ao redor do mundo. A gaseificação cujo agente oxidante é o ar é um processo que utiliza rejeitos ligno-celulósicos sem qualquer contribuição externa de energia e o gás produzido tem um PC entre 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup> (gás de baixo poder calorífico). Já se o agente for O<sub>2</sub> puro, é possível obter um gás com cerca de 10-20 MJ/Nm<sup>3</sup> (gás de médio ou alto poder calorífico). Os três tipos de gás produto com diferentes valores de poder calorífico são mostrados na Tabela 01:

**Tabela 01. Influência do meio oxidante.**

Tipo	Poder calorífico [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	Agente oxidante
Baixo PC	4-6	Ar e ar/vapor

Médio PC	10-18	Oxigênio e vapor
	15-20	Vapor em gaseificação indireta
Alto PC	40	Hidrogênio e hidrogenização

Fontes: MCKENDRY (2002); BRIDGWATER (1995); BELGIORNO et al., (2003).

Os gases de baixo PC são usados diretamente em combustão ou como combustível de motores que utilizam o ciclo Otto, enquanto que os demais podem ser usados como matéria-prima para conversão posterior em metano e metanol (MCKENDRY, 2002). A Figura 02 detalha as rotas de gaseificação baseadas no tipo do agente gaseificante.

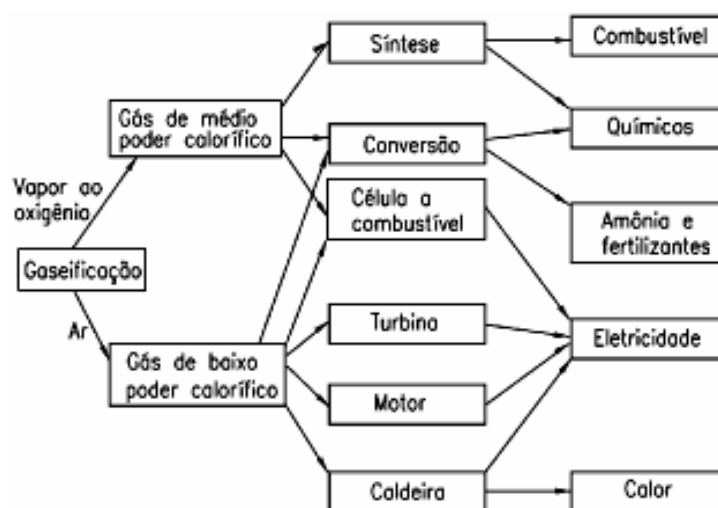


Figura 02. Aplicações da gaseificação da biomassa em dependência do poder calorífico do gás. (Fonte: LORA, 2004)

É importante também considerar os fatores econômicos. Como a utilização do oxigênio para gaseificação torna o processo caro, o ar é normalmente usado para processos até cerca de 50 MW. A desvantagem é que nitrogênio introduzido com o ar dilui o gás produzido, resultando num gás com PC líquido de 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>. BELGIORNO et al. (2003) reforça o ponto de vista e afirma que a gaseificação direta com oxigênio puro tem as mesmas vantagens dos processos de gaseificação



indireta. Todavia, o custo da produção do oxigênio é estimado em mais de 20 % do custo total da eletricidade produzida.

O PC do gás combustível resultante é significativamente afetado pela presença de nitrogênio. Devido à ausência de nitrogênio no agente de gaseificação, a gaseificação indireta aumenta a eficiência volumétrica e produz um gás de PC maior. Apesar de reduzir o custo de recuperação de energia e de limpeza do gás produto, a gaseificação indireta permanece um processo muito complexo e de custos de investimento altos (BELGIORNO et al., 2003). A Figura 03 mostra as diferenças entre gaseificação direta e indireta. O funcionamento de ambos será detalhado mais abaixo.

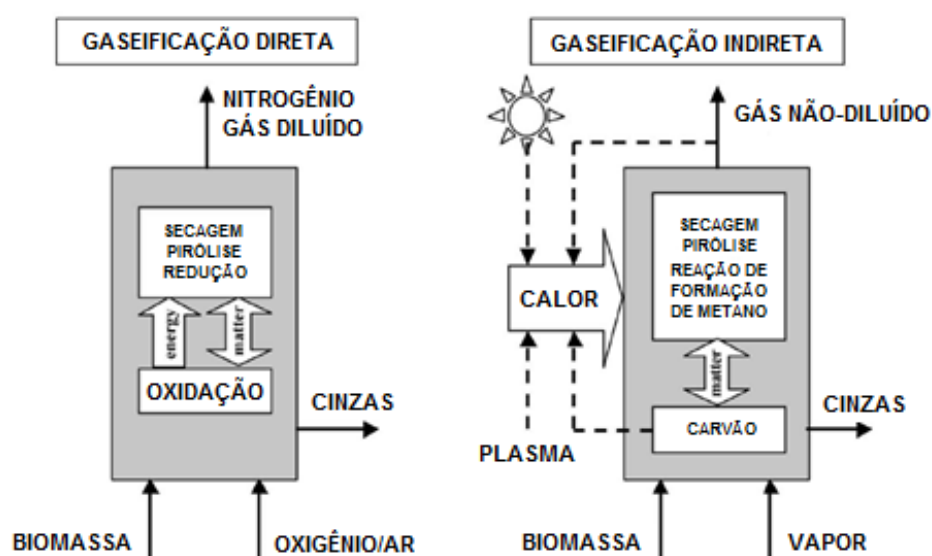


Figura 03. Esquema do funcionamento da gaseificação direta e indireta. (fonte: adaptado de BELGIORNO et al., 2003)

Na temperatura de gaseificação, (geralmente entre 500 e 1100 °C), são poucas as combinações possíveis entre o carbono, o hidrogênio e o gás carbônico, principais componentes da biomassa. Os principais compostos formados nesse processo são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), com traços de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, bem como alcatrão e particulado (SALES, 2006).

De acordo com RENDEIRO et Al. (2008), as principais etapas do processo de gaseificação são a secagem, pirólise, combustão e redução. Na etapa de secagem

ocorre a retirada da umidade contida no combustível sólido através da adição de calor, que provoca a evaporação da água. A pirólise ocorre após a secagem do combustível sólido, se a sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Essa fase também é denominada de volatilização. Portanto, nesta fase ocorre a decomposição dos carboidratos (hemicelulose, celulose, lignina) na temperatura de que varia de 250 a 300°C; e, a produção de alcatrão e ácidos leves (350–450°C). Desta forma, os produtos dessas etapas são:

Š. Gases condensáveis: alcatrão e ácidos;

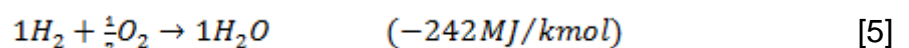
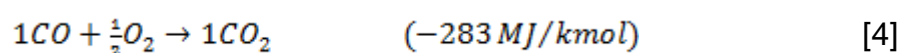
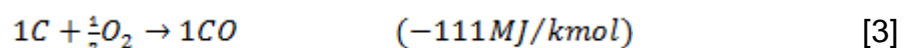
Š. Gases não condensáveis (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>);

Š. Carvão vegetal.

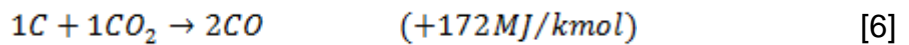
Nas etapas de redução e combustão, o carvão vegetal residual pode ser convertido em gases pelo processo denominado de gasificação. A gasificação é um processo de redução o qual requer energia para que a átomo de oxigênio seja transferido de uma molécula para o carbono do carvão. Conseqüentemente, o processo de gasificação é um processo endotérmico. Essa energia térmica pode ser fornecida aos reagentes (carvão e gás redutor) a partir de uma fonte externa ou através da combustão de parte da biomassa (voláteis e carvão). As reações químicas que ocorrem são basicamente as combinações de oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio e são classificadas em reações heterogêneas.

Segundo LORA (2008), durante os processos de gaseificação, ocorrem principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução envolvendo fases sólida e gasosa. As reações exotérmicas fornecem energia para as reações endotérmicas na forma de calor (KINTO, 2002).

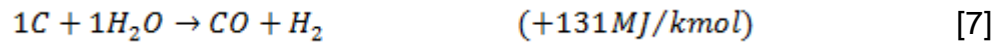
✓ Reações de combustão:



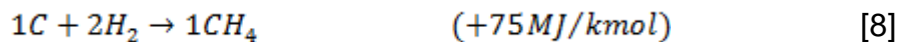
✓ Reação de Boudouard:



✓ Reação de gás-água:



✓ Reação de formação do metano:



Como as reações envolvendo o oxigênio livre (reações de combustão) são essencialmente completadas durante o processo de gaseificação, as reações [3], [4] e [5] não são consideradas para determinação da composição do gás de equilíbrio. As três reações heterogêneas, reações [6], [7] e [8], são suficientes.

Em geral, merecem atenção aquelas situações onde a conversão do carbono é essencialmente completa. Nessas circunstâncias, podem-se reduzir as equações heterogêneas em duas equações homogêneas (fase gasosa, equações [9] e [10]):



As reações [3], [6], [7] e [8] descrevem os quatro modos de como um combustível composto por carbono e hidrogênio pode ser gaseificado. As reações de oxidação do carbono são fortemente exotérmicas, rápidas e podem ser consideradas irreversíveis nas temperaturas normais de gaseificação. A reação de Boudouard passa a ser mais importante na produção de monóxido de carbono puro durante a gaseificação do carbono puro com uma mistura de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, na faixa de 800 a 900 °C. Já a reação de gás-água [08] é a base de todo processo de gaseificação hidrogenado (HIGMAN, 2003).

Na gaseificação, o objetivo principal é maximizar a produção de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, constituintes do gás combustível produzido. Os fatores que afetam a condição de equilíbrio dos gases são temperatura, pressão, umidade do combustível, teor de oxigênio no reator e o tipo de combustível (LORA, 2008).

### **3.3.1. Os tipos de gaseificadores**

LORA (2008) afirma que uma instalação de gaseificação é constituída principalmente por unidades de pré-processamento (para estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado) e o aparelho gaseificador propriamente dito, com sistemas de tratamento e resfriamento de gás e de tratamento de resíduos.

A gaseificação representa uma alternativa atrativa como sistema de tratamento térmico para recuperação de energia de rejeitos sólidos. Para um processo correto e eficiente de gaseificação, um material homogêneo, com conteúdo de carbono é necessário. Muitos tipos de rejeitos não podem ser processados por gaseificadores e certos tipos requerem um extensivo pré-tratamento. Todavia, há vários tipos de rejeitos sólidos que podem ser diretamente submetidos ao processo de gaseificação: rejeitos da indústria do papel, plásticos, rejeitos da indústria madeireira e resíduos da agricultura (BELGIORNO et al., 2003).

O grau de tratamento da biomassa depende da tecnologia empregada para geração de gás. As principais atividades são: (a) secagem: o teor de umidade deve estar abaixo de 10-15% antes da gaseificação; (b) adequação do tamanho da partícula: na maioria dos gaseificadores, o gás tem de passar através da biomassa, que deve ter suficiente resistência à compressão para suportar o peso do material acima (os tamanhos típicos são entre 20-80 mm); (c) fracionamento: o teor de nitrogênio e de álcalis da biomassa são críticos quando eles são carregados pela corrente de gás. Partículas menores tendem a conter menos nitrogênio e álcalis, então o fracionamento entre partículas menores e maiores ajuda a produzir gás com menor nível de impurezas (MCKENDRY, 2002).

Os gaseificadores, segundo ANDRADE (2007) e VIEIRA (2005), podem ser classificados quanto à pressão e quanto ao tipo de leito da matéria a ser gaseificada.

Segundo MCKENDRY (2002), os gaseificadores são principalmente de dois tipos, leito fixo e leito fluidizado, com variações em cada tipo. Já BELGIORNO et al. (2003) subdivide os gaseificadores em três tipos fundamentais: leito fixo, leito fluidizado e gaseificação indireta. Quando se observa o movimento relativo da biomassa e do agente gaseificador, os gaseificadores de leito fixo se subdividem em ascendente, descendente ou de fluxo-cruzado. Já os de leito fluidizado se dividem em borbulhante e circulante. A seguir, são apresentadas diversas classificações de acordo com as características que um gaseificador pode assumir.

- ✓ Classificação quanto ao poder calorífico do gás produzido:
  - Baixo: até 5 MJ/ Nm<sup>3</sup>;
  - Médio: entre 5 e 10 MJ/Nm<sup>3</sup>;
  - Alto: entre 10 e 40 MJ/Nm<sup>3</sup>.
  
- ✓ Classificação quanto ao tipo do agente gaseificador:
  - Ar;
  - Vapor d'água;
  - O<sub>2</sub>;
  - H<sub>2</sub>.
  
- ✓ Classificação quanto ao movimento relativo das massas:
  - Leito fixo;
  - Leito fluidizado;
  - Gaseificação indireta.
  
- ✓ Classificação quanto à pressão de trabalho:
  - Atmosféricos: baixa pressão.
  - Pressurizados: até 6 bar.
  
- ✓ Classificação quanto à natureza da biomassa:
  - Biomassa: in natura, peletizada, pulverizada;
  - Resíduos: agrícolas, industriais e sólidos urbanos.

Entre os vários tipos de gaseificadores o de leito fixo é o mais utilizado e com tecnologia mais difundida (SANTOS, 2008). De acordo com HENRIQUES (2009) até o início do século XXI, 75 % de todos os projetos elaborados na Europa e América do Norte correspondiam aos gaseificadores de contracorrente. Ainda, 20 % correspondiam ao tipo de leito fluidizado.

A escolha do tipo de gaseificador depende do tipo de matéria-prima a ser gaseificada e do uso final do gás produto (GARCIA-BACAICOA et al., 1994). O aparelho ideal deve ser barato e durável, além de produzir gás limpo utilizando diferentes combustíveis. Preço baixo, durabilidade e grande variedade, entretanto, são destoantes entre si, o que obriga cada projeto individual a relacionar um combustível determinado a uma função específica.

#### **3.3.1.1. Reatores de leito fixo**

Os gaseificadores de leito fixo destacam-se pelo escoamento do combustível por gravidade, ou seja, o leito move-se do topo para o fundo do reator. Os aparelhos utilizam uma “cama” de partículas sólidas combustíveis pela qual o ar (ou gás) passa em fluxo ascendente ou descendente. É o tipo mais simples de gaseificador, e o único indicado para aplicações de pequeno porte, pois possibilita uma conversão relativamente pequena de biomassa. (REED e DAS, 1988). Segundo KINTO (2001) na geração de energia elétrica, os gaseificadores de leito fixo são usados na alimentação de motores em sistemas com capacidade de 100 kW a 10 MW.

Podem ser classificados de acordo com o movimento do fluxo gasoso através da “cama” de combustível: os de corrente ascendente (ou *updraft*) e os de corrente descendente (ou *downdraft*). Também, podem ser divididos em relação ao sentido e à direção do fluxo do combustível a ser gaseificado e o fluxo do gás gerado. Caso tenham mesma direção e sentido, a gaseificação é denominada concorrente; caso tenham mesma direção e sentido oposto, chama-se a gaseificação de contracorrente; e se tiverem direção cruzada, a gaseificação é de corrente cruzada (*cross-current*). Portanto, são válidas as comparações:

**Tabela 02. Relações válidas para os gaseificadores de leito fixo.**

Classificação quanto ao fluxo gasoso através da cama de combustível	Classificação quanto à direção e ao sentido dos fluxos do combustível e gás.
Correntes ascendentes	Contracorrente
Correntes descendentes	Concorrente

Fonte: GERALDO (2010).

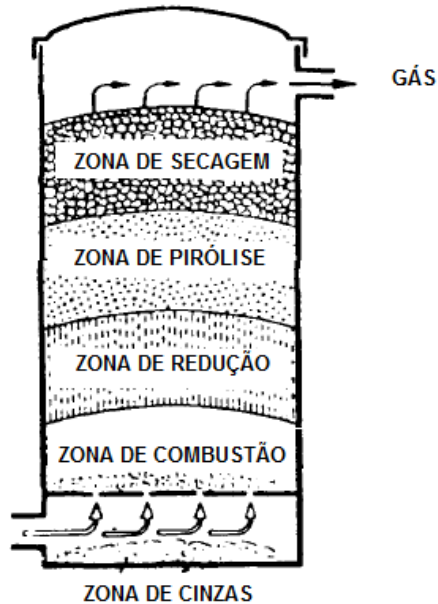
Em geral, os gaseificadores de leito fixo têm a vantagem de um projeto simples e a desvantagem de produzir um gás de baixo PC. O gás produto é composto basicamente de 40-50 % N<sub>2</sub>; 15-20 % H<sub>2</sub>; 10-15 % CO; 1-1,5 % CO<sub>2</sub>; e 3-5 % CH<sub>4</sub>, com Poder Calorífico Inferior (PCI) entre 4 e 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. Quando se usa ar como meio gaseificador, o alto teor de gás nitrogênio resultante dobra o volume do gás produto e aumenta o tamanho dos equipamentos de limpeza do gás. Para que um gás de alto PC possa ser obtido, o teor de umidade da biomassa deve ser menor que 15-20 %, de forma que uma secagem prévia deve ser realizada. O calor rejeitado pelo sistema gaseificador/motor pode ser utilizado nesta tarefa. O conteúdo de energia do gás produto chega a 75 % do conteúdo de energia da biomassa e as perdas são atribuídas ao calor sensível no gás produto, ao calor nas cinzas e às perdas por radiação (MCKENDRY, 2002).

### 3.3.1.1.2. Gaseificador contracorrente

O gaseificador contracorrente é o projeto mais antigo de gaseificação. Foi o principal gaseificador por 150 anos e ainda hoje é utilizado na gaseificação do carvão mineral e da biomassa, em menor escala (HENRIQUES, 2009). De fato, os gaseificadores *updrafts* Lurgi desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial são na atualidade usados na produção de gasolina na África do Sul.

A geometria de um gaseificador contracorrente é apresentada pela Figura 04. A biomassa é introduzida pela parte superior (geralmente, através de válvula rotativa ou porta de alimentação) e o ar é introduzido pela parte inferior, através de uma

grelha. Deste modo, a biomassa desce em contracorrente com o agente gaseificador e sofre em sequência os processos secagem, pirólise, redução e combustão.



**Figura 04. Geometria de um gaseificador contracorrente.**  
(fonte: adaptado de REED e DAS, 1988)

A grelha, base do gaseificador, é o local onde o agente gaseificador reage com o carvão vegetal para formar gás carbônico e água a elevadas temperaturas. O sólido residual remanescente após a liberação dos voláteis é queimado e a temperatura chega a cerca de 1300 °C. As cinzas caem através para a parte inferior e os gases quentes sobem para serem reduzidos. Por isso, operacionalmente, a grelha da zona de combustão é peça fundamental: deve ser capaz de permitir que as cinzas resultantes caiam para a zona de cinzas e evitar a redução da área de contato com o gás.

Enquanto o gás ascende,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  reagem endotermicamente com o carvão para formar  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ ; as reações de redução ocorrem na zona de redução, que atinge temperaturas aproximadas de 750 °C (REED e DAS, 1988). Um pouco mais acima da zona de redução, a biomassa é pirolisada e os componentes voláteis são liberados. Na zona de pirólise, a baixa temperatura gera grande quantidade de bio-óleo e considerável quantia de alcatrão é formada; o bio-óleo condensa e o alcatrão deixa o gaseificador com o gás produzido. Uma séria consequência é que o líquido



pirolítico formado, não craqueado na zona de combustão, pode causar incrustações e entupimentos em tubulações e partes do equipamento.

Por fim, na zona mais superior, a biomassa é seca, resfriando o sistema para cerca de 200-300 °C. Incorporados dos materiais voláteis resultantes da pirólise e da umidade do combustível, os gases saem pela parte superior do gaseificador. As Figuras 05 e 06 mostram o esquema de funcionamento mencionado.

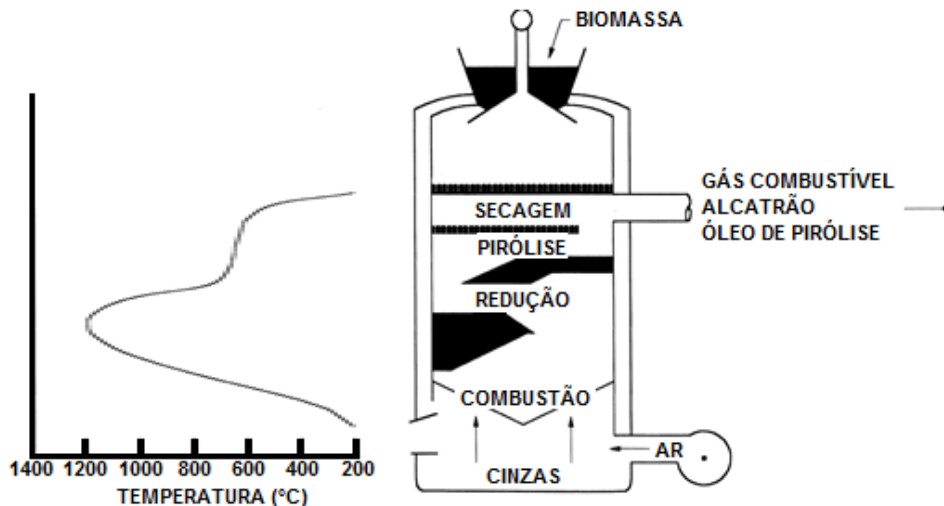


Figura 05. Esquema de funcionamento de gaseificador *updraft*.  
(fonte: adaptado de MCKENDRY, 2002)

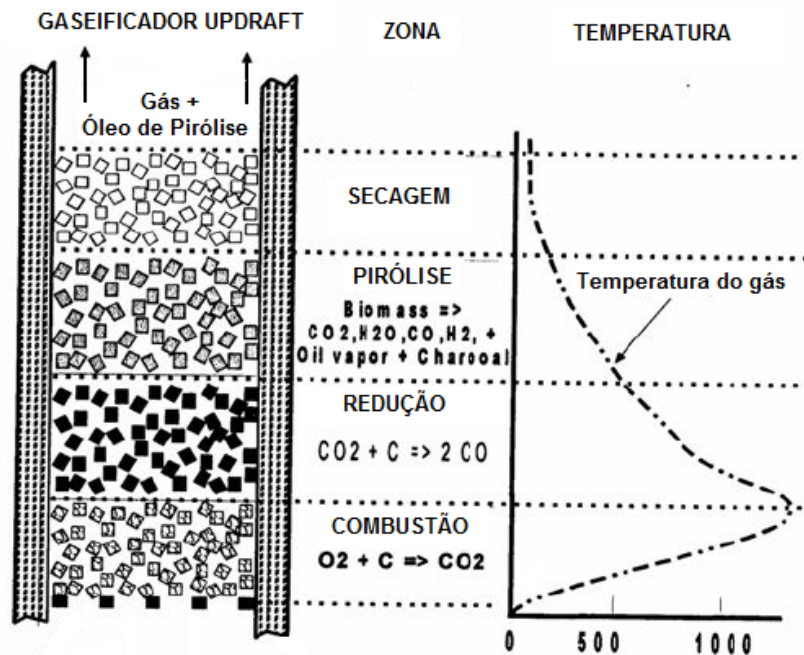


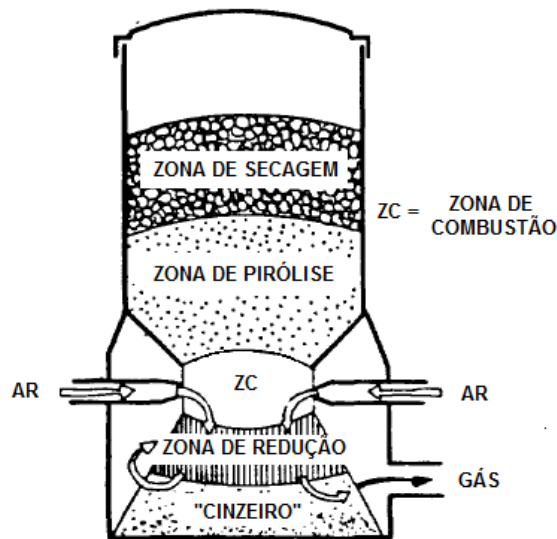
Figura 06. Resumo do processo de gaseificação em contracorrente.  
(fonte: adaptado de HENRIQUES, 2009)

A temperatura na zona de gaseificação é controlada pela adição de vapor ao ar usado para gaseificação. Devido à baixa temperatura do gás produzido, é elevado o teor de alcatrão no gás produzido. Pelo fato de ser carregado de alcatrão, o poder calorífico é elevado e a eficiência global de energia do processo é alta. Em contrapartida, deve-se evitar o seu uso direto em motores de combustão interna, caldeiras e fornos. O efeito filtrante da biomassa ajuda à produção de um gás com baixo teor de particulados e baixa velocidade (MCKENDRY, 2002; BELGIORNO et al., 2003).

#### **3.3.1.1.3. Gaseificador concorrente**

O fluxo concorrente é a tecnologia de gaseificação mais utilizada e difundida. Durante a Segunda Grande Guerra, a maioria dos veículos que utilizavam gás como combustível estava equipada com gaseificadores concorrentes (REED e DAS, 1988).

A geometria de um gaseificador concorrente é apresentada pela Figura 07. Neste tipo de gaseificador, a biomassa e o ar movem-se no mesmo sentido: a biomassa e o agente gaseificador alimentam o reator pela parte superior do equipamento (a alimentação de ar pode ser feita pelo topo do gaseificador ou lateralmente), ou seja, a biomassa desce em concorrência com o ar e sofre em sequência os processos de secagem, pirólise, combustão e redução. Como consequência, o gás produto deixa o gaseificador após passar, por último, através da zona quente, permitindo a quebra parcial do alcatrão formado durante a gaseificação.



**Figura 07. Geometria de um gaseificador concorrente.**  
(fonte: adaptado de REED e DAS, 1988)

Primeiramente, o agente gaseificador, ao ser introduzido no reator, reage com a biomassa, ainda intacta. O material sólido sofre uma secagem e o gás gerado ganha umidade. A temperatura máxima do processo (entre 800 e 1200 °C) ocorre na zona de pirólise; os gases, já aquecidos na região de secagem, reagem com a biomassa e geram gases, carvão e alcatrões na zona de pirólise.

Em seguida, os produtos da pirólise são forçados a passar pela zona de combustão. O alcatrão é, então, craqueado e convertido em gases leves e coque. O resultado é um gás limpo, mas com poder calorífico menor do que aquele produzido pela gaseificação contracorrente: o gás produzido possui menor teor de alcatrão do que comparado com o modelo *updraft*, mas apresenta maior teor de particulados (MCKENDRY, 2002; BELGIORNO et al., 2003). KINTO (2001), porém, discorda e afirma que o craqueamento do alcatrão não prejudica o conteúdo energético do gás gerado. Como a configuração do gaseificador concorrente prevê uma região de combustão próxima a saída do gás, o risco de entupimentos e incrustações diminui, uma vez que as substâncias voláteis contaminantes pouco se condensam (LORA, 2008).

As características da zona de combustão têm efeito fundamental na qualidade do gás produzido. Há casos em que o reator sofre uma redução no diâmetro interno (garganta); os injetores de ar (que garantem a uniformidade do agente oxidante) e a alta concentração dos gases tornam mais fácil a destruição do alcatrão. Pode-se,

também, encontrar situações em que não há estrangulamento na zona de combustão. Nestes casos, o conteúdo de alcatrão nos gases gerados é maior (MARTINEZ, 2008).

Por fim, o gás é liberado diretamente na zona de redução, onde sofre oxidação (com formação de mais CO), é secado e escapa para a atmosfera a uma temperatura média de 700 °C (HENRIQUES, 2009). As Figuras 08 e 09 resumem o que foi explicado.

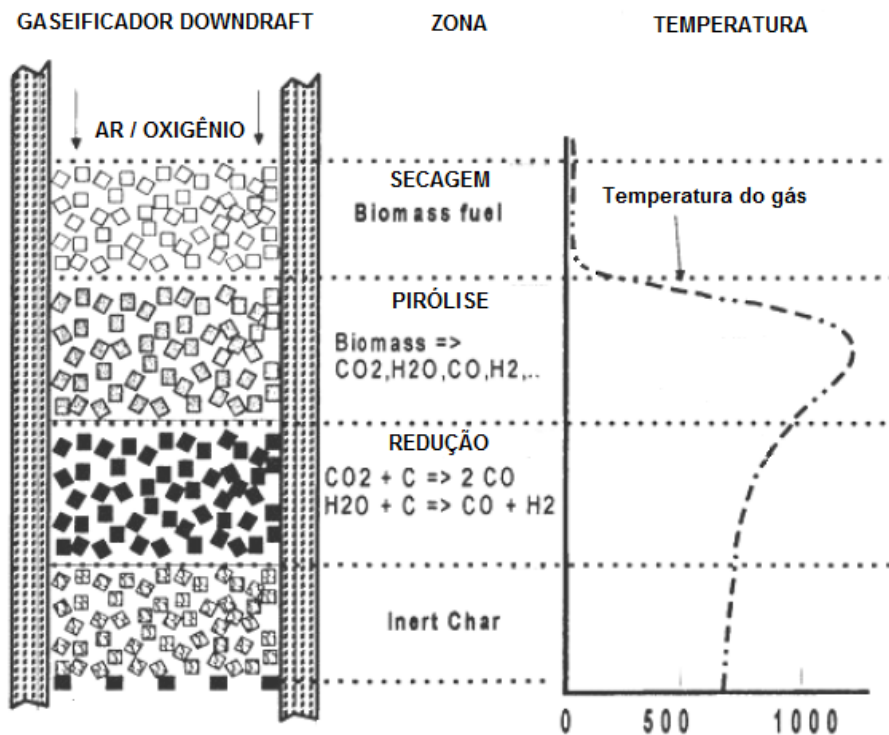


Figura 08. Resumo do processo de gaseificação em contracorrente. (fonte: adaptado de HENRIQUES, 2009)

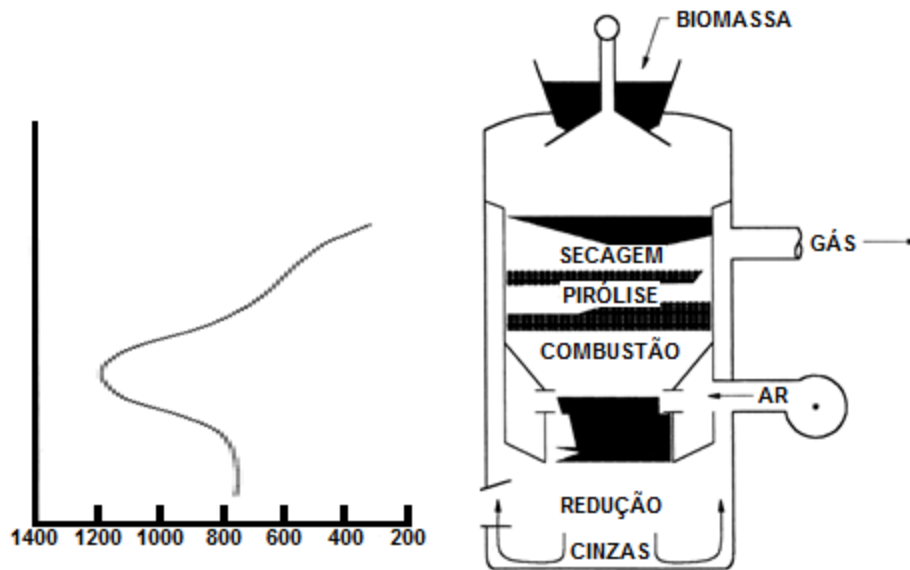


Figura 09. Esquema de funcionamento de gaseificador *downdraft*.  
(fonte: adaptado de MCKENDRY, 2002)

Os gases deixam o gaseificador a temperaturas próximas de 900-1000 °C; por este motivo, a eficiência global de energia de um gaseificador *downdraft* é baixa, devido ao alto teor de calor transportado pelo gás quente: não há troca de calor com as zonas de pirólise e secagem, ao contrário do gaseificador contracorrente (LORA, 2008). Em compensação, uma vez que o teor de alcatrão é baixo, o gás não precisa ser lavado e pode ser usado ainda quente, o que aumenta a eficiência do sistema. KINTO (2001) defende a utilização dos gases gerados pelos gaseificadores concorrentes em motores de combustão interna.

Por outro lado, os gaseificadores de fluxo descendente têm como região crítica a zona de combustão. A temperatura deve ser tal que garanta o craqueamento do alcatrão durante toda a zona. Além do mais, podem ser criadas regiões de vácuo, por onde o alcatrão pode transitar sem sofrer decomposição. HIGMAN (2003) ainda cita o baixo rendimento como uma desvantagem, uma vez que a quantidade de ar necessária é maior em comparação com o gaseificador de modelo *updraft*.

Ainda, de acordo com LORA (2008), além do projeto da garganta e do controle de fluxo do agente de gaseificação, este tipo de gaseificador é particularmente vulnerável a problemas causados por combustíveis com alto teor de cinzas e a variações no teor de umidade. Portanto, em instalações de grande porte, é necessária uma pré-secagem do gás gerado.

#### 3.3.1.1.4. Gaseificador de corrente cruzada

A tecnologia de corrente cruzada é apresentada pela Figura 10. O combustível alimenta o gaseificador pela parte superior do equipamento, enquanto que o agente gaseificador entra em alta velocidade por um bico único, localizado em uma das paredes laterais. O gás gerado é retirado também lateralmente, na parede oposta, na mesma direção em que o ar é injetado.

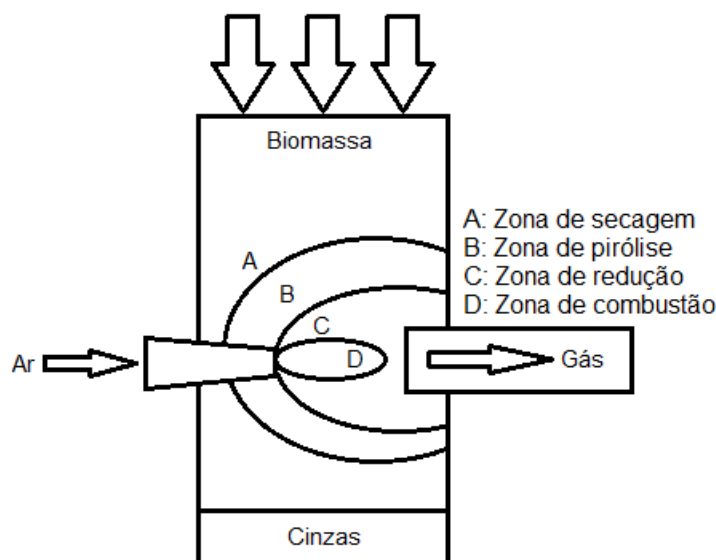


Figura 10. A tecnologia de corrente cruzada.  
(fonte: adaptado de KINTO, 2001)

O bico é dimensionado de modo a injetar o agente gaseificador diretamente na zona de combustão (MARTINEZ, 2008). O agente gaseificador entra em alta velocidade, induz uma circulação substancial e flui através do leito de combustível e carvão, liberando os gases muito rapidamente. O resultado é um gás de baixo teor de alcatrão, que permite rápida adaptação às alterações de carga do motor (HENRIQUES, 2009). De acordo com MARTINEZ (2008), a aplicação mais imediata é a produção de energia térmica.

São vantagens a simplicidade e a leveza dos gaseificadores de fluxo cruzado. O combustível e as cinzas servem como isolante térmico para as paredes do

gaseificador, o que permite a construção do equipamento em aço leve; bicos e grelhas, entretanto, devem ser fabricados de material refratário (REED e DAS, 1988). Já as desvantagens se concentram na sensibilidade às variações de composição e tamanho do combustível. A não uniformidade pode gerar zonas de combustão com material não-pirolizado, o que acarreta momentos de alta taxa de produção de alcatrão. Ademais, qualquer variação no tamanho do combustível pode atrasar o tempo de resposta e aumentar a massa térmica.

MARTINEZ (2007), HENRIQUES (2009) e o Centro Nacional de Referência em Biomassa - CENBIO (2002) resumiram as vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo.

### **Vantagens dos gaseificadores concorrentes**

- ✓ Construção relativamente simples e sistema de gaseificação comprovado: mais de um milhão de veículos utilizaram esse sistema durante a Segunda Guerra Mundial;
- ✓ Gás produzido relativamente limpo, que pode ser utilizado em motores de linha, sem grandes modificações;
- ✓ Alto potencial para conversão de carbono;
- ✓ Pouco arraste de cinzas, que são retiradas pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de sistemas de limpeza de elevada eficiência e, portanto, mais caros.
- ✓ Consomem entre 99 a 99,9 % do alcatrão: assim, o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizado em motores com um mínimo de limpeza.

### **Desvantagens dos gaseificadores concorrentes**

- ✓ O combustível necessita ter baixa umidade (< 20 %);
- ✓ Restrição de granulometria do material a ser utilizado como combustível: a granulometria tem de ser uniforme e não muito pequena;

- ✓ Alta temperatura do gás de saída (700 °C): desta forma, esta energia é perdida, a menos que haja algum aproveitamento (para pré-aquecimento do ar ou secagem do combustível, por exemplo);
- ✓ Possibilidade de fusão das cinzas, uma vez que as temperaturas de operação são muito elevadas.

### **Vantagens dos gaseificadores contracorrentes**

- ✓ Construção muito simples e robusta;
- ✓ Habilidade para operar com materiais de elevado teor de água e materiais inorgânicos, como lodo residual do tratamento de esgoto;
- ✓ Baixa temperatura dos gases de saída;
- ✓ Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha, capaz de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida);
- ✓ Alto tempo de residência dos sólidos;
- ✓ Produz gás adequado para queima direta.

### **Desvantagens dos gaseificadores contracorrentes**

- ✓ Gás produzido muito sujo e com alto teor de alcatrão: no caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, o alcatrão deve ser removido;
- ✓ Necessita de um sistema de limpeza muito caro;
- ✓ A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito ou formação de canais preferenciais, o que encarece o processo.

#### **3.3.1.1.5. Comparações dos gaseificadores de leito fixo**

A tabela 3 mostra as comparações dos gaseificadores de leito fixo

Tabela 3 – Comparações entre os gaseificadores de leito fixo



Tipo de Gaseificador (quanto ao fluxo)	Downdraft (descendente)	Updraft (Ascendente)	Crossflow (transversal)
Teor de umidade (% base seca)	12 (máx. 25)	43 (máx. 60)	10 - 20
Teor de cinzas	0,5 (máx 6)	1,4 (máx. 25)	0,5 – 1,0
Granulometria (mm)	20 – 100	5 – 100	5 - 20
Temp. gases na saída (°C)	700	200 – 400	1250
Teor de alcatrão (g/Nm <sup>3</sup> )	0,015-0,5	30 – 150	0,01 – 0,1
Eficiência nominal térmica com gases quentes (%)	85 - 90	90 – 95	75 – 90
Eficiência nominal térmica com gases frios (%)	65-75	40 – 60	70 – 85
PCI dos gases (MJ/kg)	4,5-5,0	5,0 – 6,0	4,0 – 4,5

Fonte: Rendeiro et al. "Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida" (2008).

### 3.4. Reatores de leito fluidizado

A história do processo de gaseificação em leito fluidizado está intimamente ligada ao desenvolvimento do modelo Winkler, processo no qual o carvão mineral é gaseificado em grande escala, no começo da década de 1920. Apesar de já ser antigo o seu uso nos processos de conversão termoquímica da turfa (principalmente em indústrias petroquímicas para craqueamento dos hidrocarbonetos), há poucas experiências nos processos de gaseificação da biomassa em larga escala. De acordo com LORA (2008), apesar do desenvolvimento de novas tecnologias promissoras, ainda se busca um equipamento simples, eficiente e econômico para comercialização mundial.

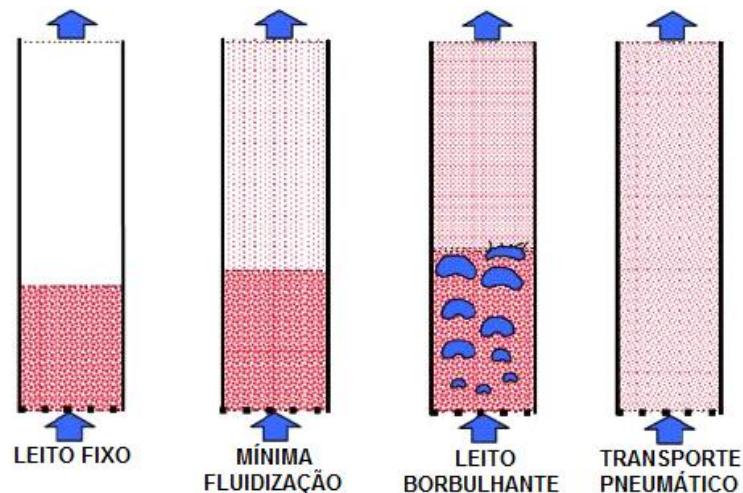
Sua vantagem sobre os gaseificadores de leito fixo é a distribuição uniforme de temperatura na zona de gaseificação. Os gaseificadores de leito fluidizado têm como característica principal o fato de um leito de partículas inertes (areia, cinzas, alumina) ser fluidizado pelo agente de gaseificação e mantido em suspensão com o combustível. A maior aproximação entre o combustível e o elemento oxidante

aumenta as taxas de reação e o contato entre o material volátil e as partículas inertes favorece a uniformidade da temperatura em todo o leito e a eficiência da transferência de calor. Por isso, as zonas de pirólise, combustão e redução são contínuas.

O termo fluidização é aplicado ao processo onde um leito fixo, normalmente argila (sílica *sand*), é transformado em um estado quase-líquido (*liquid-like*) pelo contato com o gás ascendente (agente de gaseificação). Primeiramente, o agente gaseificador é forçado a entrar no reator pelos bicos injetores, o que causa o aumento da resistência do leito de partículas ao movimento vertical do ar. Com o aumento da velocidade do agente gaseificador, as partículas tendem a se reorganizar, aumentando o leito e diminuindo a resistência à passagem do ar. Mantendo-se o aumento de velocidade, a força de arrasto se iguala ao peso das partículas (num processo que HENRIQUES (2009) chama de fluidização incipiente); neste momento, o sistema fluido-partícula se comporta como um líquido. A velocidade na fluidização incipiente é chamada de velocidade mínima de fluidização.

Ao se aumentar ainda mais a velocidade, o leito passa a não mais se expandir uniformemente. A partir daí, duas fases podem ser observadas na seção transversal do leito: bolhas (apenas gás) e emulsão (mistura de gás e partículas sólidas). Uma vez que as bolhas são responsáveis por grande escoamento de material particulado, o leito é levado a uma situação em que as partículas são arrastadas pelo gás para a região de *freeboard*.

A elevação da vazão apenas acarreta o aumento do número e tamanho de bolhas. Quando a velocidade é alta o bastante para provocar o arraste de todas as partículas do leito, o regime torna-se pneumático. A Figura 11 ilustra todo o processo.



**Figura 11. Evolução da pressão na base de um leito de material particulado com o aumento da vazão de ar. (fonte: CENBIO, 2002)**

O leito é aquecido por combustível auxiliar (geralmente, GLP) até que a temperatura seja alta o bastante para que o processo se torne auto-suficiente termicamente. O combustível alimenta o reator quando este se encontra a uma temperatura de 900 °C, já próxima da temperatura de regime estacionário de projeto. Não obstante, como a biomassa apresenta alta reatividade, os gaseificadores de leito fluidizado podem operar a temperaturas mais baixas, o que reduz, de acordo com LORA (2008), os teores de enxofre, material particulado e óxidos de nitrogênio. Entretanto, o craqueamento do alcatrão não será completo, e o gás produzido terá teores relativamente elevados da substância. Para a produção de um gás limpo, seria necessária uma temperatura 200 a 300 °C superior (KINTO, 2001).

A gaseificação em leito fluidizado foi desenvolvida originalmente para resolver os problemas operacionais dos gaseificadores de leito fixo relacionados com matéria-prima com alto teor de cinzas e, principalmente, para aumentar a eficiência. A eficiência de um gaseificador de leito fluidizado é cerca de cinco vezes maior que a dos de leito fixo, com valores por volta de 2000 kg/m<sup>2</sup> h.

Os dois tipos principais de gaseificadores de leito fluidizado são o circulante e o borbulhante; a diferença entre eles está na velocidade com a qual o gás escoou pelo leito. No de leito borbulhante, a velocidade do agente gaseificante em seu escoamento ascendente é baixa, variando de 1-3 m/s, e a expansão do leito inerte limita-se apenas à zona inferior do gaseificador. Desta forma, o material do leito e o carvão não saem do reator (HENRIQUES, 2009).

Por outro lado, a velocidade ascendente do agente gaseificador do modelo de leito circulante varia entre 5-10 m/s. Conseqüentemente, o leito expandido ocupa o reator inteiro e uma fração do material do leito e de carvão é carregada para fora do reator junto com a corrente de gás. Esta fração é capturada e reciclada no reator utilizando um ciclone que intercepta a corrente de gás (BELGIORO, 2003). Gaseificadores de leito fluidizado borbulhante e circulante são mostrados esquematicamente na Figura 12.

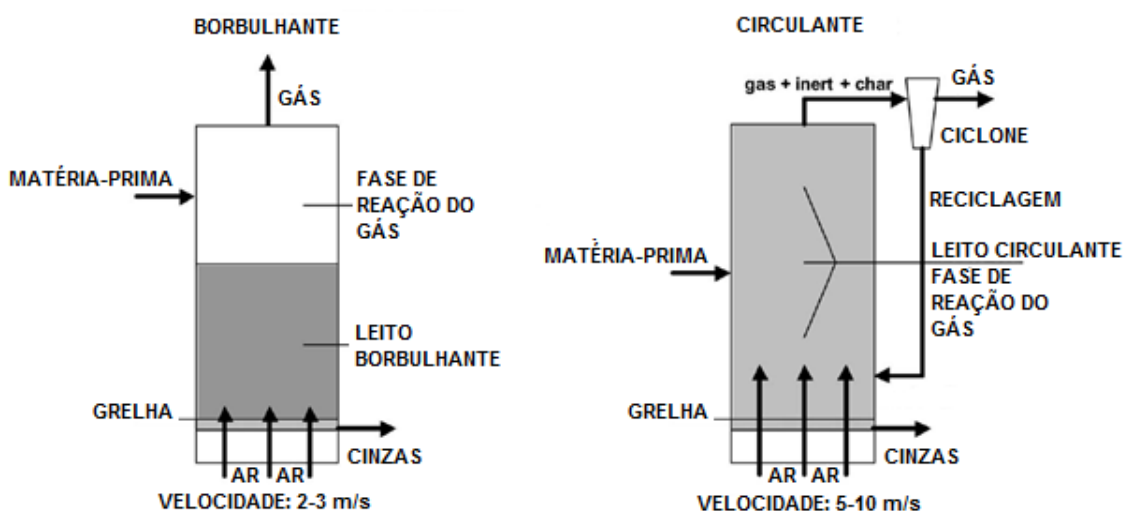


Figura 12. Esquema de gaseificador de leito borbulhante e circulante. (fonte: adaptado de BELGIORNO et al., 2003)

### Vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fluidizado

A tecnologia de leito fluidizado apresenta perspectivas promissoras e atualmente é alvo de pesquisas abrangentes por apresentarem as vantagens:

- ✓ Abrangência na utilização de biomassas com diferentes composições. A glicerina oriunda da produção do biodiesel, por exemplo, é uma biomassa de baixo poder de comercialização e alta disponibilidade no mercado;
- ✓ Facilidade no controle da temperatura de reação, pela variação na alimentação do agente gaseificador e do combustível;
- ✓ A necessidade mínima de pré-processamento dos insumos antes da alimentação;

- ✓ Flexibilidade na taxa de alimentação. Sistemas com capacidade de alimentação de 10 a 20 toneladas de biomassa por hora já estão em utilização;
- ✓ O mais indicado para sistemas com alta potência volumétrica: instalações de 25 MW já são atendidas pelos gaseificadores de leito fluidizado. Além do mais, é o projeto de gaseificador que mais vem sendo utilizado nos projetos de sistemas integrados com ciclos combinados (KINTO, 2001).

Existem, por outro lado, problemas relacionados aos gaseificadores de leito fluidizado. São desvantagens citadas por HENRIQUES (2009), CORRÊA NETO (2001) e KALATALO (2004):

- ✓ Temperatura de operação limitada;
- ✓ O alto conteúdo de cinzas e material particulado no gás;
- ✓ O gás gerado tende a conter carbono não queimado, que são arrastados com as cinzas;
- ✓ Altos teores de alcatrão, uma vez que a temperatura de operação é relativamente mais baixa;
- ✓ A maior temperatura dos gases de saída dificulta o processo de limpeza;
- ✓ Respostas lentas às mudanças de consumo do gás produzido.

#### **3.4.1. Gaseificação Indireta**

Os reatores usados para gaseificação indireta a vapor são agrupados como gaseificadores indiretos a gás (*char indirect gasifiers*) e gaseificadores indiretos a carvão (*gas indirect gasifiers*) cujos esquemas se encontram, respectivamente, nas Figuras 13 e 14.

### GASEIFICAÇÃO INDIRETA A GÁS

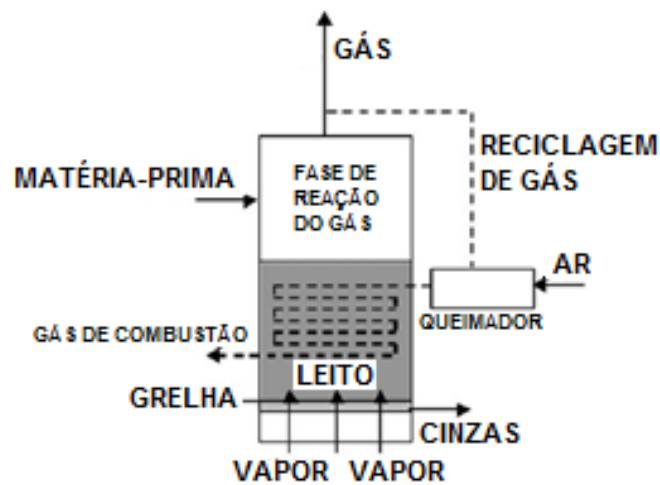


Figura 13. Gaseificador indireto a gás.  
(fonte: adaptado de BELGIORNO et al., 2003)

### GASEIFICAÇÃO INDIRETA A CARVÃO

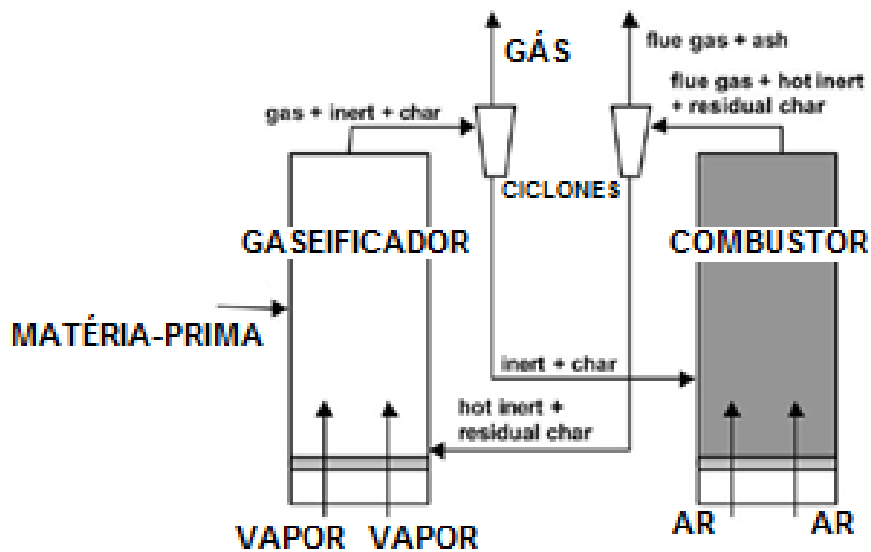


Figura 14. Gaseificador indireto a carvão.  
(fonte: adaptado de BELGIORNO et al., 2003)

A gaseificação indireta de gás usa um gaseificador de leito fluidizado a vapor com tubos trocadores de calor com o leito. Uma fração do gás combustível é queimada em um combustor de pulso e os produtos de combustão quentes proporcionam calor para a gaseificação da matéria-prima. Já o gaseificador indireto

de carvão consiste de dois reatores separados: Um de leito circulante que converte biomassa em gás produto e um combustor também de leito circulante que queima o carvão residual para proporcionar o calor necessário à gaseificação da biomassa. O leito arenoso (ou *sand*, em inglês) circula entre os dois reatores para transferência de calor.

A principal vantagem da gaseificação indireta é a alta qualidade do gás produto em contraste com os maiores custos de investimento e manutenção do reator (BELGIORNO et al., 2003).

### 3.4.2. Comparação entre os diversos tipos de gaseificadores

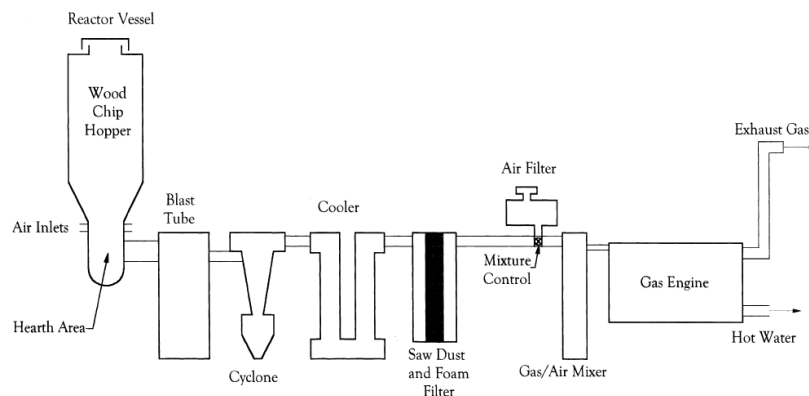
A Tabela 04 mostra as principais características dos gaseificadores

**Tabela 04. Características dos gaseificadores.**

Characteristics <sup>a</sup>	Fixed bed		Fluidised bed		Indirect gasifier	
	Updraft	Downdraft	Bubbling	Circulating	Char	Gas
Carbon conversion	****	****	**	****	*****	**
Thermal efficiency	*****	****	***	****	***	***
CGE	*****	***	***	****	**	***
Turndown ratio	**	**	****	****	****	****
Start-up facility	*	*	***	***	*****	*****
Management facility	****	****	**	**	*	*
Control facility	**	**	****	****	*****	*****
Scale-up potential	***	*	***	*****	**	***
Sized feed elasticity	****	*	**	**	**	**
Moisture feed elasticity	****	**	***	***	*	*
Ash feed elasticity	*	*	****	****	**	****
Fluffy feed elasticity	****	**	*	***	***	*
Sintering safety	*	*	***	*****	*****	***
Mixing	*	*	****	*****	*****	****
Cost safety	*****	****	**	**	*	*
Tar content	*	*****	**	***	**	**
Particulate content	*****	**	***	**	**	****
LHV	*	*	*	**	*****	*****

<sup>a</sup> \* poor, \*\* fair, \*\*\* good, \*\*\*\* very good, \*\*\*\*\* excellent.

Em comparação com os gaseificadores de leito fluidizado, os de leito fixo aparecem como a opção mais prática para o uso em geração de pequena escala usando motores ou turbinas a gás. A Figura 15 mostra um desenho esquemático para a produção de combustível para um motor estacionário a gás. A planta de gaseificação é robusta de simples construção e com poucas partes móveis (MCKENDRY, 2002).



**Figura 15. Desenho esquemático para a produção de combustível para um motor estacionário a gás.**  
(fonte: adaptado de MCKENDRY, 2002)

Para uso em motores, o gás produto de um gaseificador de leito fixo do tipo *downdraft* apresenta baixo teor de alcatrão com um alto teor de particulados. Como o alcatrão é um contaminante mais complicado para operação dos motores e os particulados podem ser removidos de forma relativamente fácil, este tipo de gaseificador é considerado o melhor para produção de combustível para motores a gás (MCKENDRY, 2002).

### 3.4.3. Classificação quanto à pressão de trabalho

A aplicação é o fator determinante para a escolha da gaseificação pressurizada ou atmosférica. Os gaseificadores pressurizados tendem a ser mais caros e complexos, pois é maior a sofisticação tecnológica dos componentes. Em compensação, a eficiência do sistema é aumentada, uma vez que não há necessidade de comprimir o gás combustível antes de sua injeção em uma turbina a gás. Em consequência, há a eliminação de perdas operacionais e redução da potência dos equipamentos auxiliares. Por isso, são muito usados para geração de energia nos ciclos termoelétricos.

Outra vantagem dos gaseificadores pressurizados reside no fato de a limpeza ser a quente, reduzindo as perdas térmicas. Nos sistemas atmosféricos, a limpeza a frio pode causar a condensação de alcatrões e perda de poder calorífico.

### 3.4.4. Propriedades da matéria-prima



Um teor de umidade acima de 30 % torna a ignição difícil e reduz o poder calorífico, uma vez que há a necessidade de evaporar a umidade adicional antes de a pirólise/gaseificação ocorrer. Um alto teor de umidade reduz a temperatura na zona de oxidação, resultando numa quebra incompleta dos hidrocarbonetos liberados na zona de pirólise. Material com alto conteúdo mineral pode tornar a gaseificação impossível. A temperatura de oxidação é frequentemente superior ao ponto de fusão da cinza, levando a problemas de *clinkering*<sup>1</sup> e problemas nas alimentações de biomassa posteriores. O gaseificador deve ser projetado para destruir alcatrão e hidrocarbonetos pesados liberados durante o estágio de pirólise do processo de gaseificação (MCKENDRY, 2002).

#### **3.4.5. Estudo de viabilidade técnico-econômica**

Em uma valorosa publicação, BRIDGWATER (1995) fez um estudo completo sobre a viabilidade técnica e econômica da gaseificação de biomassa para geração de eletricidade. Em primeiro lugar foram examinados os aspectos econômicos da gaseificação onde foi mostrado que, na época da publicação, o potencial para esta forma de energia renovável baseava-se no baixo custo do processamento de rejeitos utilizados como matéria-prima ou em algum tipo de incentivo fiscal, mesmo em instalações de relativamente grande porte e com processos de alta eficiência.

Em seguida, foram considerados todos os elementos que dizem respeito ao manuseio da madeira, preparação, gaseificação, qualidade e limpeza do gás produto e foram estabelecidos critérios para sua seleção visando a produção de gás limpo para aplicação em turbinas ou motores.

Especial ênfase foi dada ao status tecnológico à época da publicação e às principais incertezas, consideradas cruciais ao sucesso ou falência dos sistemas IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) baseados em biomassa. As principais conclusões foram que o manuseio, armazenagem, secagem, pulverização e peneiramento da madeira são processos bem desenvolvidos e não apresentam incertezas na operação e desempenho. A tecnologia da gaseificação da biomassa

---

<sup>1</sup> Formação de massas de resíduo incombustível fundido de forma irregular, subproduto da combustão de carvão (THEFREEDICTIONARY, 2011)

encontrava-se suficientemente avançada que justificava a construção de uma instalação de demonstração de grande porte para comprovar o conceito IGCC e para a obtenção de dados de performance confiáveis. Ainda persistiam áreas de incerteza, porém estas eram de menor importância e não seriam resolvidas a menos que uma grande instalação fosse construída. O processo de limpeza do gás já havia sido desenvolvido com sucesso em laboratórios até o ponto em que era necessária a demonstração em instalação de grande porte para experiência de longa duração.

BRIDGWATER (1995) ainda informou que um conceito relativamente novo (à época) de um gaseificador descendente estratificado (open-core) foi desenvolvido, em que não há uma garganta e o leito é suportado por uma grelha. Este conceito surgiu de uma ideia inicial dos chineses para aplicação em gaseificação de casca de arroz, e depois desenvolvido pela Syngas Inc.

Já está bem estabelecido que após a construção de uma primeira instalação que utiliza uma nova tecnologia as plantas subsequentes irão custar menos devido ao “efeito aprendido” – o conhecimento e experiência ganhos na construção e operação desta primeira planta irão melhorar o projeto e operação das plantas posteriores. Por exemplo, este efeito é largamente aplicado nos custos de produtos químicos onde “efeito aprendido” em torno de 15 a 20% são comuns, definidos como a redução do custo quando a produção é dobrada. Um efeito similar aplica-se aos custos de capital de novas instalações e um “efeito aprendido” de 20% resulta em uma redução potencial de custo de 50% quando se estiver construindo a décima planta ou instalação. Há apenas evidência empírica da existência deste efeito, mas é amplamente conhecido e vem sendo empregado de forma crescente na replicação de projetos baseados em biomassa, por exemplo, na justificativa de construção de 10 plantas de 27 MWe no Brasil, onde a primeira apresentaria um custo de 2750 US\$/kW<sub>e</sub> e para a décima o kW<sub>e</sub> custaria 1500 US\$ (BRIDGWATER, 1995).

A este respeito, CRAIG et al. (1995) fazem os seguintes comentários: Gaseificadores de biomassa comerciais já estão em uso para geração de calor de processo e vapor. As atividades de desenvolvimento atuais estão com foco na produção de eletricidade e envolvem a integração do processo de gaseificação com vários sistemas de limpeza para garantir um gás produto versátil e de alta qualidade.

Neste momento (1995), não há uma clara preferência por um determinado sistema simples de gaseificação. A Global Environment Facility, está avaliando dois sistemas oferecidos por fornecedores comerciais escandinavos para utilização em projeto da CHESF, no Nordeste do Brasil. Na avaliação foram comparadas as vantagens e desvantagens de utilizar gaseificação a ar a alta pressão (Bioflow) ou a baixa pressão (sistema TPS). A gaseificação a alta pressão deve garantir os níveis de pressão específicos da turbina escolhida e de todos os demais componentes do sistema, incluindo o sistema de limpeza do gás produto. Os sistemas de baixa pressão devem efetuar a limpeza do gás antes de comprimi-lo para a pressão de operação da turbina. Sistemas com insuflamento de ar produzem apenas gás de baixo PC, e uma significativa perda de eficiência ocorre se o gás deve ser resfriado a temperaturas ambiente antes de ser comprimido. Por esta razão, os programas Americano e Escandinavo de gaseificação estão enfatizando o uso de sistemas de limpeza de gás quente para gaseificadores com insuflamento de ar que irão operar a alta pressão. Apesar disso, o sistema TPS, com sistema de limpeza de gás frio foi escolhido para a planta pioneira baseando-se em curvas de aprendizado (“learning curves”) que apontam para a diminuição de custos em plantas subsequentes.

Na mesma publicação, CRAIG et al.(1995) tentam antever os melhores caminhos a serem seguidos para permitir o desenvolvimento da tecnologia de gaseificação aproveitando o conceito de exploração de um nicho de oportunidade. Para manter ou acelerar este desenvolvimento e estabelecimento da tecnologia no intervalo de tempo requerido para a conquista de mercados nacional e internacional é necessário perseguir sistemas de desenvolvimento, testes e programa de demonstração fortemente acoplados e integrados entre si. Tal sistema deve incorporar os resultados de cada estágio e tamanho em todos os demais, num processo de retroalimentação, desde a pesquisa em laboratório (kg/h), para uma unidade de desenvolvimento do processo (10-100 kg/h), para uma unidade de desenvolvimento da engenharia (1-10 t/h) e finalmente para uma planta piloto comercial (30-100 t/h).

### 3.4.6. Verificação de instalações implantadas

Dentre as diversas tecnologias disponíveis para a obtenção de energia a partir da biomassa, LORA e ANDRADE (2009) descreveram o projeto desenvolvido para gaseificação denominado GASEIFAMAZ, desenvolvido pelo CENBIO, IPT-SP e Universidade do Amazonas. O principal objetivo do projeto é verificar se a tecnologia indiana para gaseificadores de leito fixo de pequeno porte é adequada para suprimento de eletricidade de forma sustentável a comunidades isoladas localizadas na Amazônia. Para este fim, foi importado um gaseificador de 20 kW do Indian Institute of Technology. Durante os testes no IPT um PCS de 5,7 MJ/Nm<sup>3</sup> foi obtido para um consumo de biomassa de 18 kg/h. O sistema foi instalado em uma comunidade com 700 habitantes do estado de Amazonas que vende cupuaçu *in-natura* sem nenhum valor agregado. Espera-se, com a instalação do gaseificador, a formação de uma agroindústria local que permita a comercialização da polpa de cupuaçu, melhorando a qualidade de vida da população.

Com o objetivo de estudar os problemas envolvidos na ampliação da capacidade dos gaseificadores de leito fixo, foram projetadas, construídas e operadas duas diferentes instalações em Zaragoza, na Espanha. Um gaseificador com capacidade de processar entre 25 e 50 kg de biomassa/hora e outro com capacidade entre 200 e 300 kg de biomassa/hora. As duas instalações de diferente porte utilizaram a mesma biomassa. No artigo publicado por GARCIA-BACAICOA (1994), são detalhados os dados de construção e operação dos dois gaseificadores. No gaseificador maior, dois sistemas de grelha foram testados. Os resultados obtidos da análise do processamento de rejeitos florestais foram analisados. Valores acima de 90% para a eficiência de conversão de biomassa e de cerca de 70% para eficiência de gás frio foram alcançados. O procedimento experimental foi similar nos dois gaseificadores. Cada rodada foi iniciada com a ignição do carvão deixado em experimentos anteriores. Um soprador forneceu ar a 75% da vazão selecionada para o experimento. Após 5-10 minutos a ignição foi alcançada, o sistema de alimentação de biomassa iniciou e a vazão de ar foi regulada para o valor selecionado. Quando o gaseificador ficou cheio os sistemas de controle do tempo de residência (grelha vibrante e grelha excêntrica rotativa) foram acionados. Considerou-se que o regime

permanente foi alcançado quando as medições de temperatura apresentaram valores constantes. Esta situação foi alcançada em 20-30 minutos no menor e 40-60 minutos no gaseificador maior. Os experimentos duraram pelo menos 2,5 horas em regime permanente. Como o consumo de biomassa depende da vazão de ar introduzida e do projeto do sistema de remoção de cinzas, as influências destas duas variáveis foram analisadas de forma independente. Quando os experimentos acabavam, o fluxo de ar foi parado e todos os sistemas desligados. A instalação era mantida fechada até a extinção (1,5 dias para o menor e 3 dias para o gaseificador maior). Após o resfriamento das instalações a cinza era removida do ciclone e do Hopper. Lascas de madeira foram processadas em ambas as instalações.

As principais características notadas foram:

Para um dado projeto e operação do removedor de cinzas, a quantidade de biomassa processada e de gás produzido depende principalmente da vazão de ar introduzido. Ambos os valores aumentaram com a quantidade de ar introduzido. O consumo de biomassa pode ser aumentado pelo aumento da operação da grelha ou pelo aumento da vazão de ar introduzido.

Eficiência de conversão de massa e eficiência de gás frio (CGE, cold gas efficiency) aumentam com a razão de equivalência. CGE é a razão entre o PC do gás produto e o PC da matéria-prima original (biomassa). Os autores concluíram que na instalação maior, semi-comercial, características semelhantes àquelas do gaseificador pequeno foram encontradas.

Outra investigação experimental em um gaseificador de biomassa do tipo *downdraft* foi desenvolvida utilizando madeira de mobiliário e lascas de madeira, segundo relatado por ZAINAL (2002). O efeito da razão de equivalência na composição do gás, no PC e na taxa de produção de gás foi estudado. O PC do gás produto aumentou com a razão de equivalência inicialmente, atingiu um pico e então diminuiu com o aumento continuado da razão de equivalência. A vazão de gás por unidade de peso do combustível aumentou linearmente com o aumento da razão de equivalência. Foi observado também que a conversão completa do carbono para combustível gasoso não ocorreu mesmo para uma razão de equivalência ótima.

A performance do sistema gaseificador de biomassa é determinada em termos da eficiência do gás frio, eficiência de conversão de massa, vazão e PC do

gás produto. A qualidade do gás produto depende de vários fatores tais como o conteúdo de umidade da biomassa, a vazão de ar insuflado, o tamanho da madeira, a posição do injetor de ar e o volume da zona de redução. Análises do gás também foram apresentadas para determinar o desenvolvimento da composição do gás no gaseificador desde sua partida. A análise do gás serve de base para determinar o PC do gás produto. Um total de 57 rodadas foram realizadas durante o período de estudo. Visando reduzir o número de parâmetros que influenciam na performance do gaseificador a serem avaliados, uma razão de equivalência (Equação [11]) é definida para refletir o efeito combinado da vazão de ar insuflado, taxa de fornecimento de madeira e duração da rodada (ZAINAL, 2002).

$$\text{razão de equivalência } \phi = \frac{(\text{vazão de ar insuflado}) \times (\text{Duração da rodada})}{(\text{massa de madeira que entra}) \times (A/F \text{ para } \phi=1)} \quad [11]$$

A razão ar/combustível (A/F) para  $\phi = 1$  é 5,22 m<sup>3</sup> de ar/kg de madeira. A razão de equivalência para o gaseificador encontra-se na faixa entre 0,268-0,43.

Acompanhando a variação do PC com a razão de equivalência observou-se um pico indicando que há uma razão de equivalência ótima (0,38) para uma melhor performance do gaseificador *drowndraft*. A produção de gás por unidade de peso de biomassa aumenta linearmente com a razão de equivalência. A eficiência do gás frio foi da ordem de 80% enquanto que a eficiência global do sistema de geração de eletricidade ficou em torno de 10-11 %. E o consumo específico de biomassa foi da ordem de 2kg/kW h (ZAINAL, 2002).

O Grupo de Tecnologia em Biomassa (BTG – Biomass Technology Group) da Universidade de Twente, fez a monitoração em campo de 2 sistemas de gaseificação instalados em 2 países diferentes (Burundi e Ilhas Seychelles) nos anos 1980, cujos resultados foram publicados por MENDIS (1989). Várias características de operação foram levantadas: eficiência de conversão do gaseificador; temperatura externa; teor de alcatrão e de particulados, queda de pressão; composição do gás e PC; eficiência do motor/gerador; eficiência global do sistema e viabilidade econômica.

O gaseificador instalado em Burundi encontrava-se em péssimas condições, proporcionando muito pouca economia de óleo diesel. Uma melhor performance

poderia ser obtida se houvesse um melhor dimensionamento do sistema gaseificador/motor gerador. O sistema também apresentava a necessidade de um sistema contínuo de retirada de cinzas e de um sistema melhorado de limpeza do gás produzido. Já o gaseificador instalado nas Ilhas Seychelles apresentava melhores condições de operação, apresentando poucos problemas e operando de forma comparável favoravelmente a gaseificadores de projeto similar. Apresentou como pontos negativos o alto teor de alcatrão no gás produto e a rápida deterioração do óleo lubrificante do motor.

Um estudo comparativo da distribuição dos produtos orgânicos e inorgânicos em um sistema de gaseificação de biomassa de leito fixo descendente foi realizado por DE BARI (2000). Foi estudada a gaseificação de resíduos da agricultura, como madeira e cascas de amêndoa, em uma instalação de pequeno porte acoplada a um motor alternativo. Foi feita uma detalhada investigação da distribuição dos produtos orgânicos (alcatrão) e inorgânicos ( $\text{NH}_3$ , HCN, metais, etc.).

Neste trabalho tentou-se identificar a existência de certas relações entre a composição da matéria-prima (biomassa) e a distribuição dos produtos observada em regime permanente. A biomassa é caracterizada por sua composição elementar, seu teor de metais, lignina, celulose e hemicelulose. Verificou-se que uma composição diferente da matéria-prima estava associada com algumas importantes variações nos parâmetros monitorados no processo, tais como taxa de gaseificação, conteúdo de alcatrão e particulados no gás produto. Notou-se também que há três papéis importantes desempenhados pelo Cálcio no processo de gaseificação: (1) contribuir com certa decomposição da amônia; (2) promover a quebra interna do alcatrão produzido; (3) catalisar a gaseificação do carvão.

#### **3.4.7. Novas tendências**

ZHANG (2010) descreveu o estado da arte do desenvolvimento da tecnologia BTS (Biomass To Synthetic Fuels) ou da produção de biocombustíveis automotivos de segunda geração. Já existe um mercado para biocombustíveis automotivos de primeira geração, ou seja, bioetanol e biodiesel produzido a partir de culturas agrícolas em vários países. Dos pontos de vista econômico, ambiental, do uso da



terra e da água e do uso de fertilizantes há uma forte tendência de preferir o uso de biomassa (madeira e vários resíduos da agricultura como matéria-prima).

Desta forma, a produção de biocombustíveis de segunda geração utilizando a gaseificação da biomassa aparece como alternativa promissora. Após apresentar as instalações de demonstração já existentes Zhang concluiu que os biocombustíveis automotivos de segunda geração encontram-se no limiar de uma virada nos mercados de transporte de países industrializados especialmente aqueles com uma forte indústria madeireira

#### **4. Tecnologias de conversão**

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica.

Há de se mencionar, também, o uso da queima direta do biogás em caldeiras para cogeração e do surgimento de tecnologias remanescentes, porém não comerciais atualmente, como a da célula combustível. As turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo "Ciclo - Otto" ainda são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética.

#### **5. Estudo de Caso (1) - PUREFA**

As duas metas do projeto PUREFA, que são apresentadas neste artigo, tiveram como objetivo implantar um sistema demonstrativo, dentro da USP, nas instalações do CTH, capaz de captar, purificar, armazenar o biogás e utilizá-lo, como combustível, na geração de energia elétrica.

Para tal, foi utilizado um biodigestor modelo RAFA (**Figura 5**), com 6 metros de altura e volume útil de 25 m<sup>3</sup>, já existente no CTH, em pleno funcionamento e que é alimentado com efluente líquido gerado no CRUSP. Antes de ser tratado no biodigestor, o efluente passa por um sistema de pré-tratamento, composto por: caixa de areia, calha *Parshall*, tanque de acumulação e bomba, que provoca seu deslocamento até o biodigestor (**Figura 6**).





**Figura 6- Sistema de Pré-Tratamento do Efluente.**

**(COELHO ET al, 2003 a)**

Para identificar os equipamentos a serem usados no desenvolvimento das metas do projeto, primeiramente foram feitas análises do biogás gerado por duas empresas. A COMGÁS foi a primeira e os resultados obtidos não estavam dentro do padrão esperado. Por conseguinte a White Martins, empresa que já havia prestado seus serviços para o CENBIO com sucesso, foi solicitada e os resultados desta análise estão descritos na **Tabela 3**, a seguir.

**Tabela 3- Análise do Biogás Antes do Sistema de Purificação.**

<b>Compostos Químicos</b>	<b>%Vol ou ppm</b>
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	1,23%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	15,5%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	4,75%
CH <sub>4</sub> (Metano)	75,8%
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrog.)	649 ppm
H <sub>2</sub> O (água)	2,62%

Fonte: YAMASHITA, 2004 – Certificado de Análise.

Com os resultados obtidos, foi desenvolvido um sistema de purificação do biogás, para que este possa ser usado posteriormente em um sistema de conversão do biogás em energia elétrica. O sistema de purificação é composto por dois compartimentos e está instalado na linha de captação do gás. Antes de o biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, sendo que uma delas visa à retirada da umidade e a outra à retirada do ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), e sílica gel azul, utilizada como indicador, pois quando saturada, possui coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H<sub>2</sub>S, que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento (**Figuras 7 a 9**).

O resultado da análise do biogás após passar pelo sistema de purificação é descrito na **Tabela 4** a seguir.

**Tabela 4- Análise do Biogás Após o Sistema de Purificação.**

<b>Compostos Químicos</b>	<b>%Vol ou ppm</b>
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	0,89%
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	13,2%
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	4,07%
CH <sub>4</sub> (Metano)	80,8%
H <sub>2</sub> S (Sulfeto de Hidrog.)	< 1,0 ppm
H <sub>2</sub> O (água)	0,98%

Fonte: YAMASHITA, 2004 – Certificado de Análise.

A eficiência do sistema de purificação proposto se comprova pelo decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio e água.

O horímetro (**Figura 7**), equipamento que contabiliza o número de horas que a bomba operou, encontra-se instalado na bomba de alimentação do biodigestor. A partir da análise da DBO do esgoto na entrada e na saída do biodigestor (**Tabelas 5 e 6**) e dos dados do horímetro é possível fazer o cálculo teórico do volume de biogás gerado, resultando em 4 m<sup>3</sup>/dia.



**Figura 7- Horímetro (COELHO et al, 2005)**

**Tabela 5- Resultado da Análise do Efluente Antes de seu Tratamento no Biodigestor.**

Parâmetros	Expresso Como	Resultado
Alcalinidade Total (mg/L)	CaCO <sub>3</sub>	156
DBO (mg/L)	O <sub>2</sub>	329
DQO (mg/L)	O <sub>2</sub>	1,02 X 10 <sup>3</sup>
Gás Carbônico (mg/L)	CO <sub>2</sub>	> 100
pH a 25 °C (-)	-	6,15
Sólidos Totais (mg/L)	-	1,13 X 10 <sup>3</sup>
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	-	460
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	-	668
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	-	661
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)	-	400
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	-	261
Sulfeto (mg/L)	S	3,0

Fonte: ANGELO, 2004.

**Tabela 6- Resultado da Análise do Efluente Após seu Tratamento no Biodigestor.**

Parâmetros	Expresso Como	Resultado
Alcalinidade Total (mg/L)	CaCO <sub>3</sub>	264
DBO (mg/L)	O <sub>2</sub>	59
DQO (mg/L)	O <sub>2</sub>	148
Gás Carbônico (mg/L)	CO <sub>2</sub>	65
pH a 25 °C (-)	-	6,84
Sólidos Totais (mg/L)	-	454
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	-	336
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	-	118
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	-	254
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)	-	239
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	-	15
Sulfeto (mg/L)	S	7,0

Fonte: ANGELO, 2004.

Com o valor da produção do biogás pôde-se dimensionar e adquirir o gasômetro e o grupo motor-gerador ciclo Otto.

O gasômetro tem a finalidade de armazenar biogás suficiente para que o motor funcione cerca de duas horas, possibilitando um monitoramento das características do motor. O gasômetro descarta a idéia inicial de instalar um compressor, que exigiria uma outra série de equipamentos sofisticados, tais como secadores. É feito de PVC e possui duas camadas. A

interna é preta e resistente o suficiente para conter o biogás. A externa é azul e protege a camada interior do meio ambiente.

O gasômetro tem um volume útil de 10 m<sup>3</sup>, cujas dimensões são:

- Diâmetro do corpo: 2000 mm;
- Comprimento: 3200 mm.



**Figura 8- Gasômetro (COELHO et al, 2005)**

Um conjunto sensor-totalizador foi adquirido para que se possa monitorar a produção do biogás com maior facilidade.

A empresa Comercial Diesel Parts ofereceu o grupo motor-gerador de baixa potência (18 kW), que melhor atendia às necessidades do projeto, acompanhado de um quadro de comando e de um quadro de teste. Após realização de teste no grupo motor-gerador utilizando Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como combustível e verificando o perfeito estado de funcionamento do equipamento, o mesmo foi adquirido. Apesar de possuir potência superior às das outras opções encontradas, foi a única possibilidade que se apresentou viável (**Figura 9**).



**Figura 9- Grupo Motor-gerador (COELHO et al, 2005).**

De posse de todos os equipamentos, um abrigo foi projetado e construído (**Figuras 10 e 11**). A construção em alvenaria foi executada pela Famosa Engenharia e Construções, que apresentou a proposta melhor elaborada, incluindo um "radier" na execução da obra, permitindo maior estabilidade do solo para suportar as cargas dos equipamentos.



**Figuras 10 e 11- Construção em Alvenaria para Abrigo dos Equipamentos**

(**COELHO et al, 2005**).

Terminada a construção, a tubulação da saída do sistema de purificação do biogás foi prolongada até o abrigo. Em seguida foram instalados o sensor-totalizador, um manômetro e uma válvula direcional, para depois ser instalado o gasômetro (**Figuras 12 a 15**).



**Figuras 12 e 13- Sensor-totalizador de Vazão Instalado no Abrigo (COELHO et al, 2005).**



**Figura 14- Manômetro em U (COELHO et al, 2005).**



**Figura 15- Gasômetro (COELHO et al, 2005).**

Com estes equipamentos devidamente alocados, foram instalados os demais equipamentos: grupo gerador (**Figura 16**), painel de teste (**Figura 17**), painel de comando (**Figura 18**) e dado o "start up" do sistema, permitindo a realização dos testes de desempenho dos equipamentos, tempo de operação, energia gerada e análise dos gases de exaustão do grupo gerador.



**Figura 16- Grupo Gerador (COELHO et al, 2005).**



**Figura 17- Painel de Teste do Grupo Gerador (COELHO et al, 2005).**





**Figura 18- Painel de Comando do Grupo Gerador (COELHO et al, 2005).**

Os resultados das análises dos gases de exaustão estão descritos na **Tabela 7**.

**Tabela 7- Análises dos Gases de Exaustão.**

Componente	Análises			
	10:38 h	11:00 h	11:10 h	11:20 h
Hidrocarbonetos Totais como CH <sub>4</sub>	3,1%	0,67%	2,7%	0,19%
Monóxido de Carbono (CO)	641 ppm	929 ppm	787 ppm	922 ppm
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	8,8%	*	8,4%	*
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	5 ppm	15 ppm	48 ppm	65 ppm
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	3,7%	5,4%	5,7%	*
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm	<1 ppm

Fonte: YAMASHITA, 2005 – Certificado de Análise.

Segundo o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), as emissões estão diretamente relacionadas à carga. Durante a análise, o grupo gerador em questão estava submetido a uma carga de 2,4 kW (aproximadamente 15% de sua carga máxima) e, por ser uma carga relativamente baixa, acarretou maior emissão de hidrocarbonetos totais. Como o ajuste da admissão do ar ainda não está em seu ponto ótimo, a queima fica ainda mais incompleta e como consequência mais hidrocarbonetos são emitidos. Pode-se observar uma melhora no decorrer do tempo devido a ajustes feitos durante as análises.

## **6- ESTUDO DE CASO (2)**

Segundo Oliveira (2004), a geração de energia elétrica, com o uso de biogás como combustível, pode ser dividida nas seguintes tecnologias disponíveis no momento:

Conjunto Gerador de Eletricidade – Consiste em um motor de combustão interna ciclo Otto (álcool, gasolina ou diesel) adaptado para o uso do biogás como combustível, acoplado a um gerador de eletricidade, independente da rede de energia elétrica da concessionária local.



Conjunto Gerador Economizador de Eletricidade – Consiste em um motor de combustão interna ciclo Otto (álcool, gasolina ou diesel) adaptado para o uso do biogás como combustível, acoplado a um motor assíncrono, 2 ou 4 pólos, que passa a gerar energia ao ser conectado à rede de energia elétrica da concessionária local.

No primeiro caso, o conjunto é independente de rede de energia elétrica local, gerando energia dentro da propriedade com o sistema de distribuição interno isolado. No segundo caso, gerador economizador de eletricidade, o equipamento gera energia somente se estiver conectado à rede de distribuição da concessionária de energia somente se estiver conectado à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica, deixando de funcionar se a mesma sofrer interrupção, ou manutenção nas redes elétricas externas. Neste caso a energia gerada é distribuída na propriedade e na rede externa até o transformador mais próximo (Oliveira, 2004).

Estudo desenvolvido por Oliveira (2004), avaliando o potencial de produção de energia elétrica tendo como fonte de energia o biogás, na região do meio oeste catarinense, concluiu que o consumo médio de energia nas propriedades é de (600 a 1.800KWh/mês). Tomando como base uma granja de produção de suínos com capacidade para produzir em média de 50m<sup>3</sup> biogás/dia, então sua capacidade de gerar energia é de 2.700KVAh/mês, o que equivale aproximadamente 2.160 KWh/mês. Propriedades com esta capacidade de geração de biogás podem se tornar auto-suficientes em energia elétrica, adotando um sistema que seja capaz de gerar 25KVA/h de potência elétrica. O consumo de biogás observado gira entre 16 a 25 m<sup>3</sup>/hora no sistema/motor estacionário para a geração de energia elétrica, dependendo da potência elétrica gerada.

O rendimento da transformação da energia contida no biogás em energia elétrica gira em torno de 25%, contra 65% quando transformada em energia térmica.

Em síntese são grandes os benefícios atribuídos ao uso do biogás, tanto pela preservação dos recursos locais, como a retirada de lenha próxima à residência rural evitando problemas como erosão do solo, por ser um gás higiênico produz menos fumaça quando comparado ao gás de bujão, evitando assim resíduos de fuligem nas panelas e demais utensílios de cozinha. Podendo também agregar valores econômicos a propriedade suinocultoras.

## **6.1 - ESTUDO DE CASO- DESCRIÇÃO**

O biodigestor é uma experiência nova em Minas Gerais e atende aos requisitos exigidos no protocolo de kyoto que estabelece normas de preservação do meio ambiente. O Estado é o primeiro a receber a verba do Banco Mundial para ser utilizado no projeto biodigestor em Uberlândia. Poucas regiões do Brasil, incluindo Toledo, utilizam este sistema alternativo de geração de energia (Jornal Correio, Uberlândia, 27/02/2006).

Foi efetuado um trabalho de coleta de dados com objetivo de analisar a viabilidade econômica e observação de biodigestores, em propriedades rurais onde se utilizam um sistema eficiente de tratamento dos dejetos de suínos como uma forma econômica para a utilização da biofertilização, produção de energia elétrica e o aquecimento de água e de campana em granjas de aves e suínos.

Em Uberlândia, foram visitadas duas propriedades que utilizam o sistema de biodigestão e foram pioneiras na instalação do mesmo em 2003. Os proprietários rurais estão utilizando o gás metano produzido e canalizando para produção de energia elétrica e térmica.

O estudo de caso foi desenvolvido em uma das propriedades rurais e teve como objetivo mostrar que o biodigestor é um investimento viável, além disso, proporciona grandes benefícios ao meio ambiente.

A propriedade atualmente está com 3,5 mil suínos em unidades terminais (UT), com produção máxima de dejetos. Estes suínos produzem em média 11 litros/animal de dejetos pelo sistema de lamina d 'água, onde são canalizados e por desnível/gravidade seguem para os tanques de digestão.

Atualmente a propriedade esta com 2 biodigestores em funcionamento cujo modelo está representado na figura 3.1, biodigestor com manta plástica para armazenar o biogás da biomassa fermentada.



Figura 3.1 – Foto ilustrativa de Biodigestores com manta plástica

Este modelo de biodigestor pode ser abastecido continuamente pela biomassa, que sofre ação das bactérias anaeróbicas produzindo o biogás e o biofertilizante.

O biogás liberado passa por filtros de água e de limalha de ferro, para retirada de impurezas como:  $H_2O$  e  $CO_2$  aumentando seu poder calorífico.

A figura 3.2 representa a vista em corte deste tipo de biodigestor utilizado nas propriedades, onde se fez o estudo de caso.

Após a filtragem o biogás vai para os compressores onde são armazenados sob pressão e com isso pode ser canalizado pelos chamados gasodutos para os secadores da fábrica de rações e granjas localizados a 11 km do compressor onde será usado, e também, para aquecer aves ou gerar energia, conforme ilustrado nas figuras 3.3 (a) e (b).

Depois de passarem no digestor, os resíduos sobrantes da biomassa fermentada, deixa o interior do biodigestor sob a forma líquida, rica em material orgânico, com grande poder de fertilização, formando um lagoa de dejetos, conforme mostrado na figura 3.4 (a).

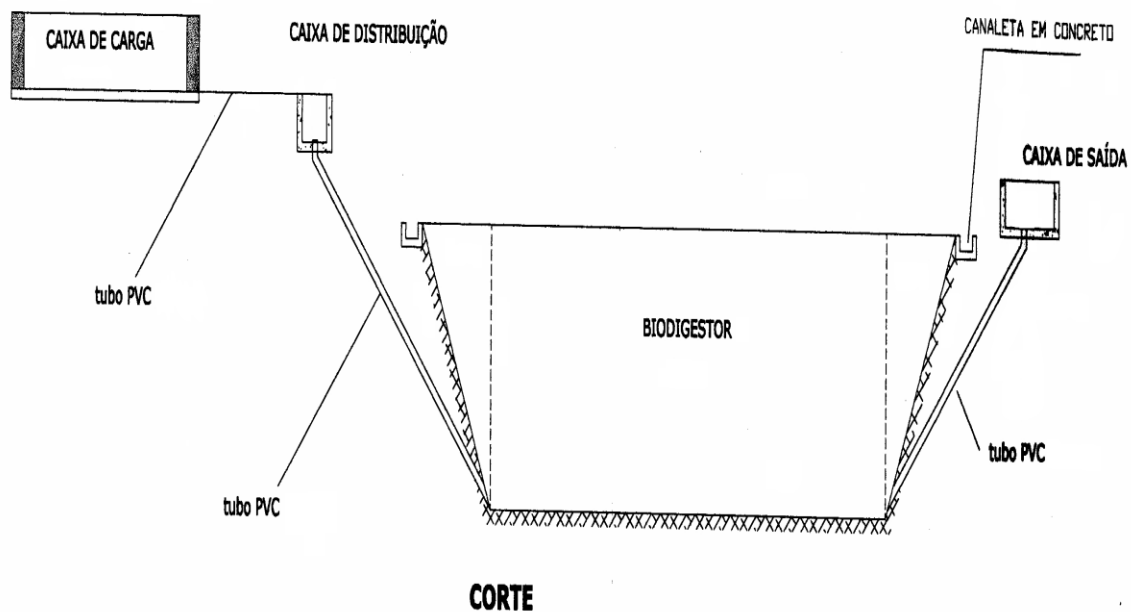


Figura 3.2 - Vista corte Biodigestor com manta plástica.



(a)



(b)

Figura 3.3 - Sistema – (a) Secagem de Ração a Biogás, (b) Aquecimento com Biogás.

Este biofertilizante, aplicado ao solo, melhora as qualidades físicas, químicas e biológicas deste. São depositados em uma lagoa, vide figura 3.4 (a), onde é captado por uma bomba e irrigado para a plantação de café, conforme mostra a figura 3.4 (b).





(a)



(b)

Figura 3.4 – Biofertilizante - (a) Lagoa de dejetos, (b) Irrigação .



(a)



(b)

Figura 3.5 – Sistema - (a) Irrigação do café com biofertilizante, (b) Moto-bomba.

A irrigação de café é realizada por estes biofertilizantes, o que pode ser evidenciado na figura 3.5 (a). Além da irrigação do café utiliza-se este biofertilizante na alimentação de peixes.

Uma das propriedades rurais visitada usa-se um motor a combustão, óleo diesel, adaptado para funcionamento com biogás, conforme figura 3.5 (b), que é ligado à uma bomba de vácuo. Essa adaptação gerou uma economia da ordem de 90% do combustível, isto é consumia-se 100 litros de óleo/dia e com a conversão para biogás reduziu-se para 10 litros de óleo/dia.

### 3.1 - Custo de instalação do Biodigestor

A uma grande controvérsia a respeito do valor de construção dos Biodigestores, podem variar de 20 a 150 mil reais, dependendo do tamanho e demanda de produção, especialistas afirmam que no Brasil somente 10% dos biodigestores instalados funcionam como o esperado.

Na propriedade onde foi desenvolvido o estudo de caso devido a grande distância do local onde é distribuído o gás, acarretou aumento nos custos de instalação do biodigestor com mangueiras para conduzir o gás. Segundo o gerente desta fazenda, o investimento na construção do biodigestor composto por compressores de ar, manta plástica, alvenaria e demais equipamentos para o perfeito funcionamento foi de 100 mil reais, nesse orçamento não entrou o motor a combustão e motor/gerador necessário para geração de energia.

### 3.2 Benefícios do Biogás para a Propriedade Rural

Com o uso do biogás a fazenda teve os seguintes benefícios financeiros, conforme ilustra a tabela 3.1.

Estas economias foram geradas a partir da instalação e funcionamento do biodigestor. A fazenda tem projetos para aumentar o número de suínos e com isso aumentar a produção de biogás para a produção de energia que hoje não é possível já que os aquecedores, fábrica de rações e restaurante consome todo o gás produzido.

Os ganhos potenciais com a geração de energia podem chegar a 20 mil/mês tornando a propriedade alta suficiente em energia, outra possibilidade de ganho, como foi visto em outra

fazenda seria o uso de um motor a combustão adaptado para funcionamento com o biogás na captação do biofertilizante para irrigação do café.

Tabela 3.1 – Economias mensais com o uso do biodigestor.

Com uso do biogás	Economia mensal (R\$)
Economia com aquecedores de aves e suínos pela substituição do GLP pelo biogás.	2600,00
Uso do biogás no restaurante da fazenda	1000,00
Substituição de GLP por Biogás na caldeira da Fábrica de Rações;	4.000,00

Uma das alternativas para aumentar a produção de gás e fazer uso dele para a geração de energia seria aumentar o número de suínos e biodigestores consequentemente o volume de dejetos, outra possibilidade, aumentar o tempo de retenção dos dejetos passando de 10 dias, que é o tempo utilizado hoje pela propriedade, para 20 dias, com isso tornar maior o rendimento dejetos/gás.

## 7- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análises dos estudos de casos realizados neste trabalho de cunho científico e respondendo às questões propostas inicialmente:

(1)- No sistema de conversão de energia elétrica a partir do biogás, o conjunto motor-gerador apresenta requisitos importantes para garantir que o processo de conversão seja completo e atenda concomitantemente as necessidades da carga e de cada um dos sistemas.

Apresente os principais requisitos que devem ser observado por cada um dos componentes do conjunto motor-gerador.

(2)- Quais as principais características do ambiente que devem ser observadas na instalação de um grupo motor-gerador.

(3)- Um grupo gerador encontra-se instalado em uma propriedade rural, funcionando de forma isolada da rede de distribuição. Esta instalação apresenta como cargas típicas um conjunto de motores de indução de baixa potência, iluminação fluorescente e incandescente e alguns eletrodomésticos. Após a instalação do sistema, os motores passaram a apresentar problemas de funcionamento com o torque das cargas mecânicas, aquecimento excessivo e, em alguns casos houve a queima do motor.

Baseando-se nos requisitos das cargas elétricas que deve ser observado pelo gerador, avalie a situação e indique o problema provocado pelo gerador.

Finalmente, serão discutidas e fundamentadas estas questões propostas, após as análises detalhadas dos estudos de casos neste trabalho de pesquisa:

A manutenção das condições originais de segurança é um obstáculo ao aproveitamento do biogás gerado pelos sistemas anaeróbios devido ao metano contido no biogás, podendo tornar-se um problema de segurança para a empresa que o recupera. Para que sejam evitados tais problemas o biogás é usualmente queimado em flares.

Segundo Tommasi (1994), a avaliação de risco de uma instalação pode utilizar diversos métodos, entre eles:

- Árvore de falhas: identificação das combinações entre falhas nos equipamentos e erros humanos que culminem em um acidente;
- Análise do erro humano: identificação dos erros humanos e suas conseqüências;
- Checklist: identificação dos perigos mais freqüentes;
- Inspeção de segurança: segurança das instalações e dos procedimentos de operação e manutenção sejam os propostos no projeto do sistema;
- Índice de baixo risco: classificação das unidades do sistema com base no seu grau de risco;
- Análise preliminar de risco: análise dos materiais perigosos e dos principais elementos da indústria antes da sua instalação, orientando projeto mais seguro;
- Hazop: identificação dos perigos e da operacionalidade do processo.

Segundo a CETESB (1994) a análise de risco é a identificação metódica de elementos e situações em uma instalação que possam gerar uma condição de risco para quem nela trabalha e para o público em geral.



Para a inserção da prática de energias renováveis na matriz energética brasileira, enfrentase três tipos de barreiras: a econômica, a financeira e a política (AL TOMONTE et al., 2003 ):

- Barreira econômica: dificuldade de concorrência com as fontes fósseis dentro de um mercado liberalizado;
- Barreira financeira: falta de regulamentação clara para diminuir os riscos e incentivar o investidor privado a financiar as fontes renováveis. A desestruturação do setor energético em vários países tem dificultado esta inserção;

Para a recuperação de biogás para fins energéticos, são identificadas poucas empresas remanescentes com tecnologia apropriada para o desenvolvimento de projetos desse gênero.

Geralmente, o uso de equipamentos para operar com biogás depende de uma adaptação. Em geral, uma adaptação de baixo custo não é satisfatória, pois o rendimento energético é inferior, os intervalos entre paradas para manutenção são menores e a confiabilidade do equipamento reduz-se drasticamente (ALVES, 2000).

O aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica é feito pela sua queima e esta queima é mais proveitosa em uma máquina de combustão interna, como motor ciclo Otto e turbina a gás, que ainda dispõe calor residual.

Para a instalação de um sistema de geração de energia elétrica em uma empresa, deve-se considerar, antes de tudo, a necessidade energética da empresa interessada. Uma empresa que necessite calor em seu processo pode substituir parte do seu combustível principal pelo biogás.

Este uso pode ser feito pela mistura de combustíveis ou pela introdução de um estágio alternativo, onde o biogás forneceria parte da energia permitindo a redução do consumo energético do estágio principal.

Entretanto, para a implantação de um sistema de aproveitamento energético do biogás, tanto em estações de tratamento de efluentes como em aterros sanitários, deve-se levar em consideração que alguns equipamentos e produtos específicos não são nacionais (compressores, medidores de vazão, filtros, entre outros), o que impacta nos custos de capital dos projetos (impostos, estadias, transportes, taxas de cambio e pagamento de amortização, entre outros), além do alto custo das tecnologias de geração de energia elétrica.

A falta de leis que impulsionem o mercado nesse sentido também é um fator que pesa

contra a utilização desta fonte de energia, seja na adoção de políticas de incentivo (tarifárias e subsídios), seja com instrumentos de regulação (tecnologias mais eficientes).

De um modo geral, a digestão anaeróbia no tratamento de efluentes possui as seguintes vantagens (adaptado de VON SPERLING, 1995):

- Baixo custo de implantação;
- Elevada sustentabilidade do sistema. Pouca dependência de fornecimento de energia, peças e equipamentos de reposição;
- Simplicidade operacional, de manutenção e controle;
- Baixos custos operacionais;
- Adequada eficiência na remoção das diversas categorias de poluentes (matéria orgânica biodegradável, sólidos suspensos, nutrientes e patogênicos);
- Pouco ou nenhum problema com a disposição do lodo gerado no sistema;
- Baixos requisitos de área;
- Possibilidade de aplicação em pequena escala (sistemas descentralizados) com pouca dependência da existência de grandes interceptores;
- Fluxograma simplificado de tratamento;
- Elevada vida útil;
- Ausência de problemas que causem transtorno à população vizinha;
- Possibilidade de recuperação de subprodutos úteis, como biofertilizante, visando sua aplicação na fertilização de culturas agrícolas; e o biogás, um gás combustível de elevado teor calorífico.

Os dejetos de suínos possuem elevadas concentrações de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), sólidos em suspensão e nutrientes (Nitrogênio e Fósforo). Isto representa uma fonte de fertilizantes, mas também uma fonte potencial de poluição quando não tratado ou manejado inadequadamente. No entanto, os dejetos de animais podem, quando bem manejados, constituir-se em alternativa econômica para a propriedade rural, sem comprometimento da qualidade ambiental (OLIVEIRA et al., 2000).

O interesse no aproveitamento dos resíduos orgânicos gerados na suinocultura tem aumentado, não somente pelos aspectos de reciclagem de nutrientes no próprio meio e de saneamento, como também pelo aproveitamento energético do biogás (LUCAS JR. et al. (2001). A digestão, ou fermentação, ou, ainda estabilização anaeróbia, objetiva, basicamente, à redução ao mínimo do poder poluente e dos riscos sanitários dos dejetos, resíduos, lixos, tendo, ao mesmo tempo, como sub-produto deste processo, o biogás, que pode ou não ser aproveitado e o biofertilizante com várias aplicações práticas na propriedade rural (OLIVEIRA, 2002).

A digestão anaeróbia é resultante da interação de uma população de microrganismos. Começa pela degradação dos compostos orgânicos (carboidratos, proteínas e lipídios) a ácidos orgânicos seguidos da transformação desses ácidos em produtos gasosos, nos quais predominam o metano e gás carbônico (FERNANDES JR., 1989). O processo é bastante complexo e um elevado número de espécies de bactérias, produtoras ou não de metano, contribuem de algum modo para a formação deste gás (RODRIGUEZ et al., 1997). A redução da carga orgânica presente em um resíduo e a produção de metano são as duas principais vantagens do tratamento anaeróbio. Os resíduos da produção agro-pastoril apresentam, na sua maioria, elevada demanda de oxigênio e sólidos na sua composição (COLEN, 2003).

A realização e a eficiência da biodigestão dependem de condições específicas de operação, como temperatura e pH do meio, tipo de substrato usado no processo, concentração de sólidos (carga orgânica) e tempo de retenção hidráulica (TRH) da biomassa no biodigestor, dentre outros. Apesar da digestão anaeróbia ser um processo natural, sua otimização se torna difícil, devido, principalmente, à dificuldade em se controlar, no campo, diversos fatores como, temperatura, pH, teor de sólidos, tempo de retenção e composição do substrato, entre outros (LUCAS JR., 1987).

A decomposição bacteriana de matéria orgânica sob condições anaeróbicas é feita em três fases: 1) fase de hidrólise; 2) fase ácida; 3) fase metagênica.

1) Fase de hidrólise - Nesta fase as bactérias liberam no meio as chamadas enzimas extracelulares, as quais irão promover a hidrólise das partículas e transformar as moléculas maiores em moléculas menores e solúveis ao meio.

2) Fase Ácida - Nesta fase, as bactérias produtoras de ácidos transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos (ácido láctico, ácido butílico), etanol, amônia, hidrogênio e dióxido de carbono e outros.

3) Fase Metanogênica - As bactérias metanogênicas atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em metano ( $\text{CH}_4$ ). Esta fase limita a velocidade da cadeia de reações devido principalmente à formação de microbolhas de metano e dióxido de carbono em torno da bactéria metanogênica, isolando-a do contato direto com a mistura em digestão. Razão pela qual a agitação no digestor é prática sempre recomendável, através de movimentos giratórios do gasômetro.

## O Biofertilizante

Depois de passarem no digestor, os resíduos sobstantes apresentam alta qualidade para uso como fertilizante agrícola, devido principalmente aos seguintes aspectos: diminuição no teor de carbono do material, pois a matéria orgânica ao ser digerida perde exclusivamente carbono na forma de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ;

\* aumento no teor de nitrogênio e demais nutrientes, em consequência da perda do carbono;

\* diminuição na relação C/N da matéria orgânica, o que melhora as condições do material para fins agrícola;

\* maiores facilidades de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao material já se encontrar em grau avançado de decomposição o que vem aumentar a eficiência do biofertilizante;

\* solubilização parcial de alguns nutrientes.

## O Biogás

"O Biogás é um gás inflamável produzido por microorganismos, quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em um ambiente impermeável ao ar". O metano, principal componente do biogás, não tem cheiro, cor ou sabor, mas os outros gases presentes conferem-lhe um ligeiro odor de alho ou de ovo podre. O peso do metano é pouco mais da metade do peso do ar, ou seja:  
 $1 \text{ m}^3 \text{ de metano} / 1 \text{ m}^3 \text{ de ar} = 0,716 \text{ kg} / 1,293 \text{ kg} = 0,554 \text{ kg}$

### Condições Indispensáveis à Fermentação

As condições ótimas de vida para os microorganismos anaeróbios são:

a) **Impermeabilidade ao Ar.**  
Nenhuma das atividades biológicas dos microorganismos, inclusive, seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, exigem oxigênio, que em cuja presença são eles, de fato, muito sensíveis. A decomposição de matéria orgânica na presença de oxigênio produz dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); na ausência de ar (oxigênio) produz metano. Se o biodigestor não estiver perfeitamente vedado a produção de biogás é inibida.

b) **Temperatura adequada.**

A temperatura no interior do digestor afeta sensivelmente a produção de biogás. ("Todos os microorganismos produtores de metano são muito sensíveis a alterações de temperatura; qualquer mudança brusca que exceder a  $30^\circ\text{C}$  afeta a produção. É preciso, pois, a segurar uma relativa estabilidade de temperatura. -c) Nutrientes- Os principais nutrientes dos microorganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos". Uma relação específica de carbono para nitrogênio de ser mantida entre 20:1 e 30:1. A principal fonte de nitrogênio são as dejeções humanas e de animais, enquanto que os polímeros presentes nos restos de culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem sucedida se apenas uma fonte de material for utilizada.

d) O teor de água deve normalmente situar-se em torno de 90% do peso do conteúdo total. Tanto o excesso, quanto a falta de água são prejudiciais. O teor da água varia de acordo com as diferenças apresentadas pelas matérias-primas destinadas à fermentação.

e) **Substâncias prejudiciais** Materiais poluentes, como NaCl, Cu, Cr,  $\text{NH}_3$ , K, Ca, Mg e Ni, são conciliáveis se mantidas abaixo de certas concentrações diluídas em água, por exemplo. O manual Chinês cita o ABS (composto detergente), cuja concentração máxima admissível é de 20 a 40 partes milhão.

### Uso do Biogás

No emprego do biogás como combustível, deve-se estabelecer entre este e o ar, uma relação que permita a combustão integral. Quando esta se dá, a chama é forte, de coloração azul claro, e o gás emite um assobio. Se a chama tremer, há insuficiência de ar e combustão incompleta. Se for curta, amarela e bruxuliente, indica biogás insuficiente e ar excessivo.

## Segurança:

- a) Manômetro - é usado para medir a pressão interna, calcular a quantidade aproximada de gás armazenado e zelar pela segurança da estrutura do digestor.
- b) Em hipótese alguma, colocar no digestor fertilizantes fosfatados. Sob condições de total ausência de ar, este material pode produzir fosfina, extremamente tóxica, cujo contato será fatal.
- c) O ar deve circular para que haja ventilação dentro da casa. Se alguém sentir cheiro forte de ovo podre, abrir as portas e janelas para expelir o gás, e evitar acender cigarro ou fósforo. Na utilização do biogás, acende-se primeiro o fósforo e depois abre-se a válvula de gás.

## Microbiologia

A fermentação metanogênica é um processo biológico altamente sensível, uma vez que envolve três grupos distintos microrganismos e a produção de gás dependem da manutenção harmônica destes grupos. Alterações substanciais no meio de cultura ou nos fatores comportamentais podem desequilibrar ou desativar a ação dos três grupos de bactérias levando a produção gasosa a níveis antiecológicos.

## Disponibilidade de nutrientes

A fermentação anaeróbica é um processo biológico que ocorre devido a ação de bactérias. Evidentemente que quando maior a população bacteriana mais eficiente e rápido será a digestão. Para se manter uma boa flora bacteriana há necessidade de se facultar um ótimo meio de cultura. A disponibilidade de nutrientes é fundamental para o meio de cultura e conseqüentemente para obter uma cultura bacteriana em ritmo acelerado de síntese e desenvolvimento. Os nutrientes são de origem orgânica e inorgânica, destacando-se principalmente os elementos carbono, nitrogênio-nitrato, fósforo-fosfatos e enxofre-sulfatos. Os nutrientes que mais frequentemente se mostram escasso são o nitrogênio e fósforo, razão pela qual merecem atenção especial.

## Novos Conceitos

Uma nova concepção energética se impõe a todos os brasileiros nesta crise irreversível do petróleo. O domínio da tecnologia da digestão anaeróbica e da operação de digestores em geral, na prática não é complexa nem difícil. Estes conhecimentos, entretanto, só se conseguem com a lida diária dos biodigestores de pequeno porte, de baixo custo e que possam ser construídos com material local. Uma vez adquiridos estes conhecimentos e o domínio dos problemas, biodigestores de maior capacidade e mais sofisticados podem ser construídos e operados sem dificuldades, pela mão de obra disponível no meio rural. Então, nesta fase do processo, a energia do metano continua no biogás e o biofertilizante, originário da reciclagem da matéria orgânica, estará na sua plenitude, ajudando o homem rural. Produzindo energia com recursos próprios e renováveis, o produtor rural, finalmente, pode libertar-se da energia do petróleo, de custo cada vez mais elevado e escasso. A tecnologia chinesa impõe a reavaliação dos seguintes conceitos básicos em biodigestores, amplamente difundidos nos países em desenvolvimento:

1- "Nos últimos anos têm-se afirmado amplamente que um dos principais entraves à disseminação de tecnologia do biogás no meio rural do terceiro mundo é o custo do digestor. À medida que detalhes dos modelos criados na China vão sendo conhecidos, torna-se evidente que os digestores construídos com material disponível no local podem realmente ter custo muito baixo. De fato, à vista do custo dos digestores atualmente disponíveis em outros países, muitas pessoas levadas a concluir que os esforços nessa área deveriam concentrar-se mais em projetos comunitários ou grandes unidades do que nos individuais. A experiência chinesa impõe uma reavaliação desse conceito".

2- "É arbitrário pensar que quanto maior o digestor mais gás produzirá". Já foi dito que "o sucesso de um digestor depende da sua operação".

No caso de um grande digestor, se não se fizer abastecimento regular de matéria-prima e não houver adequada manutenção, a produção de gás poderá ser inferior à de um digestor pequeno; A noção de que é melhor possuir um grande digestor do que um pequeno deve, pois, ser combatida. "Naturalmente, o volume do digestor não deverá ser tão pequeno que a produção de gás seja insuficiente e as necessidades não sejam atendidas".

## **Vantagens**

A produção de biogás representa um avanço importante no sentido da solução do problema da disponibilidade de combustível no meio rural, devido, por conseguinte, interessar a toda a população nele residente. A redução das necessidades de lenha poupa as matas. A produção de biogás representa um importante meio de estímulo a agricultura, promovendo a devolução de produtos vegetais ao solo e aumentando o volume e a qualidade de adubo orgânico. Os excrementos fermentados aumentam o rendimento agrícola.

O biogás, substituindo o gás de petróleo no meio rural, elimina também os custos do transporte de bujão de gás dos estoques do litoral ao interior. O uso do biogás na cozinha é higiênico, não desprende fumaça e não deixa resíduos nas panelas. As donas de casa ficam livres de pesadas tarefas domésticas, de mobilizar carvão e lenha para a cozinha.

O desenvolvimento de um programa de biogás também representa um recurso eficiente para tratar os excrementos e melhorar a higiene e o padrão sanitário do meio rural.

"O lançamento de dejetos humanos e animais num digestor de biogás soluciona o problemas de dar fins aos ovos dos esquistossomos e ancilóstomos, bem como de bactérias, bacilos desintéricos e paratíficos e de outros parasitas. O número de ovos de parasitas encontrados no efluente em 99%, após a fermentação".

## **O uso do Biogás**

Em clima tropical onde a temperatura é praticamente constante com média acima de 20°C, Os digestores dispensam sistemas adicionais para aquecimento. Entretanto, em regiões onde a temperatura cai, durante certo período do ano, esses sistemas são necessários. O aquecimento do digestor pode ser feito via interna, externa e/ou chama direta. O próprio

gás pode e deve ser utilizado para o aquecimento. Ao se utilizar um sistema de aquecimento deve-se fazer uma análise entre a quantidade de calor gastas para elevar-se a temperatura a um certo nível e a quantidade de gás produzida pelo efeito dessa elevação de temperatura. Caso o incremento na produção de biogás seja inferior, igual ou levemente inferior às calorias gastas no processo, o sistema de aquecimento torna-se inviável.

### **Tempo de Retenção**

Caracteriza-se como tempo de retenção o tempo que o material passa no digestor, isto é, o tempo de entrada e saída dos diferentes materiais no digestor. Como a água, sólidos e células.

### **Substâncias Tóxicas.**

Qualquer nutriente de elemento em solução no digestor, em excesso, pode provocar sintomas de toxidez ao meio bacteriano. Entretanto uma definição exata da concentração em que estes elementos passam a ser nocivos é difícil, devido à complexidade do processo. A presença de hidrocarbonetos-clorofórmio, tetra cloreto de carbono e outro usados como inseticidas ou solventes -industriais- constituem fortes agentes tóxicos à digestão anaeróbica. A presença do íon amônio, em digestores com altas taxas de produção, é um significativo problema.

### **Biologia da digestão anaeróbica**

Toda digestão anaeróbica (ausência de oxigênio) é um processo biológico. O organismo anaeróbico não pode sobreviver enquanto estiver oxigênio. Por isso, no digestor não deve entrar o ar atmosférico. Só as bactérias anaeróbicas metanogênicas produzem gás metano. Pertencem a quatro grupos morfológicos e são muito sensíveis a variações de temperatura, atuando numa faixa entre 10 a 45°C. São as chamadas bactérias mesófilas. Biologicamente, o sucesso de um digestor depende de um balanceamento entre as bactérias que produzem gás metano dos ácidos orgânicos. E este balanceamento é adquirido pela carga diária com água suficiente, pelo pH, temperatura, e a qualidade do material orgânico.

### **Relação carbono/nitrogênio (C/N)**

O carbono (sob a forma de carboidratos) e o nitrogênio (como proteínas, nitratos, amônia) são os principais alimentos utilizados pelas bactérias anaeróbicas: o carbono, para fornecer energia; o nitrogênio, para construir a estrutura das células. As bactérias utilizam mais carbono do que nitrogênio. A digestão anaeróbica realiza-se melhor quando o material que alimenta as bactérias contém certa quantidade de carbono e nitrogênio juntos.

**Nitrogênio** - Alguns compostos e resíduos são indigestíveis para as bactérias, como a lignina, palhas e fibras vegetais. A quantidade de nitrogênio contida na planta ou no organismo animal varia com a idade e seu desenvolvimento. A quantidade de nitrogênio, é alta, em excremento de aves devido as fezes serem expelidas com a urina.

**Carbono** - Diferentemente do nitrogênio, o carbono existe em muitas formas (matéria orgânica), as quais não são diretamente utilizadas pelas bactérias.

### **Biodigestor de cúpula fixa - Operação**



## *Operação de carga*

Fazer uma pré-fermentação da matéria -prima ( 2 a 10 dias) com ou sem adição de água. A água destinada à mistura deverá permanecer durante todo o dia em um tambor, de preferência pintado de preto, exposto ao sol. Esta água, sendo utilizada em torno das 15 horas, estará mais aquecida de aproximadamente 8 graus. Isto aumenta a produção de gás.

Fazer a mistura à tarde, na caixa de carga, com partes iguais de água e esterco, ou 5 partes de esterco bovino e 5 partes de água. Depois proceder o carregamento, lavar a caixa e as rolhas de vedação, retirando bem as pedrinha e arena que ficarem no piso da caixa.

Imediatamente após ou durante a carga, proceder à descarga do efluente, a fim de evitar que a pressão interna receba uma pressão adicional extra. Retirar o efluente utilizando um vasilhame, uma corda, uma bomba manual de duas ou mais polegadas de descarga, ou o dreno automático. Se possível, retirar uma parte do efluente antes e outra parte depois da carga da mistura, para evitar reversão de pressão na câmara de gás. Uma lata de querosene com suporte e uma corda podem servir para a descarga do efluente. Pode-se também utilizar um sistema de roldana de poço, evitando-se com isto um maior esforço. As bombas do tipo "sapo" de 2" ou 3" são excelentes para descarregar o efluente. Colocadas em cima de um suporte de 50 cm de altura, podem deslocar o efluente por gravidade na tubulação de PVC de 15 cm a mais de 100 m de distância. Uma régua marcada, colocada no interior da caixa de descarga, indica a quantidade de efluente que deve ser retirado diariamente da caixa, para manter uma determinada pressão de gás no digestor. O nível do efluente na caixa de descarga deverá ser mantido após a carga da mistura.

Manter um selo d' água na boca da tampa de acesso do digestor. Ele evita escapamento de gás e conserva a massa de vedação da tampa.

Se a caixa de descarga for construída em terreno de pequeno declive, pode-se fazer um dreno na parede da caixa, na altura do líquido (efluente) que corresponde à pressão desejada. Assim, quando se fizer a carga diária da mistura, haverá a descarga automática do efluente pelo dreno e o líquido pode ser canalizado para o local desejado.

O modelo chinês recebe, também, carregamento automático pela caixa de carga, ao nível do solo. Assim, pode-se canalizar a matéria-prima de estábulo, pocilga, aviário, latrina, etc. para a caixa de carga, por gravidade, sem interferir no processo de carregamento manual.

O biodigestor aceita 2/3 cargas/mês de matéria orgânica (folhas, restos de cultura, etc. pré-fermentados cerca de 10 a 15 dias), mantendo correta a relação C/N desejável.

A pressão interna de gás no digestor pode chegar a 100 cm da coluna d' água quando o nível do efluente ocupar uma boa parte do volume da caixa de descarga, que funciona como um sistema de prensa hidráulica. Tomar cuidado para não exceder de uma pressão razoável de 30 a 40 cm da coluna d' água, evitando com isto forçar a estrutura da cúpula principalmente a câmara de gás do digestor. Para isto deve-se observar sempre, diariamente, o nível na caixa de descarga e atentar que toda carga requer uma descarga de igual volume de líquido ou efluente.

A pressão de gás deverá ser mantida a fim que os equipamentos funcionem de acordo com a pressão recomendada pelo fabricante (principalmente os lampiões).



O biofertilizante ou efluente pode ser recolhido em poços de 100x100x80 cm de profundidade, cavado na terra, ou colocado em tanques de cimento raso ( 10 cm), depois de coado com pano de algodão, para evaporar a água e formar umas crostas marrons, ricas em proteína, altamente recomendadas para animais, principalmente peixes.

#### Limpeza periódica do digestor

Toda unidade produtora de biogás deve ser limpa periodicamente, ou seja, renovar o substrato ou mistura, pela retirada dos resíduos ou depósitos orgânicos não digeridos. O processo chinês recomenda a limpeza duas vezes ao ano.

#### *Descarga automática dos resíduos*

Quando existe a possibilidade de adaptar uma tubulação no fundo do digestor, a descarga automática de limpeza pode ser mensal. Cada mês pode-se descarregar cerca de 500 litros de resíduos (adubo mais pastoso) e reconstituir o nível da mistura com tantas cargas quantas forem necessárias. Essa tubulação só é viável se o terreno oferecer declividade adequada. Com isto não haverá interrupção de produção de biogás e não haverá mais necessidade de se abrir o biodigestor para limpeza.

#### Recomendações para segurança e bom funcionamento

Pode ocorrer uma inversão de pressão ( acusada na coluna do manômetro) se a retirada diária do volume do efluente for brusca e maior do que a carga de alimentação.

Neste caso é absolutamente desaconselhável abrir os pontos de consumo do biogás (torneiras). Isto porque:

- Poderia ocorrer inversão de chama para o interior do digestor, provocando explosão;
- Possibilitaria a entrada de oxigênio para o interior da câmara, prejudicando a fermentação anaeróbica (também com perigo de explosão).

#### Aconselha-se então:

- Recolocar um certo volume de efluente ou na impossibilidade deste, colocar nova carga de mistura, imediatamente.
- Deixar que a pressão se restabeleça normalmente sem usar o biogás para consumo até que a pressão seja positiva;
- Ficar atento para as variações de pressão registrada no manômetro durante a carga e descarga do material.

A exposição do tubo flexível de gás aos raios solares, dilata os gases e aumenta a pressão no manômetro. Isto foi observado no período experimental.

O biodigestor chinês aceita qualquer tipo de esterco (cavalo, bovino, humano, aves) e restos culturais, desde que seja mantida a relação C/N recomendada, da ordem de 1:15 a 1:25. Isto porque as bactérias usam cerca de 15 a 25 vezes mais rápido o nitrogênio (estercos) do que o carbono (restos de cultura, folhas, etc.)

A introdução de material orgânico fresco no biodigestor, sem pré-fermentação, alguns dias seguidos, causa aumento de acidez do substrato e a queda de produção de gás. Para equilibrar o pH, retornar efluente ao biodigestor duas vezes por semana.

A estrutura subterrânea do corpo do biodigestor chinês proporciona umas temperaturas estáveis, favoráveis às bactérias metanogênicas que são sensíveis a variações bruscas de temperatura.

#### Biodigestor de cúpula fixa - Acessórios

Fazer um buraco no terreno com 50 cm de profundidade e largura suficiente para colocar um cano de PVC com cerce de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, fechado, na parte inferior e a prova d' água. Ligar a perna inferior de um T de 1/2" plástico, a um tubo flexível de 40 cm, que penetre na água do tubo de PVC enterrado. No outro braço do T ligar a mangueira flexível que conduz o biogás para o manômetro e pontos de consumo. Este dispositivo serve de segurança para o sistema, liberando pressões acima de 40 cm da coluna d' água (ou outra pressão desejada) e coleta a água de condensação do biogás quando sai do gasômetro.

#### Teste de fumaça para verificar vazamentos

Colocar água limpa no biodigestor até alcançar o nível inferior da caixa de descarga. Preguar uma lata de galão vazia, com 15 cm de altura, em uma ripa de 70 cm, articulada com outra de 50 cm de comprimento. Usa-se para produzir fumaça estrume seco de boi, capim seco e verde que, colocado na lata, produzem fumaça densa. Também pode-se usar incenso, que produz fumaça densa e branca. Introduzir a lata no interior da câmara pelo túnel de 20x20 cm da caixa de descarga (sem entornar na água), várias vezes até sair fumaça pelo cano do registro superior (a tampa de acesso fechada e com selo d' água). Rapidamente introduzir água até fechar o túnel da caixa de descarga, ficando presa a fumaça dentro da câmara de gás. Então, lentamente, introduzir água até o nível do batente da caixa de descarga (pressão aproximada de 40 cm da coluna d' água). Com o manômetro desligado e o registro fechado, verifica-se então a existência de escapamento de bolhas de ar (fumaça) pelo selo d' água, ou em torno dele, ou na cúpula do biodigestor.

O cano de saída do biogás deve ser galvanizado ou de PVC, de 3/4", transpassando o anel da cúpula para sua maior fixação e terá altura externa de apenas 20 cm, terminando em rosca de 3/4". Fixar bem o cano no cimento, com anéis de arame e raspar o cano com uma grossa.

A mangueira flexível para saída do gás até o ponto de consumo, poderá ser de 3/4" ou 1/2" sem emendas, até o manômetro. Não usar registros no cano de saída do biodigestor. Quando for necessário qualquer manutenção no corpo do biodigestor, retirar a mangueira do cano de saída (presa por braçadeira tipo parafuso) e colocar uma tampa de vedação rosqueada de 3/4". O 1º Registro de gás pode ficar localizado antes do manômetro, dentro da casa.

Usar registro de gás tipo de mola, rosca de 5/8", idêntico ao usado em fogão à gás engarrafado.

O manômetro é indispensável no medelo chinês. Ele indica todas as alterações da pressão interna na câmara de gás. Para sua construção o próprio tubo pode ser fixado na parede. A escala métrica será colocada na parede ou em tábua firme. O líquido pode ser mistura de água com mercúrio cromo (poucas gotas). O tubo ou mangueira plástica cristal de 5/8" é melhor do que tubo 1/2". Refazer o nível do líquido quando ocorrer evaporação.

#### Pequenos acessórios

Preparar uma régua tipo pá de madeira para fazer a mistura do esterco com a água na caixa. Uma rolha maior para o tubo que conduz a mistura ao interior do digestor e a outra para tapar, pelo lado externo da caixa, o dreno de descarga de resíduos (pedras e areia). Tampas de madeira, nas duas caixas de entrada e de saída, impedem a entrada de corpos estranhos e excesso de chuva.

#### Descarga automática

Se o digestor for construído em terrenos com declive, a descarga do efluente será automática, desde que o dreno esteja localizado em altura compatível com a pressão interna desejada. Quanto mais alto no nível do efluente estiver o dreno, mais forte será a pressão interna do gás.

#### Agitador

Construir um agitador para a mistura dentro do digestor, utilizando um caibro de 4 m, e um pedaço de tábua de 30 x 40 cm, preso em uma das extremidades do caibro por pregos e três cantoneiras.

Este agitador funciona dentro da caixa de descarga, abaixo do batente do nível da mistura. Aplicando movimentos bruscos para cima e para baixo, o agitador comprime o efluente pelo túnel da caixa e agita fortemente o substrato no interior do digestor.

### Tipologia

Os tipos de biodigestores mais usados são os da Marinha, Indiano e Chinês.

#### Biodigestor da Marinha .

É um modelo tipo horizontal, tem a largura maior que a profundidade, sua área de exposição ao sol é maior, com isso é maior a produção de biogás. Sua cúpula é de plástico maleável, tipo PVC, que infla com a produção de gás, como um balão.

Pode ser construído enterrado ou não. A caixa de carga é feita em alvenaria, por isso pode ser mais larga evitando o entupimento.

A cúpula pode ser retirada, o que ajuda na limpeza. A desvantagem nesse modelo é o custo cúpula.

#### Biodigestor Chinês

Construído em alvenaria, modelo de peça única. Desenvolvido na China, onde as propriedades eram pequenas, por isso foi desenvolvido esse modelo que é enterrado, para ocupar menos espaços. Este modelo tem custo mais barato em relação aos outros, pois a cúpula é feita em alvenaria. Também sofrem pouca variação de temperatura.

#### Biodigestor Indiano.

Sua cúpula geralmente feita de ferro ou fibra é móvel, e se movimenta para cima e para baixo de acordo com a produção de biogás.

Nesse tipo de biodigestor o processo de fermentação acontece mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo que é pouco variável favorecendo a ação das bactérias. Ocupa pouco espaço e a construção por ser subterrânea, dispensa o uso de reforços, tais como cintas de concreto.

Caso a cúpula for de metal, deve-se fazer uso de uma boa pintura com um antioxidante. Por ser um biodigestor que fica no subsolo é preciso ter cuidado, evitando infiltração no lençol freático.

Existentes biodigestores feitos em concreto, ou metal, coberto com lona vedada. Esta deve ter duas saídas, com duas válvulas, nas quais restos orgânicos são despejados.

### Cuidados básicos com os biodigestores

\* Para construir um biodigestor, avalie o tipo de criação que há na propriedade, o total de dejetos, o potencial de produção de biogás e a demanda por biofertilizante. Consulte sempre um profissional especializado de começar seu projeto.

\* Se o estudo apontar para um biodigestor de fluxo contínuo (indiano, chinês ou tubular), lembre-se de que o abastecimento de matéria orgânica precisa ser diário, sob pena de não haver biogás disponível regularmente.

\* Observe qualquer alteração no manejo dos animais que eventualmente possa impedir a utilização do esterco para obtenção de biofertilizante (aplicação de antibióticos ou outros medicamentos, por exemplo).

\* Os dejetos colocados na caixa de entrada do sistema devem ter cerca de 8% de material sólido, para não entupir tubulações e para que o processo de fermentação se desenvolva corretamente. Para isso, o esterco é misturado com água e muito bem homogeneizado, evitando a formação de "pelotas".

\* O teor de umidade dos dejetos varia conforme a espécie, o manejo, o tipo de alimentação, etc. De forma geral, entretanto, o estrume de bovinos deve ser diluído na mesma quantidade de água ( 1 litro para cada quilo de esterco); o de suínos, em duas partes de água, e o de aves, em três. Isso tudo levando-se em conta estrume seco, do tipo que pode ser recolhido com pá.

\* O biodigestor precisa ser submetido a uma manutenção em média a cada três anos, com checagem de toda a estrutura, repintura do gasômetro (se for metálico) e remoção da areia que se concentra no fundo, ingerida pelos animais junto com capim ou rações e que é eliminada com as fezes.

### Problemas enfrentados com biodigestores.

Os princípios básicos da digestão anaeróbia não estão sendo devidamente considerados, bem como, inexistente um planejamento adequado para a produção, uso e disposição dos subprodutos derivados. Os produtores não dispõem de assistência técnica treinada e com conhecimento nos processos produtivos do biogás, sendo muitas vezes, levados pela pressão a ajustar a atividade à legislação ambiental e pela oferta dos fornecedores de materiais e equipamentos, acabam por implantar processos mal dimensionados, com problemas operacionais e baixa eficiência de produção e uso do biogás, bem como a

utilização do biofertilizante, inviabilizando o sistema do ponto de vista técnico e econômico.

O primeiro problema refere-se ao desconhecimento de que a fermentação anaeróbia é um processo muito sensível e que a decomposição biológica da matéria orgânica compreende quatro fases (hidrólise, acido-gênese, acetogênese e metano-gênese). O sucesso da digestão depende do balanceamento entre as bactérias que produzem gás metano a partir dos ácidos orgânicos e este, é dado pela carga diária (sólidos voláteis), alcalinidade, pH, temperatura e qualidade do material orgânico, ou seja, da sua operação. Qualquer variação entre eles, pode comprometer o processo. A entrada de antibióticos, inseticidas e desinfetantes no biodigestor também pode inibir a atividade biológica diminuindo sensivelmente a capacidade do sistema em produzir biogás.

A percepção de que grandes volumes de biodigestores produzem altas quantidades de biogás nem sempre é verdadeira, entretanto o dimensionamento do biodigestor deverá ser compatível com o tempo de residência hidráulica deste (aconselhável TRH maiores que 35 dias) e as demandas de biogás na propriedade. Biodigestores com grandes gasômetros representam um risco à segurança dos produtores, face à ação mecânica dos ventos aumentando o risco de vazamentos de gás e sua combustão incontrolável pela formação de qualquer centelha. Há um consenso entre os especialistas, de que os modelos de biodigestores adotados entre os produtores de suínos, muitas vezes não passam de "simples esterqueiras cobertas" e, nem sempre projetados para otimizar a geração de biogás e biofertilizante. Aliado a isso, grande parte dos dejetos são extremamente liquefeitos, com baixa concentração de sólidos voláteis fruto de um grande aporte de água pelo desperdício em bebedores, entrada de água de chuva e lavagem excessiva das baias, o que resulta em sistemas com baixa eficiência. A formação de zonas de curto circuito, busca de caminhos preferências pelo dejetos, dentro do biodigestor e o isolamento das bactérias do contato com a mistura em biodigestão, durante a fase de metanogênese também são fatores que diminuem a eficiência do sistema e contribuem para o assoreamento precoce do biodigestor e redução de sua vida útil. A agitação da biomassa no biodigestor pode mitigar estes problemas.

Os microorganismos produtores de metano são muito sensíveis a variações de temperatura, sendo preciso assegurar a sua estabilidade, seja através do aquecimento interno ou de melhor isolamento térmico da câmara de digestão durante os meses de inverno, principalmente nos estados do Sul do Brasil. Este ponto é bastante crítico pois nos meses de inverno é que se apresenta uma maior demanda por energia térmica e uma tendência dos biodigestores em produzirem volumes menores de biogás causados pelas baixas temperaturas.

## **7.1- Parâmetros que influenciam na produção de biogás**

Como todos os processos biológicos, a constância das condições de vida é muito importante. A mudança de temperatura ou alterações nos substratos ou a concentração do substrato pode levar a interrupção da produção de gás. O gás pode deixar de ser produzido por três ou até mais semanas, até que o sistema biológico esteja adaptado as novas condições e inicie a produção de biogás novamente sem qualquer intervenção externa. Mas no caso de interferência humana pode levar mais três semanas.

Os processos de metabolismo microbiano são dependentes de vários parâmetros (Tabela 3), e para um processo ideal de fermentação, vários parâmetros devem ser considerados e controlados. Além disso, o meio de cultura das bactérias fermentativas, pela qual a hidrólise e acidificação dos substratos ocorrem, possuem requisitos que diferem dos necessários para os microorganismos produtores de metano.

**Tabela- Exigências ambientais para a digestão anaeróbia [DEUBLEIN, 2010].**

Parâmetros	Hidrólise/acidogênese	Formação de metano
Temperatura	25–35°C	Mesofílicos: 32–42°C Termofílicos: 50–58°C
Valor de pH	5,2–6,3	6,7–7,5
Razão C:N	10–45	20–30
Matéria seca	<40% de matéria seca	<30% de matéria seca
Potencial redox	+400 a -300 mV	<- 250 mV
Razão C:N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Traço de elementos	Sem exigência especial	Essenciais: Ni, Co, Mo, Se

Devido estas diferenças, a produção de biogás deve ser realizada em uma planta com dois estágios, sendo um para hidrólise/acidificação e outro para acetogênese/metanação. Se o processo ocorrer em somente uma etapa, a metanação deve ser a prioridade, pois seus microrganismos não teriam nenhuma chance de sobrevivência dentro de uma cultura mista, pois possuem menor taxa de crescimento e maior sensibilidade a fatores ambientais. Porém, devemos considerar algumas questões:

- Com substratos contendo lignocelulose, a hidrólise é a limitante do processo e, portanto, necessita ser considerada como prioritária.
- Com substratos proteicos, o pH ótimo é o mesmo em ambas as fases, de modo que uma planta com somente um estágio é suficiente.
- Com as gorduras, a hidrólise ocorre mais rapidamente aumentando a emulsificação (biodisponibilidade), de modo que a acetogênese é a limitante. Nesse sentido, devemos dar preferência ao catabolismo termofílico de gordura.

A seguir analisaremos os requisitos necessários para o processo de digestão anaeróbia separadamente e veremos de que maneira cada um contribui ou afeta a produção de biogás.

### 7.1.1- Pressão parcial de hidrogênio

É necessária uma simbiose especial estreita entre as bactérias acetogênicas produtoras de H<sub>2</sub> e as metanogênicas consumidoras de H<sub>2</sub> para que o processo seja tranquilo.

Geralmente, se uma reação biológica ocorrer, esta deve ser exergônica; ou seja, a energia livre deve ser negativa.

A concentração de hidrogênio deve ser equilibrada, pois a metanogênese necessita de hidrogênio suficiente para a produção de metano. Por outro lado, a pressão de hidrogênio parcial deve ser baixa para que bactérias acetogênicas não fiquem cercadas por muitos hidrogênios e, conseqüentemente, interrompam a produção de hidrogênio. De que maneira este hidrogênio pode bloquear a ação das bactérias acetogênicas? O hidrogênio é um gás e facilmente pode ficar adsorvido na superfície da bactéria acetogênica impedindo-a de entrar em contato com os produtos da acidogênese (alcoóis, ácidos orgânicos de baixo peso molecular, ácidos graxos voláteis, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>). Se ela não entrar em contato com esses produtos não poderá formar ácido acetogênico, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> que posteriormente seguiriam para a metanogênese. A pressão parcial de hidrogênio máxima aceitável depende da espécie de bactérias e também dos substratos.

Para a conversão anaeróbia de propionato (sal do ácido propiônico) via ácido acético e hidrogênio/dióxido de carbono em metano, esta janela de energia liberada,  $\Delta G^f$ , mostra que ela é extremamente pequena, conforme a Figura 5. A degradação de ácido propiônico pode ser utilizada para medir a produtividade da planta, pois esta decomposição e muitas vezes, na prática, o fator limitante de uma fermentação anaeróbia.



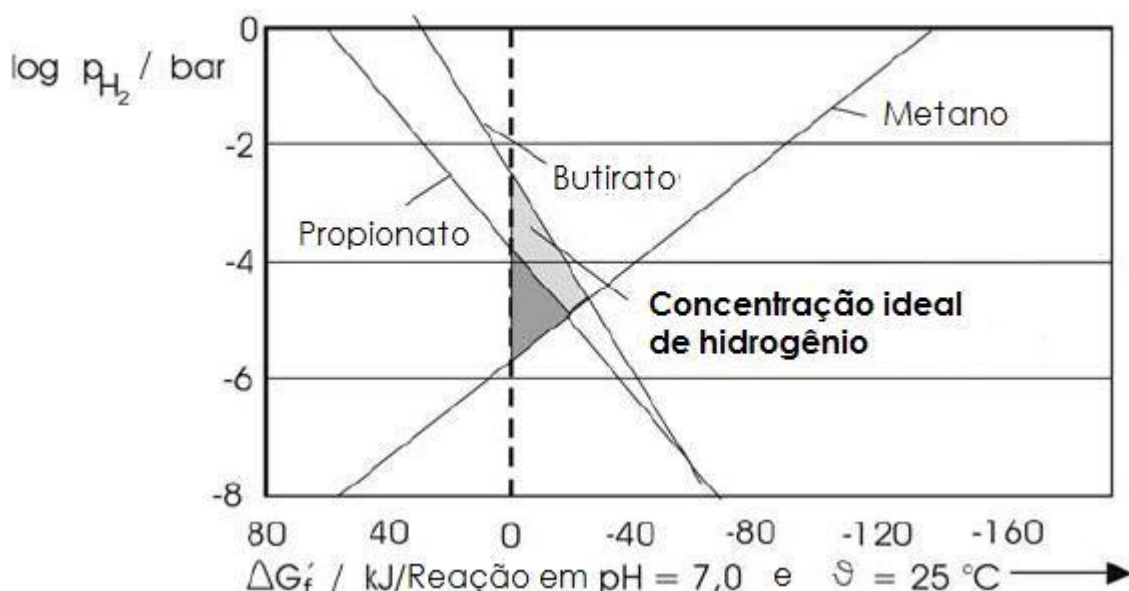


Figura 5. Influência da pressão parcial de hidrogênio,  $p_{H_2}$ , na energia liberada,  $\Delta G_f'$ , durante a acetogênese e a formação de metano a partir de dióxido de carbono e hidrogênio [DEUBLEIN, 2010].

#### 7.1.2- Concentração dos microrganismos

Microrganismos metanogênicos geralmente têm um longo tempo de regeneração (Tabela 4).

Tabela 4. Tempo de regeneração de diferentes microrganismos anaeróbios [DEUBLEIN, 2010].

Microrganismo anaeróbio	Tempo de regeneração
<b>Bactéria acidogênica</b>	
<u>Bacteróides</u>	< 24 h
<u>Clostridia</u>	24 – 36 h
<b>Bactéria acetogênica</b>	80 – 90 h
<b>Bactéria metanogênica</b>	
<u>Methanosarcina barkeri</u>	5 – 16 dias
<u>Methanococcus</u>	Cerca de 10 dias
<b>Microrganismo anaeróbio</b>	
Escherichia coli	20 min
Bactéria ativadora de lodo	2 h
Bactéria habitante na terra	1 – 5 h

Analisando o tempo de regeneração das bactérias anaeróbias da Tabela 4 podemos ter em mente que devemos evitar a lavagem do digestor seguidamente. Devemos manter o biodigestor fechado pelo menos de 10 a 15 dias para então repor a biomassa e podermos ter todas as

bactérias anaeróbias ativas novamente.

Em comparação, os tempos de regeneração da bactéria hidrolítica e formadora de ácido são significativamente mais curtos, para que com eles não ocorra nenhum risco de degradação.

A baixa taxa de crescimento do metanogênicos significa que para usinas de biogás é necessária uma fase longa para dar partida de até 3 meses, porque é preciso preparar o inóculo para que a fábrica inicie em plena capacidade, e isto requer um certo tempo.

### 7.1.3- Tipo de substrato

O substrato determina a taxa de velocidade de degradação anaeróbia, juntamente com a tecnologia e a operação do processo. Se um componente do substrato que tem importância vital se esgota, os microrganismos param seu metabolismo. Portanto, muitas vezes necessitamos repor as substâncias que possivelmente estejam faltando, tais como, carboidratos, gordura, proteínas, substâncias minerais e outros elementos de menor quantidade, bem como até certa quantidade de substrato.

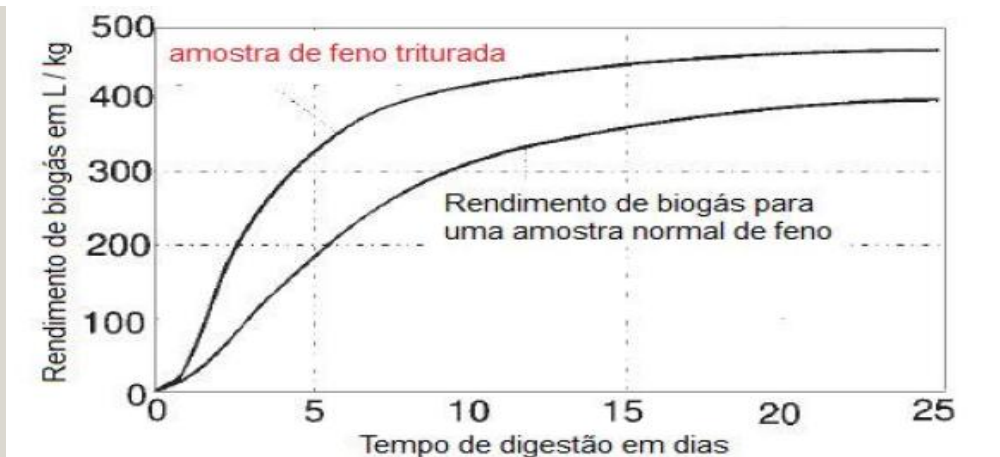
Açúcar, por exemplo, hidrolisa e acidifica em um período de tempo muito curto. A degradação de celulose é mais lenta, dependendo da fração de lignina. Em períodos mais longos, de 20 ou mais dias, mesmo materiais meio pesados e altamente degradáveis hidrolisam e, eventualmente, são metabolizados em metano.

De acordo com a composição dos substratos, produtos intermediários da decomposição também podem limitar ou inibir a degradação. Como exemplo, a degradação de gorduras pode dar origem aos ácidos graxos, que limitam a degradação posterior. Com a decomposição de proteínas, a fermentação do metano pode ser restringida pela formação de amônia e sulfeto de hidrogênio.

### 7.1.4- Superfície específica do material

Como em qualquer outra reação química, uma reação bioquímica é facilitada com o aumento da superfície do material. Pois, quanto maior a superfície de contato entre as moléculas, mais facilmente ocorre a reação química. A superfície do material, muitas vezes varia proporcionalmente ao quadrado do tamanho da partícula. A fim de aumentar a superfície do material, é recomendada a trituração da biomassa antes da fermentação. Como exemplificação, podemos observar na Figura 6 a influência da trituração no rendimento de biogás. Além de ser obtido um maior rendimento quando a matéria prima é triturada, o tempo necessário para se alcançar o maior rendimento é consideravelmente menor comparado ao não triturado, principalmente nos primeiros dias da digestão anaeróbia.





**Figura 6. Rendimento de biogás a partir do feno com e sem trituração da matéria prima em um moinho de bolas [DEUBLEIN, 2010].**

A trituração não tem uma grande influência sobre o rendimento de biogás, quando são usados materiais facilmente degradáveis (95% ou 88% de grau de decomposição), que têm apenas conteúdo muito baixo de materiais estruturais (celulose, lignina, etc.). Tais materiais são de fácil acesso para os microrganismos.

Com substratos como o feno e folhagens, que são ricos em materiais estruturados e permitem apenas um grau de decomposição de aproximadamente 50% sem trituração, o rendimento do biogás pode ser aumentado em até 20%, dependendo do grau de trituração, conforme vimos anteriormente na Figura 6. O aumento da área superficial da partícula e o afrouxamento da estrutura das fibras são as razões deste aumento de rendimento. Com grãos de girassol, por exemplo, a destruição da camada externa do grão é decisiva.

O tempo de residência técnica consiste no tempo em que são alcançados 80% do rendimento máximo do biogás. Como já citado anteriormente, a velocidade de produção de biogás varia de acordo com o substrato, e quando se utiliza substrato em que a produção é mais lenta, esta pode ser acelerada com o auxílio de trituração.

O grau de decomposição pode ser definido como a razão entre a demanda química de oxigênio (DQO) e a DQO máxima alcançável (DQO<sub>max</sub>), correspondendo à demanda química de oxigênio para a degradação completa de todos os componentes orgânicos na amostra.

Quanto maior a superfície específica da biomassa, maior é o rendimento de biogás, mas a relação não é linear. A trituração de partículas finas contribui menos do que a trituração de partículas grandes.

Pode-se supor que o aumento da superfície específica aumenta especialmente os processos de

degradação microbiológica e não os processos de solução física, que iriam começar após um curto período de tempo.

### 7.1.5- Desintegração

A destruição da estrutura celular, até mesmo das paredes das células, com um impacto mais elevado da energia é chamado de "desintegração" ou "rompimento celular". Há muitas razões para a adição de dispositivos a uma desintegração normal da planta de fermentação de biomassa, mas há também algumas razões contra ela. Hoje, a desintegração é principalmente recomendada para a produção de gás de esgoto e é aplicada de forma esporádica.

Razões para a aplicação da desintegração são discutidos abaixo.

- A desintegração aumenta o grau de decomposição e diminui a quantidade de lodo de esgoto. A desintegração traz, acima de tudo, vantagens com biomassas que são difíceis de serem destruídas. Por exemplo, excesso de lodo pode ser mais facilmente degradado, em torno de 10-30%, com um tempo de residência de 15 dias no biorreator. Isto é devido ao fato de que o tempo para a hidrólise é reduzido em função da idade da lama e a fração de microrganismos anaeróbios facultativos. A influência da desintegração é mais importante se for usado um menor tempo de degradação. A matéria seca de lodo de esgoto pode ser reduzida para 50%, porque suas partes são diluídas. No total, o teor de matéria seca orgânica no lodo é levemente aumentado.

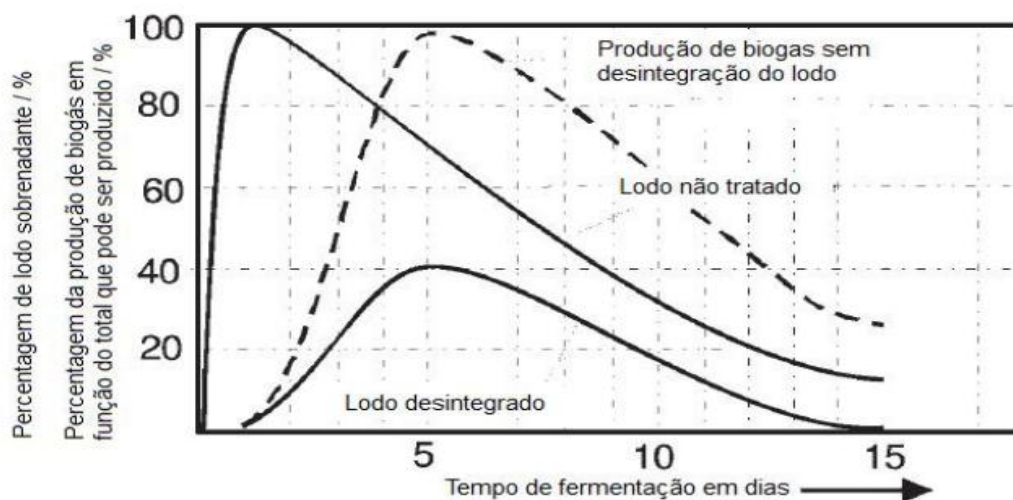
- Desintegração aumenta o rendimento de biogás. O rendimento de biogás de lodo de esgoto pode ser aumentada para aproximadamente 350-375 L.kg-1 por matéria seca de desintegração. Se a degradação do lodo é realizada por 1 hora a 70 ° C e posteriormente degradado por mais 15 dias, pode-se alcançar um aumento de 25% na produção de biogás. Quando a decomposição continua a uma temperatura de 55°C, após a desintegração térmica, é possível obter um rendimento de até 50% na produção de gás.

- Os produtos de desintegração podem servir como uma fonte de hidrogênio ou doadores de elétrons para a desnitrificação de resíduos de água. Com o excesso de água no lodo de esgoto se desintegrando, igual ou superior velocidade de desnitrificação pode ser alcançada em comparação ao uso de acetato como fonte de hidrogênio para o tratamento de águas residuais.

- Desintegração reduz a viscosidade do lodo. Na degradação da biomassa a viscosidade diminui cerca de 30%. A transferência de calor e a mistura são os fatores que auxiliam nessa diminuição. É observada uma menor aderência às superfícies quentes.

- Melhora no comportamento de sedimentação do lodo de esgoto. O comportamento de sedimentação do lodo é melhorado em até 70%. Assim, a desintegração é recomendável, especialmente com tanque de lodo, porque possuem sedimentos com dificuldade de desintegração devida ao seu alto teor de microrganismos filamentosos.

• A formação de lodo flutuante pode ser consideravelmente reduzida e por vezes mesmo totalmente evitada. Particularmente com a degradação de lodo de esgoto, muitas vezes acontece que todas as camadas sobem e ficam flutuando na superfície do lodo. Então, a percentagem de lodo sobrenadante pode chegar a 100%. A ascensão do lodo pode ser prevenida pela desintegração (Figura 7). Então o valor passa para apenas 40% após os primeiros cinco dias após a alimentação do biorreator por causa da forte liberação de gás e que depois diminui rapidamente com a diminuição da produção de biogás.



**Figura 7. Percentagem de lodo sobrenadante e produção de biogás no biorreator em função da dependência da desintegração [DEUBLEIN, 2010].**

• Formação de espuma no biorreator, causada por organismos filamentosos do tanque de lodo ativado, pode ser combatida pela desintegração. Se a formação de espuma é causada por uma alta proporção de microrganismos filamentosos em excesso na lama, a estrutura do floco volumoso é destruída por desintegração, e, portanto, a possibilidade de que as bolhas de gás fiquem presas aos flocos é reduzida. A quantidade de lodo flutuante no tanque de digestão pode ser reduzida.

Desvantagens de desintegração são discutidas abaixo.

• Desintegração afeta a desidratação, e aumenta a demanda de floculantes. Os flocos de lodo são cortados por desintegração e são mais difíceis de desidratarem devido à liberação das células internas de polissacarídeos serem mais difíceis de degradarem por causa de sua estrutura complexa. Portanto, após desintegração e degradação, em média, são necessários mais de 40% de floculantes para a desidratação.

• Desintegração aumenta a carga de nitrogênio, carbono, metais pesados e fosfatos da estação de tratamento de água. Como resultado da melhoria da degradação pela desintegração das proteínas liberadas pelas células, é previsto um aumento de nitrogênio de aproximadamente 30% com o lodo bombeado de volta para as instalações de águas residuais, devido ao amônio remanescente no produto final da degradação de proteínas na água. Imediatamente após a desintegração, os metais pesados passam a ser medidos na fase líquida. Durante a subsequente estabilização do lodo os metais pesados são adsorvidos novamente na matriz do lodo. A degradação crescente de matéria orgânica faz com que aumente a concentração de metais pesados no resíduo. Em geral, mas não sempre, o consumo de energia aumenta com o aumento do grau de

desintegração, certamente, dependendo mais ou menos do calor envolvido no processo de desintegração. A desintegração quase completa (> 95%) de microrganismos já foi alcançada por meio da utilização de moinhos de bolas, do tratamento ultrasom, e um homogeneizador de alta pressão.

• Desintegração leva à considerável erosão ou problemas de corrosão. Para a desintegração, os substratos devem ser estressados, seja por altas temperaturas, ataques químicos ou enzimáticos, fatores de estresse elevado, ou outros meios. Estas condições também afetam as máquinas e contêineres e encurtam sua vida útil.

### 7.1.6- Cultivo, mistura e capacidade de volume

A fase inicial de uma planta anaeróbica tem uma duração de 2 a 4 meses.

O início da planta normalmente tem um longo prazo devido ao efeito biocenose. O arranque inicial pode falhar completamente, isto é, a biorreação pode não ocorrer e o biogás não será produzido. Para evitar esses problemas, o hidrolisador e o reator de metano muitas vezes são inoculados com lodo anaeróbico a partir de outras plantas de fermentação. A mistura do reator tem que ser realizada com muito cuidado:

- Cada microrganismo deve conter os nutrientes necessários, e os produtos do metabolismo têm que ser removidos com auxílio de agitação suave.

- Substrato fresco pode ter que ser misturado com substrato degradado, a fim de inocular o substrato fresco com bactérias ativas.

- O biogás deve ser removido de forma eficaz do reator.

- A simbiose dos microrganismos acetogênicos e metanogênicos não deve ser perturbada.

- Os microrganismos são realmente sensíveis ao estresse e podem ser destruídos por agitação muito forte.

- A formação de espuma devido à formação de gás muito intensa pode ser prevenida por agitação adequada.

- Gradientes de temperatura no biorreator resultam numa menor eficiência da reação.

- O consumo de energia deve ser minimizado.

Os cuidados devem ser intensos.

A carga de volume depende principalmente da temperatura, da matéria orgânica seca no substrato, e do tempo de residência.

Se a carga for muito baixa, o processo funciona, mas não economicamente, porque muita água já passou.

A fim de evitar uma carga excessiva de volume no local, o biorreator deve ser alimentado frequentemente, por exemplo, duas vezes ao dia ou continuamente.

Por razões econômicas, reatores de biogás são projetados de modo que ocorra a degradação de no máximo 75% da matéria orgânica.

### 7.1.7- Luz

A luz não é letal para os microrganismos metanogênicos, mas inibe severamente a metanação. A formação de metano deve ocorrer em absoluta ausência de luz.

### 7.1.8- Temperatura

Já citamos anteriormente que a temperatura do sistema deve ser rigorosamente controlada para que o processo biológico, ou seja, a digestão anaeróbia ocorra. Este controle é importante porque bactérias são extremamente sensíveis à temperatura.

Para que as bactérias anaeróbias sejam ativas, a temperatura necessita ser controlada de acordo com cada população que, podem ser divididas em três zonas de temperatura:

- A zona psicrófila para temperaturas inferiores a 20°C,
- A zona de mesófilos para temperaturas entre 25 e 35°C,
- A zona termofílicas para temperaturas acima de 45°C.

Normalmente em temperaturas acima de 70°C as populações bacterianas estão inativas.

As temperaturas acima mostram duas regiões ótimas para as bactérias acidificantes; uma entre 32-42 ° C para os microrganismos mesófilos e outra em 48 - 55 ° C para microrganismos termofílicos. (Figura 8).

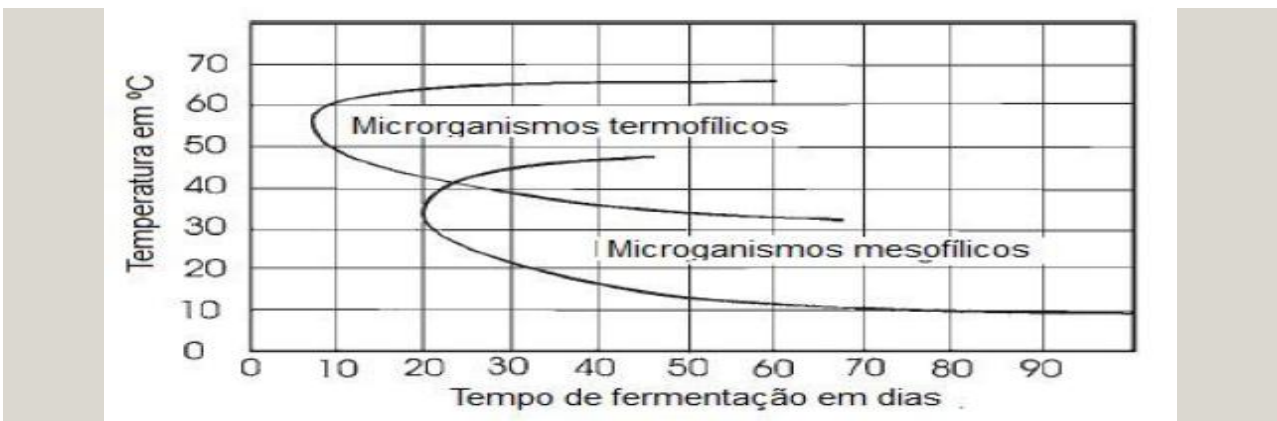


Figura 8. Influência da temperatura no tempo de fermentação [DEUBLEIN, 2010].

A maioria dos microrganismos metanogênicos pertence aos mesófilos. Apenas uma minoria é termofílicas. Outros são capazes de produzir metano, mesmo em baixas temperaturas (0,6 - 1,2°C. Em testes de laboratório, a formação de metano pode ser também realizada em temperaturas abaixo de zero.

Dentro da faixa de temperatura aceitável pelas bactérias pode haver no máximo uma variação de mais ou menos 2°C, sem danos aos microrganismos.

### 7.1.9- Efeito do pH

Outro parâmetro importante no sistema de digestão anaeróbia é o pH. O pH deve permanecer perto de 7.5. Para substrato líquido ou estrume sólido, o sistema regula-se com boa capacidade tampão, ou seja, ao ser regulado o pH, o valor não varia no decorrer do processo. Entretanto, para outros substratos, como silagem e soro de leite, é necessário monitorar o pH e, eventualmente, intervir adicionando cal, pois naturalmente ocorre a acidificação do meio. A acidificação ocorre no momento da acidogênese e acetogênese se o hidrogênio formado não for usado para produzir metano com o gás carbônico, ocorrendo o acúmulo de hidrogênio e bloqueando a fermentação.

Se por acaso ocorrer um salto no valor de pH e uma elevação na quantidade de CO<sub>2</sub> no biogás isto é uma indicação de haver um distúrbio no processo de fermentação. Um primeiro sinal de acidificação é a elevação da concentração do ácido propiônico.

A temperatura e o pH desempenham um papel muito importante. Eles afetam a velocidade de multiplicação das populações bacterianas controlando os subprodutos finais que são eliminados após a fermentação.

No processo de digestão anaeróbia ocorre uma desaceleração no processo quando o substrato começa a diminuir. Todavia, esta desaceleração do processo biológico pode ser evitada com a introdução de novos substratos. Ao se introduzir novos substratos, tentamos corrigir as populações de microrganismos no digestor ou fazer recircular o efluente para que a temperatura e o pH sejam uniformes em todo o tanque.

### 7.1.10- Potencial redox

No biorreator são necessários baixos potenciais redox, como exemplo citamos as monoculturas de metanogênicos que necessitam de potencial entre -300 e -330 mV. O potencial redox pode aumentar para 0 mV na fermentação. Para controlar o potencial redox podem ser adicionados alguns agentes oxidantes, mas sem oxigênio, sulfatos nitratos ou nitritos.

### 7.1.11- Nutrientes (Razão C/N/P)

A razão C/N do substrato deve estar na faixa de 16:1 a 25:1. Porém, o nitrogênio também pode ser encontrado na estrutura da lignina.

Para a formação de metano através de processo anaeróbio são necessárias as presenças de carbono, nitrogênio, enxofre e fósforo.

Substratos com baixa razão C/N conduzem a uma alta produção de amônia que conseqüentemente inibe a formação de metano. A carência de nitrogênio também afeta a formação de proteínas dificultando o metabolismo dos microrganismos.

### 7.1.12- Traços de elementos

Para a sobrevivência certos microrganismos também necessitam de uma pequena quantidade de ferro, cobalto, níquel, selênio, tungstênio e magnésio.



### 7.1.13- Remoção de biogás

A remoção dos gases produzidos (metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio) do substrato tem uma influência considerável nas reações biológicas. A concentração alcançada de microrganismos pode ser aumentada em 12 vezes em casos extremamente metanogênicos termofílicos quando os gases produzidos são removidos em proporção suficiente.

A desgaseificação do substrato é muito importante, pois os gases produzidos inibem o metabolismo dos microrganismos.

### 7.1.14- Inibidores

A digestão anaeróbia pode ser influenciada por vários fatores, entre eles, os inibidores. Esses inibidores podem afetar diretamente a composição do substrato e/ou as bactérias.

Os inibidores podem agir de diferentes formas no sistema de digestão anaeróbia.

Como exemplo de inibidores podemos citar:

- o oxigênio, pois a maioria das bactérias acidogênicas são facultativamente anaeróbias e as metanogênicas são obrigatoriamente anaeróbias;

- compostos contendo enxofre, que podem estar na forma de sulfato, sulfeto, sulfeto de hidrogênio e HS- e S- dissociado;

- ácidos graxos e aminoácidos não forma não dissociada, pois eles penetram nas células lipofílicas e desnaturam as proteínas da célula;

- nitrato ( $\text{NO}_3^-$ );

- amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ );

- metais pesados como chumbo, cádmio, cromo, cobre, níquel, mercúrio e zinco;

- tanino;

- outros inibidores, como herbicidas, inseticidas, desinfetantes e antibióticos.

### 7.1.15- Grau de decomposição

A degradação completa da matéria seca orgânica só é possível se não houver a presença de lignina na biomassa. Assim, o grau de decomposição normal varia entre 27 e 76%, mas na prática é cerca de 43,5%.

## 7.2- Bactérias que participam do processo da degradação da biomassa

As espécies de microrganismos utilizados dependerão do tipo de material que será degradado. A tabela abaixo mostra os tipos de bactérias que podem ser utilizadas para a produção de biogás.

Gênero: Acetobacterium	<i>A. woodii</i>	O gênero Acetobacter contém bactérias homoacetogênicas na forma de bastão	Elas reduzem compostos poliméricos autotrópicos, oligômeros e monômeros ou CO <sub>2</sub> , com hidrogênio como fonte de elétron. Eles servem como alimentadores padrões de hidrogênio e possibilitam a decomposição de ácidos graxos e compostos aromáticos.
	<i>A. paludosum</i>		
Gênero: Eubacterium	<i>E. rectale</i>	O gênero eubacterium consiste obrigatoriamente de bactérias gram-positivas anaeróbicas, que não produzem endosporos.	Muitas das Eurobactérias sacarolíticas produzem butirato como produto do metabolismo. Várias espécies estão aptas à decomposição de substratos complexos, via caminhos alternativos. Algumas espécies crescem autotropicamente e estão
	<i>E. siraeum</i>		
	<i>E. plautii</i>		
	<i>E. cylindroides</i>		
	<i>E. brachy</i>		
	<i>E. desmolans</i>		
	(produz desmolase, que pode degradar esteróides)		aptas a realizarem mudanças especiais na decomposição anaeróbica.
	<i>E. callandrei</i>		
	<i>E. limosum</i>		

A produção de energia elétrica em larga escala a partir da biomassa é um tema que vem sendo estudado, nos últimos anos, com grande interesse em vários países do Mundo. Esse interesse deve ser creditado à conjunção de vários fatores (PATTERSON, 1994 e BRIDGWATER, 1994):

(i) A produção de eletricidade a partir da biomassa têm um ciclo de Carbono praticamente fechado, as emissões de SO<sub>x</sub> são muito pequenas - ou nulas -, têm-se menos cinza residual de quando do uso de carvão mineral, por exemplo.

(ii) alguns analistas acreditam que é no uso energético de resíduos que vai ser definido o maior mercado, nos países desenvolvidos, dessas novas tecnologias de conversão da biomassa. Esta tendência será tanto mais forte quanto maior for a pressão da sociedade;

(iii) à conveniência da redução da dependência de alguns países com relação aos combustíveis fósseis e, em especial, aos derivados de petróleo, tópico que é sempre lembrado em associação à uma visão geopolítica estratégica, muito embora o abastecimento e os preços internacionais do petróleo estejam estáveis há muitos anos.

Em associação aos pontos acima listados, o DOE (1996) identifica um certo número de oportunidades de curto e médio prazo que podem facilitar o maior uso da biomassa na geração de energia elétrica. São eles:



(i) algumas termoeletricas e varias caldeiras industriais que hoje queimam carvão mineral deverão ser substituídas ou reformadas nos próximos anos, o que define uma janela de oportunidade para a conversão parcial dessas instalações para a queima conjunta da biomassa;

(ii) especialistas do setor elétrico consideram que sistemas híbridos de produção de eletricidade, que façam queima conjunta, por exemplo, de biomassa e gás natural, oferecem baixíssimo risco;

(iii) em alguns segmentos industriais que fazem uso intensivo da biomassa enquanto matéria prima e energia, existe um grande potencial para a produção de eletricidade a partir, por exemplo, de resíduos do processo.

**Segundo material didático disponível para consulta do Professor Gilson Paulillo (2011), para discorrer as questões propostas, estas podem ser fundamentadas da seguinte forma:**

### **7.3- GRUPO MOTOR-GERADOR**

Denomina-se grupo motor-gerador ao conjunto de motor e gerador de corrente alternada, convenientemente montados, dotado dos componentes de supervisão e controle necessários ao seu funcionamento autônomo e destinado ao suprimento de energia elétrica.

Conforme já mostrado, normalmente o motor utilizado é o motor de combustão interna, sendo o motor a ciclo Diesel um dos mais utilizados.

Em função dos consumidores de energia elétrica a que se destinam, os grupos geradores são construídos com características especiais que os tornam apropriados para diversas aplicações como, por exemplo, o fornecimento de energia a comunidades isoladas, como suprimento de emergência nas interrupções de fornecimento em hospitais, indústrias, etc... A seleção desse equipamento envolve muitos os fatores a serem considerados antes da aquisição do equipamento adequado, tais como: características específicas do fornecimento de energia elétrica, ambiente, temperatura, isolamento, vibração e ruído do ambiente, tempo de resposta, tempo de partida, características de partida/parada, vida útil, durabilidade das partes mecânicas, sistemas de controle e proteção, dentre outros. Isso indica que cada caso demanda um projeto específico para que o funcionamento do conjunto motor-gerador ocorra satisfatoriamente conforme a aplicação.

Os fornecedores de grupos geradores tendem a padronizar os seus produtos, evitando os fornecimentos especiais sob encomenda, o que na prática é inviável, pois há situações em que alguns requisitos do ambiente e dos consumidores não podem deixar de ser atendidos. É o caso, por exemplo, dos equipamentos de telecomunicações, que necessitam de tensão e frequência sem oscilações, com baixos fatores de interferência, que somente se consegue, em grupos geradores, com alternadores especialmente fabricados para esta finalidade. Outro exemplo são os grupos geradores para uso naval, fabricados sob fiscalização das sociedades classificadoras, que em tudo diferem do que seria considerado um grupo gerador de uso industrial.

Assim, para dimensionar corretamente um grupo gerador, algumas perguntas devem ser respondidas antecipadamente, tais como:

a) Qual o tipo de carga? (iluminação, motores de indução, fornos, canteiro de obras, retificadores de corrente, equipamentos de telecomunicações?)

b) Qual o local de serviço? (mar, terra, ambientes com atmosfera explosiva?)

c) Quais as características do local? (temperatura ambiente dominante, altitude, nível de contaminação do ar por partículas sólidas?)

d) Qual o regime de operação? (o grupo gerador é a única fonte de energia elétrica? É reserva da rede local ou de outro grupo gerador? Quantas horas de operação por dia?)

e) Quanto tempo os consumidores podem ficar desligados?

f) Quais os riscos envolvidos no caso de uma interrupção do fornecimento de energia por defeito no equipamento?

### **7.3- Requisitos de energia**

A necessidade de geração local de eletricidade geralmente é definida por instalações obrigatórias de recursos para atender requisitos de normas de edifícios e/ou o risco de perdas financeiras que podem resultar da falta de energia elétrica. No primeiro caso, decorrem dos requisitos das normas de edifícios definidos por autoridades federais, estaduais, municipais ou outros órgãos governamentais. Essas instalações são justificadas em função da segurança da vida humana, onde a perda da energia normal pode criar riscos contra a vida ou a saúde de pessoas. No segundo caso, essas instalações são justificadas por uma redução no risco de perdas de serviços, dados ou outros ativos valiosos. Além disso, também podem ser justificadas pelas reduções nos preços de carga oferecidas pela concessionária de energia elétrica, e podem ser servidas pelo mesmo sistema de geração local, desde que as necessidades de segurança à vida tenham prioridade, o que pode ser obtido em função da capacidade do gerador e dos arranjos de transferência de carga.

Além das características gerais, outro conjunto de requisitos específicos resultará na necessidade de sistemas de geração local de energia elétrica, como, por exemplo:

- Iluminação: Iluminação de saídas de emergência, sinais luminosos de saída, iluminação de segurança, luzes de advertência, iluminação da sala de operação, iluminação interna de elevadores, iluminação da sala do gerador, etc.

- Energia de Controle: Energia de controle para caldeiras, compressores de ar e outros equipamentos com funções críticas.

- Transporte: Elevadores para uso do Corpo de Bombeiros.

- Sistemas Mecânicos: Controle de fumaça e ventiladores de pressurização, tratamento de águas servidas, etc.

- Aquecimento: Aquecimento de processos críticos.

- Refrigeração: Bancos de sangue, armazenamento de alimentos, etc.

- Produção: Energia para processos críticos de laboratórios, processos de produção farmacêutica, etc.

- Refrigeração de Ambientes: Refrigeração de salas de equipamentos de computação, refrigeração e aquecimento para pessoas que requerem cuidados especiais, ventilação de ambientes perigosos, ventilação de poluentes ou contaminação biológica, etc.

- Proteção Contra Fogo: Bombas de incêndio, alarme e sinalização.
- Processamento de Dados: Sistemas UPS e refrigeração para evitar perda de dados, perda de memória, destruição de programas.
- Suporte à Vida: Hospitais, enfermarias e outras instalações de cuidados.
- Sistemas de Comunicações: Serviços telefônicos de emergência, como polícia e Corpo de Bombeiros, sistemas de antenas de edifícios públicos, etc.
- Sistemas de Sinalização: Controle de tráfego ferroviário, marítimo e aeronáutico.

#### **7.4- Tipos e Classificações de sistemas**

Os sistemas de geração local de energia podem ser classificados por tipo e classe do equipamento de geração. Basicamente, o equipamento é classificado como Standby, Prime e Contínuo.

Um grupo gerador usado em aplicações Standby é uma reserva da fonte de energia principal (concessionária de energia) e espera-se que o mesmo não seja utilizado com frequência, de modo que a classificação Standby é a mais alta disponível para o grupo gerador.

Por sua vez, espera-se que os grupos geradores classificados como Prime funcionem durante um número ilimitado de horas e o grupo gerador é considerado a fonte principal de energia para cargas variáveis, de modo que a classificação Prime geralmente representa 90% da classificação Standby.

Em aplicações de trabalho Contínuo, espera-se que o grupo gerador produza a saída nominal durante um número ilimitado de horas sob carga constante (aplicações onde o grupo gerador pode ser operado em paralelo com a fonte principal de energia e sob carga básica). Assim, a classificação Contínua normalmente é 70% da classificação Standby.

Além disso, pode-se considerar as seguintes classificações:

- Sistemas de Emergência: Os sistemas de emergência geralmente são instalados conforme as necessidades de segurança pública e por imposição legal. Normalmente, destinam-se ao fornecimento de energia e iluminação em curtos períodos com três propósitos: permitir a evacuação segura de edifícios, suporte à vida e a equipamentos críticos para pessoas que requerem cuidados especiais, ou para sistemas de comunicações críticas e locais usados para segurança pública. Os requisitos de normas normalmente especificam o equipamento de carga mínima a ser servido.
- Standby Legalmente Exigidos: Os sistemas standby exigidos por lei geralmente são instalados por imposição de requisitos legais de segurança pública. Estes sistemas normalmente destinam-se ao fornecimento de energia e iluminação por curtos períodos, onde necessário para evitar acidentes ou facilitar as operações de combate a incêndios. Em geral, as exigências normativas especificam o equipamento de carga mínima a ser servido.
- Standby Opcional: Os sistemas Standby Opcionais geralmente são instalados onde a segurança não é um fator crítico, mas a falta de energia pode causar perdas de negócios ou receitas, interrupção de processos críticos, ou causar inconveniências ou desconfortos. Estes sistemas normalmente são instalados em centros de processamento de dados, fazendas, edifícios comerciais/industriais e residências. O proprietário do sistema pode selecionar as cargas a serem conectadas ao sistema. Além de proporcionar uma fonte standby de energia em

caso de falta de energia da rede normal de eletricidade, os sistemas de geração local também são utilizados para os seguintes fins:

**o Energia Prime:** As instalações de energia prime utilizam a geração local em vez da energia normal fornecida pela rede pública em áreas onde os serviços da empresa fornecedora de energia não estejam disponíveis. Um sistema simples de energia prime utiliza pelo menos dois grupos geradores e uma chave comutadora para transferir a energia para as cargas entre eles. Um dos dois grupos geradores funciona continuamente com uma carga variável e o outro serve como reserva no caso de queda de energia e também para permitir o desligamento do primeiro para a manutenção necessária. Um relógio de alternância na chave comutadora alterna para o grupo gerador principal em um intervalo predeterminado.

**o Corte de Picos:** As instalações de corte de picos utilizam a geração local para reduzir ou nivelar o uso da eletricidade nos picos com o propósito de economizar dinheiro nos custos de demanda de energia. Os sistemas de corte de picos requerem um controlador que dá a partida e opera o gerador local em tempos apropriados para nivelar as demandas de pico do usuário. A geração instalada para fins de energia standby também pode ser usada para corte de picos.

**o Redução de Custos:** As instalações para redução de custos utilizam a geração local conforme os contratos de preços de energia elétrica mantidos com a fornecedora dos serviços de energia. Em troca de preços de energia mais favoráveis, o usuário concorda em operar os geradores e assume uma quantidade específica de carga (kW) em períodos determinados pela concessionária, normalmente para não exceder um determinado número de horas por ano. A geração instalada para fins de energia standby também pode ser utilizada para redução de custos.

**o Carga Básica Contínua:** As instalações de carga básica contínua utilizam a geração local para fornecer energia constante (kW), geralmente através de equipamentos de interconexão com a rede da concessionária. Em geral, estas instalações são propriedade das concessionárias de energia elétrica ou estão sob seu controle.

**o Cogeração:** Frequentemente, a geração de carga básica contínua é utilizada em aplicações de Co-geração. Em termos mais simples, a cogeração é a utilização da geração direta da eletricidade e do calor de escape irradiado para substituir a energia fornecida pela concessionária. O calor irradiado é capturado e utilizado diretamente ou convertido em eletricidade.

De qualquer modo, deve-se ter em mente que os grupos geradores são pequenas fontes de energia comparadas com a fonte normal da rede pública, e as características operacionais das cargas podem ter um efeito profundo na qualidade da energia se o gerador não for dimensionado corretamente. Considerando que um gerador é uma fonte de energia limitada, sempre que forem conectadas ou desconectadas cargas de um gerador, deve-se esperar por alterações na voltagem e na frequência. Essas alterações devem ser mantidas dentro de limites aceitáveis para todas as cargas conectadas. Além disso, surgirão distorções de voltagem na saída do gerador quando forem conectadas cargas não lineares que produzem correntes harmônicas.

Essas distorções podem ser consideravelmente maiores quando as cargas são alimentadas pelo gerador do que quando são alimentadas pela rede da concessionária, e provocarão um aquecimento adicional tanto no gerador quanto no equipamento de carga se não forem mantidas sob controle. Consequentemente, são necessários geradores maiores do que o exigido para alimentar cargas e limitar as alterações de voltagem e frequência durante as cargas transientes e as distorções harmônicas quando forem suportadas cargas não lineares como computadores, UPSs e VFDs.

Alguns fabricantes disponibilizam programas computacionais para o dimensionamento de geradores que auxiliam na escolha do grupo gerador e fornecem um nível mais alto de confiança para a aquisição de um sistema grande o suficiente para as necessidades do cliente – e não maior.

Além da carga conectada, vários outros fatores afetam o dimensionamento do grupo gerador: requisitos de partida de cargas como motores e suas cargas mecânicas, o desequilíbrio de cargas monofásicas, o suprimento de cargas não lineares (como, por exemplo, equipamentos do tipo UPS), restrições de queda de voltagem, cargas cíclicas, etc.

### 7.5- Tipos de Carga

- Cargas de Iluminação: Os cálculos de iluminação são bastante diretos, uma soma da potência de lâmpadas ou acessórios, ou da potência requerida para os circuitos de iluminação mais a potência requerida para reatores. Os tipos comuns de iluminação são: incandescente – conjuntos de padrão de lâmpadas de bulbo que geralmente usam um filamento de tungstênio; fluorescente – uma lâmpada de gás ionizado ativado por reator – aplica-se também para iluminação de descarga de gás; e descarga – sódio de baixa pressão, sódio de alta pressão, etc.

- Cargas de Ar Condicionado: As cargas de ar-condicionado geralmente são especificadas em toneladas. Para estimar os requisitos de potência em quilowatts, uma conversão de 2 HP/ton é usada como uma estimativa muito conservadora da carga total para uma unidade de menor eficiência. Se desejar uma medida mais precisa é necessário conhecer as cargas individuais do motor e dos componentes do equipamento de A/C, some as cargas individualmente e acrescente um fator de demanda para as cargas que podem ser iniciadas simultaneamente.

- Cargas de Motor: Existe uma grande variedade de tipos de motores e tipos de cargas conectadas a esses motores, cada uma das quais afeta a partida do motor e as características de funcionamento. Isto ainda envolve o tipo de acionamento, a utilização de dispositivos de partida direta ou de partida controlada, o tipo de motor – monofásico ou trifásico, dentre outras características.

- Cargas com Alimentação Ininterrupta de Energia: Um sistema estático de alimentação ininterrupta de energia (UPS) usa retificadores de silício controlados (SCRs) ou outros dispositivos estáticos para converter voltagem de CA em voltagem de CC. A voltagem de CC é usada para produzir voltagem de CA através de um circuito inversor na saída do UPS. A voltagem de CC também é usada para carregar as baterias, que são os componentes de armazenamento de energia para o UPS. A comutação dos SCRs na entrada induz correntes harmônicas no alternador do grupo gerador. Os efeitos dessas correntes incluem o aquecimento adicional do enrolamento, a redução da eficiência e a distorção da forma de onda de CA. O resultado é um alternador maior para uma determinada saída em kW do grupo gerador. Os dispositivos UPS também podem ser sensíveis a quedas de voltagem e oscilações de frequência.

No geral, deve-se ter em mente que existe uma forte interação entre a carga elétrica e o grupo gerador de forma que qualquer alteração nas características mecânicas do motor provoca uma alteração nas características da alimentação da carga elétrica, o que, fora de certos limites, é prejudicial à mesma. Além disso, qualquer alteração no comportamento da carga elétrica pode provocar um impacto nas características mecânicas do motor, comprometendo o seu funcionamento.

O quadro mostrado na Figura 21 ilustra essa situação e apresenta tolerâncias para algumas cargas elétricas.



EQUIPAMENTO	VOLTAGEM	FREQÜÊNCIA	COMENTÁRIOS
Motores de Indução	+/-10%	+/-5%	A baixa voltagem resulta em torque baixo e no aumento da temperatura. A alta voltagem resulta no aumento do torque e dos ampères de partida.
% de Bobinas e Motores de Partida	+/-10%	N/D	A força de retenção de uma bobina e sua constante de tempo de descarga são proporcionais aos ampères-espiras da bobina. Bobinas menores podem ficar fora destas tolerâncias para quedas transientes. Uma queda transiente de voltagem de 30 a 40% durante mais de 2 ciclos pode provocar a queda da bobina.
Iluminação Incandescente	+10%, -25%	N/D	Voltagem baixa resulta em 65% de luz. Voltagem alta resulta em 50% da vida. Freqüência baixa pode resultar em luz piscante
Iluminação Fluorescente	+/- 10%	N/D	Voltagem alta resulta em superaquecimento.
Iluminação HID	+10%, -20%	N/D	Voltagem baixa resulta em extinção. Voltagem alta resulta em superaquecimento.
UPS Estático	+10%, -15%	+/- 5%	Nenhuma descarga da bateria abaixo de -20% da voltagem. UPS são sensíveis a uma taxa de mudança de freqüência maior que 0,5 Hz/seg (taxa de risco). O superdimensionamento do gerador poderá ser necessário para limitar a distorção harmônica de voltagem.
Acionamento com Freqüência Variável (VFD)	+10%, -15%	+/- 5%	VFDs são sensíveis a uma taxa de mudança de freqüência maior que 1 Hz/seg. O superdimensionamento do gerador poderá ser necessário para limitar a distorção harmônica de voltagem.
Se a voltagem não recuperar em 90%, dispositivos de proteção contra voltagem baixa podem travar, dispositivos contra corrente excessiva podem interromper, motores de partida com voltagem reduzida podem travar ou engripar e motores podem parar ou não ter aceleração aceitável.			

**Figura 21- Tolerâncias para cargas elétricas**

## 7.6- Componentes de supervisão e controle

Os grupos geradores operam sem supervisão constante dos operadores, fornecendo energia elétrica aos consumidores e automaticamente corrigindo a tensão e a freqüência fornecidas. Nesse processo, diversos componentes e sistemas atuam de forma a manter o funcionamento adequado deste conjunto como, por exemplo, a pressão do óleo lubrificante e a temperatura da água de refrigeração, que são reguladas pelas válvulas reguladoras de pressão e termostática. Caso ocorra uma deficiência de funcionamento nos sistemas de lubrificação ou de refrigeração, o motor Diesel poderá sofrer sérias avarias antes que seja possível uma intervenção do operador.

Para prevenir estas falhas, os grupos geradores são dotados de sistemas de proteção, que, dependendo das especificações do cliente, incluem:

### a) Pressostato do óleo lubrificante:

Tem a finalidade comandar a parada do motor Diesel quando a pressão do óleo lubrificante cai abaixo de um valor predeterminado. Em algumas aplicações, utilizam-se dois pressostatos (ou sensores de pressão) sendo um para alarme, quando a pressão do óleo atinge determinado valor, e o outro para comandar a parada, calibrado para um valor imediatamente abaixo.

### b) Termostato para a água de refrigeração:

Com função idêntica à acima, também, em algumas aplicações, são utilizados dois sensores, para atuarem quando a temperatura do meio refrigerante ultrapassa valores predeterminados.

### c) Sensor de sobrevelocidade:

Para comandar a parada do motor quando a velocidade de rotação ultrapassa valores predeterminados (geralmente 20% acima da rotação nominal). Em algumas aplicações, onde há o risco de aspiração de gases inflamáveis, o sensor de sobrevelocidade é interligado a um dispositivo de corte do ar de admissão, para parar o motor por abafamento, além do corte de combustível.

**d) Sensor de nível do líquido de refrigeração:**

É utilizado para acionar, na maioria dos casos, um dispositivo de alarme, indicando a necessidade de completar o nível do sistema de refrigeração.

**e) Relé taquimétrico:**

Tem a finalidade de desligar o motor de partida quando a rotação do motor ultrapassa determinado valor. Em muitos casos, esta função é também inerente ao sensor de sobrevelocidade, quando este permite o controle de mais que uma faixa de operação. Este dispositivo impede acionar o motor de partida com o motor funcionando.

**f) Sensor de ruptura da correia:**

Este sensor é utilizado para prevenir a ruptura da correia da bomba d'água, pois em algumas aplicações exige-se que a parada do motor seja comandada antes da elevação da temperatura da água de refrigeração do motor.

**g) Sensor de frequência:**

Pode ser utilizado para supervisionar tanto a frequência do grupo gerador quanto da rede local.

Nos grupos geradores equipados com sistema de partida automática, comanda o desligamento da rede local e aciona a partida automática do grupo gerador, ou vice-versa, comanda a parada do grupo gerador e transfere a carga para a rede local quando há anormalidade na frequência do alternador.

**h) Sensores de tensão da rede e do grupo:**

Atuam como no caso dos sensores de frequência, comandando a partida e parada, conforme o caso.

**i) Outros sensores:**

Conforme a aplicação e a solicitação do cliente, outros sensores podem ser adicionados ao sistema, tais como nível do tanque de combustível, presença de água no filtro de combustível, filtro de ar obstruído, sobrecarga no alternador, bateria com deficiência de carga, pressão do sistema de arrefecimento, temperatura do óleo lubrificante, etc.. Estes podem demandar funções de alarme visual ou sonoro, no local ou à distância, ou outras funções especificadas pelo usuário.

**j) Painel local de instrumentos:**

Para avaliar a performance do motor recomenda-se a instalação de um painel de instrumentos dotado de manômetro para o óleo lubrificante, termômetro para o sistema de refrigeração, chave de partida, comando de parada manual, indicador de carga de bateria e outros instrumentos tais

como voltímetro e amperímetro para a bateria, tacômetro, termômetro para o óleo lubrificante e horímetro.

Em algumas aplicações, componentes do governador eletrônico de rotações são também instalados no painel local.

#### **k) Quadro de comando:**

Este quadro abriga os componentes elétricos afetos ao gerador elétrico, rede local e às cargas,

conforme o caso. Normalmente é dotado de uma chave seccionadora com fusíveis ou disjuntor para a entrada dos cabos provenientes do alternador, voltímetro, frequencímetro, amperímetros, chave seletora de voltímetro (para selecionar as fases cujas tensões se quer medir), regulador automática de tensão do alternador e demais componentes elétricos, tais como partida automática, sensores de tensão e frequência, chaves de transferência automática de carga, interface para comunicação e transmissão de dados, carregador/flutuador de baterias, voltímetro e amperímetro do sistema de excitação ou outros instrumentos, conforme requerido para a aplicação.

### **7.6- Requisitos da instalação**

Na maioria dos casos, não há necessidade de fundações especiais para suportar o grupo gerador. Entretanto, em qualquer situação, é necessário avaliar o peso do conjunto e as frequências envolvidas para verificar a necessidade de reforço adicional para o piso ou estruturas. Por exemplo, para a instalação do equipamento sobre a laje de um pavimento elevado de um prédio, esses valores devem ser considerados pelo calculista da edificação.

Uma maneira prática de avaliar a resistência das fundações para suportar o peso, isolar vibrações e assegurar o alinhamento do conjunto é calculando a espessura da base de concreto armado, necessária para o equipamento, considerando que o peso da base deve ser igual ao peso do Grupo Gerador:

$$e = P / (2.500 \cdot l \cdot c) \quad (8)$$

**Onde:**

**e = espessura da base de concreto [m];**

**P = Peso total do grupo gerador [kg];**

**2.500 = Densidade do concreto [kg/m<sup>3</sup>];**

**l = largura da base [m];**

**c = Comprimento da base [m].**

**Observações:**

· Os valores de l e de c devem ser os da base do grupo gerador, acrescidos de 12,0" (30 cm) para cada lado;

· No caso de uso de amortecedores de vibração (Vibra-Stop, por exemplo), considerar o peso da base igual ao do grupo gerador;



- Caso contrário, multiplicar o valor de  $e$  calculado por 1,25;
- Quando se tratar de grupos geradores que operam em paralelo, multiplicar o valor de  $e$  por 2.

A ferragem para a armação do concreto pode ser feita com uma malha trançada de vergalhões, com espaçamento de 3,00".

A base metálica do grupo gerador deve ser conectada ao sistema de aterramento geral da subestação local. No entanto, em algumas instalações, o neutro da rede local é separado do aterramento da instalação. Neste caso, conectar o neutro do alternador ao neutro da rede e o terra da base ao aterramento geral.

Tratando-se de instalação em que o grupo gerador é a única fonte de energia, um sistema de aterramento deve ser construído caso existam consumidores que demandem energia com tensão entre fase e neutro do alternador.

### 7.7- Vibrações

Um motor Diesel de quatro tempos e 6 cilindros, por exemplo, trabalhando a 1800 rpm, terá 3 tempos motor a cada volta completa da árvore de manivelas. Estes impulsos, para efeito de cálculos de frequência, são chamados excitadores principais, e sua frequência é:  $W_x = 3 \times 1.800 \times (2p / 60)$ .

A frequência natural ou própria do sistema ( $w_e$ ) é uma composição de harmônicos e sub harmônicos resultante dos movimentos das massas. Quando ocorre a igualdade das frequências dos excitadores principais com a frequência natural ( $W_x = w_e$ ), acontece o que se conhece como ressonância, com todas as manifestações perigosas que costumam acompanhá-la. A velocidade em que  $W_x = w_e$  é conhecida como velocidade crítica. Nos grupos geradores modernos, esta velocidade está abaixo de 1.000 rpm.

Para evitar que vibrações indesejáveis sejam transmitidas às edificações, entre a base e o piso de apoio são utilizados amortecedores de borracha ou de molas, que devem ser adquiridos juntamente com o equipamento, pois, no caso de molas, estas são calculadas pelo fabricante em função de peso e frequência de trabalho.

É possível que, em determinadas aplicações, seja necessário conhecer a frequência natural de algum componente do ambiente da instalação, para saber dos riscos de ressonância com a frequência dos excitadores principais do grupo gerador.

Havendo necessidade de estudos mais profundos, pode-se solicitar ao fabricante do motor, um cálculo de vibrações torsionais para um determinado acoplamento.

### 7.8- Níveis de ruídos

As fontes de ruído em um grupo gerador são:

#### 1) Ruídos mecânicos:

Nas variações rápidas de pressão, as frequências próprias são levadas ao encontro da velocidade de deformação dos componentes sujeitos a essas pressões. Os excitadores mais importantes são as engrenagens de distribuição dos movimentos, as válvulas e seus mecanismos de acionamento, os êmbolos, a bomba injetora, os mancais da árvore de manivelas (ao suportar oscilações críticas), a reverberação da base e de pontos de contato e, ainda, as

provenientes das forças de inércia livres do acionamento da árvore de manivelas, que excitam as partes do motor ou são transmitidas à base ou chassis.

## **2) Ruídos da combustão:**

Estes ruídos são causados pelo rápido aumento da pressão na câmara de combustão ou vibrações de pressão provocadas por combustão anômala (batidas, etc.). A frequência é de 0,5 até 2,5 kHz no primeiro caso ou 5 até 10 kHz no segundo. Estes ruídos se tornam mais desagradáveis quando os ruídos mecânicos são atenuados.

## **3) Ruídos por variação de carga:**

São provocados pela pulsação do fluxo no sistema de sucção e de descarga. Os amortecedores de ruído não oferecem muita resistência ao fluxo contínuo, mas amortecem os picos das pulsações. O filtro de ar amortece os pulsos da admissão e o silencioso de escape amortece os pulsos da descarga dos gases. As restrições máximas admissíveis são de »200 mm de coluna d'água para o filtro de ar e de »1.500 mm de coluna d'água para o silencioso de escape (motores de aspiração natural). O silencioso deve ter volume de 4 a 6 vezes a cilindrada do motor. Para motores turbo-alimentados a restrição máxima da descarga não deve ultrapassar 400 mm de coluna d'água.

## **4) Ruído dos ventiladores ou ventoinhas:**

Normalmente, os grupos geradores são dotados de ventoinhas para refrigeração. Este, o ventilador do gerador, aliado ao movimento do rotor, bem como o ventilador do radiador do motor e, ainda, nos motores turbo-alimentados, o ruído dos rotores do turboalimentador, que se aguçam com o aumento da carga.

O nível de ruído, a sete metros de distância do grupo gerador, chega a 95 dB. Os recursos disponíveis para amortecimento desses ruídos são poucos, dada a dificuldade de se lidar com uma gama de frequências e intensidade variadas. A solução mais adotada é o enclausuramento do equipamento em container com as paredes revestidas com material atenuador, o que possibilita uma redução do nível de ruído para até 75 dB. Esta providência implica no dimensionamento adequado das passagens para o fluxo de ar de alimentação do motor Diesel e para a refrigeração do radiador e do alternador, para não incorrer em perda de potência ou possibilidade de superaquecimento.

Quando a aplicação assim o exigir, podem ser adquiridos grupos geradores silenciados, montados em containeres com tratamento acústico para níveis de ruído abaixo de 75 dB.

A regulamentação quanto a níveis de ruído em áreas urbanas é da competência das prefeituras locais que, na maioria das cidades brasileiras, adotam o que estabelece a norma ABNT NBR10151 - Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade.

## **7.9- Circulação de ar:**

Motores Diesel para grupos geradores refrigerados por radiador utilizam ventilador tipo soprante, ao contrário dos motores utilizados em outras aplicações. Isto é feito com o objetivo de retirar o calor irradiado para o ambiente ao mesmo tempo em que retira o calor acumulado na água de refrigeração. O gerador opera com um ventilador aspirante montado no próprio eixo para retirar

calor das bobinas, transferindo-o ao ambiente. Além disso, o motor necessita de ar limpo e fresco para o seu bom funcionamento.

O ar que passa através da colméia do radiador não deve retornar. A recirculação do ar aquecido produz perda de rendimento do motor e elevação da temperatura da água de refrigeração. Quando houver risco de recirculação de ar quente no ambiente, a saída do radiador pode ser canalizada para o exterior, por meio de um duto, cuja interligação com o radiador deve ser flexível (usualmente de lona), com área interna pelo menos 1,3 vezes a área da colméia do radiador.

As entradas de ar não devem restringir o fluxo. “Quando for necessário instalar o grupo gerador em ambiente fechado, deve-se prover meios de circulação de ar sem queda de pressão superior a 2,0” (50 mm) de coluna d'água. Algumas vezes se verifica a necessidade de ventilação forçada. O fluxo de ar necessário varia em função da potência e demais características do equipamento e deve ser informado pelo fabricante.

O radiador utilizado em motores destinados a grupos geradores, assim como o ventilador, são projetados para uma capacidade 30 % superior as necessidades do motor, prevendo que o calor irradiado para o ambiente será removido pelo ar circulante.

Muitos fabricantes de motores disponibilizam ventiladores diferentes em diâmetro e número de pás, para atender necessidades específicas inerentes à instalações especiais.

A montagem do ventilador, segundo recomendações dos fabricantes, deve ser feita em um defletor de ar direcionada à colméia do radiador, de forma que, para os ventiladores de pressão (soprante), 2/3 da pá fiquem fora do defletor, para captar o ar. Para os ventiladores de sucção (aspirante), 2/3 da pá devem ficar dentro do defletor, ao contrário dos ventiladores de pressão. A distância entre a extremidade da pá e o defletor deve ser da ordem de 6,0 mm, embora dificilmente se consiga este valor. A distância entre o ventilador e a colméia do radiador deve ser de 1/3 vezes o diâmetro do ventilador, mas nunca inferior a 120 mm.

Além dos aspectos acima, deve-se lembrar a existência de Gases de Escape, que tem influência direta na temperatura do ambiente e na circulação de ar. Este sistema de escapamento de gases deverá ser cuidadosamente projetado, porque uma execução inadequada influenciará a potência, bem como o nível de ruído do motor. Em nenhuma circunstância poderá a contrapressão, no sistema de escapamento, exceder o valor permitido pelo fabricante do motor. Em casos de temperatura excessiva dos gases de escape, a contrapressão no coletor de escape ou a temperatura do ar de admissão é inadmissivelmente alta.

Os valores de resistência máximos admissíveis do sistema de escapamento total são os seguintes:

- Para motores com aspiração natural: 600 a 1.200 mm de coluna d'água.

- Para motores turbo-alimentados: 250 a 500 mm de coluna d'água.

A tubulação deve ser constituída por um tubo de aço carbono, com espessura mínima da parede de 3,0 mm, pois deve ser considerado um desgaste acentuado, devido ao calor e à umidade. Para tubulação com comprimento além de 5 metros aproximadamente, deverá ser previsto um tubo de diâmetro maior, de acordo com as instruções do fabricante do motor. O aumento deverá corresponder ao comprimento total da tubulação, incluindo os cotovelos e deve ter início imediatamente na saída do coletor ou da peça de conexão flexível.

Tubos de maiores comprimentos e diâmetros menores do que os recomendados pelo fabricante do motor aumentarão a resistência e a temperatura do motor, diminuindo, portanto, sua vida útil.

Para a conexão do coletor de escape do motor com a tubulação instalada rigidamente, deverá ser empregada uma peça de conexão flexível, instalada diretamente no motor, a fim de compensar as vibrações e a expansão térmica. A tubulação não poderá transmitir quaisquer esforços ao motor, especialmente se for turbo-alimentado, onde a conexão flexível é montada diretamente na saída do turboalimentador. Como a maioria dos grupos geradores são elasticamente apoiados, os tubos estão sujeitos não apenas à expansão térmica, mas também a vibrações, que poderão ser particularmente intensas quando da partida e parada do motor Diesel.

A tubulação de escape de diversos motores não deve desembocar numa tubulação comum, porque a contrapressão e o refluxo dos gases de exaustão provocam a formação de sedimentos quando o motor não estiver funcionando, colocando em risco a segurança operacional.

Devem ser adotadas as mesmas medidas de proteção, tanto para tubos de admissão quanto para tubos de escape, contra a entrada de água de chuva e respingos. A entrada de água no motor pode causar danos consideráveis ocasionados pela corrosão ou por calço hidráulico na partida.

## **7.10- ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA**

A correta especificação do sistema é fundamental para garantir a sua operação dentro dos limites e condições estabelecidas, garantir a vida útil dos equipamentos e a confiabilidade do sistema.

Neste sentido, diversos aspectos devem ser considerados nesta especificação:

- Dimensionamento elétrico do gerador a partir de um levantamento de carga confiável;
- Características do local e do ambiente da instalação;
- Características do tipo de combustível utilizado no motor;
- Requisitos elétricos, mecânicos e ambientais da instalação;
- Requisitos dos sistemas de monitoramento, controle e proteção.

### **7.10.1- Dimensionamento**

Para fins de orçamento dos custos do projeto, é essencial elaborar uma programação de carga razoavelmente precisa. Se todas as informações dos equipamentos de carga não estiverem

disponíveis desde o início do projeto, será preciso fazer estimativas e suposições para os cálculos do dimensionamento inicial. Esses cálculos deverão ser refeitos à medida que forem obtidas informações mais precisas. Grandes cargas de motor, sistemas de fornecimento ininterrupto de energia (UPS), acionadores de frequência variável (VFD), bombas de combate a incêndios e equipamentos de diagnóstico por imagem têm um efeito considerável no dimensionamento do grupo gerador e devem ser considerados com atenção.

Além disso, especificações “justas” sobre desempenho de transiente, queda de voltagem/frequência e tempos de retomada, durante a partida do motor, e aceitação de carga em blocos também têm efeito considerável no dimensionamento.

Para fins de estimativas preliminares devem ser utilizadas algumas regras básicas:

- Motores - ½ HP por kW;
- UPS - 40% de superdimensionamento para 12 e 6 pulsos, ou 15% de superdimensionamento para 6 pulsos com filtros de entrada e UPS de 12 pulsos;
- Acionamentos com velocidade variável - 100% de superdimensionamento exceto para modulação de largura de pulso, e então 40% de superdimensionamento.

Ao carregar o grupo gerador, a divisão das cargas em passos discretos ou blocos de carga pode ter um efeito favorável no tamanho do grupo gerador requerido. O uso de vários comutadores de transferência ou outros meios (relés de retardo de tempo, PLC, etc.) será necessário para que a voltagem e a frequência do grupo gerador se estabilizem entre os passos.

Dependendo da carga total (geralmente acima de 500 kW), pode ser vantajoso o uso de grupos geradores em paralelo. Embora tecnicamente exequível, o uso de grupos geradores em paralelo não é economicamente aconselhável quando a carga total for igual ou menor que 300 kW.

#### **7.10.2- Considerações sobre o Local:**

Uma das primeiras decisões no projeto será determinar se o grupo gerador ficará localizado dentro ou fora do edifício, em um abrigo ou gabinete.

O custo total e a facilidade de instalação do sistema de energia elétrica dependem do arranjo e da localização física de todos os elementos do sistema - grupo gerador, tanques de combustível, dutos e defletores de ventilação, acessórios, etc. Considere os seguintes aspectos tanto para a localização interna quanto externa:

- Montagem do grupo gerador;
- Localização do quadro de distribuição e dos comutadores de transferência;
- Ramificações dos circuitos para aquecedores de líquido de arrefecimento, carregador de bateria, etc;
- Segurança contra inundação, incêndio, formação de gelo e vandalismo;
- Contenção de derramamento acidental ou vazamento de combustível e de líquido de arrefecimento;
- Possibilidade de danos simultâneos nos serviços da fonte normal e de emergência;

- Acesso para manutenção e inspeções gerais;
- Acesso e espaço de trabalho para grandes serviços como revisões ou remoção/substituição de peças.

Quanto ao local externo, devem-se observar os seguintes aspectos:

- Emissão e atenuação dos níveis de ruídos;
- Tipos de carenagens - Grupos geradores de até 500 kW aproximadamente são fornecidos com carenagens 'compactas'. Entretanto, manter uma temperatura ambiente mínima de 4° C (40° F) para atender os requisitos de certas normas pode ser difícil em uma carenagem externa 'compacta'. Existem carenagens com cobertura para a maioria dos grupos geradores. Se forem incluídos recursos de atenuação de ruídos, o tamanho da carenagem aumentará consideravelmente;
- Acesso - O acesso para grandes reparos, substituição de componentes (tais como radiador ou alternador) ou recondicionamento devem ser considerados no projeto da carenagem e na instalação de grupos geradores próximos a outros equipamentos ou estruturas. Se for necessário um grande serviço devido ao número de horas de operação ou dano/falha de grandes componentes, as entradas de acesso se tornarão críticas. Essas entradas incluem tampas de acesso, paredes removíveis da carenagem, distância adequada de estruturas próximas e acesso aos equipamentos de suporte necessários;
- Cercas de proteção e barreiras visuais;
- Distâncias dos limites da propriedade;
- O escape do motor deve ser direcionado para longe de ventilações e aberturas do edifício;
- Aterramento - Eletrodos ou anéis de aterramento podem ser necessários para aterramento separado ou derivado do sistema e/ou do equipamento;
- Proteção contra descargas atmosféricas (raios).

Quanto ao local interno, devem-se observar os seguintes aspectos:

- Sala exclusiva para o gerador – Para sistemas de energia elétrica de emergência, certas normas podem exigir que a sala do gerador seja utilizada somente para acomodá-lo.

Considere também o efeito que um grande fluxo de ar da ventilação poderia ter sobre outros equipamentos na mesma sala, tais como equipamentos de aquecimento do edifício.

- Classificação contra incêndio na construção da sala:

o As normas geralmente especificam uma capacidade mínima de resistência contra incêndio de 1 ou 2 horas. No entanto, sugere-se a consulta às autoridades locais para obter os requisitos aplicáveis;

- Área de trabalho – A área de trabalho ao redor de equipamentos elétricos normalmente é especificada por normas. Na prática, deve haver pelo menos 1 m (3 pés) de espaço livre em

torno de cada grupo gerador. A substituição do alternador deve ser feita sem a necessidade de remoção de todo o conjunto ou qualquer acessório. Além disso, o projeto da instalação deverá prever o acesso para grandes trabalhos (como recondicionamento ou substituição de componentes, como um radiador, p. ex.);

- Tipo do sistema de arrefecimento – Recomenda-se um radiador montado na fábrica, mas o ventilador do radiador pode criar uma pressão negativa significativa na sala. As portas de acesso devem, portanto, abrir para dentro da sala ou serem protegidas por anteparos – de maneira que possam ser abertas quando o grupo gerador está funcionando;

- Ventilação - A ventilação envolve grandes volumes de ar. Num projeto ideal de sala, o ar é sugado diretamente do exterior e expelido para fora pela parede oposta. Para configurações opcionais de arrefecimento de grupos geradores que envolvam trocadores de calor ou

radiadores remotos, serão necessários ventiladores para a ventilação da sala;

- Escape do motor – A saída de escape do motor deverá ser tão alta quanto a prática permitir no lado descendente dos ventos dominantes e volta da diretamente para fora da ventilação e aberturas do edifício;

- Armazenamento e tubulação de combustível – As normas locais podem especificar métodos de armazenamento de combustível dentro de edifícios e restringir as quantidades armazenadas

- A localização dentro de um edifício deve permitir o acesso para a entrega e instalação do produto e posteriormente para serviços e manutenção. A localização lógica para um grupo gerador num edifício com base nestas considerações é no andar térreo, próximo a um estacionamento ou pista de acesso, ou na rampa de um estacionamento aberto. Sabendo-se que estas são áreas nobres de um edifício, se for necessário um outro local, lembre-se que podem ser necessários equipamentos pesados para a instalação e grandes serviços na unidade. Além disso, as entregas de combustível, líquido de arrefecimento, óleo, etc., são necessárias em vários intervalos. Um sistema de combustível provavelmente será projetado com tanques de suprimento, bombas, linhas, tanques diários, etc., mas as trocas de óleo lubrificante e de líquido de arrefecimento poderão ser dificultadas se os materiais tiverem que ser transportados manualmente em barris ou baldes;

- As instalações sobre lajes, embora comuns, requerem um planejamento complementar e considerações sobre o projeto estrutural. As vibrações e o armazenamento/entrega do combustível podem ser problemáticos em instalações deste tipo;

- Locais internos geralmente requerem uma sala exclusiva com estruturas contra fogo. Fornecer fluxo de ar para o interior da sala pode ser um problema.

- Geralmente, não são permitidos abafadores de incêndio em dutos para o interior das salas. O ideal é que a sala tenha duas paredes externas opostas entre si de forma que o fluxo do ar de entrada flua sobre o grupo gerador e seja levado para fora através da parede oposta, no lado do radiador da unidade.

### **7.10.3- Considerações Ambientais:**



Conforme já foi abordado anteriormente, as questões ambientais envolvem os problemas relacionados a ruídos, emissões dos gases de escape e armazenamento de combustível.

O controle de ruídos, se exigido, deve ser considerado no início do projeto preliminar.

Geralmente, os métodos de controle de ruídos resultam em um custo considerável e aumentam a área física necessária para a instalação. Um grupo gerador é uma fonte complexa de ruídos que inclui ruídos do ventilador de arrefecimento, do motor e do escape. A eficiência do controle de ruídos deve levar em conta todas essas fontes. Na maioria dos casos, os métodos recomendados de controle de ruído alteram ou redirecionam o caminho do ruído da fonte no grupo gerador até as pessoas que o ouvem. Simplesmente usar um abafador de grade poderá ou não contribuir para reduzir o nível do ruído em um determinado local. Como os ruídos são direcionais, deve-se considerar com cuidado os aspectos de localização, orientação e distância do grupo gerador em relação aos limites ou locais da propriedade onde os ruídos possam ser um problema.

Independentemente da aplicação a que estiver vinculado, os grupos geradores podem estar sujeitos a normas de controle de emissões de escape do motor em nível local ou nacional, ou ambos. A conformidade com as normas de emissões geralmente requer permissões especiais. Certas localidades podem ter normas específicas exigindo o uso de motores alimentados a gás ou estratégias de póstratamento dos gases de escape para motores diesel. Ainda no início da fase de qualquer projeto, verifique junto ao órgão municipal de controle da qualidade do ar as normas existentes de controle de emissões.

A discussão sobre a necessidade e conveniência de geração de potência elétrica utilizando biomassas já foi ultrapassada [12-19]. Sistemas BIG/GT (Biomass Gasification/Gas Turbine) têm sido estudados como alternativa a processos mais convencionais para utilização de biomassa visando a geração de potência termelétrica. Entre tais processos convencionais, o mais aplicado é baseado em caldeira consumindo biomassa pulverizada em ciclo Rankine. Entretanto, estudos [12-19] mostram que maiores eficiências podem ser logradas pelo emprego de turbinas a gás alimentadas de efluente de gaseificação da biomassa.

Por outro lado, a experiência mostra que os sistemas de alimentação de biomassas particuladas, tal como bagaço de cana, em reatores a alta pressão trazem grandes problemas que são resolvidos por meio de sistemas complexos de silos em cascata. Tais silos levam pulatinamente a biomassa de atmosfera ambiente à reinante no gaseificador. Para evitar pirólises ao longo da cascata, tais silos são mantidos sob atmosferas de nitrogênio. Cabe ainda notar que em casos de biomassas, como por exemplo, o bagaço de cana, as partículas apresentam grande tendência a se entrelaçarem devido a extremidades fibrosas. Tais estruturas formam “gaiolas” que impossibilitam a continuidade de escoamento descendente nos silos. Mecanismos de vibração e até mesmo de agitação por meio de pás no interior dos silos são empregados para evitar ou desfazer tais estruturas. Sistemas que combinam roscas operando sincronicamente entre silos, controles, mecanismos para evitar engaiolamento da biomassa nos silos mantidos em atmosferas de nitrogênio puro não são apenas muito complexos como também extremamente custosos. Tais fatores lançam grandes dúvidas sobre a viabilidade técnica e econômica de tais processos.

Uma alternativa que evita tais problemas e simplifica sensivelmente os sistemas de alimentação é o de se utilizar lamas de biomassas que seriam bombeadas para o interior do



reator. Tal alternativa já está sendo utilizada por fabricantes no Japão e Coréia do Sul em caldeiras consumindo carvão mineral e operando em leito fluidizado borbulhante a altíssimas pressões. Sistemas de grande porte (800 MW) geram vapor supercrítico em tubos imersos no leito fluidizado que alimenta turbinas a vapor enquanto o gás de escape da caldeira é injetado em turbinas à gás após apropriada limpeza.

Por outro lado, tal alternativa de alimentação com lamas aquosas de biomassa não se prestam a gaseificadores, pois a energia necessária para levar a água do estado líquido a vapor consumiria praticamente toda a energia advinda da combustão parcial da biomassa alimentada.

Dentro do panorama estratégico do Brasil para utilização de biocombustíveis, surge a possibilidade de empregar o glicerol como meio líquido em lamas de biomassa. O glicerol é resíduo da fabricação de biodiesel e muitas vezes descartado, o que constitui um sério problema ambiental e terrível desperdício de combustível. Diferentemente da água, o glicerol seria combinado com a biomassa para formar lamas, viabilizando técnica e economicamente processos BIG/GT.

Diante da pesquisa e análise dos resultados obtidos no que se refere à utilização dos biodigestores, pode-se concluir que:

O biodigestor atende as exigências de tratamento dos dejetos suínos, reduzindo o potencial de impacto ambiental, como a poluição do solo, águas e ar da região.

A produção do biogás e do biofertilizante pelo sistema de biodigestão agrega valor à propriedade rural suinocultura, de modo que se trata de uma fonte alternativa e renovável de energia com diversos tipos de utilizações e de um material orgânico de grande poder de fertilização, respectivamente, como pode ser visto no desenvolvimento do trabalho.

No estudo de caso (1) (conforme dados da literatura), evidencia-se que a variação da produção de biogás se deve principalmente ao fato da alimentação do biodigestor ser inconstante que, por sua vez, é consequência da utilização do CRUSP, que é menos utilizado no período de férias e finais de semana. Soma-se a isso o fato da bomba de sucção do esgoto, localizada entre o CRUSP e o CTH, e da bomba de recalque do esgoto, localizada antes da entrada do efluente no biodigestor, não funcionarem cem por cento do tempo, pois há paradas para manutenção corretiva destas máquinas.

Por essas razões, alternativas tiveram que ser desenvolvidas, tais como: sistema de purificação do biogás, selo hidráulico e medidor de pressão do sistema, pois os equipamentos eficazes existentes no mercado, ora necessitavam de altas pressões, ora eram caros por serem equipamentos muito específicos.

Superadas as dificuldades e completa a instalação, o sistema encontra-se em funcionamento, com o objetivo de demonstrar a possibilidade de geração de energia elétrica a partir do biogás de esgoto, incentivando a nacionalização de equipamentos para esse fim e incentivando a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis de forma descentralizada. Porém, como anteriormente descrito, ainda são necessários alguns ajustes finais no grupo gerador para que atinja queima mais completa possível e, conseqüentemente, emita menor quantidade de poluentes. Para que esses ajustes sejam feitos e ocorra um maior aprofundamento no estudo deste sistema de geração de eletricidade, uma nova proposta foi elaborada e encaminhada para possíveis financiadores.

No estudo de caso (2) realizado, evidenciaram-se exemplos que o biodigestor atende as exigências de tratamento dos dejetos suínos, reduzindo o potencial de impacto ambiental, como a poluição do solo, águas e ar da região. A produção do biogás e do biofertilizante pelo sistema de biodigestão, agrega valor à propriedade rural suinocultora, de modo que se trata de uma fonte alternativa e renovável de energia com diversos tipos de utilizações e de um material orgânico de grande poder de fertilização, respectivamente, como pode ser visto no desenvolvimento do trabalho.

Assim sendo conclui-se que o biodigestor além de uma excelente ferramenta de tratamento de resíduos é de grande benefício econômico.

## Referências

1. Williams, R. H., **Biomass Gasifier/Gas Turbine Power and Greenhouse Warming**, IEA/OECD Expert Seminar on Energy Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, OECD Headquarters, Paris, 12th-14th April, 1989.
2. ALVES, J. W. S. (2000). Diagnostico tecnico institucional da recuperacao e uso
3. energetico do biogas gerado pela digestao anaerobia de residuos. Sao Paulo. Dissertação de Mestrado. PIPGE / USP.
4. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição – Módulo 3 Acesso aos Sistemas de Distribuição. Versão 26/08/2006\_SRD. 2006 (a).
5. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição – Módulo 4 Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição. Versão 22/08/2006\_SRD. 2006 (b).
6. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição – Módulo 5 Sistemas de Medição. Versão 29/08/2006\_SRD. 2006 (c).
7. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Versão 30/08/2006\_SRD. 2006(d).
8. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Rede – Módulo 12 – Medição para Faturamento. Versão 30/08/2006\_SRD. 2006 (e).
9. BARBOSA, A. Instalação de grupo motor gerador. HEMMER, 2010.
10. BERNDSEN, C. J. (2007). Desenvolvimento experimental e análise exérgica de um sistema trigerador para produção simultânea de calor, eletricidade e frio. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFPR.
11. CANAVATE, O.J.;BAADER. W.; Biogás as fuel for internal combustion engines. Asae1988.
12. Cartepillar. Gás generator sets. Catálogos informativos. Disponível em [www.cat.com](http://www.cat.com), acesso 24/02/2012.
13. COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Manual de Acesso de Geração Distribuída.
14. Norma técnica Copel 905100. 2010.
15. CUMMINS. POWER GENERATION. Manual de aplicação de grupos geradores arrefecidos
16. ANGELO, G. S. Jr. Relatório de Ensaio - "**Certificado de Análise do Efluente**". São Paulo. AMBIENTAL LABORATÓRIO E EQUIPAMENTOS LTDA., 2003.
17. BALAT, M. et al. Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. Energy Sources, 27: 931- 940, 2005.
18. BALAT, M. Usage of energy sources and environmental problems. Energy Exploration & Exploitation, 23(2): 141-168, 2005.

19. DEUBLEIN, D. et al. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
20. NGÔ, C. Energy: Resources, technologies and the environment. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
21. BATISTA, Laurentino Fernandes: Manual técnico construção e operação de biodigestores. Brasília, 1981, 54p. ilustr. (Manuais, 24)
22. ECO-VILLAGE. Biodigestor chinês de cúpula fixa. Eco-Village Online – Rede de Práticas Comunitárias e Auto-sustentáveis. Disponível em: <<http://www.aondevamos.eng.br/boletins/edicao03.htm>>. Acesso em 25 de Fevereiro 2012.
23. GASPAR, Rita Maria Bedran Leme: Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR. Florianópolis, 2003, 119p. ( Pós- Graduação em engenharia de produção e sistemas) Universidade Federal de Santa Catarina.
24. HUMMEL, Paulo Roberto Vampré, Análise e decisão sobre investimentos financiamentos: engenharia econômica: teoria/prática/ Paulo Roberto Vampré Hummel, Mauro Roberto Black Taschner.—4.ed.ampl.com modelo de determinação da inflação interna de empresa e modelo de resolução com taxa de inflação múltipla.—São Paulo: Atlas, 1995.
25. LIMA, Gustavo J. M. M. de. Manejo da dieta de suínos. In: SUINO.COM. Contaminação das fontes de água por coliformes fecais. A Comunidade Virtual da Suinocultura Brasileira. Seção Meio-ambiente. Disponível em: <<http://www.suino.com.br>>. Acesso em 20 de Agosto 2006.
26. OLIVEIRA, Paulo Armando Victória: Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas. Concórdia, Embrapa Suínos e Aves, 2004, 109p.29cm.
27. SOUZA, Alceu: Decisões financeiras e análise de investimento: fundamentos, técnicas e aplicações/ Alceu Souza, Ademir Clemente. – São Paulo: Atlas, 1999.
28. CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. "**Utilization of biomass for supply of energy carrier**". Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.
29. COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; VARKULYA, A. Jr.; PECORA, V.. Relatório de Acompanhamento - "**Biodigestor Modelo UASB**". São Paulo. CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2003.
30. COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. de. Relatório de Acompanhamento - "**Relatório de Atividades do Projeto Programa de Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA)**". São Paulo. CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2004.
31. COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. de. Relatório de Acompanhamento - "**Relatório Final de Atividades do Projeto Programa de**

- Uso Racional de Energia e Fontes Alternativas (PUREFA)**". São Paulo. CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2005.
32. NETTO, J. C. "**Gás Natural Liberalização do Sector na União Europeia e em Portugal**". Rio de Janeiro. ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, 2004.
  33. NOGUEIRA, L.A.H. "**Biodigestão, a alternativa energética**", Editora Nobel, p.1-93. São Paulo, 1986.
  34. SOUZA, M. E., "**Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia**", Trabalho apresentado no V Simpósio Nacional de Fermentação, Viçosa, 1982.
  35. YAMASHITA, T. Relatório de Ensaio - "**Certificado de Análise da Composição do Biogás - PUREFA**". São Paulo. WHITE MARTINS, 2004.
  36. YAMASHITA, T. Relatório de Ensaio - "**Certificado de Análise dos Gases de Exaustão - PUREFA**". São Paulo. WHITE MARTINS, 2005.
  37. Ogden, J. M., Williams, R. H., Fulmer, M. E., **Cogeneration Applications of Biomass Gasifier/Gas Turbine Technologies in the Cane Sugar and Alcohol Industries**, Conference on Energy and Environment in the 21st Century, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, March 26-28, 1990.
  38. Larson, E. D., **Biomass-Gasifier/Gas-Turbine Cogeneration in the Pulp and Paper Industry**, 36th ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Orlando, Florida, June 3-6, 1991.
  39. Larson, E. D., Marrison, C. I., **Economic Scales for First-Generation Biomass-Gasifier/Gas Turbine Combined Cycles Fueled from Energy Plantations**, Turbo Expo'96, the 41st ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress, 10-13 June 1996, Birmingham, England.
  40. Larson, E. D., Hughes, W. E. M., **Performance Modeling of Aeroengine Steam-Injected Gas Turbines and Combined Cycles Fueled from Fixed or Fluid-bed Biomass Gasifiers**, Turbo Expo'96, the 41st ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress, 10-13 June 1996, Birmingham, England.
  41. LUCAS JR., J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos indiano e chinês**. Botucatu, 1987. 114p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu - UNESP.
  42. LUCAS JR., J.; SANTOS, T.M.B.; OLIVEIRA, R.A. Possibilidades de uso de dejetos animais no meio rural. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. (Ed.) **Mudanças Climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001. cap.15, p.303-323.
  43. Consonni, S., Larson, E. D., Biomass-Gasifier/Aeroengine Gas Turbine Combined Cycles; Part A: Technologies and Performance Modeling, Cogen Turbo Power'94, **The American Society of Mechanical Engineers' 8th Congress & Exposition on Gas Turbines in Cogeneration and Utility, Industrial and Independent Power Generation**, Portland, Oregon, 25-27 October, 1994.
  44. Consonni, S., Larson, E. D., Biomass-Gasifier/Aeroengine Gas Turbine Combined Cycles; Part B: Performance Calculations and Economic Assessment, Cogen Turbo Power'94, **The American Society of Mechanical Engineers' 8th Congress & Exposition on Gas Turbines in Cogeneration and Utility, Industrial and Independent Power Generation**, Portland, Oregon, 25-27 October, 1994.
  45. Larson, E.D., Williams, R.H., Leal, M. R. L.V., A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba, **Energy for Sustainable Development**, Volume V No. 1, March 2001.
  46. SORAES J. E.; Confederação Nacional da Indústria. Biomassa: Coadjuvante na Oferta Total de Energia. Coleção, Vol. 3, 1982.
  47. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. Carvão Vegetal; Destilação, Propriedades e Controle de Qualidade, Belo Horizonte, 1982.
  48. COELHO, J. C. Biomassa, Biocombustíveis, Bioenergia, Brasília, 1982. CARIOCA, J. D. B. et al Biomassa: Fundamentos, Aplicações, BNB, UFC, 1982.

49. MCGOWIN, C.R., "Biomass for Electric Power in the 21st Century". Biomass and Bioenergy, Vol. 10, numbers 2-3, pp. 69-70, 1996.
50. VAN DEN BROEK, R., Faalj, A. and Van Wuk, A., "Biomass Combustion for Power Generation",. Biomass and Bioenergy, Vol. 11, number 4, pp. 271-281, 1996.
51. NGUYEN,Q.A.,SADDLER, J.N. An Integrated Model for the Technical and Economic Evaluation of an Enzimatic Biomass Conversion Process Bioresource Technology, No. 35, p. 275-282, 1991.
52. WHITE, L.P. e PLASKETT. "Biomass as Fuel", Academic Press, 1981, p.180.
53. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento do Eucalipto no Rio Grande do Sul.** Disponível em <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/zoneamento/eucalipto/index.php>
54. FAGUNDES, Hilton Albano Vieira, **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS – 2003
55. GASPAR, Rita Maria Bedran Leme: Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: Um estudo de caso na região de Toledo-PR. Florianópolis, 2003, 119p.( Pós- Graduação em engenharia de produção e sistemas) Universidade Federal de Santa Catarina.
56. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. SIDRA – Sistema de Recuperação de Dados Agregados. **Pesquisa Agrícola Municipal**, 2009. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo2.asp?e=v&p=PA&z=t&o=11>
57. MOVERGS – Associação das Indústrias de Móveis do Estado do Rio Grande do Sul. **Lista das empresas associadas.** Disponível em <http://www.movergs.com.br/associados/todos>
58. SEPLAG – Secretaria de planejamento e gestão do Rio Grande do Sul. **Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul.** Disponível em <http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/>
59. **SINDIMADEIRA. Informações sobre a base florestal e o perfil das empresas do setor.** Disponível em <http://www.sindimadeira.org.br/sindimadeira/pt/documentos/HOL-01-04-RS.pdf>
60. SCHUMACHER, M V; TRUEBY, P; WITSCHORECK, R; ARAÚJO, E F; FERRAZ, M O. **Produção de serapilheira e devolução de nutrientes em uma floresta de um híbrido de *eucalyptus urophylla* x *e. Globulus maidenii*, no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul.** Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Depto. de Ciências Florestais, Lab. de Ecologia Florestal, 2009
61. SVMA - Secretaria Do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo. **Manual de Poda.** 2005. Disponível em [http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/meio\\_ambiente/eixo\\_biodiversidade/arb\\_onizacao\\_urbana/0002/Manual\\_poda\\_final.pdf](http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/meio_ambiente/eixo_biodiversidade/arb_onizacao_urbana/0002/Manual_poda_final.pdf). Acesso em 25/02/2010.
62. AF&PA, American Forest and Paper Association. What is Black Liquor?, 2011.



63. Cortez, L. A. B.; Lora, E. E. S.; Gómez, E. O. *Biomassa para energia. Capítulo 2: caracterização da biomassa*. Editora UNICAMP, 2008.
64. DEMIRBAS, M.F.; BALAT, M e BALAT, H., *Potential contribution of biomass to the sustainable energy development*, Energy Conversion and Management, vol 50, 1746-1760, 2009.
65. Geraldo, B. C. A.; Silva, S. P. R. Nascimento Jr., A. F.; Almeida, C. H. T. Geração de biocombustíveis gasosos a partir da gaseificação da glicerina. 4º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 2010.
66. Lora, E.S.; Andrade R.V. *Biomass as energy source in Brazil*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13., 777-788, 2009.
67. MME-BR, Ministério de Minas e Energia do Brasil. *Resenha energética 2006*.
68. Mothé, C.G.; Azevêdo, A. D. *Análise Térmica de Materiais*. São Paulo, 2002.
69. Nogueira, M. F.M. *Biomassa energética: caracterização de biomassa*. Primeira Escola de Combustão, Universidade Federal do Pará, 2007.
70. OLIVEIRA, Paulo Armando Victória: *Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas*. Concórdia, Embrapa Suínos e Aves, 2004, 109p.29cm.
71. Quirino, W. F.; Vale, A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevêdo, A. C. S. *Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos*. Revista da Madeira, número 85, 2005.
72. Reed, T. B.; Das, A. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. U.S. Department of Energy, 1988.
73. Reigel, I.; Moura, A. B.; Morisso, F.; Mello, F. *Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil*. Rev. Árvore, volume 32, 2008.
74. Ribeiro, R. S.; Lima, R. D. C.; Veras, C. A. G. *Caracterização de Emissões em Sistema de Geração Energética por Gaseificação de Biomassa Aplicada a Comunidades Isoladas*. 16º Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, 2006.
75. Rocha, J. D.; Mesa Pérez, J. M.; Cortez, L. A. B. *Aspectos Teóricos e práticos do Processo de Pirólise de Biomassa*. Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Alcool”, 2004.
76. Rodrigues, L. D.; Silva, I. T.; Rocha, B. R. P.; Silva, I. M. O. *Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará*. Quarto Encontro Energético do Meio Rural, 2002.
77. AF&PA, American Forest and Paper Association. *What is Black Liquor?*, 2011.

78. ANDRADE, R.V.; LORA, E.S.L.; MELO, B. A. e SALES, C. S. V. B.; Gomez, E. O. *Gaseificação de biomassa em leito fluidizado: avaliação de um reator operando com casca de arroz como combustível*. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 2007.
79. BAUEN, A., *Biomass Gasification*, Encyclopedia of energy, Vol 1, 2004.
80. BELGIORNO, V.; DE FEO, G.; DELLA ROCCA, C. e NAPOLI, R.M.A. *Energy from gasification of solid wastes*, Waste Management, vol. 23, 1-15, 2003.
81. BRIDGWATER, A.V., *The technical and economic feasibility of biomass gasification for Power generation*, Fuel, Vol 74, No. 5, 631-653, 1995.
82. CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa. *Comparação entre as tecnologias de gaseificação existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte. Estado da Arte da Gaseificação*, 2002.
83. CORRÊA NETO, V. *Análise da viabilidade da co-geração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana de açúcar e gás natural*. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, 2001.
84. CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. e GOMÉZ, E. O. *Biomassa para energia. Capítulo 2: caracterização da biomassa*. Editora UNICAMP, 2008.
85. CRAIG, K.R.; BAIN, R.L. e OVEREND, R.P., *Biomass power systems –where are we, where are we going, and how do we get there? The role of gasification*. EPRI Conference on New Power Generation Technology, San Francisco, 1995.
86. DE BARI, I.; BARISANO, D.; CARDINALE, M.; MATERA, D.; NANNA, F. e VIGGIANO, D., *Air Gasification of Biomass in a Downdraft Fixed bed: A Comparative Study of the Inorganic and Organic Products Distribution*, Energy & Fuels, vol. 14, 889-898, 2000.
87. DEMIRBAS, M.F.; BALAT, M. e BALAT, H. *Potential contribution of biomass to the sustainable energy development*, Energy Conversion and Management, vol 50, 1746-1760, 2009.



88. GARCIA-BACAIUCA, P.; BILBAO, R.; ARAUZO, J. e SALVADOR, M.L., *Scale-up of downdraft moving bed gasifiers (25-300 kg/h) – design, experimental aspects and results*, Bioresource Technology, vol. 48, 229-235, 1994.
89. GERALDO, B. C. A.; SILVA, S. P. R.; NASCIMENTO JR., A. F. e ALMEIDA, C. H. T. *Geração de biocombustíveis gasosos a partir da gaseificação da glicerina*. 4º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 2010.
90. GERALDO, B. C. A. *Geração de biocombustíveis gasosos a partir da gaseificação da glicerina*. Projeto de final de curso. Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2010.
91. GÓMEZ, E. O. *A tecnologia de pirólise no contexto da produção moderna de biocombustíveis: uma visão perspectiva*. 2009. Disponível em: [www.biopetroleo.com.br](http://www.biopetroleo.com.br). Acesso dia 10 de setembro de 2010.
92. HENRIQUES, M. R. *Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa para gaseificação*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
93. HIGMAN, C. e VAN DER BURGT. *Gasification*. Gulf Professional Publishing, 2003.
94. KALATALO, D. N. *Análise exergética de ciclos combinados*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2004.
95. KINTO, O. T.; GALVÃO, L. C.; GRIMONI, J. A. e UDAETA, M. E. *Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo*. An. 4. Enc. Energ. Meio Rural, 2002.
96. KINTO, O. T. *Produção Local de Energia através da Gaseificação da Biomassa para Geração de EE no MPP*. Projeto de Formatura. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
97. LORA, E.S. e ANDRADE, R.V. *Biomass as energy source in Brazil*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13., 777-788, 2009.

98. LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; SANCHEZ, C. G.; GÓMEZ, E. O. e SALES, C. V. B. *Biomassa para energia*. Capítulo 9: Gaseificação. Editora UNICAMP, 2008.
99. LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V. e ARADAS, M. E. *Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa*. An. 5. Enc. Energ. Meio Rural, 2004.
100. MARTINEZ, J. D.; ANDRADE, R. V. e LORA, E. E. *Gaseificação de biomassa em leito fixo tipo concorrente, aspectos teóricos e experimentais*. Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2008.
101. MENDIS, M.S.; STASSEN, H.E.M. and STILES, H.N., *Biomass Gasification: Field Monitoring Results*, Biomass vol. 19, p. 1-18, 1989.
102. MME-BR, Ministério de Minas e Energia do Brasil. *Resenha energética 2006*.
103. MCKENDRY, P. *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*, Bioresource Technology, vol. 83, 55-63, 2002.
104. NOGUEIRA, M. F. M. *Biomassa energética: caracterização de biomassa*. Primeira Escola de Combustão, Universidade Federal do Pará, 2007.
105. PÉREZ, J. M.; MARÍN MESA, H. R.; ROCHA, J. D.; GÓMEZ, E. O.; CORTEZ, L. A. B.; SHIMABUKURO, F. R. e VALLIN, M. J. *Pirólise Rápida de biomassa em reator de leito fluidizado*. Problemas, causas e soluções. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural, 2006.
106. QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S. e AZEVÊDO, A. C. S. *Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos*. Revista da Madeira, número 85, 2005.
107. REED, T. B. e DAS, A. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. U.S. Department of Energy, 1988.
108. REED, T. B. *'Operation of a Pressurized Downdraft Gasifier to Produce Medium-Btu Gas'*. Biofuels and Municipal Waste Technology Research Program Summary, FY 1986, Report no. DOE/CH/10093-6, US Dept. of Energy, 1987, p. 189.

109. REIGEL, I.; MOURA, A. B.; MORISSO, F. e MELLO, F. *Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil*. Rev. Árvore, volume 32, 2008.
110. RENDEIRO et al., *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida- Soluções Energéticas para a Amazônia*, ISBN 978-85-98341-05- 192 p.
111. RIBEIRO, R. S.; LIMA, R. D. C. e VERAS, C. A. G. *Caracterização de Emissões em Sistema de Geração Energética por Gaseificação de Biomassa Aplicada a Comunidades Isoladas*. 16º Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, 2006.
112. ROCHA, J. D.; MESA PÉREZ, J. M. e CORTEZ, L. A. B. *Aspectos Teóricos e práticos do Processo de Pirólise de Biomassa*. Curso “Energia na Indústria de Açúcar e Álcool”, 2004.
113. RODRIGUEZ, L. D.; SILVA, I. T.; ROCHA, B. R. P. e SILVA, I. M. O. *Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará*. Quarto Encontro Energético do Meio Rural, 2002.
114. SALES, C. V. B.; ANDRADE, R. V. e LORA, E. E. S. *Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa*. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural, 2006.
115. SANTOS, D.; GULYURTLU, I. e CABRITA, I. *Materiais e energia*. Conversão termoquímica de combustíveis, Repositório Científico do LNEG, 2008.
116. VALLIYAPPAN, T. *Hydrogen or syn gas production from glycerol using pyrolysis and steam gasification*. M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, CA, 2005.
117. VIEIRA, A. C. *Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.
118. ZAINAL, Z.A.; RIFAU, A.; QUADIR, G.A. e SEETHARAMU, K.N., *Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier*, Biomass & Bioenergy, vol 23, 283-289, 2002.
119. ZHANG, W., *Automotive fuels from biomass via gasification*, Fuel Processing Technology, vol. 91, 866-876, 2010.