

**Universidade de São Paulo – Escola Politécnica**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Gaseificador Downdraft**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Maxmilian Mainardi  
Rubens Gomes de Araújo Júnior

Orientador: Prof. Dr. Euryale J. G. de Jesus Zerbini

Área de concentração:  
Engenharia Mecânica

São Paulo

2002

*Nicola 20  
f*

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Euryale de Jesus Zerbini pela colaboração, paciência e compreensão com o nosso trabalho; ao Agrupamento de Engenharia Térmica do IPT pelo conhecimento que nos colocou à disposição; e às nossas famílias, sem o apoio das quais jamais teríamos chegado a este resultado.

## Sumário

|   |    |
|---|----|
| Listas de figuras   |    |
| Listas de tabelas   |    |
| Nomenclatura  |    |
| 1 – Introdução  | 1  |
| 1.1 – Objetivo  | 2  |
| 1.2 – Sistema utilizado   | 3  |
| 2 – Funcionamento de um gaseificador “downdraft”  | 3  |
| 2.1 – Procedimentos operacionais  | 7  |
| 3 – O processo de gaseificação  | 8  |
| 3.1 – Composição da madeira   | 8  |
| 3.2 – Reações químicas  | 9  |
| 3.2.1 – Carbono-oxigênio  | 9  |
| 3.2.2 – Carbono-água  | 9  |
| 3.2.3 – Monóxido de carbono-água  | 10 |
| 3.2.4 – Monóxido de carbono-oxigênio  | 10 |
| 3.2.5 – Hidrogênio-oxigênio   | 10 |
| 3.2.6 – Carbono-dióxido de carbono  | 10 |
| 3.2.7 – Carbono-hidrogênio  | 11 |
| 3.3 – Influência das propriedades e das condições do combustível<br>alimentado sobre o desempenho do gaseificador | 11 |
| 3.3.1 – Efeito da espessura do cavaco   | 11 |
| 3.3.2 – Influência da umidade do cavaco   | 11 |
| 4 – Dimensionamento da produção do gaseificador   | 12 |
| 4.1 – Cálculo do desempenho do motor de combustão interna e faixa<br>ótima de operação                            | 12 |
| 4.2 – Consumo de madeira  | 16 |
| 4.3 – Consumo de ar   | 18 |
| 4.4 – Balanço de massa  | 18 |

|  |    |
|--|----|
| 5 – Projeto do gaseificador  | 19 |
| 5.1 – Descrição do gaseificador “Imbert downdraft”                     | 19 |
| 5.2 – Velocidade superficial, carregamento e dimensões do gaseificador | 24 |
| 5.3 – Materiais de construção para o gaseificador                      | 27 |
| 5.3.1 – Carcaça  | 27 |
| 5.3.2 – Partes interna submetidas a alta temperatura                   | 27 |
| 5.3.3 – Grelha   | 27 |
| 5.3.4 – Revestimento refratário  | 27 |
| 5.4 – Instrumentos   | 28 |
| 5.4.1 – Temperatura  | 28 |
| 5.4.2 – Pressão  | 28 |
| 5.4.3 – Mistura de gases   | 29 |
| 6 – Equipamentos auxiliares  | 29 |
| 6.1 – Limpeza e condicionamento do gás                                 | 29 |
| 6.2 – Alimentação de ar  | 30 |
| 6.3 – Preparação da biomassa   | 30 |
| 6.4 – Armazenamento  | 31 |
| 6.5 – Gerador auxiliar   | 31 |
| 6.6 – Flare de partida   | 31 |
| 7 – Gerador elétrico   | 31 |
| 8 – Instalação física  | 32 |
| 9 – Aspectos econômicos  | 33 |
| 9.1 – Custo de aquisição   | 34 |
| 9.2 – Custo de combustível   | 35 |
| 9.3 – Custo de manutenção  | 36 |
| 9.4 – Custo total  | 37 |
| 10 – Conclusões e considerações finais                                 | 40 |
| Referências Bibliográficas   | 41 |
| Anexos   |    |

## **Listas de figuras**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Diagrama esquemático do gaseificador downdraft e seu perfil de temperatura       | 4  |
| Figura 2  | Configuração básica do gaseificador downdraft de leito fixo                      | 5  |
| Figura 3  | Layout do sistema gerador de energia elétrica a partir de biomassa               | 8  |
| Figura 4  | Diagrama das zonas de gaseificação no sistema downdraft                          | 19 |
| Figura 5  | Gaseificador Imbert downdraft  | 20 |
| Figura 6  | Gaseificador Imbert downdraft mostrando o “bocal-fornalha V”                     | 22 |
| Figura 7  | Placa plana de constrição  | 22 |
| Figura 8  | Zona de alta temperatura do gaseificador, próximas aos bocais de entrada de ar   | 23 |
| Figura 9  | Dimensões gerais para os bocais do gaseificador                                  | 25 |
| Figura 10 | Lavador ciclônico  | 30 |
| Figura 11 | Gráfico comparativo entre os custos dos sistemas geradores a diesel e a biomassa | 38 |

## **Lista de tabelas**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Composição média da madeira   | 8  |
| Tabela 2 | Dados do motor a gás  | 13 |
| Tabela 3 | Composição média do gás pobre obtida com a gaseificação<br>de madeira | 13 |
| Tabela 4 | Máxima velocidade superficial e carregamento de fornalha              | 24 |
| Tabela 5 | Dimensões recomendadas para bocais e fornalhas                        | 26 |
| Tabela 6 | Dados técnicos do gerador elétrico                                    | 32 |
| Tabela 7 | Comparação entre os sistemas de geração de energia                    | 33 |
| Tabela 8 | Tarifas médias por classe de consumo – regional e Brasil –<br>R\$/MWh | 28 |
| Tabela 9 | Síntese dos preços praticados do óleo diesel (R\$/l)                  | 39 |

## Nomenclatura

### Símbolos latinos

|     |  |                                 |
|-----|--|---------------------------------|
| c   | consumo de combustível                   | [l/h] ou [ton/h]                |
| ce  | consumo específico                       | [g/kWh]                         |
| co  | carga operacional                        | [%]                             |
| m   | vazão mássica                            | [kg/h]                          |
| p   | pressão                                  | [Pa]                            |
| to  | tempo de operação                        | [h]                             |
| v   | valor do combustível / volume específico | [R\$/l] ou [m <sup>3</sup> /kg] |
| AC  | relação ar – combustível                 |                                 |
| C   | valor                                    | [R\$]                           |
| CA  | custo de aquisição                       | [R\$/kWh] ou [R\$/h]            |
| CC  | custo de combustível                     | [R\$/kWh] ou [R\$/h]            |
| CEq | custo do equipamento                     | [R\$]                           |
| CM  | custo de manutenção                      | [R\$/kWh] ou [R\$/h]            |
| CT  | custo total                              | [R\$/kWh] ou [R\$/h]            |
| F   | fração molar                             |                                 |
| I   | intervalo                                | [h]                             |
| MM  | massa molar                              | [kg/kmol]                       |
| Pot | potencia                                 | [kW]                            |
| R   | constante do gás                         | [kJ/kg.K]                       |
| T   | temperatura                              | [K]                             |
| Vd  | volume deslocado                         | [l/s]                           |
| X   | fração mássica                           |                                 |

### Símbolos gregos

|           |  |
|-----------|--|
| $\eta$    | rendimento                                   |
| $\rho$    | densidade                                    |
| $\lambda$ | fator de temperatura de ocorrência da reação |

### Subscrito

|          |  |
|----------|--|
| 1        | termo energético                           |
| 2        | termo de tempo                             |
| abs      | absoluta                                   |
| atm      | atmosférica                                |
| bio_1    | referente a biomassa em termos energéticos |
| bio_2    | referente a biomassa em termos de tempo    |
| comb     | combustível                                |
| diesel_1 | referente ao diesel em termos energéticos  |
| diesel_2 | referente ao diesel em termos de tempo     |
| ent      | entrada                                    |
| gaso     | gasogênio                                  |
| GNV      | gás natural veicular                       |
| manut    | manutenção                                 |
| maxgaso  | máxima referente ao gasogênio              |
| mec      | mecânico (a)                               |
| mist     | mistura de gás pobre                       |
| mistgaso | mistura do gasogênio                       |
| mistGNV  | mistura de gás natural veicular            |
| mol      | molar                                      |
| mol_gaso | molar do gasogênio                         |
| nom      | nominal                                    |
| S        | saída                                      |
| term     | térmico (a)                                |

## **1 - Introdução**

No que diz respeito à diminuição dos combustíveis fósseis em um futuro próximo e a crescente conscientização sobre conservação de energia têm tido atenção mundial. Os atuais recursos energéticos, tais como carvão, óleo e gás, estão sendo utilizados em uma taxa acelerada, apesar do receio de diminuição neste século. Além deste receio, há uma preocupação crescente com a poluição ambiental e com modos de minimizá-la.

Existem nove fontes de energia na Terra: solar, biomassa, eólica, ondas, marés, hidráulicas, geotérmica, nuclear e fóssil. À exceção das últimas três, as seis restantes são geralmente conhecidas por fontes renováveis de energia, ou seja, não diminuem com o tempo. Uma das mais promissoras fontes de energia é a advinda da **biomassa**.

A utilização de biomassa é uma fonte muito importante de energia em muitas partes do mundo, especialmente em áreas distantes para o suprimento de combustíveis fósseis de qualidade, tais como gás natural, gás líquido feito de petróleo, óleo diesel, etc., e até mesmo de energia elétrica. Para pequenas instalações produzindo menos de 1,5 MW, carvão não é um combustível adequado devido ao alto teor de enxofre (tipicamente 0,5 – 2%) e a posterior e dispendiosa necessidade de remoção de SO<sub>2</sub>. A **gaseificação de biomassa** converte o material sólido em um combustível gasoso com poder calorífico de 3 a 5 MJ/m<sup>3</sup> (gás natural é 34 MJ/m<sup>3</sup>), sendo a maior parte da energia disponível do H<sub>2</sub> e do CO. Após a limpeza, este gás é utilizado para movimentar motores de combustão interna, caldeiras, aquecedores de processo, etc.

Além disto, o potencial oferecido pela **biomassa** em reduzir a produção de gás do efeito estufa é amplamente reconhecido, pois não acrescenta CO<sub>2</sub> ao ciclo já existente na atmosfera, como é o caso dos combustíveis fósseis. Se a **biomassa** é gaseificada de maneira eficiente, pode permitir um alto rendimento em gases produzidos. O primeiro passo do processo é a decomposição termo-química dos compostos de lignina com produção de carvão, alcatrão e

compostos voláteis. O alcatrão e o carvão prejudicam a qualidade do gás produzido e um grande número de projetos de pesquisa no campo da conversão termo-química de **biomassa**, principalmente em pirólise e gaseificação, têm sido desenvolvidos para o entendimento do processo.

O contexto brasileiro permite, sem maiores restrições, a utilização de unidades geradoras de energia a partir da **biomassa**. Dada sua extensão territorial, o Brasil apresenta muitas regiões completamente desprovidas de quaisquer formas de geração de energia e, existindo-se um grupo gerador, seu funcionamento é ocasional. Um exemplo desta situação ocorre em pequenas comunidades no interior da Amazônia (Silva, 1997). Mesmo quando localizadas próximas a hidrelétricas ou centros urbanos, a rede de distribuição é precária restando, portanto, o uso de unidades geradoras movidas a óleo diesel, as quais suprem as necessidades mínimas de eletricidade destas comunidades. Como agravante, a dificuldade de transporte do combustível devido às longas distâncias e difíceis condições de acesso, tornam o uso ainda mais restrito, pois implica em valores elevados do preço do óleo diesel, quando comparado aos centros produtores (Cenbio).

### **1.1 – Objetivo**

O objetivo deste trabalho é apresentar um dispositivo que possa substituir o uso de óleo diesel em grupos geradores de localidades remotas, utilizando **biomassa** como combustível: o **gaseificador de biomassa**, o qual é acoplado a um grupo gerador composto por um motor de combustão ciclo Otto e gerador elétrico, proverá gás combustível a partir de madeira, extremamente abundante nas regiões a que se destina o seu uso.

O projeto da unidade geradora compreenderá os seguintes aspectos:

- potência da ordem de 100 kW;
- seleção e integração dos sub-sistemas;
- desenhos de conjunto.

## 1.2 – Sistema utilizado

O gaseificador aqui especificado será do tipo “**Imbert downdraft**” ou de fluxo co-corrente, mais adequado a este tipo de aplicação, uma vez que em decorrência do processo de gaseificação, a formação de alcatrão é reduzida a níveis mínimos, não prejudicando o funcionamento do m.c.i. da unidade geradora (Reed, 1992).

## **2 – Funcionamento de um gaseificador “downdraft”**

Em gaseificadores “downdraft”, combustível e o fluxo de ar descem através do reator permitindo aos gases de pirólise passar por leito quente de carvão suportado por uma grelha. Isto resulta na quebra (“cracking”) da maior parte do alcatrão em gases não condensáveis e água. Além disso, o ar ou ar enriquecido com oxigênio é normalmente admitido no leito combustível através de bocais de entrada causando a pirólise do carvão e voláteis que queimarão parcialmente conforme são produzidos. Os produtos gasosos desta “combustão” consumirão então o carvão produzido durante esta pirólise e são reduzidos a gás combustível. Este gás é muito mais adequado à operação em queimadores, motores de combustão interna, turbinas a gás e/ou transporte de gás em tubulações. Outra vantagem do **gaseificador “downdraft”** é a alta conversão do carvão, baixa produção de cinzas e alcatrão, resposta rápida à mudança de carga e simples construção (Dogru, 2002).

Altas temperaturas de saída dos gases, dificuldade de incremento da produção, fusão das cinzas nas altas temperaturas da grelha e limitações de umidade do combustível (menores que 25%) são as desvantagens mais comuns. Entretanto, comparado aos gaseificadores “updraft”, os menores níveis de alcatrão produzidos e a resposta a mudanças de carga e combustível fazem deste modelo de gaseificador o mais adequado em operações de geração de potência e calor, especialmente em operações que requerem secagem e potência simultaneamente.

Como mostrado na Figura 1, o gaseificador “downdraft” tem quatro zonas de reação distintas: secagem, pirólise, oxidação e redução, de cima para baixo, respectivamente. Em termos construtivos, este sistema é composto por quatro seções: silo de alimentação do combustível, zona de reação de gaseificação, sistema de alimentação de ar e caixa de remoção de cinzas. Diagramas esquemáticos com o perfil típico de temperatura e zonas são mostrados nas Figuras 1 e 2.

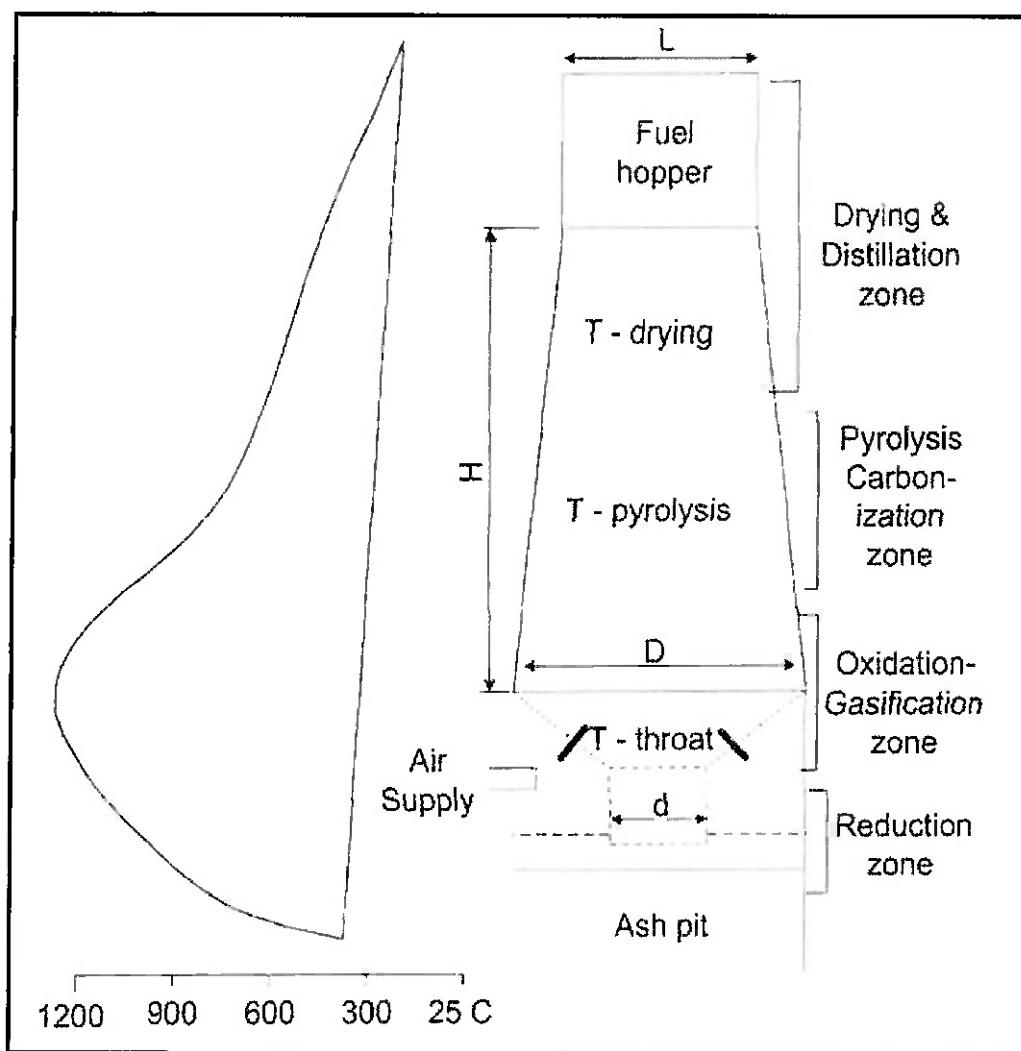


Figura 1: Diagrama esquemático do gaseificador downdraft e seu perfil de temperatura  
(Fonte: Dogru, 2002)

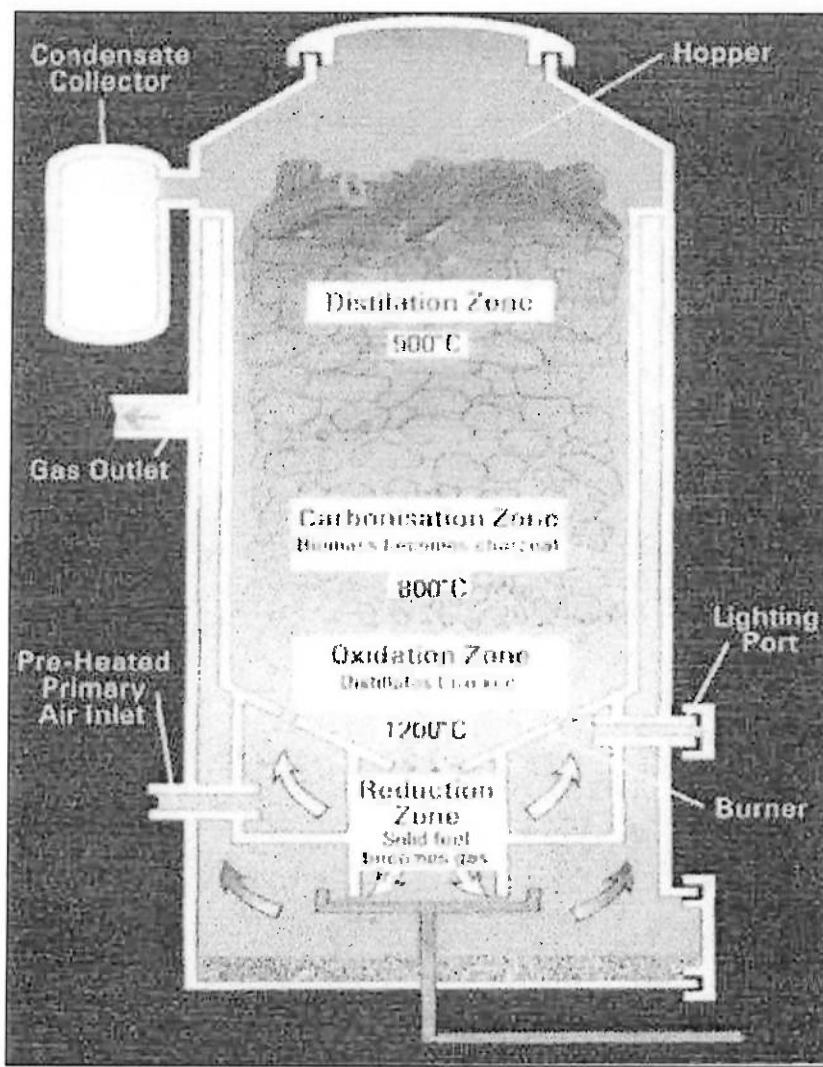


Figura 2: Configuração básica do gaseificador downdraft de leito fixo  
 (Fonte: Dogru, 2002)

Na zona de secagem, a madeira picada na forma de cavacos desce pelo gaseificador e a umidade é removida usando-se o calor gerado pelas zonas inferiores por evaporação. A taxa de secagem depende da área superficial do combustível, da diferença de temperatura entre a alimentação e os gases aquecidos, da velocidade de recirculação e umidade relativa dos gases, bem como a difusividade interna da umidade com o combustível. A temperatura e a altura da zona de secagem são aproximadamente 70 – 200°C e 0,10m, respectivamente.

Na zona de pirólise, a decomposição térmica do combustível seco vindo da zona de secagem se inicia utilizando a energia térmica liberada pela oxidação parcial dos produtos de pirólise. A temperatura e a altura da zona de pirólise são aproximadamente 350 – 500°C e 0,17m.

Na zona de oxidação, os produtos voláteis da pirólise são parcialmente oxidados em reações altamente exotérmicas, resultando em um rápido crescimento da temperatura para 1200°C na região da garganta. O calor gerado é utilizado na secagem e pirólise do combustível e nas reações de gaseificação. As reações de oxidação dos voláteis são muito rápidas e o oxigênio é consumido antes que possa se difundir pela superfície do carvão. Assim, não ocorre a combustão do carvão (carbono) sólido. A oxidação da fração orgânica condensável para formar produtos de baixo peso molecular é importante para se reduzir a quantidade de alcatrão produzido pelo gaseificador. A temperatura e altura da zona de oxidação são aproximadamente 1000 – 1200°C e 0,12m.

Na zona de redução (freqüentemente chamada de zona de gaseificação) o carbono é convertido em produtos gasosos pela reação com os gases quentes vindos das zonas superiores. Os gases são reduzidos de modo a formar uma mistura de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, estes três últimos em uma proporção muito pequena comparada aos outros gases. Nesta zona, os gases combustíveis saem do gaseificador a uma temperatura entre 200 3 300°C e estão carregados de particulado (cinzas), produtos de pirólise (alcatrão) e vapor d'água. Dependendo do uso final, é necessário resfriar e limpar o gás de modo a remover o máximo de vapor d'água, particulado e alcatrão possível do gás, especialmente se este for utilizado em um motor de combustão interna, como nesta aplicação do gaseificador.

## 2.1 – Procedimentos operacionais

A operação do gaseificador pode ser dividida em quatro partes, a seguir:

- (1) Partida, que inclui todas as operações exigidas até o regime permanente, através do qual a qualidade estabelecida do gás para o motor é alcançada. Lotes previamente pesados de cavacos são carregados no silo a um nível pré-determinado e então, o ventilador e a bomba de circulação do lavador de gases são acionados. O gaseificador é acionado por uma chama piloto, comumente um maçarico de gás propano.
- (2) Os dados medidos são a taxa de alimentação da madeira, taxa do fluxo de gás, análise da composição do gás, alcatrão e condensáveis, medição de temperatura e pressão. Este procedimento somente é possível quando da construção e teste do sistema, não sendo necessário no local de utilização.
- (3) Procedimentos de parada incluem todas as ações para selar com segurança o gaseificador. Lavador de gases, bocais de alimentação de ar, ventilador de circulação são desligados em uma seqüência ordenada com a saída de gás remanescente usando-se um queimador secundário (flare) até que não se produza mais gás combustível.

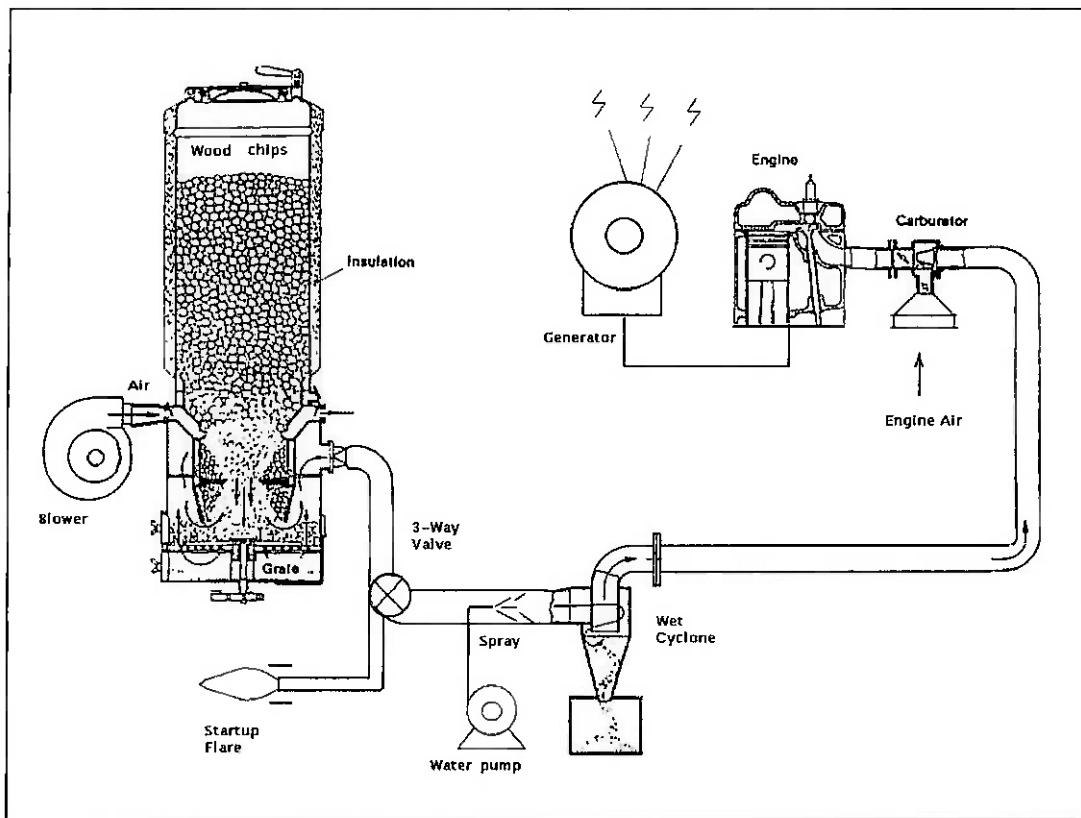


Figura 3: Layout do sistema gerador de energia elétrica a partir de biomassa  
(Fonte: Reed, 1992)

### **3 – O processo de gaseificação**

#### **3.1 – Composição da madeira**

Tendo em vista que o combustível utilizado no processo de gaseificação aqui proposto será a **madeira**, da análise pode-se obter os seguintes valores de sua composição química:

| componente      | carbono | hidrogênio | oxigênio | nitrogênio | enxofre |
|-----------------|---------|------------|----------|------------|---------|
| <b>teor (%)</b> | 48      | 6          | 43       | 1          | <1      |

Tabela 1: Composição média da madeira (B.U.)  
(Fonte: IPT, Relatório Técnico nº17135)

Além destes valores, outro aspecto a ser observado é o teor de umidade, que no caso da madeira é 20 a 55% de sua massa. Um outro aspecto refere-se à

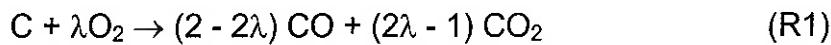
formação de cinzas. Cinza é o resíduo do combustível após o processo de combustão, que contém resíduos tais como: CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.

A tendência atual no projeto de um gaseificador é obter a taxa máxima de gaseificação sem exceder temperaturas nas quais há formação de sínter, o que deve ser evitado pois pode levar a constantes paradas no equipamento prejudicando a requerida produção contínua de gás.

### 3.2 – Reações químicas

A seguir serão apresentadas as reações químicas que melhor caracterizam os processos envolvidos na gaseificação. Várias outras reações podem ocorrer, porém exercem muito pouca influência ou podem ser obtidas por combinação das descritas abaixo.

As reações consideradas são:



#### 3.2.1 Carbono - oxigênio

Trata-se da reação (R1), altamente exotérmica. O fator “λ” indicado depende da temperatura em que ocorre a reação.

#### 3.2.2 Carbono - água

Trata-se da reação (R2). É endotérmica com entalpia de reação de 131,38MJ/kmol sendo, portanto, responsável em grande parte pelo controle da

temperatura máxima obtida no leito. É a reação que fornece a quase totalidade do hidrogênio gerado no processo.

### 3.2.3 Monóxido de carbono - água

Trata-se da reação (R3). É exotérmica com entalpia de reação -41,20MJ/kmol. Esta reação é, também, chamada de conversão de monóxido de carbono ou "shift". É uma reação importante pois tem o papel de converter parte da água em hidrogênio. Entretanto, ela diminui a concentração de monóxido de carbono. Dependendo da utilização do gás gerado, pode ser interessante, até, a utilização de algum produto catalisador para acelerá-la. Em unidades que visam produzir gás combustível, este tratamento não é utilizado devido aos altos custos de investimento e operação que inviabilizariam o processo.

### 3.2.4 Monóxido de carbono - oxigênio

Trata-se da reação (R4), exotérmica com entalpia de reação -238,18MJ/kmol e desempenha um papel de importância secundária. Isto se deve ao fato de a fase onde se tem oxigênio predomina a reação de combustão do carbono (R1) que possui velocidade muito maior que esta reação. Assim, o oxigênio reage preferencialmente com o carbono e muito pouco com o monóxido formado. Além disso, a reação (R3) pode ser interpretada como a combinação da reação (R4) e (R5).

### 3.2.5 Hidrogênio - oxigênio

Trata-se da reação dada por (R5), exotérmica cuja entalpia de reação é igual a -241,98MJ/kmol. Esta reação, embora de alta velocidade, tem efeito negligenciável no processo. Isto se deve ao fato de que o hidrogênio é produzido pelas reações (R2) e (R3) que possuem, por sua vez, velocidades muito menores que (R1), responsável pelo rápido consumo de todo o oxigênio disponível.

### 3.2.6 Carbono - dióxido de carbono

Trata-se da reação (R6) que é endotérmica com entalpia de reação de 172,58MJ/kmol. Seu efeito se verifica mais nitidamente na região onde a

concentração de oxigênio é muito baixa, ou seja, após a zona de combustão. Esta reação, juntamente com (R2) é responsável pelo declínio de temperatura na zona de gaseificação.

### **3.2.7 Carbono - hidrogênio**

Trata-se da reação (R7) que é exotérmica e cuja entalpia de reação é da ordem de -74,86MJ/kmol, sendo responsável pela produção do metano.

## **3.3 – Influência das propriedades e das condições do combustível alimentado sobre o desempenho do gaseificador**

### **3.3.1 Efeito da espessura do cavaco**

Segundo observado por Ushima (1996), a redução da espessura do cavaco de 0,015m (espessura padrão de ensaio) para 0,010m tende a reduzir a extensão de todas as zonas existentes no gaseificador, a menos da região inerte entre as zonas de gaseificação e pirólise. Isto significa que a altura do leito pode ser reduzida caso se empregue cavacos com espessuras menores, sem alterar o rendimento do gaseificador, tornado-o mais compacto.

### **3.3.2 Influência da umidade do cavaco**

Ainda segundo observações feitas por Ushima (1996), a umidade do sólido alimentado interfere significativamente na operação do gaseificador, semelhante à influência da espessura do cavaco. A diminuição da umidade aumenta o comprimento da região inerte, localizada entre as zonas de gaseificação e pirólise. Para cavacos secos o aumento é máximo, indicando a possibilidade de se reduzir a altura do leito sem prejuízo do gaseificador. Nota-se, assim, a importância da secagem do cavaco para obtenção do melhor rendimento para o processo de gaseificação.

#### **4 – Dimensionamento da produção do gaseificador**

##### **4.1 – Cálculo do desempenho do motor de combustão interna e faixa ótima de operação**

Inicialmente, o dimensionamento da produção de gás pelo gaseificador partiu da verificação e cálculo do novo desempenho do motor, uma vez que não mais se utilizaria de GNV (Gás Natural Veicular) e sim, do chamado “gás pobre”, gerado a partir da madeira. O motor, previamente selecionado, mostrou-se o mais adequado a este tipo de utilização, tanto pelas características operacionais como pela facilidade na substituição do combustível usado.

Assim, o desempenho do motor seria sensivelmente alterado, sobretudo no que se refere à potência máxima desenvolvida pois, mesmo contando com sobrealimentação (turbo-compressor), a queda de desempenho certamente ocorreria. Restava, portanto, quantificar a queda de desempenho e verificar seu grau de influência sobre a unidade de geração de energia. Partindo-se dos dados das Tabelas 2 e 3, tornou-se possível estimar a máxima potência obtida, bem como sua respectiva faixa ótima de operação em torque máximo.

| <b>Motor</b>                           |  |
|--|--|
| Modelo                                 | Mercedes-Benz M-366 LAG  |
| Tipo                                   | 6 cilindros verticais em linha, com turbocooler (turboalimentado com pós-resfriador do ar de admissão) |
| Potência máxima, conforme NBR ISO 1585 | 170 kW (231 cv) a 2600 rpm   |
| Torque máximo, conforme NBR ISO 1585   | 720 Nm (73 mkgf) A 1560 rpm  |
| Cilindrada total                       | 5958 cm <sup>3</sup>   |
| Diâmetro do pistão                     | 97,5 mm  |
| Curso do pistão                        | 133 mm   |
| Relação de compressão                  | 12:1   |
| Consumo específico                     | 190 g/kWh (180 g/cvh)<br>a 1370 rpm  |

Tabela 2: Dados do motor a gás

(Fonte: Mercedes-Benz)

A composição média do gás pobre também é conhecida, sendo mostrada na tabela 3, a seguir:

| <b>Composição Média do Gás Pobre</b> |                 |      |                |                |                 |                |                  |
|--------------------------------------|-----------------|------|----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|
| Componentes                          | CO <sub>2</sub> | CO   | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |
| % molar                              | 7,2             | 22,1 | 2,1            | 14,8           | 1,0             | 47,9           | 4,9              |
| Massa Molar Média                    | 24,8 kg/kmol    |      |                |                |                 |                |                  |
| PCS                                  | PCI             |      |                |                |                 |                |                  |
| 5,55 MJ/kg                           | 5,19 MJ/kg      |      |                |                |                 |                |                  |

Tabela 3: Composição média do gás pobre obtida com a gaseificação de madeira

(fonte: IPT, Relatório Técnico nº18874)

Da curva de desempenho do motor operando com GNV fornecida pelo fabricante (ver Anexo), obtém-se:

- potência a 1800 rpm: 135kW
- consumo específico: 196g/kWh
- PCI do combustível: 48MJ/kg

O rendimento global do motor no ponto de operação (1800 rpm) é dado por:

$$\eta_{global} = \frac{Pot_{mec}}{Pot_{term}} = \frac{Pot_{mec}}{Pot_{mec}.ce.PCS} = 0,34$$

Da estequiometria para operação com GNV, tem-se:

$$MM_{mist} = 28,06\text{kg/kmol}$$

$$AC_{mol} = 10,71$$

$$R_{mistGNV} = 296,3\text{kJ/kg.K}$$

$$Vd = 89,4\text{l/s}$$

$$\dot{m}_{GNV} = ce \cdot Pot_{mec} = 7,35 \cdot 10^{-3}\text{kmol/s}$$

$$MM_{GNV} = 19,9\text{kg/kmol}$$

$$\dot{m}_{mistGNV} = 1,2136 \cdot 10^{-1}\text{kg/s}$$

Para verificação da pressão de sobrealimentação do compressor, tem-se:

$$\rho_{mistGNV} = \frac{\dot{m}_{mistGNV}}{Vd} = 1,3575 \cdot 10^{-3} \text{ kg/l}$$

Assumindo temperatura típica de entrada da mistura no cilindro (após o *aftercooler*):

$T_{ent} = 80^\circ\text{C} = 353\text{K}$ , para um gás perfeito:

$$p = R_{mistGNV} \cdot T_{ent} \cdot \rho_{mistGNV} = 142\text{kPa}$$

$$p_s = p_{abs} - p_{atm} = 42 \text{kPa}$$

Para se minimizar a queda de potência na conversão do combustível do motor, deve-se operar com a maior pressão de sobrealimentação possível, a qual deve garantir a operação sem a ocorrência de detonação.

Mukunda (2000), ensaiou motores convertidos para gás pobre com diversas relações de compressão. Verificou combustão suave mesmo para taxas de compressão da ordem de 17:1, num motor naturalmente aspirado.

A proposta é fixar a pressão máxima de compressão de um ciclo ar padrão Otto em uma taxa de compressão de 17:1 e pressão de referência igual à atmosférica (aspiraçāo natural). A equivalência do motor analisado, de taxa de compressão menor (12:1), será feita aumentando-se a pressão de referência até atingir-se o mesmo valor fixado de pressão máxima de compressão.

Da compressão isentrópica de um gás perfeito:

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k, \text{ onde } k = 1,4 \text{ (ar atmosférico)}$$

Para o motor ensaiado:

$$\begin{aligned} \text{se} \quad p_1 &= p_{atm} = 10^5 \text{ Pa} \\ &v_1 / v_2 = 17 \\ &p_2 = 52,8 \cdot 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Fixando-se  $p_2$ , estima-se  $p_1$  para a taxa de compressão de 12:1

$$\begin{aligned} \text{se} \quad p_2 &= 52,8 \cdot 10^5 \text{ Pa} \\ &v_1 / v_2 = 12 \\ &p_2 = 1,628 \cdot 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Portanto, a nova pressão de sobrealimentação será:  $p_s' = 62,8 \text{kPa}$

Da estequiometria para operação com gás pobre:

$$MM_{gaso} = 25 \text{ kg/kmol}$$

$$MM_{mistgaso} = 27,8 \text{ kg/kmol}$$

$$AC_{mol} = 1,314$$

$$R_{mistgaso} = 305,7 \text{ kJ/kg.K}$$

$$Vd = 89,4 \text{ l/s}$$

$$\rho_{mistgaso} = \frac{p_s}{R_{mistgaso} \cdot T_{ent}} = 1,509 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{mistgaso} = \rho_{mistgaso} \cdot Vd = 0,135 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{gaso} = 0,397 \cdot \dot{m}_{mistgaso} = 0,0536 \text{ kg/s}$$

Portanto, o gaseificador deverá ser dimensionado para produzir uma vazão mássica de gás pobre de **193kg/h**.

Assumindo o mesmo rendimento global da operação com GNV, tem-se:

$$Pot_{maxgaso} = \eta_g \cdot PCS_{gaso} \cdot m_{gaso} = 99,3 \text{ kW}$$

#### 4.2 – Consumo de madeira

Após determinada a vazão mássica de gás pobre, faz-se necessária a determinação da quantidade de madeira necessária para gerar esta quantidade de gás.

Como visto no item 4.1, o consumo de gás pobre é igual a 193kg/h e sua massa molar é igual a 25kg/kmol. O consumo molar de gás pobre será então:

$$\dot{m}_{mol\_gaso} = \frac{\dot{m}_{gaso}}{MM_{gaso}} = 2,144 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s}$$

Fazendo o balanço mássico para as espécies químicas contendo o elemento carbono, provenientes apenas do combustível tem-se, da composição molar média do gás pobre:

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{gaso} \cdot F_{CH_4}}{MM_{CH_4}} = 3,430 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{gaso} \cdot F_{CO_2}}{MM_{CO_2}} = 6,792 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{CO} = \frac{\dot{m}_{gaso} \cdot F_{CO}}{MM_{CO}} = 1,327 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$$

O fluxo mássico do elemento carbono é dado por:

$$\dot{m}_C = \dot{m}_{CH_4} \cdot \frac{MM_C}{MM_{CH_4}} + \dot{m}_{CO_2} \cdot \frac{MM_C}{MM_{CO_2}} + \dot{m}_{CO} \cdot \frac{MM_C}{MM_{CO}} = 7,796 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

A partir da fração mássica de carbono no combustível, obtém-se o consumo de madeira:

$$\dot{m}_{madeira} = \frac{\dot{m}_C}{X_C} = 4,147 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$$

$\dot{m}_{madeira} = 149 \text{ kg/h}$

#### 4.3 – Consumo de ar

Para o dimensionamento do sistema de ventilação do gaseificador, deve-se estimar a vazão máxima de ar no processo. Admite-se que todo o nitrogênio contido no gás produzido é proveniente no ar atmosférico, ou seja, a fração de nitrogênio na biomassa é desprezível.

Da fração molar de N<sub>2</sub> no gás pobre, tem-se:

$$\dot{m}_{mol\_N_2} = \dot{m}_{mol\_gaso} \cdot F_{N_2} = 1,027 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s}$$

A partir da fração molar de N<sub>2</sub> no ar atmosférico, tem-se:

$$\dot{m}_{mol\_Ar} = \frac{\dot{m}_{mol\_N_2}}{F_{N_2atm}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ kmol/s}$$

$$\dot{m}_{Ar} = \dot{m}_{mol\_Ar} \cdot MM_{Ar} = 3,744 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$$

$$\boxed{\dot{m}_{Ar} = 135 \text{ kg/h}}$$

#### 4.4 – Balanço de massa

Uma vez obtidos os valores dos fluxos mássicos, podemos prever a umidade e cinzas contidas no combustível:

$$\dot{m}_{madeira} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{cinzas} + \dot{m}_{Ar} = \dot{m}_{gaso}$$

Sendo

$$\dot{m}_{Ar} = 135 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{madeira} = 149 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{gaso} = 193 \text{ kg/h}$$

Obtemos

$$\dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{cinzas} = 91 \text{ kg/h}$$

## **5 – Projeto do gaseificador**

A partir do cálculo do consumo de madeira necessário para geração de gás especificada, bem como a quantidade de ar requerida, é possível dimensionar o gaseificador de modo a atender a demanda de produção de gás, a qual é bastante restrita e não permite variações acentuadas.

### **5.1 – Descrição do gaseificador “Imbert downdraft”**

Como é possível observar nas Figuras 4 e 5, a parte cilíndrica superior da câmara interna é simplesmente um “silo” para os cavacos de madeira ou outro tipo de biomassa. Durante a operação, esta câmara é preenchida em intervalos de tempo de acordo com a demanda. A tampa, cujo fechamento é feito através de uma mola, é aberta para carregar o gaseificador e fechada durante a operação. A mola permite que a tampa se abra de modo a aliviar a pressão em caso de explosão do gás, funcionando como uma válvula de segurança.

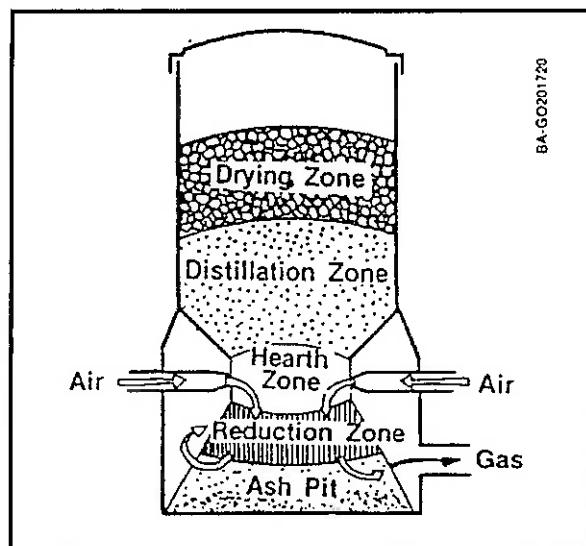


Figura 4: Diagrama das zonas de gaseificação no sistema downdraft  
(Fonte: Reed, 1992)

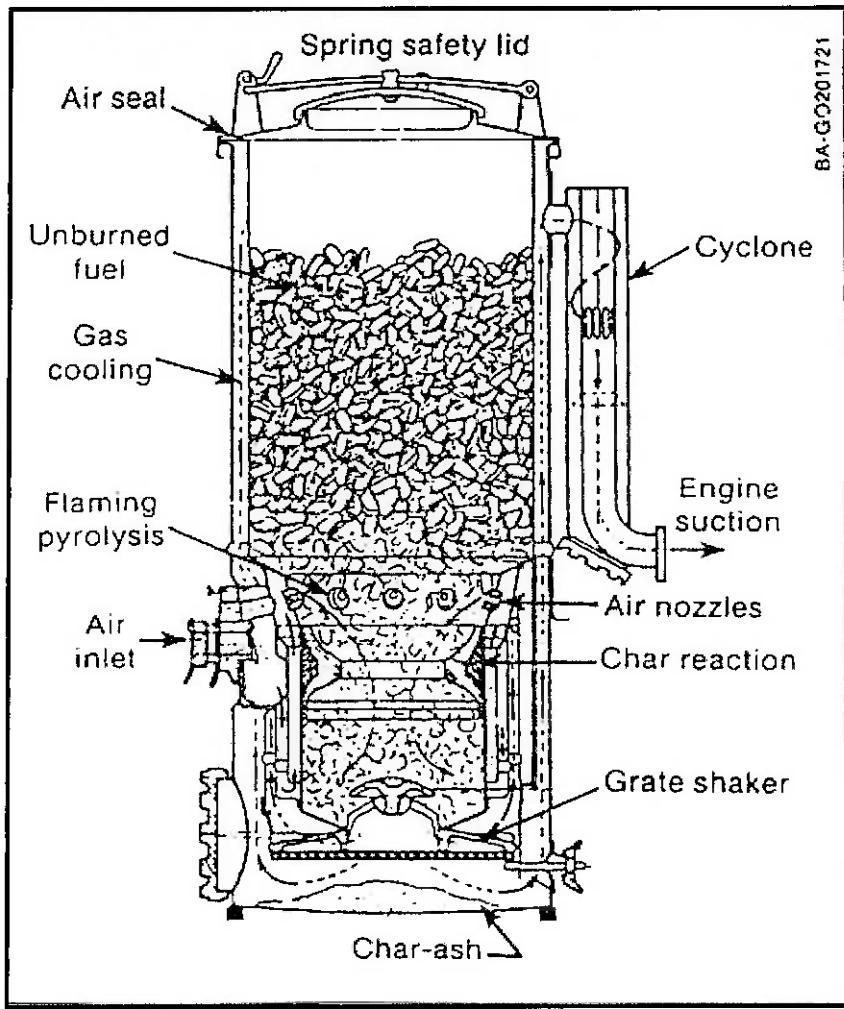


Figura 5: Gaseificador Imbert downdraft

(Fonte: Reed, 1992)

Posicionados cerca de 1/3 acima da base estão bocais de ar dispostos radialmente que permitem ao ar passar se misturar aos cavacos conforme estes descem para a gaseificação. Tipicamente, há um número de bocais tal que os gases quentes que saem de cada um não interfiram nos bocais opostos. Os bocais são solidários a um manifold de distribuição ao redor do qual está ligada a superfície externa da câmara do gaseificador. Este manifold é conectado a uma grande entrada de ar. Um dos bocais está alinhado com esta entrada, permitindo ao operador dar partida no leito através deste bocal.

Durante a operação, o ar admitido queima e pirolisa parte da madeira e grande parte do alcatrão, bem como parte da madeira (já na forma de carvão) que

preenche o gaseificador abaixo dos bocais. Grande parte da massa de madeira é convertida em gás dentro desta zona de chama, desde que contenha mais de 80% de material volátil.

O gaseificador é, de vários modos, auto-ajustável. Se há insuficiente quantidade de carvão próxima aos bocais, mais madeira é consumida e pirolisada de modo a formar mais carvão. Se muito carvão se forma durante condições de alto carregamento, então o nível de carvão passa acima do nível dos bocais, e o ar admitido queima o carvão de modo a reduzir seu nível. Deste modo, a zona de reação é mantida nos bocais.

Abaixo da zona dos bocais de ar localiza-se a zona de redução, que usualmente consiste do chamado "bocal-fornalha V" (Figura 6). Mais recentemente, uma placa plana de constrição foi introduzida (Figura 7). Estes tipos de "bocais-fornalha" acumulam uma camada de cinzas que formam um isolamento de alta qualidade e auto-reparável. Isolamento adequado nesta peça resulta em menor produção de alcatrão e eficiência mais elevada sobre uma ampla escala de condições operacionais.

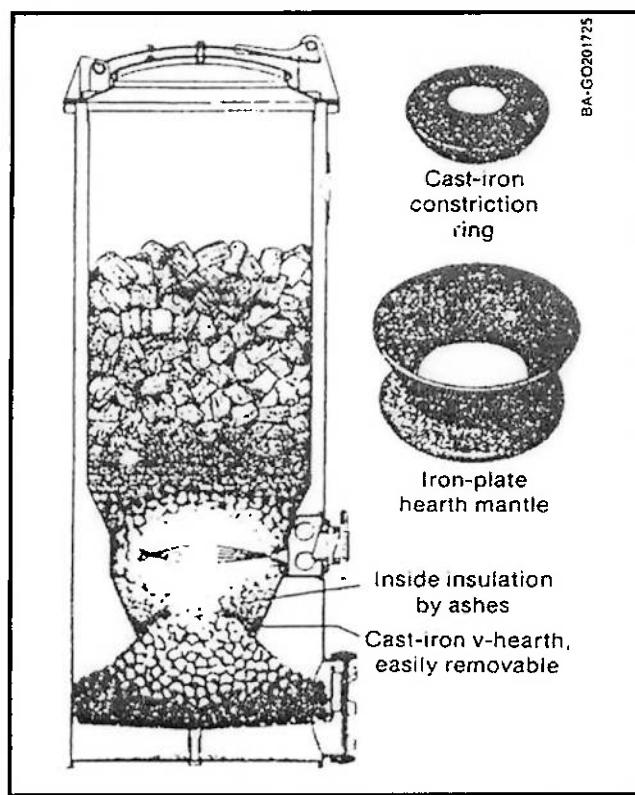


Figura 6: Gaseificador Imbert downdraft mostrando o "bocal-fornalha V"

(Fonte: Reed, 1992)

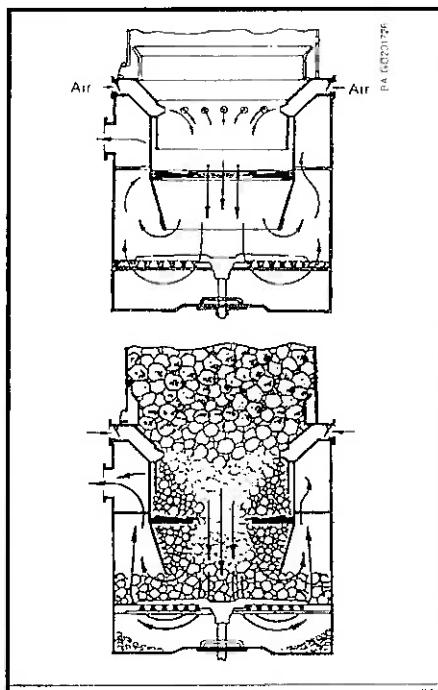


Figura 7: Placa plana de constrição

(Fonte: Reed, 1992)

Após a combustão/pirólise da madeira ao nível dos bocais de ar, os gases quentes resultantes ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) passam através do carvão aquecido onde são parcialmente reduzidos nos combustíveis  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ , de acordo com as reações R2 e R6 do item 3.2. Este procedimento resulta em um notável resfriamento do gás, uma vez que o calor sensível do gás é convertido em energia química. Isto remove a maior parte do carvão e melhora a qualidade do gás produzido. Eventualmente, o carvão é “dissolvido” por estes gases, formando pequenos grãos e um pó fino, sendo arrastados com os gases para o separador ciclônico ou caindo através da grelha. O alcatrão que tenha escapado da combustão nos bocais poderá ser consumidos posteriormente no carvão aquecido, apesar de que sua quebra ocorre apenas acima de  $850^\circ\text{C}$ .

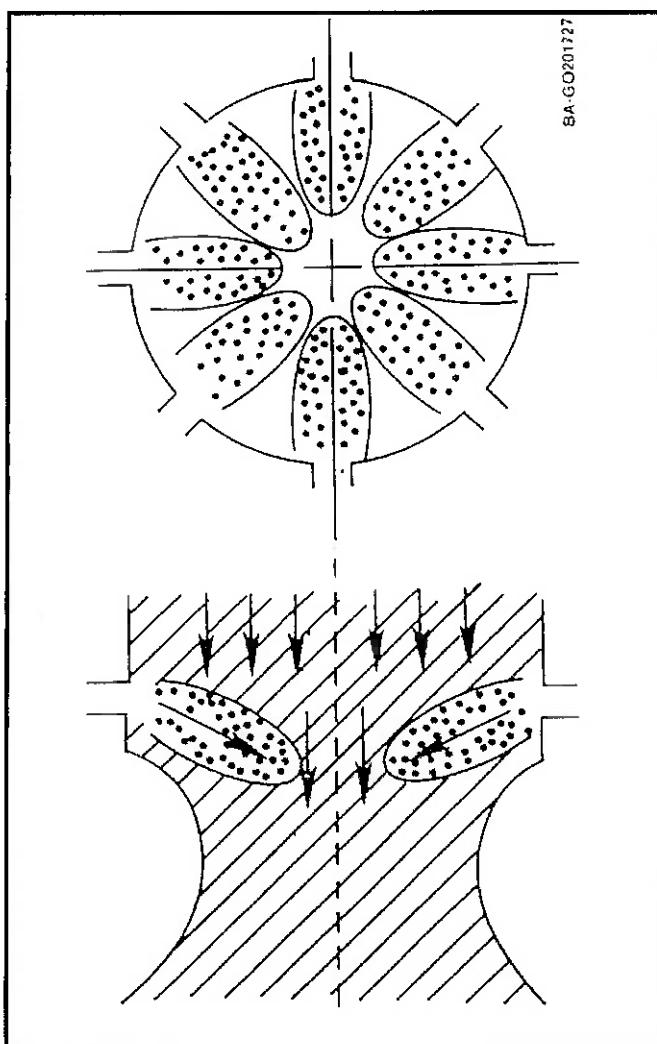


Figura 8: Zona de alta temperatura do gaseificador, próxima aos bocais de entrada de ar  
(Fonte: Reed, 1992)

Os espaços entre os bocais (Figura 8) permitem que parte da biomassa que não sofreu pirólise passe através deles. A constrição no bocal-fornalha força a passagem de todos os gases por ela, resultando assim em máxima mistura e mínima perda de calor. As elevadas temperaturas atingidas nesta seção implicam na necessidade de que esta peça seja substituível.

### 5.2 – Velocidade superficial, carregamento e dimensões do gaseificador

Segundo Reed (1992), um importante fator usado para determinação das dimensões do gaseificador é a *velocidade superficial*,  $V_s$ , do gás calculada onde este passa através da parte mais estreita da zona de gaseificação. Apesar de as unidades de  $V_s$  serem comprimento/tempo (m/s), pode-se pensar na velocidade superficial expressa em termos de volume/área-tempo ( $m^3/m^2s$ ), uma taxa específica da produção de gás.

Um outro termo muito relacionado é o *máximo carregamento da fornalha*,  $B_H$ , expressa em volume de gás/área da fornalha – h. Um valor de  $B_H$  para um gaseificador Imbert é cerca de  $0,9Nm^3/h\cdot cm^2$ , em outras palavras,  $0,9m^3$  de gás é produzido para cada  $cm^2$  de área transversal na constrição. Isto corresponde a uma velocidade superficial de 2,5m/s, calculada nas CNTP no diâmetro de garganta e ignorando a presença do combustível, o que corresponde a uma taxa de produção de  $9000m^3$  de gás por  $m^2$  por hora.

| diâmetro D (m) | vel. superficial $V_s$ (m/s) | carga $B_H$ ( $m^3/cm^2h$ ) |
|----------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0,15           | 2,50                         | 0,90                        |
| 0,30           | 0,63                         | 0,23                        |

Tabela 4 – Máxima velocidade superficial e carregamento de fornalha  
(Fonte: Reed, 1992)

Intimamente ligado à área da fornalha é a área da seção transversal dos bocais de ar ( $A_m$ ). Recentes pesquisas mostraram uma reação ótima entre as áreas da fornalha e bocais de ar. Por exemplo, potência máxima foi obtida de fornalhas de 130mm (diâmetro) que possuíam 5 bocais de 12mm. Qualquer variação do

bocal ou fornalha causam redução de potência. Um diâmetro maior de fornalha requer maior velocidade no bocal de modo a penetrar mais profundamente no leito de combustível. Isto leva a uma maior queda de pressão para fornalhas maiores, estabelecendo um limite superior na alimentação dos bocais do gaseificador downdraft quando o fluxo de gás é feito pela aspiração de um motor. Se a área da seção transversal dos bocais é muito pequena, haverá uma excessiva perda de carga na formação dos jatos de ar; se a área for muito grande, os jatos de ar terão velocidade baixa e o ar não penetrará adequadamente no leito do gaseificador. A velocidade do jato de ar e as dimensões ótimas de bocais para gaseificadores Imbert são mostradas na Figura 9 e na Tabela 5 a seguir:

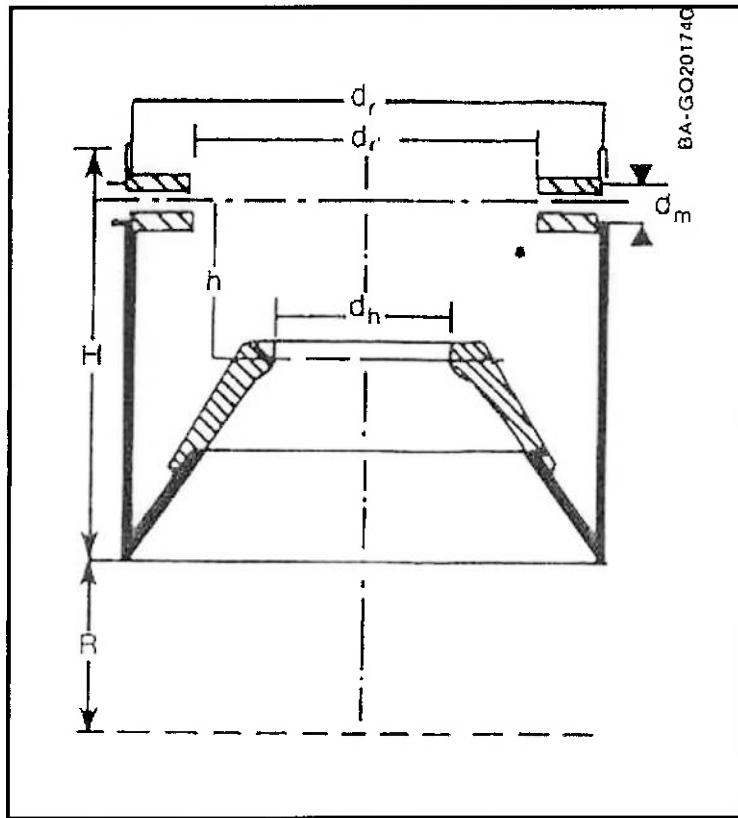


Figura 9: Dimensões gerais para os bocais do gaseificador, referentes à Tabela 5  
(Fonte: Reed, 1992)

| dh/dh   | dh<br>mm | dr<br>mm | dr'<br>mm | h<br>mm | H<br>mm | R<br>mm | A<br>mm | dm<br>mm | (A.m.100)/Ah | dr/dh | h/dh | Range de saída de gás<br>máximo<br>Nm3/h | Range de saída de gás<br>mínimo<br>Nm3/h | Máximo<br>consumo de madeira<br>kg/h | Velocidade do<br>jato de ar (Vm)<br>m/s |
|---------|----------|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|--------------|-------|------|--|--|--------------------------------------|---|
| 268/60  | 60       | 268      | 150       | 80      | 256     | 100     | 5       | 7,5      | 7,8          | 4,5   | 1,33 | 30                                       | 4  | 14                                   | 22,4                                    |
| 268/60  | 80       | 268      | 176       | 95      | 256     | 100     | 5       | 9,0      | 6,4          | 3,3   | 1,19 | 44                                       | 5  | 21                                   | 23,0                                    |
| 268/100 | 100      | 268      | 202       | 100     | 256     | 100     | 5       | 10,5     | 5,5          | 2,7   | 1,00 | 63                                       | 8  | 30                                   | 24,2                                    |
| 268/120 | 120      | 268      | 216       | 110     | 256     | 100     | 5       | 12,0     | 5,0          | 2,2   | 0,92 | 90                                       | 12                                       | 42                                   | 26,0                                    |
| 300/100 | 100      | 300      | 208       | 100     | 275     | 115     | 5       | 10,5     | 5,5          | 3,0   | 1,00 | 77                                       | 10                                       | 36                                   | 29,4                                    |
| 300/115 | 115      | 300      | 228       | 105     | 275     | 115     | 5       | 11,5     | 5,0          | 2,6   | 0,92 | 95                                       | 12                                       | 45                                   | 30,3                                    |
| 300/130 | 130      | 300      | 248       | 110     | 275     | 115     | 5       | 12,5     | 4,6          | 2,3   | 0,85 | 115                                      | 15                                       | 55                                   | 31,5                                    |
| 300/150 | 150      | 300      | 256       | 120     | 275     | 115     | 5       | 14,0     | 4,4          | 2,0   | 0,80 | 140                                      | 18                                       | 67                                   | 30,0                                    |
| 400/130 | 130      | 400      | 258       | 110     | 370     | 155     | 7       | 10,5     | 4,6          | 3,1   | 0,85 | 120                                      | 17                                       | 57                                   | 32,6                                    |
| 400/150 | 135      | 400      | 258       | 120     | 370     | 155     | 7       | 12,0     | 4,5          | 2,7   | 0,80 | 150                                      | 21                                       | 71                                   | 32,6                                    |
| 400/175 | 175      | 400      | 308       | 130     | 370     | 155     | 7       | 13,5     | 4,2          | 2,3   | 0,74 | 190                                      | 16                                       | 90                                   | 31,4                                    |
| 400/200 | 200      | 400      | 318       | 145     | 370     | 153     | 7       | 16,0     | 3,9          | 2,0   | 0,73 | 230                                      | 33                                       | 110                                  | 31,2                                    |

Tabela 5: Dimensões recomendadas para bocais e fornalhas  
(Fonte: Reed, 1992)

### 5.3 – Materiais de construção para o gaseificador

Neste tópico, serão abordados os materiais de construção para as várias partes do corpo do gaseificador e a seguir dos demais componentes.

#### 5.3.1 Carcaça

A carcaça é revestida internamente por material refratário, não exigindo nenhuma qualidade especial do seu material, podendo se utilizar chapas de aço com baixo teor de carbono comerciais e laminadas a quente.

#### 5.3.2 Partes internas submetidas a alta temperatura

No caso específico deste gaseificador, o bocal-fornalha (ou somente fornalha), embora não esteja submetido a grandes esforços, a não ser aqueles devidos ao peso do leito, é necessário que o material conserve alguma resistência mecânica, resistência à fluência e, principalmente, resistência à oxidação em altas temperaturas. Construindo-se esta peça com uma cavidade interna (oca), de modo que possa ser resfriada pelo ar admitido, o material a ser utilizado pode ser aço inox AISI 316 ou 304.

#### 5.3.3 Grelha

A grelha é envolvida pelos gases quentes gerados e suporta um leito de cinzas em alta temperatura. Deste modo, o material mais adequado é um aço austenítico 25-12 (25% Cr e 12% Ni), devido à atmosfera redutora da região.

#### 5.3.4 Revestimento refratário

Como a carcaça do gaseificador não será revestida por uma camisa d'água, alguns problemas podem ocorrer com o refratário:

- a) desgaste por abrasão, com o leito descendente e principalmente na região de cisalhamento cinza-leito;
- b) ataque das cinzas fundidas;
- c) formação de fuligem no interior dos poros do material, devido à reação
$$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{C}$$
 Esta fuligem depositada tende a desagregar o material

(ruptura por tração), na forma de cascas sucessivas, resultando, portanto num desgaste do mesmo.

Considerando o aspecto do item (a), o material deve ser queimado a 1450°C, de forma a apresentar elevada resistência ao desgaste. Quanto ao aspecto do item (b), o material deve apresentar médio a alto teor de alumina, uma vez que as cinzas são em geral ácidas. E finalmente, o aspecto do item (c) implica na apresentação de baixa porosidade e alta densidade do material refratário.

Isto posto, conclui-se que um revestimento de concreto refratário ou massa de socar não são soluções satisfatórias. Um material adequado em se tratando de pequenas unidades é o refratório sílico-aluminoso com as seguintes propriedades:

- porosidade aparente: cerca de 15%;
- teor de sílica: 49% a 53%;
- teor de alumina: 42% a 45%;
- teor de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ): cerca de 1%.

## 5.4 – Instrumentos

### 5.4.1 Temperatura

Termopares (cromel-alumel tipo K) devem ser utilizados na medição de vários pontos do gaseificador, especialmente abaixo da grelha, de modo a verificar o funcionamento normal ou anormal. As temperaturas na grelha não devem exceder 800°C; a ocorrência de temperaturas maiores indica funcionamento anormal. Consequentemente, o sinal pode ser usado por um eventual sistema de controle ou um sistema de alarme.

### 5.4.2 Pressão

Manômetros são necessários para medir a queda de pressão através do leito, ciclone, filtros e outros componentes, sendo normalmente da ordem de poucos milímetros de coluna d'água. Estes manômetros podem servir como alarmes de indicação de funcionamento anormal.

#### **5.4.3 Mistura de gases**

Sensores de oxigênio podem ser utilizados para medir pequenas mudanças na concentração deste gás, servindo como controle da relação ar/combustível para se obter combustão limpa e eficiente.

### **6 – Equipamentos auxiliares**

Para o funcionamento adequado do sistema de geração de energia a partir da gaseificação de biomassa, além do gaseificador propriamente dito e do motor de combustão interna, vários outros equipamentos são previstos no projeto: sistemas de limpeza e condicionamento do gás produzido (*lavador ciclônico* de gás e filtro), alimentação de ar (ventilador), preparação da biomassa (picador), armazenamento (silo), gerador auxiliar e flare de partida.

#### **6.1 – Limpeza e condicionamento do gás**

Ao sair do gaseificador, o gás produzido encontra-se carregado de material particulado e a alta temperatura, não estando adequado à admissão no motor de combustão interna. O *lavador ciclônico* de gás (Figura 10) é a combinação de uma torre de resfriamento e um separador ciclônico. O gás é admitido no sistema, onde é imposta uma rotação a ele. As partículas mais pesadas se deslocam para a periferia do corpo do lavador, enquanto que as menores e mais leves são coletadas pelas gotículas de água, a qual além do aspecto de limpeza ocasiona uma redução na temperatura do gás.

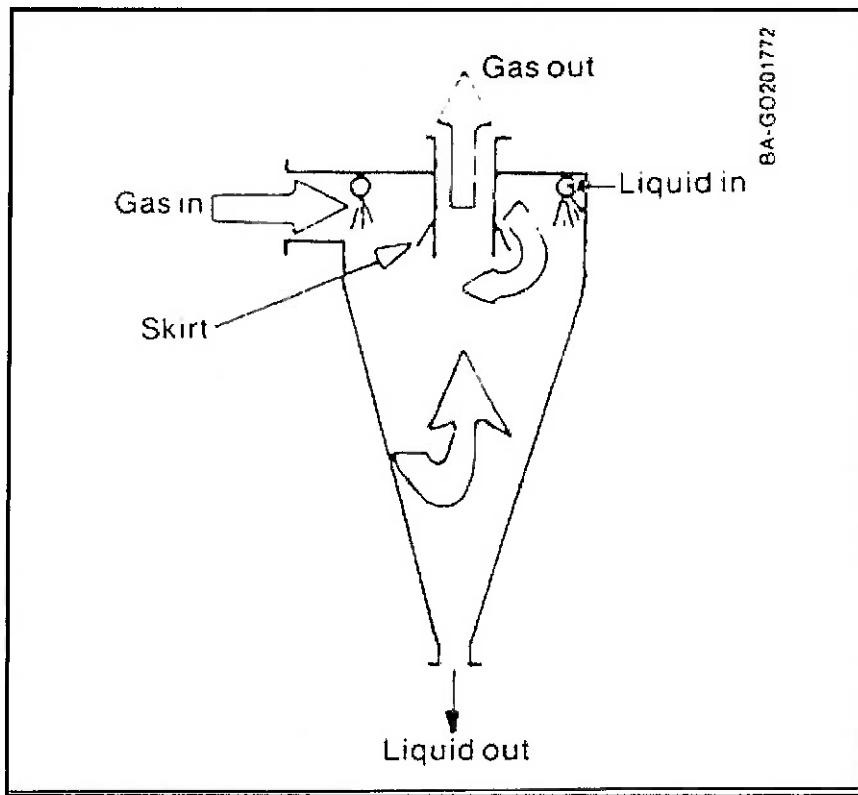


Figura 10: Lavador ciclônico

(Fonte: Reed, 1992)

## 6.2 – Alimentação de ar

Para suprir a quantidade de ar exigida, foi selecionado um ventilador do tipo radial centrífugo, o qual tem seu funcionamento atrelado ao gerador auxiliar quando o sistema está em início de funcionamento. Ao se atingir a condição de regime permanente, o gerador elétrico acoplado ao motor torna-se responsável pelo seu funcionamento.

## 6.3 – Preparação da biomassa

Como a quantidade de biomassa necessária para a demanda energética projetada é relativamente pequena frente à quantidade disponível, um picador de pequeno porte é incorporado ao sistema. Seu funcionamento é reduzido a poucas horas durante o dia, apenas para produzir material suficiente para uma campanha de operação.

#### **6.4 – Armazenamento**

Um silo estoca uma quantidade de cavaco pronto (seco) para utilização durante vários dias de funcionamento. Deste modo, reduz-se a utilização do picador e a operação do sistema de geração de energia torna-se mais constante. A armazenagem, bem como a alimentação do gaseificador será feita manualmente, com possibilidade de mecanização.

#### **6.5 – Gerador auxiliar**

Um gerador auxiliar 4 tempos a gasolina, com potência nominal de 2,3kW será utilizado para geração de energia elétrica durante a partida do sistema de gaseificação, permitindo o funcionamento dos sub-sistemas até a entrada do gaseificador em sua condição de regime estável.

#### **6.6 – Flare de partida**

No momento de início da gaseificação, os gases produzidos ainda não atingiram a composição ideal prevista no projeto, impedindo a alimentação do motor com este gás. Como o tempo necessário para entrada em regime estável é de aproximadamente 10 minutos, este gás será consumido por um flare que se utiliza de GLP, consumindo o gás inadequado sem despejá-lo no ambiente.

### **7 – Gerador elétrico**

Conhecendo-se a rotação de torque máximo do motor a gás e, portanto, sua faixa ótima de operação, é possível determinar qual gerador elétrico é o mais adequado a esta faixa de operação e qual atende à demanda energética projetada. O modelo selecionado é um gerador trifásico WEG modelo 200MI26, o qual apresenta as seguintes características:

| <b>Geradores Trifásicos Linha G</b>                           |                |
|---|----------------|
| (4 Pólos – Classe “H” – Fator de Potência 0.8 – Baixa Tensão) |                |
| Tensão  | 220 – 240V     |
| Freqüência  | 60Hz Trifásico |
| Rotação   | 1800 rpm       |
| Potência  | 105kVA / 84kW  |
| Temperatura Máxima de Operação                                | 125°C          |
| Massa   | 366kg          |

Tabela 6 - Dados técnicos do gerador elétrico

(Fonte: WEG)

## **8 – Instalação física**

Este item do projeto busca elaborar uma unidade de geração de energia compacta, de formato modular e de fácil transporte para os locais de utilização. Considerando a possibilidade de operar tanto com gás pobre como com GN, o gaseificador e os componentes para tratamento do gás formam uma parte do módulo, enquanto que a outra parte é formada pelo conjunto motor e gerador elétrico. Isto é feito de modo a permitir o transporte do sistema de gaseificação e tratamento do gás para uma outra localidade, no caso de este sistema vir a ser utilizado em áreas de prospecção de petróleo na região Amazônica. Assim, enquanto a jazida não é descoberta, o sistema se utiliza de biomassa para geração de energia, a qual é obtida a partir da derrubada da floresta para a abertura da clareira em que se executam os trabalhos de prospecção. Tão logo ocorra a descoberta, o gás natural associado passa a ser utilizado, pois o motor requer poucos ajustes durante a mudança de combustível.

O desenho de conjunto do sistema gerador, bem como o detalhamento parcial do gaseificador podem ser observados nos Anexos deste trabalho.

## **9 – Aspectos econômicos**

O sistema de geração de energia a partir de biomassa mostra-se como uma alternativa bastante viável para o fornecimento de energia elétrica. Comparando-se grupos geradores de potência nominal equivalente (100kW), observa-se que o valor total de um sistema de geração com gaseificador é 60% maior que um grupo gerador diesel devido, sobretudo à sua complexidade e maior número de equipamentos acoplados ao sistema, como pode ser observado na Tabela 7 a seguir:

| <b>Comparação Econômica Diesel / Gaseificador</b> |  |
|---|--|
| <b>Grupo Gerador Diesel</b>                       | <b>Sistema de Geração com Gaseificador</b> |
| Motor   | Motor                                      |
| Gerador trifásico                                 | Gerador trifásico                          |
| Bateria   | Bateria                                    |
| Quadro elétrico                                   | Quadro elétrico                            |
|   | Gaseificador                               |
|   | Lavador ciclônico                          |
|   | Picador                                    |
|   | Bomba de água                              |
|   | Ventilador                                 |
|   | Gerador auxiliar                           |
|   | Filtro                                     |
|   | Flare                                      |
| Potência nominal 100kW                            |  |
| <b>Total estimado: R\$ 25650,00</b>               | <b>Total estimado: R\$42150,00</b>         |

Tabela 7: Comparação entre os sistemas de geração de energia  
(Fonte: Fabricantes)

Para se demonstrar a viabilidade econômica do sistema de geração de energia a partir de biomassa, deve-se avaliar os custos gerais de aquisição do equipamento, de combustível e de manutenção, em termos energéticos

(R\$/kWh) e operacionais (R\$/h), durante o tempo de funcionamento de 2000 horas e confrontar valores tanto de biomassa, óleo diesel (Tabela 9) e eletricidade (Tabela 8), todos referentes à tarifação praticada na Região Norte do país.

### 9.1 – Custo de aquisição

O *custo de aquisição* (CA) é obtido analisando-se os valores fornecidos pela Tabela 7, referentes ao óleo diesel e à biomassa, ambos em termos de custo/energia e custo/tempo. Deste modo:

$$CA_1 = \frac{CEq}{Pot_{nom}.co.to}$$

$$CA_2 = \frac{CEq}{to}$$

onde:  
 CA<sub>1</sub> = custo de aquisição em termos energéticos [R\$/kWh]  
 CA<sub>2</sub> = custo de aquisição em termos de tempo [R\$/h]  
 CEq = custo do equipamento [R\$]  
 Pot<sub>nom</sub> = potência nominal [kW]  
 co = carga operacional [%]  
 to = tempo de operação [h]

Tem-se então:

$$CA_{diesel\_1} = \frac{R\$25650}{100kW \cdot 0,75 \cdot 2000h} = 0,171 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CA_{diesel\_2} = \frac{R\$25650}{2000h} = 12,825 \frac{R\$}{h}$$

$$CA_{bio\_1} = \frac{R\$42150}{100kW \cdot 0,75 \cdot 2000h} = 0,281 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CA_{bio\_2} = \frac{R\$42150}{2000h} = 21,075 \frac{R\$}{h}$$

## 9.2 – Custo de combustível

O *custo de combustível* (CC) segue os mesmo princípio do custo de aquisição, porém, neste caso, não será contabilizado o tempo de operação. Deste modo:

$$CC_1 = \frac{c_{comb} \cdot v_{comb}}{Pot_{nom} \cdot co}$$

$$CC_2 = c_{comb} \cdot v_{comb}$$

onde:      CC<sub>1</sub> = custo de combustível em termos energéticos [R\$/kWh]

CC<sub>2</sub> = custo de combustível em termos de tempo [R\$/h]

c<sub>comb</sub> = consumo de combustível [l/h] ou [ton/h]

v<sub>comb</sub> = valor do combustível [R\$/l] ou [R\$/ton]

Pot<sub>nom</sub> = potência nominal [kW]

co = carga operacional [%]

Tem-se então:

$$CC_{diesel\_1} = \frac{20l/h \cdot 1,449 R\$/l}{100kW \cdot 0,75} = 0,386 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CC_{diesel\_2} = 20 \frac{l}{h} \cdot 1,449 \frac{R\$}{l} = 28,98 \frac{R\$}{h}$$

$$CC_{bio\_1} = \frac{0,149 ton/h \cdot 50 R\%$/ton}{100kW \cdot 0,75} = 0,099 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CC_{bio\_2} = 0,149 \frac{ton}{h} \cdot 50 \frac{R\$}{ton} = 7,45 \frac{R\$}{h}$$

### 9.3 – Custo de manutenção

O custo de manutenção (CM) é avaliado segundo o intervalo de manutenção do motor recomendado pelo fabricante, que tanto para o motor diesel quanto para o motor a gás é de 200 horas. Para o motor diesel, o custo de manutenção envolve mão-de-obra e troca de óleo lubrificante. Para o motor a gás, o custo de manutenção envolve mão-de-obra, troca de óleo lubrificante e substituição das velas de ignição. Deste modo:

$$CM_1 = \frac{C_{manut}}{Pot_{nom}.co.I_{manut}}$$

$$CM_2 = \frac{C_{manut}}{I_{manut}}$$

onde:  $CM_1$  = custo de manutenção em termos energéticos [R\$/kWh]

$CM_2$  = custo de manutenção em termos de tempo [R\$/h]

$C_{manut}$  = valor de manutenção [R\$]

$I_{manut}$  = intervalo de manutenção recomendado para o motor [h]

$Pot_{nom}$  = potência nominal [kW]

$co$  = carga operacional [%]

Tem-se então:

$$CM_{diesel\_1} = \frac{R\$60}{100kW \cdot 0,75 \cdot 200h} = 0,004 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CM_{diesel\_2} = \frac{R\$60}{200h} = 0,30 \frac{R\$}{h}$$

$$CM_{bio\_1} = \frac{R\$90}{100kW \cdot 0,75 \cdot 200h} = 0,006 \frac{R\$}{kWh}$$

$$CM_{bio\_2} = \frac{R\$90}{200h} = 0,45 \frac{R\$}{h}$$

#### 9.4 – Custo total

O *custo total* (CT) é a soma de todos os componentes do custo, relativos à biomassa e ao diesel, cada um deles com seus respectivos valores de custo/energia e custo/tempo. Deste modo:

$$CT_{diesel\_1} = CA_{diesel\_1} + CC_{diesel\_1} + CM_{diesel\_1} = 0,561 \text{ R\$/ kWh} \quad (a)$$

$$CT_{diesel\_2} = CA_{diesel\_2} + CC_{diesel\_2} + CM_{diesel\_2} = 42,105 \text{ R\$/ h} \quad (b)$$

$$CT_{bio\_1} = CA_{bio\_1} + CC_{bio\_1} + CM_{bio\_1} = 0,386 \text{ R\$/ kWh} \quad (c)$$

$$CT_{bio\_2} = CA_{bio\_2} + CC_{bio\_2} + CM_{bio\_2} = 28,975 \text{ R\$/ h} \quad (d)$$

Comparando-se os valores de (a) e (c) com os valores da Tabela 8 para consumidores industriais (68,01 R\$/MWh ou 0,068 R\$/kWh) verifica-se que o custo total para o uso de biomassa é efetivamente menor que o uso de diesel como forma de geração de energia, uma vez que a energia elétrica para consumidores industriais é subsidiada na Região Norte, segundo a política de desenvolvimento adotada para a mesma. A partir dos valores fornecidos por (b) e (d), pode-se demonstrar a evolução do custo geral de cada sistema, durante um período de 2000 horas, observada no gráfico da Figura 11.

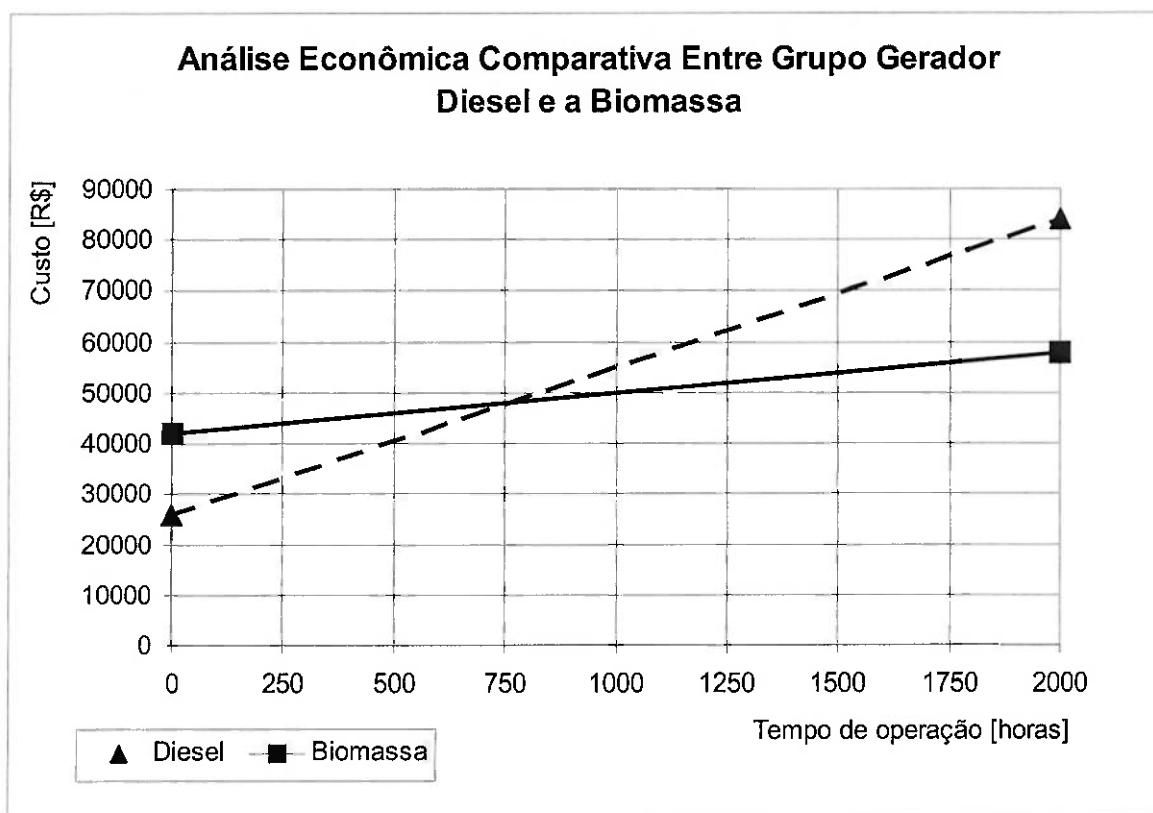


Figura 11: Gráfico comparativo entre os custos dos sistemas geradores a diesel e biomassa

| Classe de Consumo  | Norte         | Nordeste | Sudeste | Sul    | Centro-Oeste | Brasil |
|--------------------|---------------|----------|---------|--------|--------------|--------|
| Residencial        | 188,30        | 172,55   | 236,42  | 219,39 | 207,20       | 219,24 |
| <b>Industrial</b>  | <b>68,01</b>  | 79,24    | 110,43  | 118,63 | 109,52       | 103,23 |
| Comercial          | 171,71        | 169,38   | 205,70  | 192,91 | 194,09       | 196,11 |
| Rural              | <b>131,91</b> | 101,94   | 123,46  | 118,44 | 118,20       | 117,18 |
| Poder Público      | 178,10        | 179,76   | 202,35  | 200,54 | 198,44       | 194,74 |
| Iluminação Pública | 112,35        | 105,05   | 125,78  | 116,60 | 112,90       | 118,23 |
| Serviço Público    | 117,52        | 101,62   | 114,74  | 125,78 | 113,31       | 113,67 |
| Consumo Próprio    | 183,73        | 170,41   | 97,67   | 162,56 | 205,83       | 121,24 |
| Tarifa Média Total | 119,52        | 162,77   | 157,43  | 120,49 | 165,18       | 152,26 |

Tabela 8: Tarifas médias por classe de consumo – regional e Brasil – R\$/MWh

Tarifas referentes ao ano de 2002 – Janeiro a Novembro

(Fonte: ANEEL)

| Região       | n° de postos<br>pesquisados | preço ao consumidor |               |              |              |              | Dados Brasil |               |              | preço distribuidora |               |              |
|--------------|-----------------------------|---------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------------|---------------|--------------|
|              |                             | preço médio         | desvio padrão | preço mínimo | preço máximo | margin média | preço médio  | desvio padrão | preço mínimo | preço médio         | desvio padrão | preço máximo |
| Centro Oeste | 829                         | 1,434               | 0,098         | 1,200        | 1,850        | 0,197        | 1,238        | 0,068         | 0,918        | 1,495               |               |              |
| Nordeste     | 1654                        | 1,385               | 0,092         | 1,138        | 1,790        | 0,187        | 1,198        | 0,084         | 0,823        | 1,465               |               |              |
| Monte        | 507                         | <b>1,449</b>        | 0,109         | 1,150        | 1,940        | 0,233        | <b>1,216</b> | 0,062         | 0,882        | 1,490               |               |              |
| Sudeste      | 5394                        | 1,373               | 0,080         | 0,999        | 1,779        | 0,207        | 1,166        | 0,069         | 0,819        | 1,419               |               |              |
| Sul          | 1626                        | 1,419               | 0,082         | 1,159        | 1,769        | 0,217        | 1,203        | 0,065         | 0,898        | 1,451               |               |              |

Tabela 9: Síntese dos preços praticados do óleo diesel (R\$/l)

Dezembro de 2002

(Fonte: ANP)

## **10 – Conclusões e considerações finais**

Levando-se em consideração todos os aspectos descritos neste trabalho, sejam de caráter técnico, econômico ou ambiental, fica clara a diferenciação e consequente vantagem que o *sistema de geração de energia através de biomassa* leva sobre os sistemas que se utilizam de combustíveis fósseis, quando referem-se a pequenas potências instaladas.

Os principais fatores constatados para a viabilidade da implementação de sistemas de geração de energia através de biomassa são:

- preço competitivo – conforme analisado, os custos gerais envolvidos são efetivamente menores quando comparados aos referentes ao óleo diesel;
- oferta regular – há abundância de combustível nas localidades a que se destina este sistema, sem a necessidade de desmatamento de grandes áreas de floresta;
- tecnologia comercialmente disponível – construtivamente simples, o sistema permite fácil operação;
- sistema flexível – operando junto a unidades de prospecção de petróleo pode eventualmente ser substituído por Gás Natural associado e o conjunto do gaseificador pode ser levado a outra localidade.

Entretanto, apesar se sua comprovada viabilidade técnica e econômica, deve-se ressaltar que sua operação é mais complexa que um sistema gerador a diesel, o que implica na necessidade de políticas ambientais favoráveis à substituição (ou complementação) dos sistemas convencionais. Além disto, o sistema depende de um gerador auxiliar que utiliza combustível fóssil no momento de partida.

## Referências Bibliográficas

- [1] Reed, T.; *Handbook of Biomass Gasifier Engine Systems*. The Biomass Energy Foundation, 1992.
- [2] Reed, T. e Bryant, B.; *Densified Biomass: a New Form of Solid Fuel*. The Biomass Energy Foundation, 2000.
- [3] IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; *Relatório Técnico nº17135, Unidade de geração de energia elétrica a partir de um grupo motor-gerador acoplado a um gasogênio de resíduos florestais*, 1982.
- [4] IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; *Relatório Técnico nº18874, Medidas de vazão, composição, pressão e temperatura de gás de gasogênio*, 1983.
- [5] Silva, M. V. M.; *Estrutura de Planejamento Energético para Pequenas Comunidades da Amazônia*, dissertação de mestrado, IEE - Instituto de Eletrotécnica e Energia, 1997.
- [6] Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., Borgnakke, C.; *Fundamentos da Termodinâmica*, Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1998.
- [7] Incropera, F. P. e DeWitt, D. P.; *Fundamentos da Transferência de Calor e Massa*, Ed. LTC S.A., Rio de Janeiro, 1992.
- [8] Mukunda, H. S., Paul, P. J., Sridhar, G.; *Biomass Derived Producer Gas as a Reciprocating Engine Fuel – na Experimental Analysis*, Indian Institute of Science, Índia, 2000.
- [9] IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; *Tópicos Sobre Gaseificação e Gaseificadores*, São Paulo, 1981.

- [10] Ushima, A. H.; *Modelagem e Simulação de Pirólise e Secagem de Biomassa em um Gaseificador de Leito Movente Contracorrente*, dissertação de mestrado, UNICAMP, 1996.
- [11] Dogru, M., Howarth, C. R., Akay, G., Keskinler, B., Malik, A. A.; *Gasification of Hazelnut Shells in a Downdraft Gasifier*, University of Newcastle, Reino Unido, 2002.
- [12] Zainal, Z. A., Rifau, A., Quadir, G. A., Seetharamu, K. N.; *Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier*, University Sains Malaysia, Malásia, 2002.
- [13] Zainal, Z. A., Rifau, A., Lean, C. H., Seetharamu, K. N.; *Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier Using Equilibrium Modeling for Different Biomass Materials*, University Sains Malaysia, Malásia, 2000.
- [14] Bhattacharya, S. C., Siddique, M. R., Hoang-Luong, P.; *A Study on Wood Gasification for Low-tar Gas Production*, Asian Institute of Technology, Tailândia, 1998.
- [15] [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)
- [16] [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)
- [17] [www.cenbio.org.br](http://www.cenbio.org.br)
- [18] [www.mercedes-benz.com.br](http://www.mercedes-benz.com.br)
- [19] [www.weg.com.br](http://www.weg.com.br)
- [20] [www.bernauer.com.br](http://www.bernauer.com.br)
- [21] [www.ksb.com.br](http://www.ksb.com.br)

[22] [www.trapp.com.br](http://www.trapp.com.br)

[23] [www.honda.com.br](http://www.honda.com.br)

## **Anexos**

**Anexo I**

**Curva de torque do motor Mercedes-Benz**

# DAIMLERCHRYSLER

## Curva de desempenho do motor

Motor Mercedes-Benz OM 366LAG

EAT3-Dados Técnicos

código do certificado

**OM 366LAG.II/21**

número da construção

**BM: 376.919**

nº da prescrição

obs: n° de Metano: 76 (poder calorífico específico: 48 MJ/Kg)

Potência máx. líquida

**170 kW / 231 cv @ 2600 l/min**

8 cil. em linha turboalimentado

Torque máximo

**720 Nm / 73mkgf @ 1560 l/min**

$\varnothing 97,5 \times 133 \text{ mm} \Rightarrow 6968 \text{ cm}^3$

Consumo especif. min.

**190 g/kWh / 140 g/cv@ 1370 l/min**

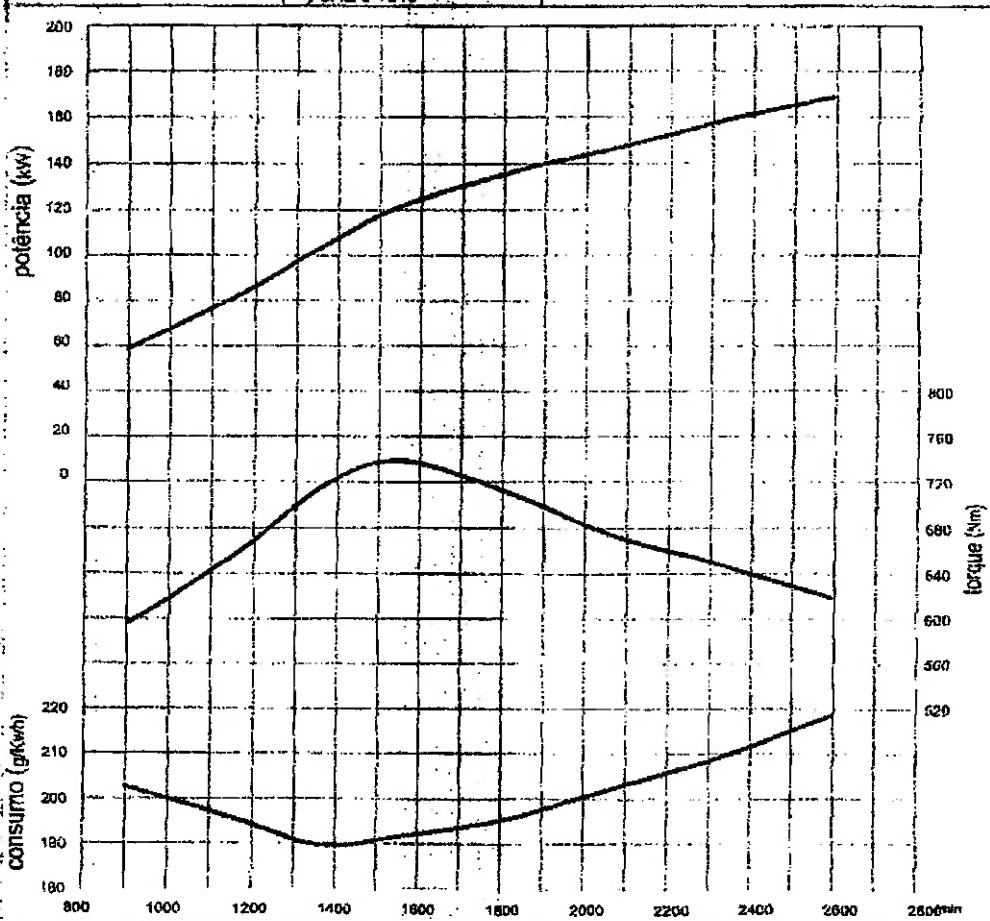
taxa de compres.: 12:1

Valores reduzidos conforme:

(X) ISO 1585

( ) ECE R 24(03)

( ) SAE J 1349



**Anexo II**

**Desenho do gaseificador downdraft**