

IVANILDO DA SILVA DOS SANTOS

**REATOR DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA EM FLUXO  
CONTRACORRENTE.**

Tese apresentada à  
**Universidade Federal de Viçosa**,  
como parte das exigências do Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, para obtenção do título de  
***“Magister Scientiae”***.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2003

IVANILDO DA SILVA DOS SANTOS

**REATOR DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA EM FLUXO  
CONTRACORRENTE.**

Tese apresentada à  
**Universidade Federal de Viçosa**,  
como parte das exigências do Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, para obtenção do título de  
***“Magister Scientiae”***.

APROVADA em 29 de agosto de 2003.

---

Prof. Juarez de Sousa e Silva  
(Conselheiro )

---

Prof. Dr. Roberto Precci Lopes

---

Dr. Sérgio M. Lopes Donzeles

---

Dr. José Cardoso Sobrinho

---

Prof. Jadir Nogueira da Silva  
(Orientador)

Ao meu Pai, pelo exemplo de persistência e luta,  
A minha Mãe, pelo amor e os ensinamentos de humildade,  
Aos meus irmãos (ãs), que compartilharam meus ideais e os  
alimentaram,

DEDICO.

A minha esposa Fernanda,  
Aos meus Sobrinhos (as),  
OFEREÇO.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela bênção, saúde e ânimo para superar os momentos difíceis.

Aos amigos do CEFET-URA, que não mediram esforços e assumiram atividades extras, demonstrando solidariedade e compreensão. Com estes atos, concretizaram minha liberação e ajudaram-me a vencer esta batalha.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Uberaba, CEFET-URA, por ter efetivado minha liberação para realização do curso.

À Universidade Federal de Viçosa / Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade e condições oferecidas para realização e conclusão do curso.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela atenção dispensada, mesmo antes de ingressar-me no curso, pela orientação, confiança, ajuda na instalação de moradia, amizade e pelos ensinamentos. Obrigado Professor foi mais que um Orientador.

Aos professores conselheiros, Adílio Flauzino de Lacerda filho, Delly Oliveira Filho e Juarez de Sousa e Silva, pelas críticas e sugestões que só somaram para o sucesso deste trabalho.

A todos meus familiares, pelo incentivo e torcida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela bolsa de estudo.

Aos colegas da Pós-graduação do curso de Engenharia Agrícola - UFV, que não mediram esforços nos momentos em que os solicitei.

Aos funcionários do Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, Sr Antônio “Inhame”, Silas e José Raimundo, pela colaboração na montagem do experimento.

Ao pesquisador Sérgio M. Lopes Donzeles pelas sugestões.

## **BIOGRAFIA**

Ivanildo da Silva dos Santos, o quinto, dos nove filhos de Valdemar Dantas dos Santos e Iracema Ana da Silva dos Santos, nasceu em 03 de janeiro de 1971 em Vale Rico, estado de Mato Grosso.

Nesta mesma cidade, também nasceu sua vida acadêmica, a qual, começou na Escola Estadual de 1º Grau “Pedro Ferreira”, onde concluiu o ensino fundamental em 1987 e foi professor substituto durante o ano de 1991.

Em 1990 conclui o ensino médio e o curso Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Cuiabá.

Na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em 1996, concluiu o curso de Licenciatura em Física.

Especializou-se em “O Processo Ensino Aprendizagem”, na área de Educação, pela Universidade Claretianas de Batatais, em dezembro 1996.

Desde maio de 1996, faz parte do quadro efetivo de professores do Centro Federal e Ensino Tecnológico de Uberaba, ocupando a cadeira de professor de Física.

Ingressou-se no curso de mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais em abril de 2002, concluindo-o em agosto de 2003.

## CONTEÚDO

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| RESUMO.....                                       | viii |
| ABSTRACT .....                                    | x    |
| 1. INTRODUÇÃO .....                               | 1    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                    | 5    |
| 2.1. Potencial energético da biomassa.....        | 5    |
| 2.2. Combustíveis.....                            | 6    |
| 2.2.1. Temperaturas de ignição .....              | 7    |
| 2.2.2. Poder calorífico.....                      | 8    |
| 2.2.3. Composição do combustível.....             | 9    |
| 2.2.4. Lenha.....                                 | 10   |
| 2.3. Gaseificação.....                            | 11   |
| 2.3.1. Classificação dos gaseificadores.....      | 13   |
| 2.3.2. Fundamentos teóricos da gaseificação.....  | 16   |
| 2.3.3. Ar teórico ou estequiométrico.....         | 18   |
| 2.3.4. Fator de Ar .....                          | 20   |
| 2.4. Balanço de massa.....                        | 21   |
| 2.5. Balanço de energia aplicado ao sistema ..... | 22   |
| 2.6. Eficiência térmica.....                      | 25   |
| 2.7. Análise de custo.....                        | 27   |
| 2.7.1. Custo fixo total (CFT).....                | 27   |
| 2.7.2. Custo variável total.(CVT) .....           | 27   |
| 2.7.3. Custo total de aquecimento (Ctotal) .....  | 27   |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.4. Custo total médio.....                                                                             | 28 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                | 29 |
| 3.1. Dimensionamento do reator de gaseificação de biomassa e<br>câmara de combustão.....                  | 29 |
| 3.1.1. Construção do reator.....                                                                          | 30 |
| 3.1.2. Construção da câmara de combustão dos gases.....                                                   | 34 |
| 3.1.3. Ventilador.....                                                                                    | 37 |
| 3.1.4. Funcionamento do reator de gaseificação-combustão para<br>aquecimento direto do ar.....            | 37 |
| 3.2. Instrumentação.....                                                                                  | 39 |
| 3.2.1. Sensores de temperatura.....                                                                       | 39 |
| 3.2.2. Velocidades e vazões mássicas do ar primário e do ar de<br>secagem.....                            | 42 |
| 3.2.3. Umidade relativa do ar.....                                                                        | 43 |
| 3.3. Características do combustível.....                                                                  | 44 |
| 3.3.1. Medida do poder calorífico.....                                                                    | 45 |
| 3.3.2. Medida do teor de água do combustível.....                                                         | 45 |
| 3.3.3. Massa específica da lenha empilhada .....                                                          | 45 |
| 3.3.4. Composição elementar.....                                                                          | 45 |
| 3.4. Parâmetros relativos à gaseificação.....                                                             | 45 |
| 3.4.1. Cálculo da razão de equivalência.....                                                              | 45 |
| 3.4.2. Cálculo da eficiência térmica.....                                                                 | 46 |
| 3.5. Custos fixos e variáveis analisados na operação do sistema.....                                      | 49 |
| 3.5.1. Depreciação anual.....                                                                             | 49 |
| 3.5.2. Custo de oportunidade.....                                                                         | 49 |
| 3.5.3. Custo de conservação.....                                                                          | 50 |
| 3.5.4. Custo de combustível.....                                                                          | 50 |
| 3.5.5. Custo de energia elétrica.....                                                                     | 51 |
| 3.5.6. Custo de mão-de-obra.....                                                                          | 51 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                            | 52 |
| 4.1. Desempenho do sistema para aquecimento direto do ar.....                                             | 52 |
| 4.1.1. Efeitos das variações da área de admissão do ar de<br>refrigeração sobre o desempenho do reator de |    |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| gaseificação-combustão.....                                                          | 53 |
| 4.2. Características do combustível.....                                             | 54 |
| 4.2.1. Massa específica da lenha empilhada.....                                      | 54 |
| 4.2.2. Poder calorífico superior.....                                                | 54 |
| 4.2.3. Poder calorífico inferior.....                                                | 55 |
| 4.3. Temperaturas nos pontos do sistema .....                                        | 55 |
| 4.4. Parâmetros da avaliação de custo do sistema de gaseificação-<br>combustão ..... | 56 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES.....                                                          | 59 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                                   | 61 |
| APÊNDICES.....                                                                       | 65 |



## RESUMO

SANTOS, Ivanildo da Silva dos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2003. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Conselheiros: Juarez de Sousa e Silva, Delly de Oliveira Filho e Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

Na busca de dispositivos que convertam a energia da biomassa em energia térmica limpa, eficientemente, um sistema de gaseificação de fluxo contracorrente com combustor do gás produzido foi desenvolvido e avaliado para aquecimento direto do ar de secagem de produtos agrícolas que requerem ar quente, livre de fumaça e partículas. O sistema foi composto por um reator de gaseificação e uma câmara de combustão do gás produzido, ambos com trocadores de calor, cujo objetivo era aproveitar o calor dissipado e evitar acidentes por queimaduras. Visando diminuir danos térmicos, minimizar custos, facilitar a manutenção e simplificar a construção, partes do sistema foram construídas de alvenaria. O reator de gaseificação-combustão caracterizou-se positivamente por responder rapidamente ao reabastecimento, gaseificação contínua e regular do combustível na câmara de gaseificação, combustão ininterrupta do gás, manutenção da temperatura do ar aquecido e simplicidade nas operações do sistema. O sistema foi avaliado usando lenha de eucalipto como combustível e, também, pela variação das aberturas de 0,072, 0,092, 0,12 e 0,14 m<sup>2</sup>, para admissão de ar ambiente na câmara de combustão (trocador de calor 2). As vazões

mássicas de ar quente variaram de 1,04 a 1,34 kg s<sup>-1</sup>. e as temperaturas médias ficaram entre 50 e 73 °C. Na situação tomada como ideal para o funcionamento, a eficiência do sistema na primeira carga de combustível foi de 56 % no aquecimento de 1,34 kg s<sup>-1</sup> de ar, com temperatura ambiente de 15 °C e UR de 64,7 % para 54 °C e consumo de 19,8 kg.h<sup>-1</sup> de lenha. Na recarga, a eficiência foi de 71 % no aquecimento de 1,29 kg s<sup>-1</sup> de ar, com temperatura ambiente de 23 °C e UR de 39,7 % para 63 °C, com consumo de 15,8 kg.h<sup>-1</sup> de lenha. O dispositivo atendeu aos propósitos esperados, disponibilizando ar quente com as características requeridas pelos produtos agrícolas e com boa eficiência.

## ABSTRACT

SANTOS, Ivanildo da Silva dos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August of 2003. **Updraft biomass gasification reactor**. Advisor: Jadir Nogueira da Silva. Committee members: Juarez de Sousa e Silva, Delly de Oliveira Filho and Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

In the search of devices that transform the energy of biomass into clean thermal energy, an updraft gasification system with a combustor of the produced gas, was developed and evaluated for direct heating of the drying air of agricultural products. This process requires clean hot air, free from smoke and particulates. The system was composed by a gasification reactor and a combustion chamber of the produced gas, both with heat exchange, whose objective was to take advantage of the dissipated heat and also to avoid burning accidents. Seeking to decrease thermal damages, to minimize costs, to facilitate the maintenance and to simplify the construction, parts of the system were built of bricks. The gasification-combustion reactor was characterized positively by answering quickly to refills, continuous and regular gasification of the fuel in the reactors, uninterrupted combustion of the gas, maintenance of the temperature of the warm air and simplicity in the operations. The system were evaluated using eucalyptus firewood as fuel and with openings of 0,072, 0,092, 0,12 and 0,14 m<sup>2</sup> in the admission of ambient air in the combustion camera (heat exchange 2). The mass of heated air varied from 1,04 to 1,34 kg s<sup>-1</sup>, and its average temperatures from 50 to

73°C. In the situation taking as ideal for the operation, the efficiency of the system, for first fuel load, was of 56%, heating  $1,34 \text{ kg s}^{-1}$  of air with ambient temperature from 15 °C and RH 64,7% up to 54 °C, with consumption of 19,8  $\text{kg.h}^{-1}$  of firewood. Recharging the unit its efficiency raised up to 71%, heating  $1,29 \text{ kg s}^{-1}$  of air from ambient temperature of 23 °C and RH 39,7% to 63 °C, consuming 15,8  $\text{kg.h}^{-1}$  of firewood. The device achieves expected performance, providing hot air with desired characteristics required for drying agricultural products with good efficiency.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o mundo moderno vem buscando um sistema energético descentralizado, baseado cada vez mais em recursos renováveis e adotando estratégias que incorporem investimentos na obtenção dos mesmos serviços de iluminação, cozimento, aquecimento, transporte e industrialização com menor necessidade de energia (**eficiência energética**). Os avanços na eficiência do uso energético com melhores eletrodomésticos, prédios, automóveis e processos industriais já registraram reduções no volume de energia utilizada por cada unidade do produto econômico.

Mesmo com os avanços tecnológicos, as limitações encontradas no uso das chamadas fontes convencionais de energia e a preocupação com a poluição, de modo geral, têm levado à realização de pesquisas referentes à conversão da biomassa em fonte de energia para satisfazer, ou auxiliar, a demanda energética de muitas comunidades. Ao contrário da energia de derivados do petróleo, a biomassa, quando utilizada com replantio e de maneira sustentável, é renovável e não contribui para o acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, porque o CO<sub>2</sub> liberado durante a sua conversão em energia é absorvido novamente no processo de fotossíntese.

Os combustíveis gerados a partir da biomassa podem ser sólidos, líquidos e gasosos e sua conversão energética pode ser realizada por meio de diferentes processos: combustão, gaseificação, pirólise, liquefação, fermentação e biodigestão.

O Brasil é um grande produtor agrícola, gerando uma grande quantidade de resíduos. Estes resíduos podem e, muitas vezes, são utilizados como fonte energética. Em virtude de não existirem tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento dos resíduos de certas culturas, grandes potenciais são deixados de lado.

Atualmente, no meio rural, a queima de biomassa é feita em fornalhas, sendo esta a principal forma de transformação de sua energia para o aquecimento do ar utilizado nas operações de secagem. Durante este processo, os produtos agrícolas requerem ar quente limpo, livre de partículas, fumaças e de outros contaminantes que possam impregnar odores, gostos indesejáveis no produto e causar sua desvalorização.

Nos últimos anos, os aumentos consideráveis na produção agrícola brasileira colocaram o Brasil como um dos líderes na produção mundial de grãos e com expressivas participações no total produzido. Infelizmente, mesmo sendo um dos maiores produtores mundiais, o País sofre grandes perdas durante a pós-colheita, tornando-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que comprovadamente atuem no sentido de proporcionar a conservação pós-colheita, bem como a qualidade de muitos produtos. Dentre as tecnologias, ressaltam-se as de secagem, por ser esta o processo comercial mais utilizado para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas, sendo, no entanto, a etapa que mais consome energia no processo de produção agrícola (LOPES et al., 2000), podendo atingir 60% no pré-processamento de grãos. Por isso, no desenvolvimento de sistemas de aquecimento de ar para secagem de produtos agrícolas, devem-se buscar aqueles em que se racionalize o uso de combustível e de energia elétrica.

A eficiência energética média das fornalhas que queimam biomassa com trocador de calor para secadores é da ordem de 30 a 54% (ROSSI e ROA, 1980; SAGLIETTI, 1991; VALARELLI, 1991; OLIVEIRA, 1996). Esta baixa eficiência energética aumenta o consumo de biomassa e de mão-de-obra. O uso da queima direta ocasiona economia de energia, mas pode provocar contaminação do produto com partículas e fumaça, reduzindo sua qualidade. A queima do gás liquefeito de petróleo-GLP resulta em energia limpa, mas seu custo é cerca de três vezes superior ao da lenha de

eucalipto, usada em fornalhas com trocadores de calor (CARDOSO SOBRINHO et al, 2000). Por estas e outras razões, as tecnologias que utilizam fontes energéticas provenientes da biomassa, em especial a da lenha, constituem a opção adequada para produtores e agroindústrias.

Diante destas preocupações e na busca de alternativas que satisfaçam tais anseios, vem à tona a tecnologia da gaseificação, que é a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em combustível gasoso, através de sua oxidação parcial em temperaturas elevadas, obtida em reatores denominados gaseificadores.

Os gases produzidos têm várias aplicações práticas, tais como uso em motores de combustão interna, em turbinas para geração de potência ou de energia elétrica e também para a geração direta de calor.

O uso da gaseificação-combustão para aquecimento do ar de secagem de grãos tem sido pouco pesquisado. Acredita-se que as principais razões para este fato se devam ao desconhecimento das vantagens deste sistema para o aquecimento do ar utilizado na secagem de produtos agrícolas e a indisponibilidade de tecnologias que contemplem sistemas de operações simples, de baixo custo e funcionamento versátil.

Para agregar valores qualitativos aos produtos agrícolas, diminuir os custos com a secagem e sabendo que a utilização de reatores de gaseificação de fluxo contracorrente com posterior queima dos gases combustíveis em uma câmara de combustão, para aquecimento do ar de secagem de produtos agrícolas, é escassa, constata-se a necessidade de desenvolver e disseminar um dispositivo de gaseificação que abranja tais anseios.

Neste contexto, o trabalho teve os seguintes objetivos:

- construir e testar um reator de gaseificação de biomassas de fluxo contracorrente com câmara de combustão para posterior queima dos gases produzidos;
- desenvolver o sistema com dispositivos que permitam aproveitar o calor residual gerado;
- verificar a ocorrência de variação na eficiência energética, operando o sistema com diferentes condições de entrada de ar de refrigeração da câmara de combustão;

- executar uma análise dos custos de implantação e operação do processo de gaseificação com câmara de combustão, visando futuras comparações com dispositivos convencionais de aquecimento do ar de secagem.



## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Potencial energético da biomassa.**

A biomassa é definida como toda matéria orgânica de origem animal e vegetal. A de origem vegetal é formada pelo processo de fotossíntese, o qual acontece na presença da luz solar. Pode-se dizer que a biomassa é uma das formas de armazenamento da fração de energia solar incidente na superfície terrestre, na forma de ligações moleculares orgânicas. Esta energia é liberada por processos biológicos e termoquímicos (ZANIN e SOUZA, 2000). Por isso, é uma fonte renovável de energia tão antiga quanto a própria civilização e sua produção contínua tem sustentado a humanidade, fornecendo-lhe alimentos, fertilizantes, madeiras, combustíveis, fibras e produtos químicos.

Segundo o Boletim do Balanço Energético Nacional (2002), no Brasil a biomassa representou 16,8% do uso de energia. A lenha, que já representou 13,1% do total de energia no país em 1985, hoje representa 5,9%.

Utilizando 12,6% da lenha consumida no país para fins energéticos, o setor agropecuário supriu 22,4% da energia consumida.

Embora o Brasil se apresente com este nível de utilização de biomassa como fonte energética, se faz necessário a evolução dos processos de conversão energética tradicional para sistemas altamente eficientes, levando a vetores energéticos modernos (combustíveis líquidos,

gasosos e eletricidade) e que trará mudança importante no perfil de utilização e nos volumes de biomassa para energia, nos próximos anos. Novas bases para o desenvolvimento rural e emprego, assim como as limitações globais ao crescimento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico, serão fatores para aumento do uso da biomassa. O clima, extensão e disponibilidade de mão-de-obra são características que o Brasil possui para a produção de biomassa, constatando que a utilização da mesma como fonte energética é uma alternativa altamente compatível com a realidade brasileira, sendo o meio rural o local por excelência para produção, conversão e utilização desta matéria-prima como fonte de energia para os mais variados fins, em especial como combustível para aquecimento do ar, visando a secagem de produtos agrícolas.

## **2.2 Combustíveis.**

Combustíveis são substâncias ricas em carbono e hidrogênio que, em condições favoráveis de temperatura e pressão, são capazes de, ao reagirem com o oxigênio do ar, liberar energia na forma de luz e calor, como consequência de reações químicas com o carbono, hidrogênio e enxofre. Os combustíveis são caracterizados pelas suas propriedades físico-químicas e são encontrados na forma natural ou artificial.

Os combustíveis utilizados como fonte de energia para aquecimento de ar e também para outros fins, compreendem dois grupos: o dos combustíveis fósseis e o da biomassa. Os combustíveis do primeiro grupo são fontes de energia esgotáveis, cujos preços estão sujeitos às oscilações do mercado internacional; os do segundo grupo são provenientes de fontes renováveis, as quais podem ser encontradas no próprio local de utilização. Diferentemente dos combustíveis fósseis, a biomassa, por não conter praticamente enxofre, permite produzir uma mistura gasosa, sem propriedades corrosivas e propícias à secagem de produtos agrícolas.

Uma característica indesejável dos combustíveis é o teor de cinzas, resíduo sólido resultante da combustão. Este componente é prejudicial por obstruir o fluxo de ar comburente nas grelhas, aumentar o teor de carbono não convertido nas cinzas, fundir-se em temperaturas elevadas, onerar o

custo de transporte do combustível, atacar quimicamente refratários e aumentar as perdas referentes à entalpia “sensível” da própria cinza arrastada para fora do equipamento (CAMARGO, 1990; OCÓN, 1967). Como a combustão se processa a temperatura elevada, é importante conhecer o comportamento das cinzas para evitar os inconvenientes mencionados.

Na escolha do combustível a ser utilizado, devem-se considerar as vantagens e desvantagens de cada um e analisar questões como a quantidade de calor produzido, custo, segurança, condições de armazenamento e transporte, emissão de poluentes, disponibilidade de combustível, mão-de-obra para manipulação, efeitos sobre a qualidade do produto, facilidade do controle da combustão, equipamentos necessários (queimador, tipo de conversor), etc.

### **2.2.1 Temperaturas de ignição**

Em uma câmara de combustão é importante assegurar a queima eficiente do combustível e o fluxo regular dos gases, por isso, deve-se propiciar uma temperatura mínima capaz de permitir que a combustão se inicie e se mantenha. Esta temperatura, denominada temperatura de ignição, é definida como a temperatura na qual o calor gerado durante a reação é maior do que o calor perdido para o ambiente, permitindo que a combustão prossiga. As temperaturas de ignição de alguns combustíveis ao nível do mar, na presença de ar e à pressão atmosférica, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Temperatura de ignição de alguns combustíveis

| Combustível         | Temperatura de ignição, °C |
|---------------------|----------------------------|
| Metano              | 640 - 760                  |
| Hidrogênio          | 575 - 610                  |
| Monóxido de Carbono | 640 - 670                  |
| Madeira             | 300                        |

Fonte: ANDRADE et al. (1984) e LIMA (1974).

### 2.2.2 Poder calorífico

A composição química dos combustíveis determina o poder calorífico, a principal característica dos combustíveis, e refere-se à quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume, durante a combustão completa.

Quando, na medição do poder calorífico, considera-se o calor latente de condensação para todo o vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio presente no combustível, tem-se o PCS (poder calorífico superior), mas quando este não é considerado tem-se o PCI (poder calorífico inferior) do combustível. Como no ambiente o vapor d'água não se condensa e todo produto resultante da combustão do hidrogênio permanece em estado de vapor, na prática adota-se, nos cálculos, o poder calorífico inferior (OCÓN, 1967; LIMA, 1974; LORA et al., 1997).

Um dos parâmetros de maior influência sobre o poder calorífico dos combustíveis é o teor de água. A umidade aumenta a energia necessária à pré-ignição e diminui o calor liberado pela combustão. Devido a isto, nos cálculos referentes à avaliação da eficiência térmica, com base no consumo de combustível úmido, o poder calorífico inferior é de maior aplicação, sendo determinado analiticamente a partir da equação um, citada por GOMES et al.(1985), subtraindo do PCS a entalpia de vaporização da água devido ao vapor d'água formado na reação do hidrogênio com o oxigênio e considerando a umidade presente no combustível.

$$PCI = PCS - \frac{2508(U_b + 9H_2)}{(1 + U_b)} \quad (1)$$

em que

- PCS - poder calorífico superior do combustível,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;
- PCI - poder calorífico inferior do combustível,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;
- $U_b$  - teor de água da biomassa, decimal, b.s.;
- $H_2$  - fração de hidrogênio no combustível,  $\text{kg kg}^{-1}$ ; e
- 2508 - entalpia de vaporização da água,  $\text{kJ.kg}^{-1}$  de água

### 2.2.3 Composição do combustível

Para determinar a potencialidade de um combustível e avaliar se este está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade, devem-se primeiramente conhecer as suas características fundamentais, ou seja, as composições elementar e imediata, e poder calorífico.

A composição elementar de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e material residual (cinzas) (A).

As Tabelas 2 e 3 apresentam alguns resultados de um extenso levantamento realizado por JENKINS (1990) no qual foram obtidos dados referentes à composição elementar e poder calorífico de alguns tipos de biomassa.

Tabela 2 - Composição elementar de alguns tipos de biomassa.

| Tipo de Biomassa | Composição Elementar (%) |      |       |      |      |       |
|------------------|--------------------------|------|-------|------|------|-------|
|                  | C                        | H    | O     | N    | S    | A     |
| Pinus            | 49,25                    | 5,99 | 44,36 | 0,06 | 0,03 | 0,3   |
| Eucalipto        | 49,00                    | 5,87 | 43,97 | 0,30 | 0,01 | 0,72  |
| Casca de Arroz   | 40,96                    | 4,30 | 35,86 | 0,40 | 0,02 | 18,34 |
| Bagaço de Cana   | 44,80                    | 5,35 | 39,55 | 0,38 | 0,01 | 9,79  |
| Casca de Coco    | 48,23                    | 5,23 | 33,19 | 2,98 | 0,12 | 10,25 |
| Sabugo de Milho  | 46,58                    | 5,87 | 45,46 | 0,47 | 0,01 | 1,40  |
| Ramas de Algodão | 47,05                    | 5,35 | 40,77 | 0,65 | 0,21 | 5,89  |

Fonte - JENKINS (1990)

Tabela 3 - Poder calorífico superior de alguns tipos de biomassa.

| Tipo de Biomassa    | Poder Calorífico Superior (PCS) |
|---------------------|---------------------------------|
|                     | (MJ/kg)                         |
| Pinus               | 20,02                           |
| Eucalipto           | 19,42                           |
| Casca de Arroz      | 16,14                           |
| Bagaço de Cana      | 17,33                           |
| Casca de Coco       | 19,04                           |
| Sabugo de Milho     | 18,77                           |
| Ramas de Algodão    | 18,26                           |
| Excrementos de Gado | 17,36                           |

Fonte - JENKINS (1990)

#### 2.2.4 Lenha

A lenha é a madeira picada ou desdobrada em pedaços de tamanhos adequados para serem aproveitados como combustível. Em 1990, aproximadamente 40 % da população mundial (cerca de dois bilhões de pessoas), fizeram uso da madeira como fonte de energia para aquecimento e principalmente para cocção de alimentos (BADGER, 1999).

Atualmente, a utilização da madeira, principalmente se proveniente de reservas nativas, está em vias de encerramento. A partir da década de sessenta, a atividade florestal ganhou impulso com os incentivos fiscais, transformando-se num ramo dinâmico, capaz de gerar riqueza de modo permanente, além de proporcionar estabilidade e bem-estar social (MAGALHÃES, 2001).

Uma das preocupações dos consumidores de lenha é a garantia de suprimento e a economia da sua utilização. A implantação de reflorestamentos (florestas energéticas) surge como alternativa que, além de contribuir para a geração de empregos, permite utilizar áreas impróprias à agricultura e à pecuária.

A composição elementar da lenha seca apresenta os seguintes valores médios: carbono 47,5%, hidrogênio 6,0%, oxigênio 44,0%, nitrogênio 1,0% e cinzas 1,5% (VLASSOV, 2001) e a análise imediata, a seguinte composição: materiais voláteis 70,0 a 75,0%, carbono fixo 20,0 a 27,0% e cinzas 0,5 a 2,0% (DINIZ, 1981).

A massa específica da lenha varia entre 250 e 450 kg.m<sup>-3</sup>, dependendo da espécie e da umidade (ANDRADE, 1982).

De acordo com ANDRADE et al. (1984), pode-se enumerar as seguintes vantagens e desvantagens do uso da lenha como fonte de energia:

##### Vantagens

- ainda é um combustível de baixo custo, tanto por unidade de massa quanto por unidade de energia;
- apresenta baixo teor de cinza e enxofre nos gases de combustão; e

- possibilita armazenagem em espaço livre e aberto.

#### Desvantagens

- exige planejamento para o uso racional;
- ocupa grandes espaços ao ser armazenada;
- fornecimento irregular devido às grandes quantidades exigidas e ao aumento da demanda;
- é de difícil manipulação se comparada aos combustíveis fósseis, líquidos e gasosos; e
- apresenta poder calorífico inferior ao dos combustíveis fósseis.

### 2.3 Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico que converte a biomassa sólida em gases e voláteis. Estes, ao serem queimados, fornecem energia térmica limpa, podendo ser usados diretamente em secadores, com eficiência energética próxima a da combustão direta (SILVA e PINHEIRO, 1984). Segundo PAYNE e CHANDRA, 1985, o processo apresenta-se como alternativa tecnológica ao uso de GLP ou de gás natural, além de uma opção viável e eficiente para produção da energia limpa, necessária à secagem de grãos e de outros produtos agrícolas, apresentando satisfatório potencial econômico, considerando a agricultura em pequena escala.

A utilização da gaseificação com combustão dos gases produzidos para aquecimento de ar, objetivando a secagem de grãos, tem sido pouco estudada no Brasil e devido aos benefícios relatados, torna-se necessário investir nesta área de conhecimento.

As razões práticas para se decidir pela gaseificação de biomassa são numerosas e dependem muito das condições locais e, segundo D'ÁVILA e MAKRAY (1981), a gaseificação da biomassa e posterior utilização do gás combustível é um processo de conversão eficiente da energia da biomassa em energia final, apesar das perdas na produção do gás combustível. Assim, considerando-se as eficiências globais de aproveitamento do combustível, a gaseificação apresenta-se com eficiências globais situando-se na faixa de 65% e 80%.

Além da boa eficiência energética, o melhor controle da energia produzida, a diminuição da emissão de particulados e do uso de equipamentos controladores de poluição, são outras vantagens dos sistemas de gaseificação-combustão.

A gaseificação de biomassa pode reduzir a dependência de regiões e países às flutuações nos preços dos combustíveis importados. Além disso, existem muitas circunstâncias em que a gaseificação apresenta vantagens significativas sobre a queima direta da biomassa ou de combustíveis fósseis.

A técnica de gaseificação é, em princípio, extremamente versátil, mas existem muitos problemas em transformar este potencial teórico em uma tecnologia viável e prática. Na maioria dos casos, as dificuldades residem não no processo básico de gaseificação e sim no projeto de um equipamento que deve produzir um gás de qualidade com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação.

Porém a gaseificação possui algumas desvantagens técnicas que devem ser levadas em consideração: requer tecnologia mais sofisticada que a queima direta e deve-se ter especial atenção com respeito à segurança, uma vez que o monóxido de carbono (CO), um dos componentes gasosos gerados, é um gás tóxico. Portanto, os gaseificadores devem ser feitos de forma a evitar vazamentos e alocados em locais bem ventilados. Deve-se considerar ainda a redução da eficiência do sistema de gaseificação, que pode ocorrer devido à perda de calor para o ambiente no próprio reator e atentar para o consumo de energia em excesso nos ventiladores.

Do ponto de vista operacional, enquanto em instalações para queima direta a principal preocupação é a fornalha, nas de gaseificação trabalha-se com operações mais complexas, mesmo para as instalações de pequeno porte (ASSUMPÇÃO, 1988). Uma instalação de gaseificação, dependendo da aplicação que se quer dar aos gases gerados, é constituída por:

- pré-processamento: estoque, transporte e redução da biomassa ao tamanho adequado;
- gaseificador, dotado de seção de alimentação apropriada para não haver vazamento de gás;



- tratamento do gás, com resfriamento e limpeza;
- sistema de controle;e
- tratamento dos resíduos, com disposição adequada.

### **2.3.1 Classificação dos gaseificadores**

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

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: 10 a 40 MJ/Nm<sup>3</sup>

b) Tipo de agente gaseificador:

- ar
- vapor d'água
- oxigênio
- hidrogênio (hidrogaseificação)

c) Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação:

- contrafluxo (contracorrente)
- fluxo direto (concorrente)
- fluxo cruzado
- leito fluidizado

d) Pressão de trabalho:

- baixa pressão (atmosférica)
- pressurizados (até 6 MPa)

e) Tipo e forma de biomassa:

- resíduos agrícolas
- resíduos industriais

- resíduos sólidos urbanos (lixo)
- biomassa in natura
- biomassa peletizada
- biomassa pulverizada

Um gaseificador ideal deverá ser capaz de produzir gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma larga variedade de combustíveis, trabalhar eficientemente, responder rapidamente às alterações de carga, além de ser de baixo custo e durável. Na prática, estes requisitos são muitas vezes mutuamente conflitantes, determinando que, para cada projeto individual se faça um estudo relacionado ao combustível utilizado e ao uso final do gás produzido.

A decisão pelo tipo de gaseificador deve levar em conta o tipo de biomassa a ser gaseificada e o uso final do gás. Uma comparação das características do gás de diferentes tipos de gaseificadores mostra que o tipo de gaseificador influi sobre as características do gás produzido (composição, poder calorífico e qualidade), como se pode observar na Tabela 4, obtida de um levantamento feito por BRIDGEWATER (1991).

Tabela 4 - Características do gás de diferentes tipos de gaseificadores para biomassa.

| Tipo de gaseificador | Composição do gás, |    |                 |                 |                | PCS                | Qualidade do gás * |
|----------------------|--------------------|----|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|
|                      | % volume           |    |                 |                 |                | MJ/Nm <sup>3</sup> |                    |
|                      | H <sub>2</sub>     | CO | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> |                    |                    |
| Leito Fluidizado     | 9                  | 14 | 20              | 7               | 50             | 5,4                | Média              |
| Contracorrente       | 11                 | 24 | 9               | 3               | 53             | 5,5                | Pobre              |
| Concorrente          | 17                 | 21 | 13              | 1               | 48             | 5,7                | Boa                |

\* quanto a particulados e alcatrão

Fonte - BRIDGEWATER (1991)

Utilizando um reator de pequeno porte, capaz de operar tanto com fluxo concorrente como contracorrente, e gaseificando sabugo de milho, SILVA e PINHEIRO (1984) encontraram os seguintes valores médios para a

composição do gás produzido: (CO<sub>2</sub>) dióxido de carbono 10,76 %, (CO) monóxido de carbono 17,79 %, (H<sub>2</sub>) hidrogênio 15,80 %, (O<sub>2</sub>) oxigênio 0,88 %, (CH<sub>4</sub>) metano 3,73 % e (N<sub>2</sub>) nitrogênio 50,32 %.

### Gaseificadores contracorrente

O gaseificador mais simples é o de fluxo contracorrente, Figura 1, onde a entrada de ar primário fica na parte inferior do gaseificador e o fluxo de gases é ascendente, contrário ao fluxo de combustível que é introduzido na parte superior e descende pela ação da força gravitacional à medida que é consumido.

Os gaseificadores tendem a ter eficiência alta, pelo fato dos gases quentes provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga de combustível ao passar por ela. Tendo a simplicidade como principal característica, possui, no entanto, a desvantagem de produzir um gás extremamente impuro. Nenhum dos alcatrões e outros produtos da pirólise são craqueados na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para cima do gaseificador e podem, dependendo de sua utilização, causar incrustações nas tubulações. Alguns gaseificadores, particularmente os de grande porte, possuem uma câmara na parte superior, acima do topo do combustível, a fim de reduzir a velocidade do gás e permitir a condensação de voláteis dentro do gaseificador.

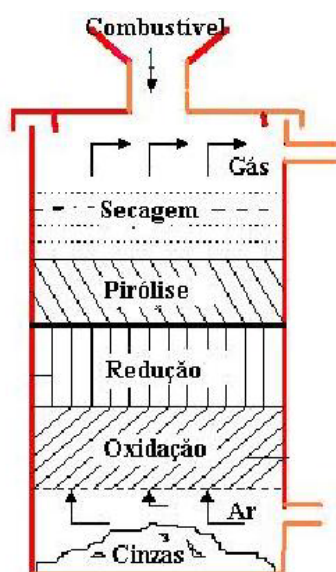


Figura 1 – Gaseificador contracorrente

O projeto da grelha é importante na maioria dos gaseificadores contracorrente, pois esta suporta diretamente a zona de combustão e deve ser capaz de deixar as cinzas caírem sem uma perda excessiva de material ainda incombustos.

A zona de oxidação, ou às vezes toda a câmara de gaseificação, são recobertas por materiais refratários a fim de proteger as partes metálicas bem como diminuir perdas por troca de calor.

Gaseificadores contracorrentes podem ser construídos para utilização de larga variedade de combustíveis, mas deve-se ressaltar o fato de que o gás produzido, normalmente contém grande quantidade de alcatrão e voláteis, o que inviabiliza sua utilização direta em motores de combustão interna, restringindo seu uso em dispositivos onde é simplesmente queimado (aquecimento direto).

### **2.3.2 Fundamentos teóricos da gaseificação**

Ao proceder o dimensionamento de um gaseificador, pode-se determinar a composição do gás produzido, através de equações termoquímicas. Estas prevêm o estado de equilíbrio das reações básicas envolvidas na gaseificação em função dos principais parâmetros, ou seja, pressão, temperatura, umidade do combustível, teor de oxigênio no agente gaseificador e tipo de combustível.

Todo gaseificador tem uma etapa de pirólise precedendo a de gaseificação, e as reações envolvidas podem ser analisadas separadamente.

- **Pirólise**

A secagem e pirólise (200 a 600 °C) com liberação da água, dos voláteis e do alcatrão ocorre em 3 fases ( MILNE, 1981, SIMMONS e LEE, 1985):

- aquecimento e evaporação da água;
- decomposição dos carboidratos (hemi-celulose, celulose, lignina) (250-300 °C);

- produção de alcatrão e ácidos leves (350-430 °C)

Produtos:

- gases não condensáveis (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>);
- carvão vegetal;
- condensado: alcatrão e ácidos.

As reações químicas que ocorrem na zona de oxidação são basicamente a combinação de oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio

Um esquema simplificado da pirólise do sólido (SIMMONS e LEE, 1985) pode ser descrito como:

Madeira + calor → coque + gases + alcatrão + condensáveis

- **Reações de gaseificação**

Durante os processos de gaseificação, nas zonas de oxidação (800 a 1.200 °C) e redução (600 a 800 °C), respectivamente, ocorrem principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução envolvendo fases sólida e gasosa (BRAME e KING, 1956; HEMATI et al., 1989):

❖ reações heterogêneas gás-sólido:

- oxidação do carbono, H (kJ/mol)  

$$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{CO} \quad (-110,6)$$

$$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 \quad (-393,8)$$
- reação de Boudouard  

$$\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO} \quad (172,6)$$
- reação de gás-d'água  

$$\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2 \quad (131,4)$$
- formação de metano  

$$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 \quad (-74,9)$$

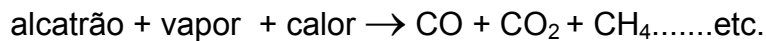
❖ reações homogêneas (fase gasosa):



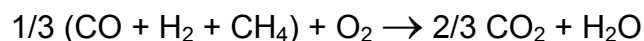
As reações de oxidação do carbono são fortemente exotérmicas, rápidas e podem ser consideradas irreversíveis nas temperaturas normais de gaseificação. As reações de Boudouard e de gás-d'água são endotérmicas. A reação de Boudouard passa a ser a mais importante na faixa de temperatura de 800 a 900°C, ocorrendo em todo o leito, ao contrário das reações de formação de dióxido e monóxido de carbono que só ocorrem obviamente com a presença de oxigênio ( SHAW e PATERSON, 1978)

- **Craqueamento do alcatrão**

O alcatrão, indesejável no ar de secagem de produtos agrícolas é também um combustível e pode ser craqueado dependendo das características do ambiente em que ele se encontra.



Além destas reações, temos que destacar a oxidação de parte dos produtos da pirólise;



### **2.3.3 Ar teórico ou estequiométrico**

O ar necessário, em quantidade exata, para proporcionar a combustão completa de carbono, hidrogênio, enxofre e outros elementos presentes no combustível, que possam se oxidar é denominado “ar teórico” ou estequiométrico.

A determinação da quantidade mínima de oxigênio necessário e suficiente para oxidar completamente os elementos combustíveis é feita com base na análise elementar do combustível. Para um combustível isento de umidade e constituído por carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, as equações químicas de reação estequiométrica entre estes elementos e o oxigênio conduzem à equação dois, que permite determinar a massa teórica do oxigênio necessário à combustão (PERA, 1990):

$$m_{O_2}^{ts} = \frac{32}{12} C + 8H_2 - O_2 + S \quad (2)$$

em que

$m_{O_2}^{ts}$  - massa teórica de oxigênio, kg kg<sup>-1</sup> de combustível seco;

Como na prática os combustíveis apresentam certo teor de umidade, é comum expressar o consumo de oxigênio e de ar comburente por quilograma de combustível úmido. Para este propósito deve-se utilizar a equação 3 (CAMARGO, 1990), para determinar a massa teórica de oxigênio necessária para a combustão completa.

$$m_{O_2}^{tu} = m_{O_2}^{ts} (1 - U_{bu}) \quad (3)$$

em que

$m_{O_2}^{tu}$  - massa teórica de oxigênio, kg kg<sup>-1</sup> de combustível úmido

$U_{bu}$  - umidade da biomassa, decimal base úmida

Por ser abundante e possuir cerca de 21% em volume de oxigênio em sua constituição, o ar atmosférico é o principal comburente utilizado nos processos de combustão. O oxigênio entra na composição gravimétrica do ar atmosférico na proporção de 23 %. O consumo estequiométrico de ar

comburente seco, por quilograma de combustível úmido, pode ser obtido pela equação 6:

$$m_{ar}^t = \frac{100}{23} m_{O_2}^{tu} \quad (4)$$

ou

$$m_{ar}^t = \frac{100}{23} \left( \frac{32}{12} C + 8H_2 - O_2 + S \right) (1 - U_{bu}) \quad (5)$$

e ainda

$$m_{ar}^t = \frac{8C + 24H_2 - 3O_2 + 3S}{0,696} (1 - U_{bu}) \quad (6)$$

em que

$m_{ar}^t$  - massa de ar estequiométrico necessário para combustão da biomassa, kg de ar por kg de combustível úmido.

Esta equação refere-se ao consumo de ar comburente teórico em massa, necessário a uma combustão ideal, na qual todas moléculas de combustível e de oxigênio reagem integralmente no processo.

#### 2.3.4 Fator de ar

O fator de ar FA é a fração do volume estequiométrico (para 1 kg de combustível) alimentado ao gaseificador. Este é o parâmetro de operação principal, que define a temperatura da câmara de gaseificação e a eficiência do reator. Geralmente o valor do fator de ar para gaseificadores de biomassa está na faixa de 0,2 a 0,4 (LORA et al., 1997).



## 2.4 Balanço de massa

Na Figura.2 são mostrados os fluxos de massa e energia, entrando e saindo pela superfície de controle, de um volume de controle (VC) aplicado a um sistema utilizado para aquecimento direto do ar.

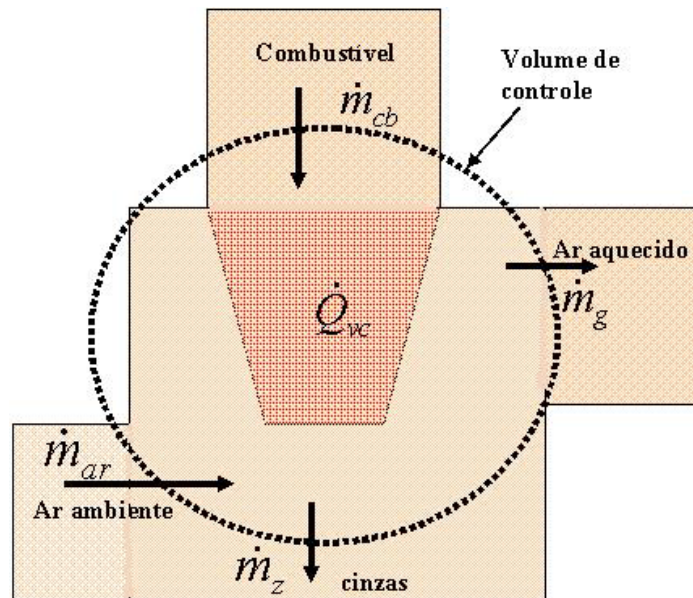


Figura 2 - Volume de controle aplicado a um sistema.

O princípio da conservação da massa aplicada ao volume de controle permite escrever em uma notação matemática, a seguinte equação:

$$0 = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s + \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (7)$$

em que

- $\sum \dot{m}_s$  - vazão mássica instantânea que deixa o volume de controle pela superfície de controle,  $\text{kg.s}^{-1}$ ;
- $\sum \dot{m}_e$  - vazão mássica instantânea que entra no volume de controle pela superfície de controle,  $\text{kg.s}^{-1}$ ; e
- $\frac{dm_{vc}}{dt}$  - taxa de variação da massa por unidade de tempo dentro do volume de controle,  $\text{kg.s}^{-1}$ .

Considerando-se que o sistema esteja operando em regime permanente, a taxa de variação de massa dentro do volume de controle é nula; ou seja, não há acúmulo nem decréscimo de massa no volume de controle com o tempo, o que permite escrever:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s$$

$$\sum \dot{m}_s = \dot{m}_g + \dot{m}_z \quad (9)$$

$$\sum \dot{m}_e = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{cb} \quad (10)$$

em que

- $\dot{m}_{ar}$  - vazão mássica de ar que entra no VC,  $\text{kg.s}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_{cb}$  - vazão mássica de combustível que entra no VC,  $\text{kg.s}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_g$  - vazão mássica de gases que deixam o VC,  $\text{kg.s}^{-1}$ ; e
- $\dot{m}_z$  - vazão mássica de cinzas que deixam o VC,  $\text{kg.s}^{-1}$ .

## 2.5 Balanço de energia aplicado ao sistema

A primeira lei da termodinâmica, aplicada a fluxos de energia e massa e ao volume de controle do sistema, apresentado na Figura 2, conduz à seguinte equação:

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W} \quad (11)$$

em que

- $\dot{Q}$  - taxa de transferência de calor entre o VC e o meio,  $\text{kJ.s}^{-1}$ ;
- $h_e, h_s$  - entalpia dos reagentes e dos produtos na entrada e na saída, respectivamente,  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ;

- $V_e, V_s$  - velocidade dos reagentes e dos produtos na entrada e na saída, respectivamente,  $m.s^{-1}$ ;
- $g$  - aceleração da gravidade,  $m.s^{-2}$ ;
- $Z_e, Z_s$  - termos relativos à energia de posição, m;
- $\dot{W}$  - trabalho líquido realizado por dispositivos eletro-mecânicos acoplados ao sistema,  $kJ.s^{-1}$ ; e
- $\frac{dE_{vc}}{dt}$  - taxa de variação da energia dentro do VC,  $kJ.s^{-1}$ .

Pela equação 11 verifica-se que a taxa de transferência de calor para o volume de controle, mais a taxa de energia que entra, como resultado da transferência de massa, é igual à taxa de variação da energia dentro do volume de controle mais a taxa de energia que sai deste, como resultado da transferência de massa, e mais a energia realizada sobre o sistema pelos dispositivos eletromecânicos acoplados ao equipamento, como ventiladores, bomba de circulação de fluido, etc (VAN WYLEN et al. 1998).

Alguns autores, como CARMAGO (1990), não levam em consideração a energia consumida por estes equipamentos no cálculo da eficiência, por entenderem que se trata de “entrada de energia” no sistema. Segundo eles, o que se deve evidenciar é a eficiência do sistema na conversão da energia do combustível em energia térmica.

Uma hipótese aceitável na aplicação da primeira lei da termodinâmica, quando aplicada a um sistema em regime permanente, quanto à massa que escoar através da superfície de controle, é de que o fluxo de massa e o estado desta, em cada área discreta de escoamento na superfície de controle, não variam com o tempo e que as taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constante, o que permite escrever:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (12)$$

ou seja; não há variação de energia durante a operação em regime permanente.

A velocidade do combustível e das cinzas, respectivamente, na entrada e na saída do volume de controle, num intervalo de tempo em que  $dt \rightarrow 0$ , pode ser desprezada e admitindo não haver variações de energia potencial e significativa de energia cinética no sistema, entre os demais fluxos de massa que atravessam o VC, a equação da primeira lei da termodinâmica se reduz à equação 13:

$$\dot{Q} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad (13)$$

Segundo SUKUP et al. (1982), a quantidade dos gases de combustão, representados a maior parte por  $\text{CO}_2$ , não altera significativamente a entalpia específica do ar ao se misturarem, o que pode ser comprovado segundo Gomide (1984) e Souza (1980), citados por MELO (1987), na faixa de temperatura de 18 a 250 °C. Desta forma, pode-se utilizar as propriedades termodinâmicas do ar quando se comporta como gás perfeito, ou seja, quando sua densidade é suficientemente baixa e que as forças intermoleculares e a energia associada a estas possam ser desprezadas. Veja Figura 3, extraída das tabelas de propriedades termodinâmicas (VAN WYLEN et al. 1998).

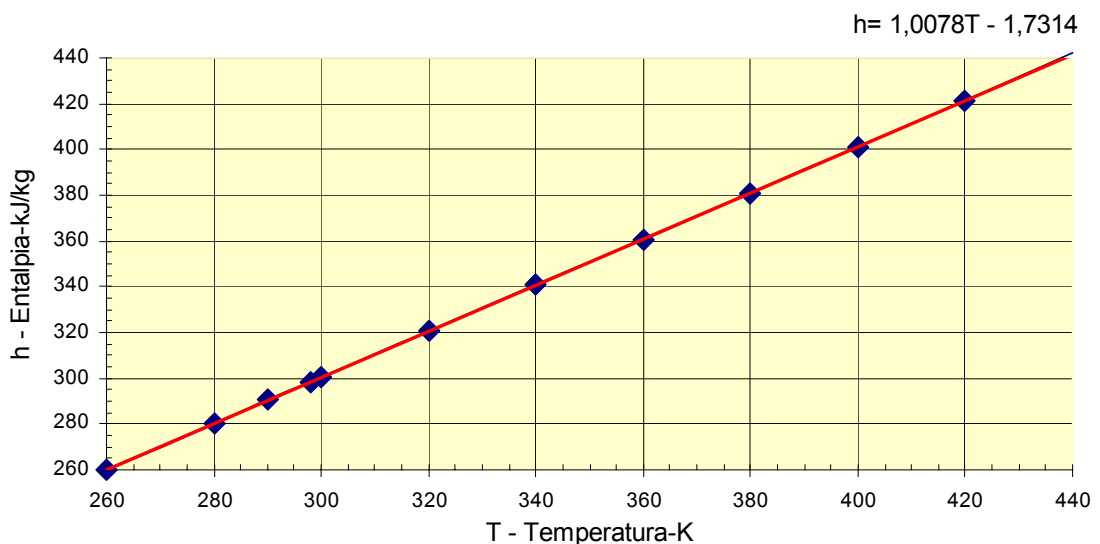


Figura 3 – Entalpia do ar x temperatura ar (gás perfeito)

## 2.6 Eficiência térmica

A eficiência térmica constitui o parâmetro de maior interesse, com relação aos equipamentos de conversão de energia térmica, por estar diretamente associado à redução de custos, o que pode proporcionar economia de combustível.

No estudo de sistemas para aquecimento de ar, a energia química contida no combustível é transformada em energia térmica, para aquecimento do ar. Obviamente nem toda energia contida no combustível é aproveitada para este fim devido às perdas inerentes ao sistema. A avaliação de um sistema quanto à eficiência desta transformação pode ser feita com base na definição da ASME – American Society of Mechanical Engineers, que define as eficiências energéticas de um sistema, operando em regime permanente, como a razão entre a energia disponível nos produtos da combustão e a energia fornecida ao equipamento (GOMES, 1988). De acordo com esta definição, a eficiência térmica pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_f} 100 \quad (14)$$

em que

- $\eta$  - eficiência térmica;
- $\dot{q}_f$  - energia fornecida ao sistema,  $\text{kJ.s}^{-1}$ ;
- $\dot{q}_u$  - energia útil na saída do sistema,  $\text{kJ.s}^{-1}$

A eficiência térmica pode ser referida ao poder calorífico inferior (base para o cálculo da energia disponível na câmara de combustão), ou ao poder calorífico superior do combustível (base para o cálculo da energia fornecida à fornalha).

Uma análise exata da eficiência térmica de um sistema requer a utilização dos princípios termodinâmicos e da transferência de calor e

massa. Estes princípios requerem conhecimento dos mecanismos que regem as reações químicas de combustão, a composição elementar e imediata do combustível, a composição dos gases de combustão, as propriedades físicas dos reagentes e dos produtos da combustão nas suas fases sólidas, líquidas e gasosas, o fluxo de gases e de energia no sistema, as temperaturas dos gases, as propriedades dos materiais utilizados e outros parâmetros nem sempre disponíveis na prática.

Além destes aspectos, na maioria dos casos, é difícil quantificar com precisão todos os fluxos de massa que atravessam o volume de controle, bem como o fluxo de energia perdido para o meio ambiente, pelas paredes do sistema (BAZZO, 1995). Em uma abordagem mais geral, a aplicação da primeira lei da termodinâmica e da equação da continuidade, nos processos de combustão, em sistemas abertos e em regime de fluxo permanente, tem resolvido satisfatoriamente grande parte dos problemas práticos de combustão, notadamente, aqueles referentes a determinação da eficiência do processo (BAZZO, 1995 e PERA, 1990).

Segundo BAZZO (1995) e PERA (1990), na determinação da energia disponível, devem-se levar em consideração, além da energia liberada na queima do combustível, a energia associada aos fluxos de massa do combustível, do ar comburente e da umidade do ar de combustão. Considerando-se que no sistema apresentado na Figura 2 não há pré-aquecimento do combustível e do ar comburente e que a temperatura de referência é aproximadamente igual à temperatura ambiente, a energia associada a esses fluxos pode ser desprezada. Portanto, tem-se:

$$\dot{q}_d = \dot{m}_{cb} \text{PCI} \quad (15)$$

em que

$\dot{q}_d$  - energia disponível na câmara de combustão, kW.

## **2.7 Análise de custo**

Um estudo econômico sempre recai na escolha entre alternativas de investimentos. Deve-se tomar uma decisão entre a realização, a rejeição ou mesmo o abandono de um determinado projeto (ABREU e STEPHAN, 1982). Os critérios empregados na análise e comparação das alternativas são baseados no princípio de equivalência dos projetos, isto é, quando é indiferente escolher entre um ou outro no que se refere aos objetivos. Esses métodos visam determinar valores únicos, que representam cada alternativa de investimento (FRANCISCO, 1985).

O conhecimento sobre o comportamento do custo é fundamental para a escolha do sistema de melhor eficiência econômica, complementando-se as análises feitas com base na teoria de investimentos, conforme os indicadores apropriados.

### **2.7.1 Custo fixo total (CFT)**

Este custo compreende os itens que independem da quantidade de ar quente produzido ou independem da intensidade de uso do sistema, como depreciação, seguros, impostos, juros sobre o capital empatado e mão-de-obra permanente.

### **2.7.2 Custo variável total (CVT)**

Este custo compreende os itens que variam diretamente com a intensidade de uso do sistema ou com a quantidade de ar quente produzido. Inclui gasto com mão-de-obra, manutenção dos equipamentos, combustível e consumo de energia.

### **2.7.3 Custo total de aquecimento ( $C_{total}$ )**

Este custo é a medida mais ampla para avaliar o custo de um sistema de aquecimento de ar. Conceitualmente, o custo total de aquecimento refere-se à remuneração de todos os fatores empregados no

sistema estudado, o que é o resultado do somatório do CFT e do CVT expresso pela equação 16.

$$C_{total} = CFT + CVT \quad (16)$$

em que

$C_{total}$  - custo total do aquecimento, R\$ m<sup>-3</sup>.

#### **2.7.4 Custo total médio (CTMe)**

Este custo representa exatamente a razão do custo total pela quantidade de mil metros cúbicos de ar aquecido (N).

$$CTMe = \frac{C_{Total}}{N} \quad (17)$$

em que

CTMe - custo total médio, R\$ m<sup>-3</sup>; e

N - número de 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> de ar quente produzido por ano.

Para que o sistema de aquecimento de ar para secagem de produtos agrícolas seja economicamente viável, o ganho adicional de renda deve ser superior ao incremento do custo total.



### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia para Secagem de Produtos Agrícolas “Prof. Juarez de Sousa e Silva”, localizado na área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

#### **3.1 Dimensionamento do reator de gaseificação de biomassa e câmara de combustão**

A metodologia apresentada inclui equações de balanços de massa e energia, bem como critérios empíricos para estimativa do diâmetro do reator e sua altura. A intenção é de que ela seja usada como uma ferramenta prática e não como um procedimento teórico rigoroso. Os dados inicialmente necessários foram:

- Demanda térmica para o processo considerado (48 kW);
- Análise elementar da biomassa a ser gaseificada (VLASSOV, 2001);
- Eficiência do gaseificador (valor estimado de 70 %);
- Valor da razão de equivalência (valor estimado de 25 %);
- Velocidade do ar primário na superfície da grelha (valor estimado de  $\text{um m s}^{-1}$ ); e

- Poder calorífico inferior da biomassa ( $18737 \text{ kJ kg}^{-1}$ )

No apêndice é apresentado o algoritmo para cálculo do diâmetro e da altura da câmara de gaseificação.

### 3.1.1 Construção do reator

O reator de gaseificação foi construído em dois módulos visando compor um sistema de fácil manutenção, minimizar perdas de calor e evitar acidentes por queimaduras durante sua operação.

Fizeram parte deste sistema:

-uma câmara de gaseificação (módulo 1) (Figura 4a);e

-um trocador de calor, aqui denominado de casulo 1 (módulo 2) (Figura 4b).

O módulo 1 foi construído em chapa metálica número 12 e o módulo 2 em alvenaria. Na disposição de montagem do reator, a câmara de gaseificação foi envolvida pelo casulo 1

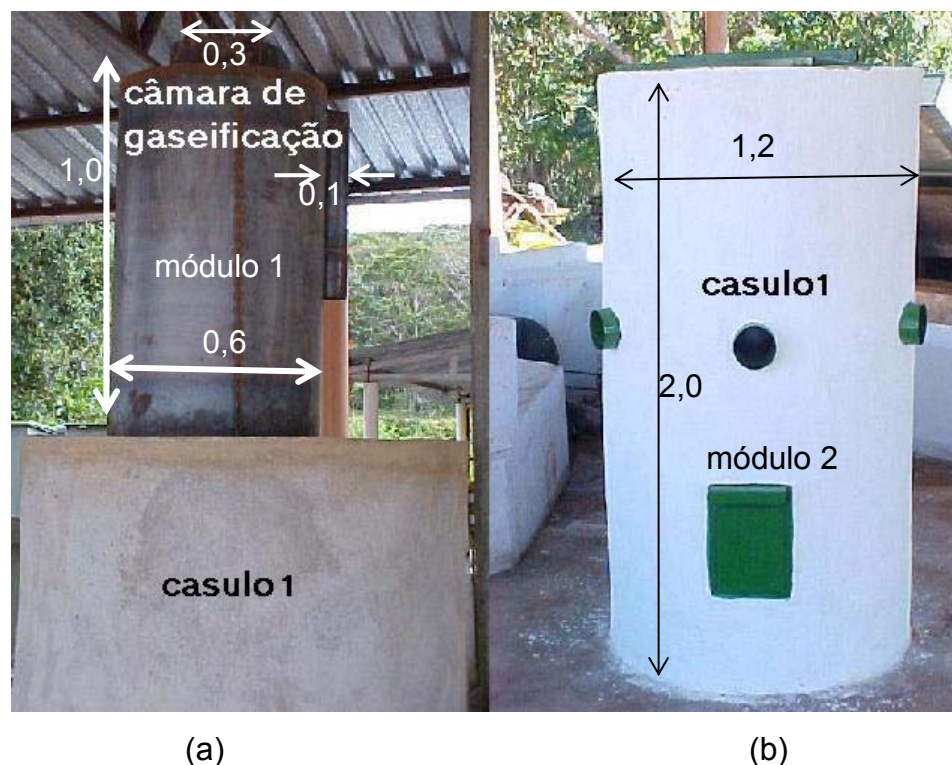


Figura 4 - (a) (módulo 1) Câmara de gaseificação com tubo condutor do gás combustível e (b) (módulo 2) casulo 1 com entrada de ar primário e de refrigeração.

A câmara de gaseificação foi construída com diâmetro de 0,60 m e altura de 1,00 m. O diâmetro da abertura de alimentação de combustível era de 0,30 m e do tubo condutor do gás produzido de 0,10 m. A área do tubo condutor do gás foi adotada como sendo igual à área mínima livre da grelha (Figura 4a).

A construção do casulo 1 teve suas dimensões baseadas nas da câmara de gaseificação e iniciou-se com o levantamento de dois cilindros, dispostos um dentro do outro e construídos de tijolo de barro maciço. O cilindro interno, com 0,60 m de diâmetro, e o externo, com 1,20 m, foram erguidos até uma altura de 0,50 m, deixando-se uma abertura na sua base de 0,25 x 0,35 m para entrada do ar primário e pela qual efetuava-se, também, a retirada das cinzas (Figura 5).

A grelha foi feita com barras de ferro fundido de 0,01 m de espessura, 0,05 m de altura e 0,60 m de comprimento, distanciadas 0,01 m entre si, e assentadas sobre a parede do cilindro interno (Figura 5). Foi adotado como área da grelha um valor dez vezes maior que a área mínima livre, calculada a partir do algoritmo. Adotou-se este fator considerando-se que o ar primário foi controlado na entrada, que metade da área da grelha foi ocupada pelas barras de ferro e, também, para propiciar melhor distribuição do ar através do combustível .

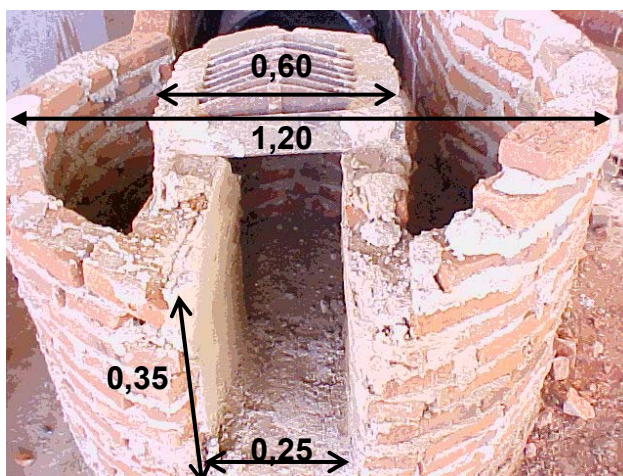


Figura 5 – Base do reator de gaseificação com grelha.

No espaço entre os cilindros, instalaram-se dois tubos metálicos de 0,15 m de diâmetro que conduziam ar do casulo 1 até as câmaras de

combustão e mistura e outro, de diâmetro de 0,10 m, que conduziu o gás produzido na câmara de gaseificação até a câmara de combustão. O espaço livre entre as duas paredes foi preenchido com restos de materiais de construção (tijolos, areia e pedras) e teve sua superfície concretada na altura da grelha (Figura 6). A partir deste ponto, só a parede externa foi erguida, até a altura de 2,0 m.



Figura 6 – Instalação de tubos condutores e do tronco cônico.

Sobre a grelha, foi construído um cilindro em concreto refratário com o formato interno de um tronco de cone (Figura 6) e o externo cilíndrico. A declividade da parede interna era de 70°. O diâmetro externo do tronco cônico era de 0,56 m e a altura de 0,45 m. A espessura da parede na parte superior do tronco foi de 0,05 m e na parte inferior de 0,15 m. A função do tronco cônico foi de proporcionar melhor redução da biomassa, direcionando-a a uma área específica da grelha, bem como de reduzir danos térmicos na câmara de gaseificação. Com a construção do tronco cônico, a grelha passou a ter uma área circular com diâmetro de 0,26 m (Figura 7). Com o objetivo de vedar a parte inferior da câmara de gaseificação, o espaço entre o tronco cônico e a parede foi preenchido com areia.



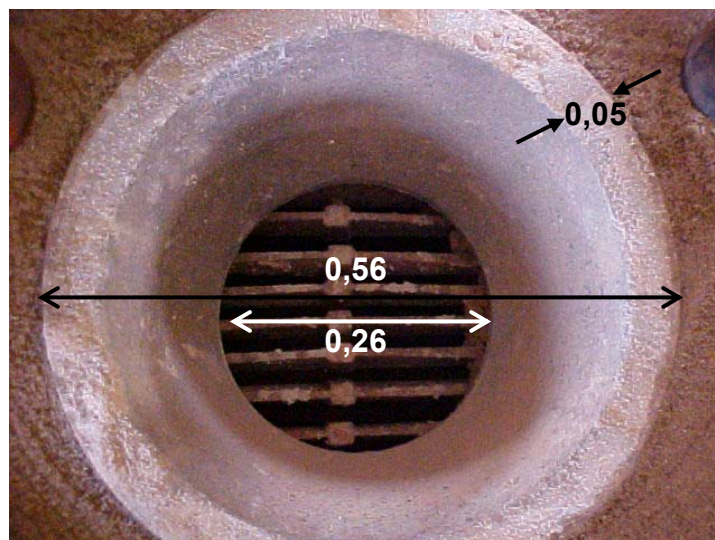


Figura 7 – Tronco cônico de concreto refratário.

Na parede do casulo 1, acima do nível da areia, foram feitas cinco entradas de ar de 0,15 m de diâmetro, visando a refrigeração da câmara de gaseificação (Figura 8).



Figura 8 – Entradas e controladores de ar do reator de gaseificação.

A parte superior do casulo 1 foi coberta com uma tampa metálica para facilitar o acesso ao reator e sua manutenção, permitir entrada de ar somente pela parte inferior e diminuir perdas de energia térmica por convecção e radiação. A entrada de ar primário foi controlada por uma porta tipo guilhotina e a de ar para refrigeração da câmara de gaseificação, por

controladores tipo borboleta, que foram instalados nos tubos condutores de ar (Figura 8).

A câmara de gaseificação foi assentada sobre a areia situada na base do casulo 1, envolvendo o tronco cônico. A vedação da abertura para abastecimento de combustível também foi feita com areia e o engate do tubo condutor dos gases foi do tipo bolsa (Figura 9)



Figura 9 – Vedações e engate do tubo condutor de gás.

### 3.1.2 Construção da câmara de combustão dos gases

A câmara de combustão dos gases também foi construída em dois módulos.

Fazem parte deste sistema (Figura 10):

- um combustor (módulo 3); e
- um trocador de calor, aqui denominado de casulo 2 (módulo 4).

O módulo 3 foi construído em chapa metálica número 16 e o 4 em alvenaria. Na montagem da câmara de combustão, o combustor foi envolvido pelo casulo 2.

O combustor, de formato cilíndrico, possuía diâmetro de 0,60 m e comprimento de 2,60 m. No primeiro 1,00 m, o combustor foi revestido internamente de concreto refratário, cuja espessura era 0,05 m (Figura 10).

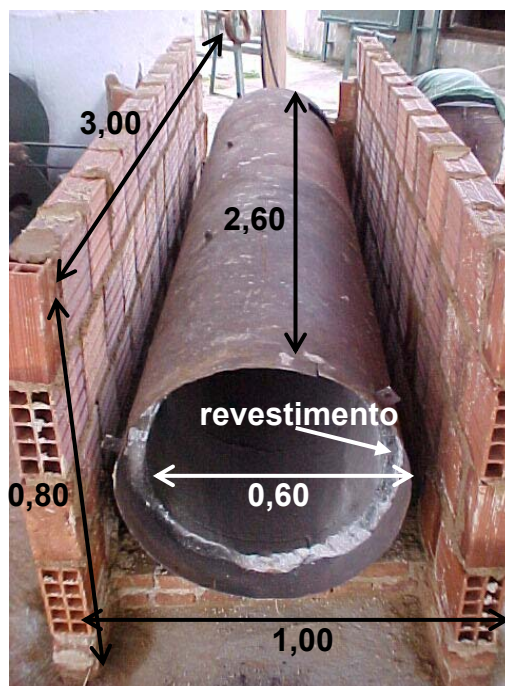


Figura 10 – Combustor envolvido pelo casulo 2 (câmara de combustão).

Com o intuito de aumentar o tempo de residência dos gases no combustor para efetivação de sua queima, construiu-se na saída do mesmo, um estrangulador de ar, reduzindo seu diâmetro para 0,25 m (Figura 11).

O casulo 2 (módulo 4), construído em alvenaria, consistiu no levantamento de duas paredes laterais, distanciadas 1,00 m entre si, com altura de 0,80 m e 3,00 m de comprimento (Figura 10) e que sustentaram lajes de concreto efetivando o fechamento do casulo 2 (Figura 11).

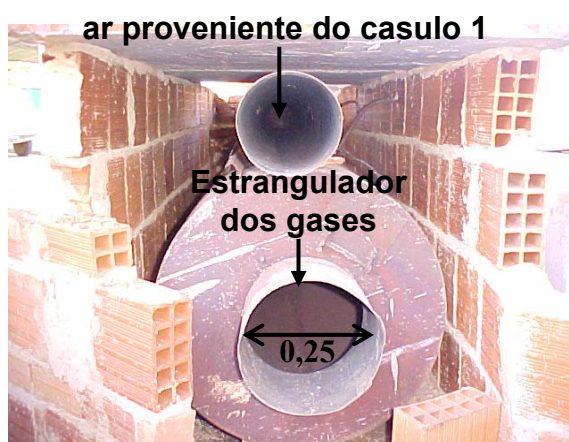


Figura 11 – Estrangulador dos gases e cobertura de laje.



A ligação do reator de gaseificação com a câmara de combustão foi feita de tijolo refratário, deixando-se uma abertura lateral de 0,20 x 0,20 m para introdução da chama piloto na ignição dos gases (Figura 12).



Figura 12 – (a) Visualização interna da ligação do reator de gaseificação com a câmara de combustão e (b) abertura lateral para introdução da chama piloto na ignição dos gases .

No casulo 2 foram feitas três entradas para admissão do ar de mistura e facilitar o acesso para medição de temperaturas. Estas entradas, quando totalmente abertas, possuíam áreas de 0,07, 0,02 e 0,05 m<sup>2</sup>. A câmara de combustão foi ligada diretamente à câmara de mistura por se tratar de um aquecimento direto de ar. A câmara de mistura, construída em alvenaria, possuía dimensões de 0,80 x 0,80 x 0,80 m. Na Figura 13 observa-se o sistema reator de gaseificação com câmara de combustão dos gases após conclusão.



Figura 13 – Reator de gaseificação com câmara de combustão dos gases.



### 3.1.3 Ventilador

Para succionar o ar primário, o gás produzido na câmara de gaseificação, o ar necessário à combustão do gás e o ar ambiente adicionado aos gases da combustão, bem como para fornecer a vazão de ar necessária à secagem, utilizou-se um ventilador centrífugo cujo rotor foi acoplado, por meio de correias, ao eixo de um motor elétrico trifásico, de potência nominal de 3,73 kW (5,0 cv) e 1750 rpm.

Na saída do ventilador, construiu-se um "registro", dispositivo que possibilitou direcionar o ar proveniente do sistema (Figura 14). No início do funcionamento, por conter grande quantidade de fumaça, o ar era direcionado para a chaminé e quando o sistema atingia o regime permanente, produzindo ar quente ideal para secagem de produtos agrícolas, este era então direcionado para o secador.

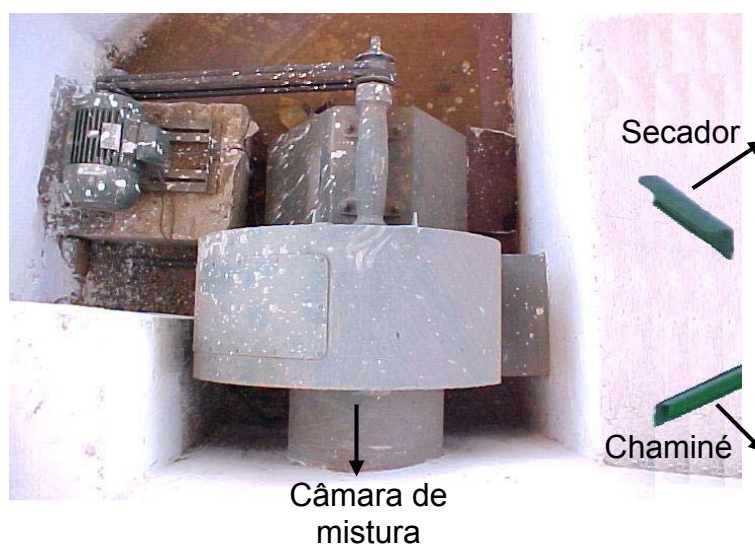


Figura 14 – Ventilador e registro direcionador do ar.

### 3.2.4 Funcionamento do reator de gaseificação-combustão para aquecimento direto do ar

O funcionamento do reator de gaseificação teve início com o abastecimento da câmara de gaseificação, cuja capacidade era de aproximadamente 0,20 m<sup>3</sup> de biomassa.

Com o auxílio de um lança chama, injetou-se calor na lenha (via grelha) para dar início ao processo de aquecimento da câmara de

A partir do instante em que os gases entravam em combustão, a abertura do registro (Figura 14) era direcionada para o secador (Figura 15b), realizando-se também o controle da entrada do ar primário e de refrigeração, buscando a situação que respondesse com maior eficiência, compatível com os objetivos propostos.



chaminé e (b) secador.

Os gases da gaseificação foram conduzidos até a câmara de combustão pela diferença de pressão estabelecida pelo ventilador entre os pontos de entrada e de saída dos fluidos gasosos no interior do reator.

38

ar de secagem foi obtida com auxílio de um termopar tipo K, instalado na saída do ventilador.

O ventilador, após succionar a mistura dos gases da combustão e do ar ambiente, fornecia uma vazão de ar aquecido propícia à secagem de produtos agrícolas, caracterizando, desta forma, o aquecimento direto do ar. Na Figura 16 é ilustrado todo o sistema de gaseificação e combustão, bem como os fluxos de ar e gases.

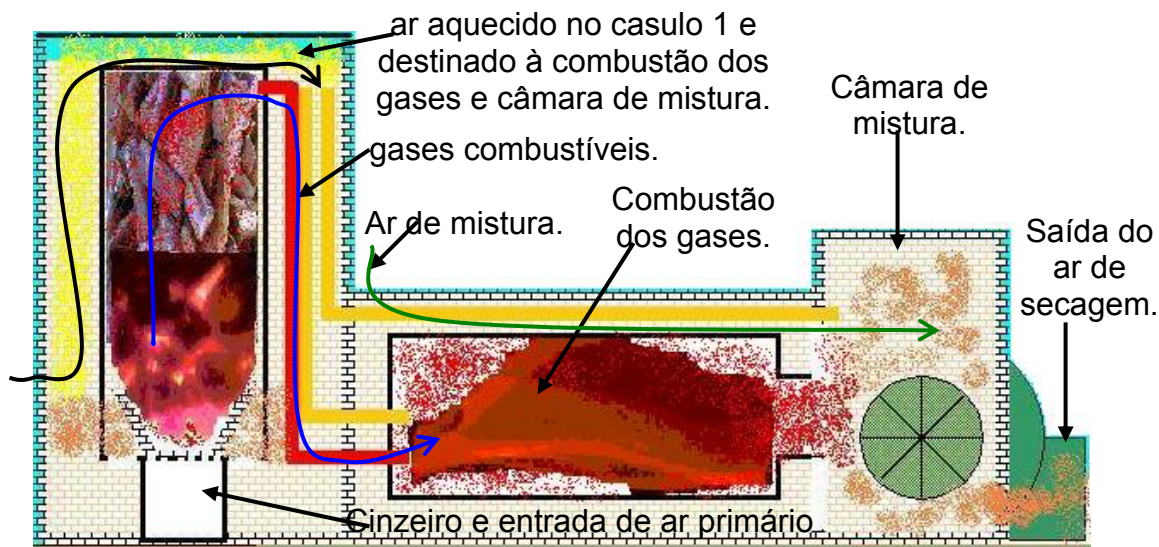


Figura 16 – Fluxo dos gases.

### 3.2 Instrumentação

Para acompanhar, avaliar e controlar sistematicamente os parâmetros que determinariam a melhor situação de desempenho do sistema, uma série de variáveis foram monitoradas, como: temperatura e umidade relativa do ar ambiente, vazão de ar primário na câmara de gaseificação, vazão e temperatura do ar de secagem, temperaturas no interior do reator e na câmara de combustão e medição do consumo de combustível. Estas informações foram indispensáveis para o equacionamento da avaliação do desempenho funcional e econômico do sistema.

#### 3.2.1 Sensores de temperatura

As temperaturas foram obtidas por meio de sondas termométricas, escolhidas de acordo com a temperatura do local de medição e tolerância à atmosfera corrosiva.

As sondas termométricas utilizadas para medir as temperaturas internas da câmara de gaseificação foram instaladas através da grelha (Figura 17a). Uma possuía 0,50 m de comprimento e a outra 1,00 m, ambas do tipo K, com 0,01 m de diâmetro, isolamento de porcelana e revestidas por metal.

As temperaturas do ar ambiente e de secagem, dos gases na saída da câmara de gaseificação, do ar presente nos casulos e dentro do combustor foram medidas com sondas termométricas do tipo K, com 0,15 m de comprimento e 1,5 mm de diâmetro (Figura 17b).

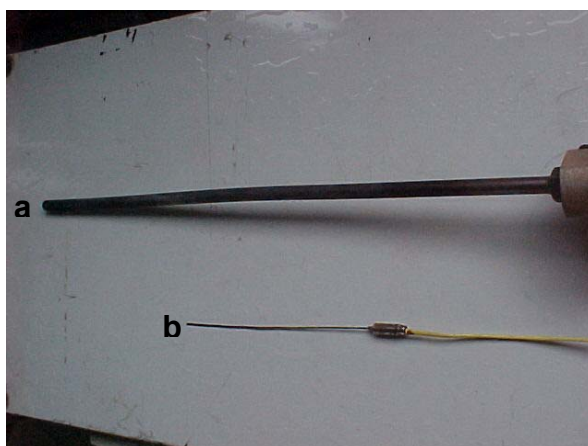


Figura 17 – Sondas termométricas (a) com isolamento de porcelana e (b) de imersão com diâmetro de 1,5 mm.

Algumas sondas instaladas na câmara de gaseificação não suportaram todos os testes e tiveram que ser substituídas (Figura 18).



Figura 18 – Sondas danificadas pelas ações térmicas.

As sondas foram instaladas em pontos que possibilitaram ter uma análise ideal do sistema (Figura 19), são eles:

- Ponto 1 – zona de oxidação;
- Ponto 2 – provável zona de redução;
- Ponto 3 – zona de secagem;
- Ponto 4 – interior do casulo 1 (trocador de calor);
- Ponto 5 – zona de combustão dos gases-C1 (interior do combustor);
- Ponto 6 – zona de combustão dos gases-C2 (interior do combustor);
- Ponto 7 – interior do casulo 2-P1 (trocador de calor);
- Ponto 8 – interior do casulo 2-P2 (trocador de calor);
- Ponto 9 – câmara de mistura;
- Ponto 10 – saída do ventilador.

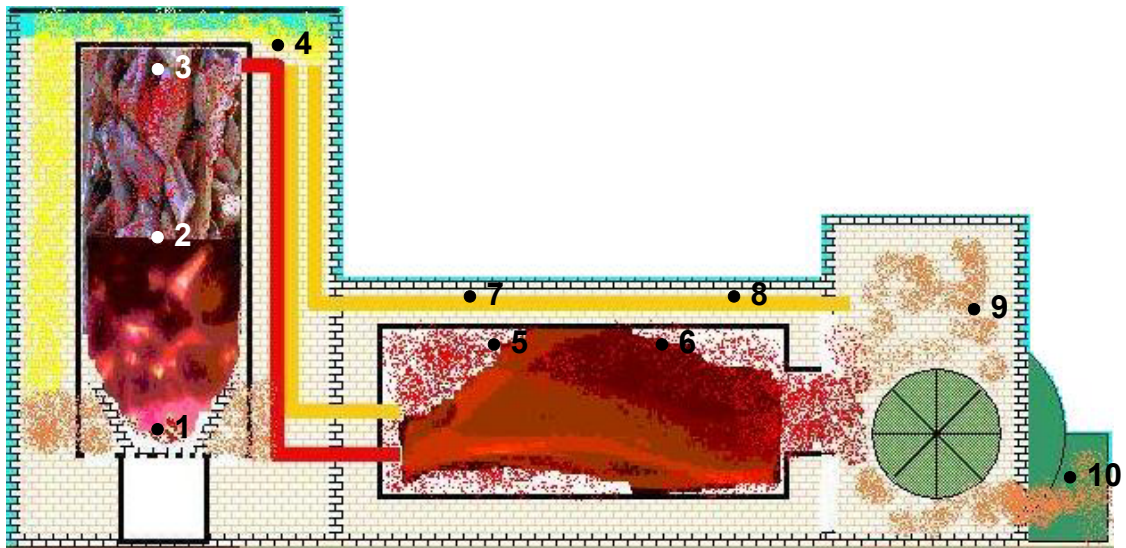


Figura 19 – Localização das sondas termométricas.

Os sensores de temperatura foram conectados a instrumentos de aquisição de dados, marca Dayon, modelo TC10, com sensibilidade de 0,1 °C (Figura 20). A aquisição das temperaturas foram obtidas em intervalos regulares de 20 minutos.



Figura 20 – Instrumento utilizado na aquisição das temperaturas.



### 3.2.2 Velocidades e vazões mássicas do ar primário e do ar de secagem

Para calcular as vazões mássicas de ar primário, mediram-se as velocidades do ar na entrada, utilizando-se um termo-anemômetro digital de fio quente, marca Hygro-Therm e modelo airflow<sup>TM</sup> – TA3, com sensibilidade de  $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ . A seção transversal da entrada de ar primário foi dividida em quatro áreas iguais, reticuladas (Figura 21), e a velocidade do ar foi medida no centro de cada área com intervalos regulares de 20 minutos.

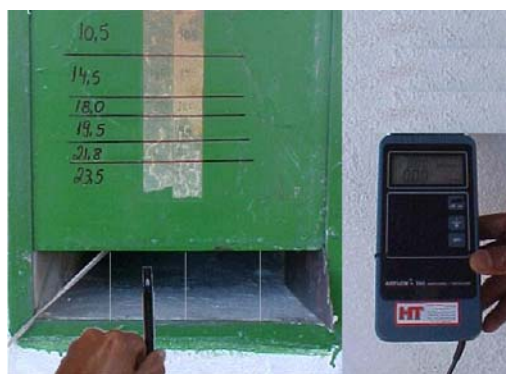


Figura 21 - Medição da velocidade do ar primário.

O ventilador operou com sua saída livre em todos os testes e a velocidade do ar quente, medida em dez pontos ao longo do diâmetro do duto de saída, foi obtida com o mesmo anemômetro descrito anteriormente, em intervalos regulares de 20 minutos. Estas velocidades foram comparadas às da curva do ventilador, obtida segundo a metodologia proposta pela "Air Moving and Conditions Association" – AMCA.

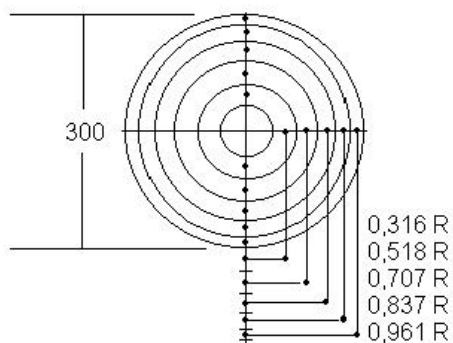


Figura 22 - Pontos de medida da velocidade do ar na seção transversal do duto de medição de vazão.

Esta metodologia consistiu na medição da pressão dinâmica do ar por meio de um tubo de "Pitot" conectado a um manômetro diferencial inclinado. Os pontos de medição foram determinados pelo método dos centróides de áreas iguais. Para o tamanho do duto utilizado (diâmetro de 300 mm), as pressões foram medidas em 20 pontos da seção transversal de medição (10 pontos por diâmetro, Figura 22). A curva do ventilador encontra-se no apêndice (Figura 1–A).

As vazões mássicas do ar primário, de refrigeração e de secagem foram obtidas pela equação 18, considerando estes como gases perfeitos, de acordo com as propriedades termodinâmicas e a pressão atmosférica local, a obtida nos registros diários da estação climatológica da Universidade Federal de Viçosa.

$$\dot{m} = \frac{v A P}{R T} \quad (18)$$

em que

- $\dot{m}$  - vazão mássica média,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $v$  - velocidade média do ar,  $\text{m s}^{-1}$ ;
- $A$  - área da seção,  $\text{m}^2$ ;
- $P$  - pressão atmosférica do local,  $\text{kPa}$ ;
- $R$  - constante do ar,  $0,2870 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ; e
- $T$  - temperatura do ar,  $\text{K}$ .

### 3.2.3 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar foi obtida por meio de um DATALOGGER. Instrumento da marca Sato, modelo SK-L200-TH, com sensores de umidade e temperatura, precisão de 0,1% e sensibilidade  $0,1^\circ\text{C}$  (Figura 23).



Figura 23 – DATALOGGER com sensor.

### 3.3 Características do combustível

O combustível utilizado nos testes de performance do sistema foi lenha de eucalipto, com diâmetros de  $75 \pm 25$  mm e cortada com comprimento de  $110 \pm 20$  mm (Figura 24).



Figura 24 – Amostra de lenha utilizada.

#### 3.3.1 Medida do poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi medido em bomba calorimétrica, no Laboratório de Energia da Madeira/Departamento de Engenharia Florestal/UFV, segundo as normas ASTM D-2015-66. O poder calorífico inferior foi obtido utilizando-se a equação 1, apresentada no item 2.2.1.

#### 3.3.2 Medida do teor de água do combustível

O teor de água da lenha de eucalipto foi medido colocando-se cinco amostras representativas em estufa previamente aquecida a  $105^{\circ}\text{C}$ . Em intervalos regulares de duas horas, fez-se a pesagem das amostras, até que atingissem peso constante. O teor de água da lenha foi calculado em base úmida pela equação 19.

$$U_{bu} = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \quad (19)$$

em que



- $U_{bu}$  - teor de água em base úmida, decimal bu;
- $M_0$  - massa da amostra de lenha úmida, g; e
- $M_1$  - massa da amostra de lenha seca, g.

### 3.3.3 Massa específica da lenha empilhada

A massa específica da lenha empilhada, utilizada para a gaseificação, foi obtida medindo-se a massa e o volume de uma amostra representativa do lote. Adotou-se esta metodologia para se conhecer a massa existente em um metro cúbico de lenha nas condições em que ela foi vendida e o valor obtido foi utilizado para cálculos do custo de aquecimento do ar.

A massa por unidade de volume foi calculada pela equação 20.

$$D = \frac{M_l}{V_m} \quad (20)$$

em que

- $D$  - massa específica da lenha empilhada,  $\text{kg m}^{-3}$
- $M_l$  - massa da amostra representativa, kg;
- $V_m$  - volume da amostra,  $\text{m}^3$ .

### 3.3.4 Composição elementar

Adotou-se como composição elementar da lenha de eucalipto "*eucalyptus grandi*" utilizada a citada por VLASSOV (2001): carbono 47,5 %, hidrogênio 6 %, oxigênio 44 %, nitrogênio 1 % e cinzas 1,5 %.

## 3.4 Parâmetros relativos à gaseificação

### 3.4.1 Cálculo da razão de equivalência

A razão de equivalência (RE), ou fator de ar, é definida como a razão entre a massa de ar usada na gaseificação e o parâmetro estequiométrico calculado a partir da composição da biomassa (LORA et al.,1997). Para este

propósito, utilizou-se a equação 21, tomando-se como referência a vazão mássica de ar primário quando o sistema encontrava-se em regime permanente.

$$RE = \frac{\dot{m}_l}{m_{ar}^t \dot{m}_{cb}} \quad (21)$$

em que

RE - razão de equivalência, decimal;

$\dot{m}_l$  - vazão mássica de ar primário usado na gasificação da biomassa,  $\text{kg.s}^{-1}$ ; e

$\dot{m}_{cb}$  - vazão mássica de combustível úmido,  $\text{kg.s}^{-1}$ .

A vazão mássica de combustível úmido foi obtida pela equação 22:

$$\dot{m}_{cb} = \frac{M_t}{\Delta t} \quad (22)$$

em que

$M_t$  - massa total de combustível úmido depositado no reator, kg; e

$\Delta t$  - duração do teste em regime permanente, s.

### 3.4.2 Cálculo da eficiência térmica

Para cálculo da eficiência térmica, a energia adicionada ao ar ambiente, para adquirir as condições de ar de secagem, foi considerada como energia útil. Ela representou a energia realmente aproveitada pelo sistema, ou seja, a variação de entalpia sofrida pelo ar ambiente ao atravessar o volume de controle.

Considerando a afirmação feita por SUKUP et al (1982) (item 2.5) e as propriedades termodinâmicas do ar (Figura 3), pode-se dizer então que:

$$\dot{q}_u = \dot{m}_{ar,s} h_s - \dot{m}_{ar,e} h_e \quad (23)$$

em que

- $\dot{m}_{ar,e}$  - vazão mássica total de ar que entra no volume de controle,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_{ar,s}$  - vazão mássica do ar de secagem que deixa o volume de controle,  $\text{kg s}^{-1}$ ;e
- $h_s, h_e$  - entalpias do ar que sai e entra no volume de controle,  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

Neste trabalho foi considerada como energia fornecida ao gaseificador-combustor aquela referenciada ao poder calorífico inferior do combustível, conforme dito anteriormente no item 2.6, ou seja, a disponibilizada na câmara de gaseificação. Deste modo, tem-se que  $\dot{q}_f = \dot{q}_d$  e considerando tal afirmação, a equação 14 passa a ser escrita como:

$$\eta = \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_d} 100 \quad (24)$$

Substituindo as equações 15 e 23 na equação 24, tem-se, para o cálculo simplificado da eficiência térmica, a equação 25.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ar,s} h_s - \dot{m}_{ar,e} h_e}{\dot{m}_{cb} \text{PCI}} 100 \quad (25)$$

A eficiência térmica do conjunto reator de gaseificação-câmara de combustão foi determinada considerando-se o volume de controle do sistema, representado na Figura 25, e também:

- a combustão dos gases foi completa;
- a quantidade de partículas de carbono arrastadas ou presentes nas cinzas foi desprezível;
- o sistema opera em regime permanente;

- o consumo de energia por equipamentos eletromecânicos é desprezível; e
- a vazão mássica total do ar que entra no volume de controle é a diferença entre a vazão mássica do ar de saída e a vazão mássica de combustível.

Assim sendo, a equação 25 foi reduzida à equação 26, a qual foi utilizada nos cálculos de eficiência térmica do sistema.

$$\eta = \left( \frac{\dot{m}_{ar.s} (h_s - h_e)}{\dot{m}_{cb} PCI} + \frac{h_e}{PCI} \right) 100 \quad (26)$$

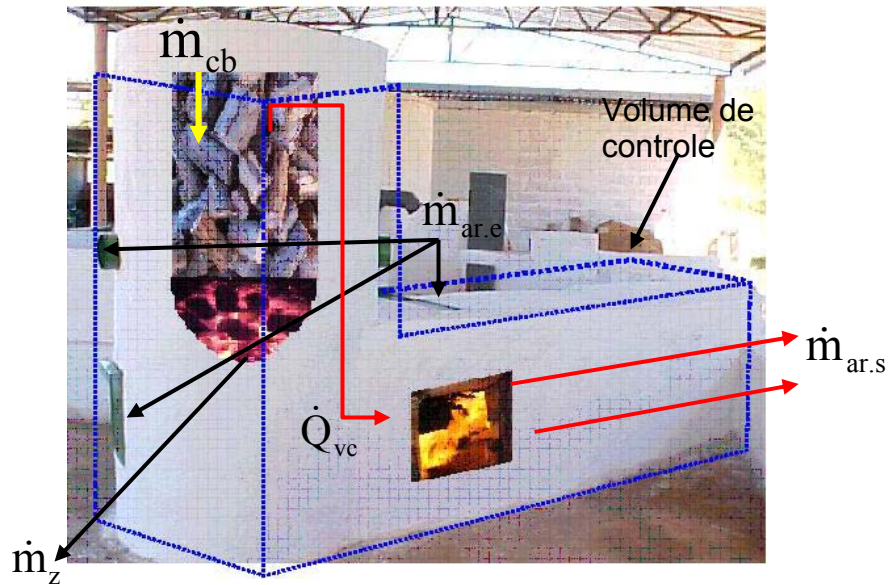


Figura 25 – Volume de controle aplicado ao sistema de gaseificação-combustão para aquecimento de ar.

Conhecida a eficiência térmica do sistema de gaseificação-combustão, pode-se estimar o consumo de combustível necessário ao aquecimento de ar utilizando-se os resultados experimentais de vazão e temperaturas do ar ambiente e do ar de secagem, como se segue:

$$\dot{m}_{ce} = \frac{\dot{m}_{ar.s} (h_s - h_e)}{\eta PCI - h_e} \quad (27)$$

em que

$\dot{m}_{ce}$  - consumo estimado de combustível,  $\text{kg s}^{-1}$ ; e

$\eta$  - eficiência térmica, decimal

### 3.5 Custos fixos e variáveis analisados na operação do sistema

#### 3.51 Depreciação anual

A depreciação é um custo não-monetário que reflete a perda do valor do capital com a idade, o uso e a obsolescência. É também um procedimento contábil que pode ser interpretado como fundos necessários para amortização do capital investido. Ele reflete a perda do valor do capital inicialmente investido na aquisição do bem. A depreciação foi estimada pelo método linear utilizando-se a equação 28:

$$D_a = \frac{V_{ic} - V_{fc}}{T} \quad (28)$$

em que

$D_a$  - depreciação,  $\text{R}\$.ano^{-1}$ ;

$T$  - tempo de vida útil dos equipamentos (anos);

$V_{ic}$  - valor inicial do capital,  $\text{R}\$$ ; e

$V_{fc}$  - valor final do capital,  $\text{R}\$$ .

#### 3.5.2 Custo de oportunidade

Este custo representa quanto o proprietário deixa de receber ao investir seu capital no sistema de aquecimento do ar, se comparado a outra opção de investimento, como, por exemplo, no mercado financeiro, que lhe renderia juros. Essa aplicação corresponde ao valor das benfeitorias que compõem o capital fixo do sistema de gaseificação-combustão que permanece completamente empatado durante sua vida útil, quando poderia estar gerando dividendos em outras alternativas.

O valor médio entre o valor inicial e final do capital foi considerado para se determinar o custo de oportunidade, fornecendo uma aproximação do montante total que ficou empatado durante a vida útil do sistema. O valor médio do capital investido, multiplicado pela taxa de juros praticados no mercado financeiro (6 % aa), representou a estimativa de quanto o proprietário deixaria de receber, em média, por ano, ao empregar seus recursos no sistema.

$$CO = \frac{V_{ic} + V_{fc}}{2} \cdot R \quad (29)$$

em que

CO - custo de oportunidade em R\$.ano<sup>-1</sup>; e

R - taxa de juros de mercado, percentagem.

### 3.5.3 Custo de conservação

O valor de custo de conservação foi considerado como sendo 5% do valor inicial do investimento. Este valor está de acordo com os praticados na economia para avaliação de projetos de investimentos.

### 3.5.4 Custo de combustível

O custo do combustível utilizado no experimento foi o praticado na região, adicionando-se os custos com mão-de-obra e energia elétrica para realização do corte da lenha nos tamanhos adequados (preparação). Este custo foi determinado pela equação 30.

$$C_{comb} = C_{ci} + C_{moc} + C_{elc} \quad (30)$$

em que

$C_{comb}$  - custo da lenha cortada em pedaços, R\$.kg<sup>-1</sup>;

$C_{ci}$  - custo da lenha no mercado, R\$ kg<sup>-1</sup>;

$C_{moc}$  - custo da mão-de-obra usada na preparação da lenha, R\$ kg<sup>-1</sup>; e

$C_{elc}$  - custo da energia utilizada na preparação da lenha, R\$ kg<sup>-1</sup>.

### 3.5.5. Custo da energia elétrica

O custo da energia elétrica usada na preparação da lenha e na operação do sistema de aquecimento foi calculado segundo a equação 31. A quantidade de energia elétrica utilizada foi obtida considerando-se a corrente elétrica, a tensão e o tempo de trabalho ao qual o motor foi submetido.

$$C_{el} = E_u C_{kWh} \quad (31)$$

em que

$C_{el}$  - custo com energia elétrica, R\$;

$E_u$  - energia utilizada no corte da lenha ou na operação do sistema, kWh; e

$C_{kWh}$  - preço da energia cobrada no meio rural, R\$ (kWh)<sup>-1</sup>.

### 3.5.6. Custo da mão-de-obra

Na determinação do custo da mão-de-obra utilizada na preparação da lenha e na operação do sistema considerou-se sua utilização parcial. A equação 32 pode ajustar este custo.

$$C_{mo} = n.P \quad (32)$$

em que

$C_{mo}$  - custo com mão-de-obra, R\$ h<sup>-1</sup>;

$P$  - preço da mão-de-obra praticado na região, R\$ h<sup>-1</sup>; e

$n$  - . constante de ajuste – operação do sistema  $n=0,4$

- preparação da lenha  $n=0,08$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Desempenho do sistema para aquecimento direto do ar

O desempenho do reator de gaseificação-combustão, para aquecimento direto do ar, foi estudado fazendo-se variar a área de entrada de ar de refrigeração no trocador de calor (casulo 2) da câmara de combustão e, conseqüentemente, as velocidades do ar nos diversos pontos de admissão do sistema. Realizaram-se testes com quatro situações de entrada de ar, como é discriminado na tabela 5.

A área de admissão do ar primário com o sistema em regime permanente foi de 45 cm<sup>2</sup> em todos os testes.

Tabela 5 – Detalhamento experimental.

| Situações de testes |                            | Número de testes |             | Duração<br>média dos<br>testes (h) |
|---------------------|----------------------------|------------------|-------------|------------------------------------|
|                     | aberturas(m <sup>2</sup> ) | Sem recarga      | Com recarga |                                    |
| 1 <sup>a</sup>      | 0,07                       | 1                | 0           | 2,0                                |
| 2 <sup>a</sup>      | 0,09                       | 3                | 0           | 2,8                                |
| 3 <sup>a</sup>      | 0,12                       | 0                | 2           | 3,4                                |
| 4 <sup>a</sup>      | 0,14                       | 1                | 0           | 5,0                                |

O motivo pelo qual se realizou somente um teste na primeira situação foi a constatação de alto consumo de lenha e baixa eficiência. Na terceira situação, por obterem-se eficiências consideráveis, os testes foram



realizados efetuando-se uma recarga no reator, obtendo-se, assim, uma situação real de campo.

#### **4.1.1 Efeitos das variações da área de admissão do ar de refrigeração no desempenho do reator de gaseificação-combustão**

A resposta do reator de gaseificação-combustão às variações da área de admissão do ar de refrigeração no trocador de calor da câmara de combustão foi verificada analisando-se as temperaturas do ar aquecido na saída do ventilador, o consumo de combustível e a eficiência térmica do sistema.

O aumento da área de admissão de ar na câmara de combustão através do trocador de calor (casulo 2) provocou queda na temperatura final do ar aquecido. As temperaturas médias do ar de secagem, nas diversas situações, estão ilustradas na Tabela 6.

A diminuição da temperatura é indicativa da ocorrência de dois fatos:

- queda na produção de gás combustível, provocada pela diminuição de ar primário disponível na câmara de gaseificação; e
- aumento da proporção do ar de mistura em relação aos gases da combustão, na câmara de mistura.

Nas primeiras situações de testes, a maior disponibilidade de ar primário na câmara de gaseificação não ocasionou razão de equivalência acima da citada nas literaturas (20 a 40%).

O aumento da área de admissão de ar na câmara de combustão através do trocador de calor (casulo 2) provocou queda na quantidade de ar primário admitido na câmara de gaseificação, ocasionando redução das reações químicas e conseqüentemente o consumo de combustível. Com a queda no consumo de combustível e a temperatura do ar de secagem mantendo-se entre 50 e 60 °C, ocorreu um aumento na eficiência térmica (Tabela 6).

Quando o sistema trabalhou com reabastecimento, constatou-se que a eficiência do teste da recarga foi maior que a eficiência do teste da carga inicial, simplesmente porque, no reabastecimento, a câmara de gaseificação encontrava-se nas condições ideais de temperatura (600 a 800 °C) para a

ocorrência das reações de gaseificação. Esta observação é muito importante na análise do desempenho do sistema, pois representa a situação real de campo.

Tabela 6 – Temperatura do ar, consumo de combustível e rendimento térmico do sistema nas diversas situações de teste

| Situações de testes | Temperaturas médias do ar - °C |       | Velocidade média do ar primário m s <sup>-1</sup> | Razão de equivalência % | Consumo de lenha kg h <sup>-1</sup> | Vazão mássica ar quente-kg s <sup>-1</sup> | Duração dos testes - h | Rendimento térmico - % |
|---------------------|--------------------------------|-------|---------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                     | entrada                        | saída |                                                   |                         |                                     |                                            |                        |                        |
| 1 <sup>a</sup> –    | 22                             | 73    | 2,12                                              | 25,5                    | 32,4                                | 1,04                                       | 2,0                    | <b>36</b>              |
| 2 <sup>a</sup> –    | 19                             | 60    | 1,33                                              | 23,7                    | 22,3                                | 1,23                                       | 3,0                    | <b>48</b>              |
| 2 <sup>a</sup> –    | 26                             | 63    | 1,29                                              | 22,3                    | 22,3                                | 1,23                                       | 2,5                    | <b>44</b>              |
| 2 <sup>a</sup> –    | 24                             | 57    | 1,25                                              | 21,9                    | 22,3                                | 1,26                                       | 3,0                    | <b>41</b>              |
| 3 <sup>a</sup> –    | 25                             | 52    | 0,89                                              | 23,2                    | 15,1                                | 1,33                                       | 4,0                    | <b>51</b>              |
| recarga             | 21                             | 64    | 1,08                                              | 21,4                    | 20,2                                | 1,24                                       | 3,0                    | <b>58</b>              |
| 3 <sup>a</sup> –    | 15                             | 54    | 1,14                                              | 22,9                    | 19,8                                | 1,34                                       | 3,0                    | <b>56</b>              |
| recarga             | 23                             | 63    | 0,90                                              | 22,6                    | 15,8                                | 1,29                                       | 3,5                    | <b>71</b>              |
| 4 <sup>a</sup> –    | 21                             | 50    | 0,82                                              | 23,2                    | 14,0                                | 1,17                                       | 5,0                    | <b>51</b>              |

## 4.2 Características do combustível

### 4.2.1 Massa específica da lenha empilhada

A massa específica da lenha empilhada depende de vários parâmetros, como: umidade, espécie da lenha e até mesmo a maneira do empilhamento. Devido a essas variações, várias empresas vêm adotando a compra de lenha pela massa e seguindo uma classificação quanto à umidade. O valor encontrado foi de 394 kg m<sup>-3</sup> e não faremos comparação com valores citados por literaturas, já que o valor foi utilizado especificamente para cálculo de custo e a metodologia usada não fornece a massa específica real da madeira e sim da pilha de lenha.

### 4.2.2 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) do combustível, medido conforme recomendação da norma ASTM D-2015-66, em bomba calorimétrica

adiabática, foi de 18737,3 kJ kg<sup>-1</sup>. O valor obtido apresentou-se de acordo com o citado por JENKINS (1990), de 19420 kJ kg<sup>-1</sup>.

#### 4.2.3 Poder calorífico inferior

Na determinação do poder calorífico inferior, adotou-se a composição elementar citada por VLASSOV (2001) e conhecendo o PCS, calculou-se o poder calorífico inferior do combustível (PCI) utilizando a equação 1, cujo valor obtido foi de 17.243 kJ kg<sup>-1</sup>.

#### 4.3 Temperaturas nos pontos do sistema

As temperaturas nos pontos do sistema, (indicados na Figura 19), durante a operação de gaseificação com combustão dos gases, situaram-se dentro dos intervalos citados pelas literaturas para gaseificadores contracorrentes.

A mudança de uma situação de teste para outra não ocasionou grandes variações de temperatura nestes pontos. Na Tabela 7, podem-se observar as temperaturas nos variados pontos do sistema, medidas em intervalos de 20 minutos, durante um teste.

Tabela 7 – Temperaturas nos pontos do sistema

| Localização                  | Temperaturas em intervalos de 20 minutos -°C |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|------------------------------|----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 1 - zona de oxidação         | 756                                          | 845 | 875 | 922 | 918 | 915 | 896 | 874 | 822 |  |
| 2 - provável zona de redução | 622                                          | 658 | 659 | 667 | 702 | 699 | 675 | 724 | 653 |  |
| 3 - zona de secagem          | 281                                          | 288 | 327 | 332 | 336 | 345 | 357 | 387 | 470 |  |
| 4 - saída do casulo 1        | 71                                           | 65  | 74  | 73  | 75  | 70  | 73  | 76  | 87  |  |
| 5 - combustor                | 550                                          | 710 | 698 | 705 | 722 | 732 | 710 | 670 | 450 |  |
| 6 - combustor                | 345                                          | 406 | 412 | 454 | 461 | 374 | 323 | 317 | 280 |  |
| 7 – trocador de calor        | 33                                           | 34  | 34  | 35  | 35  | 32  | 31  | 29  | 26  |  |
| 8 - saída do casulo 2        | 42                                           | 43  | 44  | 48  | 50  | 39  | 36  | 35  | 31  |  |
| 10 – ar de secagem           | 58                                           | 59  | 61  | 61  | 63  | 58  | 55  | 52  | 47  |  |
| 11 - ar ambiente             | 22                                           | 22  | 22  | 23  | 24  | 24  | 25  | 25  | 26  |  |

A temperatura no ponto 4, por se tratar de uma região do sistema que foi construída com o objetivo de aproveitar o calor dissipado pela câmara de

gaseificação e evitar acidentes por queimaduras, funcionou de forma esperada.

Os dados demonstraram que os  $0,20 \pm 0,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de ar ambiente, com temperatura média de  $22 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , que entravam nesta região, saíam desta com significativo aumento de temperatura no decorrer dos testes .

A região dos pontos 7 e 8 possuía o mesmo objetivo descrito anteriormente em relação ao combustor. Apesar de o aumento da temperatura do ar que atravessava a região não ter sido tão significativo, devido à grande quantidade ( $0,92 \pm 0,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) de ar ambiente admitido nesta região, o sistema também funcionou de forma esperada.

As temperaturas dentro do combustor (pontos 5 e 6) situaram-se entre 280 e 770  $^\circ\text{C}$ , oferecendo, assim, situações propícias para queima dos combustíveis presentes. Este intervalo apresentou-se de acordo com os citados por ANDRADE (1984) e LIMA (1974) para ignição de alguns combustíveis. Deve-se ressaltar que estes pontos não estavam localizados na região de atividade máxima da chama. Em testes preliminares, as temperaturas verificadas na região de atividade máxima da chama foram superiores a 700  $^\circ\text{C}$

#### **4.4 Parâmetros da avaliação de custo do sistema de gaseificação-combustão**

Na Tabela 8, têm-se os parâmetros de custos obtidos na implantação e no funcionamento do reator de gaseificação-combustão, visando o aquecimento de ar.

A determinação do custo total foi realizada com os dados apresentados na Tabela 8. Para dados relacionados ao funcionamento, foi considerado como ideal, (vazão de  $1,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de 60  $^\circ\text{C}$ , comum na maioria dos secadores utilizados no meio rural (LOPES 2002)), o teste da recarga da 3ª situação, do dia 04/07/2003. Nesta condição, o sistema apresentou consumo de combustível de  $15,8 \text{ kg.h}^{-1}$ , com eficiência térmica de 71,0 % e autonomia para funcionamento por 3 horas.

No investimento, desconsiderou-se o ventilador, por entender que se trata da avaliação de um sistema de transformação de energia em uma determinada condição.

Tabela 8 – Valores utilizados no cálculo das estimativas de custo de produção do reator de gaseificação-combustão

| Parâmetros                                   | Unidade                        | Valores |
|----------------------------------------------|--------------------------------|---------|
| Temperatura média do ar ambiente             | °C                             | 23      |
| Temperatura média do ar de secagem           | °C                             | 63      |
| Umidade Relativa do ar ambiente              | %                              | 40      |
| PCI do combustível.                          | kJ kg <sup>-1</sup>            | 17243   |
| Vazão volumétrica de ar                      | m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> | 4498    |
| Vazão mássica de ar                          | Kg h <sup>-1</sup>             | 4661    |
| Preço da Lenha de eucalipto no mercado       | R\$ m <sup>-3</sup>            | 26,00   |
| Preço Mão-de-obra                            | R\$ h <sup>-1</sup>            | 2,05    |
| Preço eletricidade                           | R\$ kWh <sup>-1</sup>          | 0,22    |
| Duração da safra                             | h                              | 2880    |
| Investimento                                 | R\$                            | 2000,0  |
| Custo da mão de obra no preparo da lenha     | R\$ h <sup>-1</sup>            | 0,16    |
| Custo da mão de obra na operação do sistema  | R\$ h <sup>-1</sup>            | 0,82    |
| Consumo de combustível (lenha)               | kg h <sup>-1</sup>             | 15,8    |
| Consumo de eletricidade no preparo da lenha  | kWh ano <sup>-1</sup>          | 387     |
| Custo final do combustível (lenha preparada) | R\$ kg <sup>-1</sup>           | 0,09    |
| Consumo de eletricidade na operação do       | KWh                            | 5069    |

Considerando os parâmetros da Tabela 8, calcularam-se os custos anuais variáveis com combustíveis, eletricidade e mão-de-obra. Estes dois últimos referem-se somente à operação do sistema, pois os custos com eletricidade e mão-de-obra, utilizadas na preparação da lenha, estão inseridos no custo final do combustível. Os custos fixos anuais com depreciação, conservação e custo de oportunidade também foram embasados nos parâmetros da Tabela 8. Os valores apresentados foram obtidos considerando-se que o tempo de duração da safra foi de 2880 horas e a vida útil do sistema de cinco anos. O motivo da baixa vida útil se deve ao fato de que a câmara de gaseificação foi construída com uma chapa de espessura média e os danos térmicos são inevitáveis, mesmo com os dispositivos construídos visando a refrigeração do sistema.

Tabela 9 – Custos anuais com a operação do sistema

| Custos anuais           | Unidades              | Valor          |
|-------------------------|-----------------------|----------------|
| <b>Custos variáveis</b> |                       |                |
| Combustível             | R\$ ano <sup>-1</sup> | 4095,00        |
| Eletricidade            | R\$ ano <sup>-1</sup> | 1115,00        |
| Mão-de-obra             | R\$ ano <sup>-1</sup> | 2361,00        |
| <b>Custos fixos</b>     |                       |                |
| Depreciação             | R\$ ano <sup>-1</sup> | 400,00         |
| Conservação             | R\$ ano <sup>-1</sup> | 200,00         |
| Custo de oportunidade   | R\$ ano <sup>-1</sup> | 24,00          |
| <b>Custo total</b>      | R\$ ano <sup>-1</sup> | <b>8195,00</b> |

A Tabela 10 é apresentado um resumo dos indicadores de custos obtidos com a implantação e operação do reator de gaseificação-combustão no aquecimento de ar para secagem de produtos agrícolas.

Tabela 10 – Indicadores de custos do sistema de aquecimento

| Parâmetros Econômicos                     | Unidades              | Valor   |
|-------------------------------------------|-----------------------|---------|
| <b>Custos totais do aquecimento de ar</b> |                       |         |
| Custo fixo total                          | R\$ ano <sup>-1</sup> | 624,00  |
| Custo variável total                      | R\$ ano <sup>-1</sup> | 7571,00 |
| Custo total                               | R\$ ano <sup>-1</sup> | 8195,00 |
| <b>Custos médios</b>                      |                       |         |
| Custo fixo total médio                    | R\$ h <sup>-1</sup>   | 0,22    |
| Custo variável total médio                | R\$ h <sup>-1</sup>   | 2,63    |
| Custo total médio                         | R\$ h <sup>-1</sup>   | 2,84    |

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este estudo foi realizado na Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Um reator de gaseificação do tipo contracorrente, acoplado a uma câmara de combustão do gás produzido, foi desenvolvido e avaliado visando o aquecimento direto do ar para aplicação na secagem de produtos agrícolas.

O sistema foi composto por uma câmara de gaseificação, uma câmara de combustão e um ventilador.

Na busca da melhor eficiência do sistema, os testes foram realizados com quatro áreas de entrada de ar de refrigeração na câmara de combustão dos gases, analisando a temperatura do ar aquecido, o consumo de combustível e a eficiência térmica.

Uma análise de custos de implantação e de funcionamento do sistema também foi executada.

De acordo com os testes realizados na operação do sistema para aquecimento direto do ar, pôde-se concluir:

- na condição de funcionamento ideal (vazão de  $1,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , comum na maioria dos secadores utilizados no meio rural (LOPES 2002)), o sistema disponibiliza ar com potencial para a secagem de produtos agrícolas com boa eficiência. Operando

nesta condição, o sistema apresentou autonomia para funcionamento por 3 horas;

- em regime permanente, a gaseificação de biomassa se processou de forma contínua e regular, com temperaturas ideais nas zonas de oxidação, redução, pirólise e secagem;
- a produção contínua e regular de gás na câmara de gaseificação permitiu manter estável a queima do gás na câmara de combustão, bem como a temperatura do ar aquecido para secagem;
- há necessidade de se colocar retentores no combustor para aumentar o tempo de residência do gás, permitindo assim, queima completa deste;
- a construção e a operação do sistema estudado são simples se comparadas com outros tipos de gaseificadores ;
- a utilização do sistema com casulos atendeu às expectativas para as quais eles foram construídos, isto é, para evitar acidentes e para o aproveitamento do calor dissipado nas câmaras de gaseificação e combustão;
- o sistema responde imediatamente ao reabastecimento de combustível, assegurando a estabilidade e continuidade operacional no caso de secagem contínua ou por longos períodos;
- há necessidade de se operar o sistema com velocidades adequadas nas câmaras de gaseificação e combustão, para evitar o arraste de gases combustíveis antes de se queimarem;
- a gaseificação da biomassa deve ser considerada como uma alternativa viável e complementar na geração de energia para secagem de produtos agrícolas; e
- os custos de construção do sistema situaram-se dentro do esperado, são acessíveis à realidade rural e os ajustes necessários na câmara de combustão poderão aumentar a eficiência, diminuindo os custos de operação.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, P.F.S.P., STEPHAN, C. **Análise de investimentos**. Rio de Janeiro: Campus, 1982. 280p.
- ANDRADE, E.B. **Combustíveis e fornalhas**. Viçosa: CENTREINAR, 1982. 68 p.
- ANDRADE, E.B., SASSERON, J. L., OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa: CENTREINAR, 1984. 39 p.
- ASSUMPÇÃO, R.M.V (1988) **Gaseificadores de leito fixo, análise e modelo para otimização de projetos e pesquisas**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.
- BADGER, P.C. Solid fuels. In: KITANI, O. **Energy and biomass engineering**. Michigan, ASAE, 1999. p248-288, v.5.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: ed. da UFSC, 1995. 216 p. (Série didática).
- BROME, J.S.S., KING, J.E. (1956) **Fuel: solid, liquid and gaseous**. London: Edward Arnold.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de energia. **Balanco Energético Nacional** Ano Base 2002. Brasília. [citado em 04 de agosto de 2003]. Disponível da <http://WWW.mme.gov.br/sen/ben/BenTab/>
- BRIDGEWATER, A.V (1991) **Review of thermochemical biomass conversion**. ESTU B1202. Crown.
- CAMARGO, C.A. (Coord.). **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. 796p. (Publicação IPT, 1817).

- CARDOSO SOBRINHO, J.; SILVA, J.N. LACERDA FILHO, A.F; SILVA, J.S. **Custos comparativos de secagem de café usando-se lenha de eucalipto e gás liquefeito de petróleo** – In: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil. 2000, Poços de Calda-MG. **Anais...** p.1132-1137.
- D'ÁVILA, S.G.; MAKRAY, Z.T. Gaseificadores de madeira – aspectos técnicos econômicos. In: CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: 1981.
- DINIZ, V.Y. Caldeiras a lenha. In: PENEDO, W.R. (comp.). **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1981. p.113-131. (Série SPT 004).
- FRANCISCO, W. **Matemática financeira**. Rev. Ampl. e Atualizada. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1985. 319p.
- GOMES, L.C.L.; LELLES, J.G.; CARDOSO, J.M. AMARAL, M.A. Energia térmica primária gerada pelas madeiras de *Xilopia sericea* (Pimenteira) e *Secropia* sp (Embaúba). **Informativo SIF**, (4):1-3, 1985.
- GOMES, R.A.R. **Avaliação do desempenho de uma fornalha a lenha de fluxo descendente e com sistema de aquecimento direto**. Viçosa: UFV, 1988. 56p. Dissertação (Dissertação de mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- HEMATI, M., EL GHEZOL, L., LAGUERIE, C. Modelling of wood sawdust pyrolysis in a fluidized bed, in Fluidization IV, Engineering Foundation. 1989. p. 709-717, New York.
- JENKINS, B.M., GOSS, J.R., CHANCELLOR, W.J., CAMACHO, I.R. Variation of engine performance with reactor size for a rice hull fueled gasification system. ASAE paper, 1990.p. 90-6076.
- LIMA, L da R. **Elementos básicos da engenharia química**. São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 412p.
- LOPES, R.P.; AFONSO, A.D.L.; SILVA, J.S. Energia no pré-processamento de produtos agrícolas. In: **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**, Viçosa-MG: APRENDA FÁCIL, 2000. p.191-219.
- LOPES, R.P.; **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar**. Viçosa: UFV, 2002. 220p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- LORA, E. S., HAPP, J. F., CORTEZ, L. A. B. Caracterização e disponibilidade da biomassa. In: CORTEZ, L.A.B., LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI, 1997. p5-37.

- MAGALHÃES, J. G. R. A energia que vem da floresta. In: MELLO, M. G. **Biomassa – energia dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH/UFMG, 2001. p. 133-144.
- MELO, E.C. **Rendimento térmico de uma fornalha a lenha de fluxos descendentes**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1987. 45p. (Dissertação de mestrado).
- MILNE, T. (1981) Pyrolysis- the thermal behavior of biomass below 600 °C. In: **Biomass Gasification: Principles and Technology**. Reed, T.B. (ed.). Noyes Data Corporation. p. 91-111.
- OCÓN, J., Producción industrial del calor. Combustibles, combustión y gasificación. In: VIAN, A., AGUILAR, J.O. **Elementos de ingeniería química**. España, 1967. p.141-181.
- OLIVEIRA, G.A. Desenvolvimento e teste de uma fornalha com aquecimento indireto e autocontrole da temperatura máxima do ar para secagem de produtos agrícolas. Viçosa: UFV, 1996. 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- PAYNE, F. A.; CHANDRA, P.K. Mass Balance for biomass gasifier-combustor. **Transaction of the ASAE** 28 (6): 2037-2041, 1985.
- PERA, H. Geradores de vapor; um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. São Paulo: Fama, 1990. (Paginação irregular).
- ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295p.
- SAGLIETI, J.R.C. **Rendimento térmico de fornalha a lenha de fluxos cruzados**. Botucatu: UNESP, 1991. 102p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, 1991.
- SHAW, J.T., PATERSON, N.P. (1978) **Studies of the gasification of solid fuels in a fluidized bed at atmospheric pressure**. Fluidization: Cambridge University Press. p. 229-234.
- SILVA, J.N.; PINHEIRO, M.C. Principais características dos gaseificadores de biomassa utilizados na secagem de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa. 1984, v. 9,10 n.1 e 2 p.41-44.
- SIMMONS, G.M., LEE, W.H. (1985) Kinetics of gas formation from cellulose and wood pyrolysis. In: **Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion**. Overend, R.P., Milne, T.A., Mudge, L.K. (eds.). London: Elsevier App. Sc. Pub., p. 385-395.

- SUKUP, C. E., BERN, C. J., BUCHELE, W. F. Performance of a biomass furnace for grain drying. St. Joseph: **American Society of Agricultural Engineers**, 1982. 32p. (ASAE Paper, 82-3524).
- VALARELLI, I.D. **Desenvolvimento e teste de uma fornalha a resíduos agrícolas, de fogo indireto para secadores de produtos agrícolas**. Botucatu: UNESP, 1991. 123p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista, 1991.
- VAN WYLEN, G.J., SONNTAG, R.E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 565p.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 185p.
- ZANIN, A.; SOUZA, S.M.N. Potencial energético da biomassa de resíduos vegetais e animais na região do oeste do Paraná. In: SEMINÁRIO ENERGIA NA AGRICULTURA, 1. Uberaba, 2000. **Anais...**Uberaba. Cemig, 2000. p.114-118.

## **APÊNDICES**

Quadro 1-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão

| Teste do dia 16/ 06/2003                                                     | Consumo lenha = 65kg    | Partida = 14:55                                                        | Gasificação= 15:10 | Final = 17:10 |       |       |       |   |   |   |   |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------|-------|-------|-------|---|---|---|---|-------|---|-------|
|                                                                              | seção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |                    |               |       |       |       |   |   |   |   | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>    | 1,95                                                                   | 1,90               | 1,96          | 2,20  | 2,50  | 2,20  | x | x | x | x | x     | x | 2,12  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,10                                                                   | 3,40               | 3,10          | 2,80  | 2,80  | 2,80  | x | x | x | x | x     | x | 2,83  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,10                                                                   | 2,20               | 3,10          | 2,50  | 2,60  | 2,50  | x | x | x | x | x     | x | 2,50  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,00                                                                   | 2,10               | 2,70          | 2,20  | 2,60  | 2,30  | x | x | x | x | x     | x | 2,32  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,10                                                                   | 2,30               | 2,50          | 2,00  | 2,40  | 2,30  | x | x | x | x | x     | x | 2,27  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,10                                                                   | 2,10               | 2,40          | 2,20  | 2,60  | 2,30  | x | x | x | x | x     | x | 2,28  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>    | 8,40                                                                   | 9,40               | 9,40          | 10,1  | 10,1  | 9,50  | x | x | x | x | x     | x | 9,48  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>    | x                                                                      | x                  | x             | x     | x     | x     | x | x | x | x | x     | x | x     |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>    | x                                                                      | x                  | x             | x     | x     | x     | x | x | x | x | x     | x | x     |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>    | 11,51                                                                  | 11,40              | 10,54         | 10,60 | 11,80 | 11,20 | x | x | x | x | x     | x | 11,18 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                         |                                                                        |                    |               |       |       |       |   |   |   |   |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                         | 840                                                                    | 872                | 918           | 913   | 893   | 815   | x | x | x | x | x     | x | 875   |
| P2 - zona redução                                                            |                         | 544                                                                    | 586                | 690           | 720   | 714   | 610   | x | x | x | x | x     | x | 644   |
| P3 - zona secagem                                                            |                         | 163                                                                    | 184                | 326           | 401   | 345   | 320   | x | x | x | x | x     | x | 290   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                         | 54                                                                     | 59                 | 65            | 72    | 72    | 80    | x | x | x | x | x     | x | 67    |
| P5 - combustor                                                               |                         | 455                                                                    | 538                | 607           | 645   | 528   | 489   | x | x | x | x | x     | x | 544   |
| P6 - combustor                                                               |                         | 354                                                                    | 481                | 522           | 531   | 482   | 423   | x | x | x | x | x     | x | 466   |
| P7 - trocador calor                                                          |                         | 32                                                                     | 42                 | 43            | 39    | 39    | 38    | x | x | x | x | x     | x | 39    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                         | 36                                                                     | 49                 | 49            | 45    | 43    | 44    | x | x | x | x | x     | x | 44    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                         | 69                                                                     | 84                 | 90            | 84    | 62    | 63    | x | x | x | x | x     | x | 75    |
| P10 - ar secagem                                                             |                         | 70                                                                     | 83                 | 80            | 73    | 60    | 73    | x | x | x | x | x     | x | 73    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                         | 23                                                                     | 22                 | 22            | 21    | 20    | 22    | x | x | x | x | x     | x | 22    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                         | 63,9                                                                   | 65,4               | 71,3          | 73,1  | 76,0  | 77,0  | x | x | x | x | x     | x | 71,1  |

Quadro 2-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão

| Teste do dia 18/ 06/2003                                                     |                          | Consumo lenha = 67kg                                                   |       |       | Partida = 15:45 |       |       | Gasificação= 16:10 |       |       | Final = 19:10 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 1,45                                                                   | 1,28  | 1,35  | 1,29            | 1,29  | 1,31  | 1,34               | 1,40  | 1,29  | x             | x     | x | 1,33  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,45                                                                   | 2,52  | 2,51  | 2,56            | 2,68  | 2,56  | 2,42               | 2,51  | 2,48  | x             | x     | x | 2,52  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,20                                                                   | 2,21  | 2,19  | 2,14            | 2,27  | 2,14  | 2,26               | 2,23  | 2,18  | x             | x     | x | 2,20  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,32                                                                   | 1,98  | 2,05  | 2,15            | 2,11  | 2,15  | 2,14               | 2,10  | 2,08  | x             | x     | x | 2,12  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,23                                                                   | 2,13  | 2,06  | 2,11            | 2,16  | 2,21  | 2,17               | 2,14  | 2,08  | x             | x     | x | 2,14  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,43                                                                   | 2,35  | 2,27  | 2,24            | 2,15  | 2,22  | 2,27               | 2,29  | 2,28  | x             | x     | x | 2,28  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 8,97                                                                   | 8,46  | 8,51  | 8,58            | 8,79  | 8,68  | 8,65               | 8,72  | 8,54  | x             | x     | x | 8,66  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x | x     |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | 6,87                                                                   | 6,98  | 7,34  | 7,38            | 7,71  | 7,22  | 7,28               | 7,29  | 7,26  | x             | x     | x | 7,26  |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 12,37                                                                  | 12,53 | 12,80 | 12,76           | 12,43 | 12,87 | 12,67              | 12,56 | 12,76 | x             | x     | x | 12,64 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 810                                                                    | 821   | 915   | 954             | 976   | 916   | 894                | 872   | 821   | x             | x     | x | 887   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 707                                                                    | 771   | 731   | 736             | 706   | 699   | 675                | 724   | 653   | x             | x     | x | 711   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 170                                                                    | 262   | 280   | 324             | 338   | 345   | 357                | 387   | 470   | x             | x     | x | 326   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 47                                                                     | 52    | 57    | 60              | 63    | 70    | 73                 | 76    | 87    | x             | x     | x | 65    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 570                                                                    | 700   | 682   | 750             | 745   | 732   | 710                | 670   | 450   | x             | x     | x | 668   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 302                                                                    | 410   | 419   | 390             | 400   | 374   | 323                | 317   | 280   | x             | x     | x | 357   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 28,4                                                                   | 31    | 32    | 30              | 32    | 31    | 30                 | 28    | 27    | x             | x     | x | 30    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 36                                                                     | 41    | 40    | 38              | 40    | 39    | 36                 | 35    | 31    | x             | x     | x | 37    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 60                                                                     | 65    | 65    | 63              | 66    | 65    | 62                 | 57    | 48    | x             | x     | x | 61    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 59                                                                     | 64    | 64    | 63              | 63    | 64    | 61                 | 56    | 45    | x             | x     | x | 60    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 22                                                                     | 20    | 19    | 18              | 18    | 19    | 20                 | 17    | 17    | x             | x     | x | 19    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 67,3                                                                   | 71,9  | 76,1  | 78              | 80,2  | 81,2  | 82,4               | 83,3  | 83,9  | x             | x     | x | 78,2  |

Quadro 3-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão

| Teste do dia 20/ 06/2003                                                     |                          | Consumo lenha = 56kg                                                   |       |       | Partida = 13:15 |       |       | Gasificação= 13:50 |       |   | Final = 16:15 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|---|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |   |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 1,05                                                                   | 1,24  | 1,57  | 1,31            | 1,36  | 1,24  | 1,26               | 1,28  | x | x             | x     | x | 1,29  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,72                                                                   | 2,29  | 2,56  | 2,48            | 2,67  | 2,55  | 2,42               | 2,46  | x | x             | x     | x | 2,52  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,38                                                                   | 2,36  | 2,27  | 2,38            | 2,50  | 2,21  | 2,31               | 2,35  | x | x             | x     | x | 2,35  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,50                                                                   | 2,21  | 2,31  | 2,35            | 2,30  | 2,50  | 2,21               | 2,31  | x | x             | x     | x | 2,34  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,41                                                                   | 2,39  | 2,23  | 2,50            | 2,21  | 2,31  | 2,36               | 2,31  | x | x             | x     | x | 2,34  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,59                                                                   | 2,51  | 2,32  | 2,24            | 2,21  | 2,19  | 2,50               | 2,21  | x | x             | x     | x | 2,35  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 8,94                                                                   | 8,65  | 8,68  | 8,81            | 8,92  | 8,56  | 8,74               | 8,82  | x | x             | x     | x | 8,77  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x | x             | x     | x | 7,59  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | 7,65                                                                   | 7,52  | 7,56  | 7,68            | 7,42  | 7,66  | 7,59               | 7,62  | x | x             | x     | x | 7,58  |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 12,87                                                                  | 12,93 | 12,48 | 12,84           | 12,88 | 12,67 | 12,58              | 12,86 | x | x             | x     | x | 12,76 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |   |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 756                                                                    | 845   | 875   | 922             | 913   | 894   | 874                | 842   | x | x             | x     | x | 865   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 622                                                                    | 658   | 659   | 667             | 702   | 689   | 654                | 612   | x | x             | x     | x | 658   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 281                                                                    | 288   | 327   | 332             | 336   | 341   | 352                | 367   | x | x             | x     | x | 328   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 71                                                                     | 65    | 74    | 73              | 75    | 77    | 78                 | 84    | x | x             | x     | x | 75    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 550                                                                    | 710   | 698   | 705             | 722   | 689   | 624                | 575   | x | x             | x     | x | 659   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 345                                                                    | 406   | 412   | 454             | 461   | 432   | 423                | 398   | x | x             | x     | x | 416   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 33                                                                     | 34    | 35    | 35              | 37    | 36    | 34                 | 33    | x | x             | x     | x | 35    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 42                                                                     | 43    | 44    | 48              | 50    | 49    | 47                 | 46    | x | x             | x     | x | 46    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 60                                                                     | 65    | 67    | 70              | 69    | 64    | 63                 | 61    | x | x             | x     | x | 65    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 60                                                                     | 64    | 66    | 69              | 68    | 62    | 61                 | 57    | x | x             | x     | x | 63    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 28                                                                     | 27    | 27    | 27              | 26    | 25    | 24                 | 23    | x | x             | x     | x | 26    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 40,0                                                                   | 43,5  | 44,5  | 46,7            | 48,9  | 49,3  | 50,4               | 51,9  | x | x             | x     | x | 46,9  |



Quadro 4-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| Teste do dia 25/ 06/2003                                                     |                          | Consumo lenha = 67kg                                                   |       |       | Partida = 9:00 |       |       | Gasificação= 09:30 |       |       | Final = 12:30 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 1,19                                                                   | 1,12  | 1,30  | 1,40           | 1,34  | 1,22  | 1,31               | 1,20  | 1,18  | x             | x     | x | 1,25  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,38                                                                   | 2,56  | 2,78  | 2,64           | 2,51  | 2,36  | 2,21               | 2,68  | 2,32  | x             | x     | x | 2,49  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,53                                                                   | 2,22  | 2,38  | 2,42           | 2,28  | 2,45  | 2,36               | 2,47  | 2,51  | x             | x     | x | 2,40  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,36                                                                   | 2,21  | 2,68  | 2,32           | 2,53  | 2,22  | 2,38               | 2,42  | 2,28  | x             | x     | x | 2,38  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,45                                                                   | 2,36  | 2,47  | 2,51           | 2,36  | 2,21  | 2,68               | 2,32  | 2,34  | x             | x     | x | 2,41  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,46                                                                   | 2,34  | 2,41  | 2,28           | 2,45  | 2,36  | 2,47               | 2,51  | 2,29  | x             | x     | x | 2,40  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 8,21                                                                   | 8,42  | 8,79  | 8,81           | 8,74  | 8,22  | 8,76               | 8,59  | 8,68  | x             | x     | x | 8,58  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | x                                                                      | x     | x     | x              | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x |       |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | 6,84                                                                   | 7,12  | 7,11  | 7,07           | 6,98  | 7,12  | 7,21               | 6,99  | 6,87  | x             | x     | x | 7,03  |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 12,86                                                                  | 12,94 | 12,89 | 12,92          | 12,86 | 12,92 | 12,94              | 12,95 | 12,84 | x             | x     | x | 12,90 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 756                                                                    | 845   | 875   | 922            | 918   | 915   | 896                | 874   | 822   | x             | x     | x | 869   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 622                                                                    | 658   | 659   | 667            | 702   | 699   | 675                | 724   | 653   | x             | x     | x | 673   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 281                                                                    | 288   | 327   | 332            | 336   | 345   | 357                | 387   | 470   | x             | x     | x | 347   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 71                                                                     | 65    | 74    | 73             | 75    | 70    | 73                 | 76    | 87    | x             | x     | x | 74    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 550                                                                    | 710   | 698   | 705            | 722   | 732   | 710                | 670   | 450   | x             | x     | x | 661   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 345                                                                    | 406   | 412   | 454            | 461   | 374   | 323                | 317   | 280   | x             | x     | x | 375   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 33                                                                     | 34    | 34    | 35             | 35    | 32    | 31                 | 29    | 26    | x             | x     | x | 32    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 42                                                                     | 43    | 44    | 48             | 50    | 39    | 36                 | 35    | 31    | x             | x     | x | 41    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 59                                                                     | 61    | 63    | 64             | 64    | 60    | 58                 | 53    | 48    | x             | x     | x | 59    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 58                                                                     | 59    | 61    | 61             | 63    | 58    | 55                 | 52    | 47    | x             | x     | x | 57    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 22                                                                     | 22    | 22    | 23             | 24    | 24    | 25                 | 25    | 26    | x             | x     | x | 24    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 68,4                                                                   | 67,6  | 65,2  | 60,4           | 54,0  | 51,2  | 48,2               | 43,9  | 43,2  | x             | x     | x | 55,8  |

Quadro 5-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| Teste do dia 28/ 06/2003                                                     |                         | Consumo lenha = 60kg                                                   |       |       | Partida = 10:25 |       |       | Gasificação= 10:50 |       |       | Final = 14:50 |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
|                                                                              | seção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |       | média |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>    | 0,83                                                                   | 0,91  | 0,93  | 0,92            | 0,78  | 0,84  | 0,87               | 0,93  | 0,96  | 0,89          | 0,87  | 0,93  | 0,89  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,61                                                                   | 2,42  | 2,54  | 2,36            | 2,32  | 2,47  | 2,42               | 2,54  | 2,36  | 2,32          | 2,47  | 2,22  | 2,42  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,36                                                                   | 2,32  | 2,47  | 2,32            | 2,25  | 2,28  | 2,32               | 2,47  | 2,32  | 2,25          | 2,28  | 2,23  | 2,32  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,32                                                                   | 2,25  | 2,28  | 2,1             | 2,12  | 2,21  | 2,25               | 2,28  | 2,1   | 2,12          | 2,21  | 2,43  | 2,22  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,1                                                                    | 2,12  | 2,21  | 2,61            | 2,42  | 2,54  | 2,36               | 2,47  | 2,42  | 2,54          | 2,36  | 2,32  | 2,37  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,12                                                                   | 2,38  | 2,34  | 2,36            | 2,32  | 2,47  | 2,32               | 2,28  | 2,32  | 2,47          | 2,32  | 2,25  | 2,33  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>    | 6,71                                                                   | 6,57  | 6,57  | 6,65            | 6,54  | 6,58  | 6,62               | 6,52  | 6,53  | 6,54          | 6,57  | 6,55  | 6,58  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>    | 6,52                                                                   | 6,68  | 6,84  | 6,72            | 6,71  | 6,59  | 6,64               | 6,68  | 6,64  | 6,69          | 6,73  | 6,59  | 6,67  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>    | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x     | x     |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>    | 13,20                                                                  | 13,56 | 13,45 | 13,28           | 13,37 | 13,29 | 13,30              | 13,37 | 13,21 | 13,12         | 13,25 | 13,26 | 13,31 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                         |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |       |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                         | 807                                                                    | 930   | 906   | 875             | 922   | 918   | 915                | 896   | 874   | 796           | 726   | 688   | 854   |
| P2 - zona redução                                                            |                         | 555                                                                    | 591   | 634   | 659             | 667   | 702   | 699                | 675   | 624   | 609           | 572   | 561   | 629   |
| P3 - zona secagem                                                            |                         | 199                                                                    | 334   | 341   | 327             | 332   | 336   | 345                | 357   | 387   | 391           | 403   | 409   | 347   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                         | 54                                                                     | 62,7  | 74    | 74              | 73    | 75    | 70                 | 73    | 76    | 85            | 94    | 104   | 76    |
| P5 - combustor                                                               |                         | 384                                                                    | 479   | 429   | 698             | 705   | 722   | 732                | 710   | 670   | 342           | 281   | 270   | 535   |
| P6 - combustor                                                               |                         | 322                                                                    | 352   | 299   | 412             | 454   | 461   | 374                | 323   | 317   | 259           | 210   | 199   | 332   |
| P7 - trocador calor                                                          |                         | 31                                                                     | 38    | 41    | 34              | 35    | 35    | 32                 | 31    | 29    | 34            | 33    | 31    | 34    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                         | 40                                                                     | 45    | 42    | 44              | 48    | 50    | 39                 | 36    | 35    | 38            | 35    | 38    | 41    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                         | 53                                                                     | 55    | 57    | 55              | 58    | 57    | 57                 | 55    | 53    | 51            | 50    | 48    | 54    |
| P10 - ar secagem                                                             |                         | 53                                                                     | 54    | 55    | 54              | 56    | 56    | 56                 | 53    | 51    | 50            | 49    | 47    | 52    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                         | 23                                                                     | 25    | 26    | 25              | 26    | 25    | 24                 | 25    | 26    | 26            | 26    | 25    | 25    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                         | 46,5                                                                   | 40,1  | 39,4  | 40,1            | 40,2  | 38,7  | 38,2               | 37,9  | 37,2  | 36,2          | 39,2  | 38    | 39,3  |

Quadro 6-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| Recarga do dia 28/ 06/2003                                                   |                          | Consumo lenha = 60kg                                                   |       |       | Partida = 15:00 |       |       | Gasificação= 15:05 |       |       | Final = 18:05 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 1,12                                                                   | 1,05  | 1,06  | 0,96            | 1,05  | 0,92  | 1,18               | 1,21  | 1,16  | x             | x     | x | 1,08  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 1,76                                                                   | 1,86  | 1,78  | 1,96            | 1,98  | 1,74  | 1,89               | 2,15  | 1,86  | x             | x     | x | 1,89  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 1,68                                                                   | 1,65  | 1,67  | 1,99            | 1,99  | 1,86  | 1,78               | 2,03  | 1,92  | x             | x     | x | 1,84  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 1,47                                                                   | 1,68  | 1,76  | 1,86            | 1,78  | 1,92  | 1,96               | 1,98  | 1,76  | x             | x     | x | 1,80  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 1,86                                                                   | 1,86  | 1,68  | 1,92            | 1,96  | 1,89  | 1,99               | 1,99  | 1,68  | x             | x     | x | 1,87  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 1,92                                                                   | 1,57  | 1,47  | 1,89            | 1,99  | 1,67  | 1,81               | 1,91  | 1,47  | x             | x     | x | 1,74  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 6,38                                                                   | 6,22  | 6,58  | 6,57            | 6,48  | 6,42  | 6,52               | 6,34  | 6,42  | x             | x     | x | 6,44  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | 6,24                                                                   | 6,34  | 5,56  | 6,31            | 6,54  | 6,54  | 6,67               | 6,42  | 6,38  | x             | x     | x | 6,33  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x | x     |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 13,17                                                                  | 12,78 | 13,10 | 13,08           | 12,87 | 13,09 | 13,11              | 12,76 | 12,61 | x             | x     | x | 12,95 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 807                                                                    | 930   | 906   | 875             | 922   | 913   | 894                | 874   | 842   | x             | x     | x | 885   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 555                                                                    | 491   | 534   | 659             | 667   | 702   | 689                | 654   | 612   | x             | x     | x | 618   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 199                                                                    | 334   | 341   | 327             | 332   | 336   | 341                | 352   | 367   | x             | x     | x | 325   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 54                                                                     | 62,7  | 74    | 74              | 73    | 75    | 77                 | 78    | 94    | x             | x     | x | 74    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 547                                                                    | 771   | 640   | 688             | 700   | 722   | 689                | 624   | 575   | x             | x     | x | 663   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 389                                                                    | 430   | 440   | 412             | 454   | 461   | 432                | 423   | 398   | x             | x     | x | 427   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 32                                                                     | 35    | 41    | 35              | 35    | 37    | 36                 | 34    | 33    | x             | x     | x | 36    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 38                                                                     | 43    | 42    | 44              | 48    | 50    | 49                 | 47    | 46    | x             | x     | x | 46    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 67                                                                     | 67    | 70    | 68              | 66    | 67    | 66                 | 60    | 56    | x             | x     | x | 65    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 66                                                                     | 67    | 68    | 66              | 65    | 66    | 65                 | 59    | 54    | x             | x     | x | 64    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 25                                                                     | 25    | 24    | 22              | 21    | 20,4  | 19                 | 18,6  | 18    | x             | x     | x | 21    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 42                                                                     | 44,9  | 61,1  | 62,3            | 63,4  | 64,6  | 65,9               | 67,6  | 69,8  | x             | x     | x | 60,2  |

Quadro 7-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| Teste do dia 04/ 07/2003                                                     |                          | Consumo lenha = 60kg                                                   |       |       | Partida = 08:05 |       |       | Gasificação= 08:20 |       |       | Final = 11:20 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 1,12                                                                   | 1,05  | 1,21  | 1,07            | 1,09  | 1,12  | 1,22               | 1,23  | 1,16  | x             | x     | x | 1,14  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,41                                                                   | 2,42  | 2,54  | 2,32            | 2,42  | 2,33  | 2,41               | 2,38  | 2,46  | x             | x     | x | 2,41  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,26                                                                   | 2,32  | 2,24  | 2,25            | 2,32  | 2,17  | 2,12               | 2,21  | 2,18  | x             | x     | x | 2,23  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,32                                                                   | 2,25  | 2,28  | 2,12            | 2,25  | 1,98  | 2,13               | 2,09  | 2,23  | x             | x     | x | 2,18  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,10                                                                   | 2,12  | 2,21  | 2,23            | 2,12  | 2,28  | 2,02               | 2,24  | 2,26  | x             | x     | x | 2,18  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,12                                                                   | 2,23  | 2,34  | 2,35            | 2,23  | 2,15  | 2,19               | 2,09  | 2,26  | x             | x     | x | 2,22  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 6,70                                                                   | 6,57  | 6,57  | 6,38            | 6,59  | 6,42  | 7,12               | 6,86  | 6,91  | x             | x     | x | 6,68  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | 6,52                                                                   | 6,68  | 6,84  | 6,58            | 6,61  | 6,57  | 6,78               | 6,64  | 6,72  | x             | x     | x | 6,66  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x | x     |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 13,72                                                                  | 13,56 | 13,45 | 13,48           | 13,64 | 13,21 | 13,78              | 13,52 | 13,68 | x             | x     | x | 13,56 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 807                                                                    | 808   | 806   | 896             | 930   | 884   | 836                | 826   | 788   | x             | x     | x | 842   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 655                                                                    | 691   | 734   | 708             | 710   | 683   | 645                | 621   | 604   | x             | x     | x | 672   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 199                                                                    | 334   | 341   | 342             | 346   | 359   | 391                | 403   | 460   | x             | x     | x | 353   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 54                                                                     | 63    | 64    | 65              | 72    | 79    | 83                 | 88    | 94    | x             | x     | x | 74    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 384                                                                    | 479   | 502   | 608             | 612   | 621   | 554                | 496   | 483   | x             | x     | x | 527   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 322                                                                    | 352   | 355   | 368             | 389   | 402   | 381                | 354   | 322   | x             | x     | x | 361   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 31                                                                     | 32    | 34    | 34              | 32    | 33    | 34                 | 33    | 31    | x             | x     | x | 33    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 39                                                                     | 41    | 42    | 43              | 42    | 41    | 38                 | 35    | 38    | x             | x     | x | 40    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 60                                                                     | 65    | 61    | 59              | 57    | 56    | 54                 | 49    | 45    | x             | x     | x | 56    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 53                                                                     | 61    | 60    | 58              | 56    | 54    | 53                 | 50    | 45    | x             | x     | x | 54    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 12                                                                     | 13    | 14    | 14              | 15    | 15    | 17                 | 18    | 21    | x             | x     | x | 15    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 77,7                                                                   | 71,9  | 70,2  | 68,5            | 66,2  | 64,9  | 60,1               | 54,6  | 48,3  | x             | x     | x | 64,7  |

Quadro 8-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| recarga do dia 04/ 07/2003                                                   |                         | Consumo lenha = 55kg                                                   |       |       | Partida = 11:40 |       |       | Gasificação= 11:45 |       |       | Final = 15:15 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | seção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 20 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>    | 0,81                                                                   | 0,86  | 0,97  | 0,82            | 0,93  | 0,91  | 1,04               | 0,94  | 0,82  | 0,89          | x     | x | 0,90  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,41                                                                   | 2,42  | 2,54  | 2,26            | 2,32  | 2,24  | 2,33               | 2,41  | 2,38  | 2,46          | x     | x | 2,38  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,26                                                                   | 2,32  | 2,24  | 2,32            | 2,25  | 2,28  | 2,17               | 2,12  | 2,21  | 2,18          | x     | x | 2,24  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,32                                                                   | 2,25  | 2,28  | 2,10            | 2,12  | 2,21  | 2,14               | 2,13  | 2,09  | 2,23          | x     | x | 2,19  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,10                                                                   | 2,12  | 2,21  | 2,17            | 2,12  | 2,21  | 2,28               | 2,02  | 2,24  | 2,26          | x     | x | 2,17  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>    | 2,12                                                                   | 2,23  | 2,34  | 2,14            | 2,13  | 2,09  | 2,15               | 2,35  | 2,31  | 2,26          | x     | x | 2,21  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>    | 7,23                                                                   | 7,12  | 7,24  | 7,23            | 7,16  | 7,19  | 7,21               | 7,12  | 7,21  | 7,24          | x     | x | 7,20  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>    | 7,41                                                                   | 7,36  | 7,36  | 7,28            | 7,32  | 7,27  | 7,32               | 7,41  | 7,52  | 7,58          | x     | x | 7,38  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>    | x                                                                      | x     | x     | x               | x     | x     | x                  | x     | x     | x             | x     | x | x     |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>    | 13,65                                                                  | 13,56 | 13,45 | 13,36           | 13,48 | 13,51 | 13,21              | 13,26 | 13,52 | 13,41         | x     | x | 13,44 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 20 minutos (°C) |                         |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                         | 760                                                                    | 798   | 806   | 855             | 897   | 926   | 851                | 796   | 726   | 688           | x     | x | 810   |
| P2 - zona redução                                                            |                         | 555                                                                    | 591   | 634   | 676             | 652   | 678   | 643                | 609   | 552   | 521           | x     | x | 611   |
| P3 - zona secagem                                                            |                         | 199                                                                    | 334   | 341   | 347             | 352   | 355   | 359                | 391   | 403   | 460           | x     | x | 354   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                         | 55                                                                     | 63    | 71    | 72              | 73    | 76    | 81                 | 85    | 94    | 96            | x     | x | 77    |
| P5 - combustor                                                               |                         | 470                                                                    | 479   | 529   | 521             | 604   | 589   | 580                | 542   | 481   | 470           | x     | x | 527   |
| P6 - combustor                                                               |                         | 322                                                                    | 352   | 356   | 375             | 376   | 358   | 342                | 328   | 315   | 303           | x     | x | 343   |
| P7 - trocador calor                                                          |                         | 31                                                                     | 38    | 38    | 39              | 36    | 35    | 34                 | 34    | 33    | 31            | x     | x | 35    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                         | 40                                                                     | 45    | 42    | 41              | 41    | 40    | 41                 | 38    | 35    | 38            | x     | x | 40    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                         | 60                                                                     | 65    | 64    | 66              | 70    | 74    | 72                 | 66    | 58    | 50            | x     | x | 65    |
| P10 - ar secagem                                                             |                         | 57                                                                     | 59    | 62    | 65              | 69    | 74    | 70                 | 64    | 57    | 48            | x     | x | 63    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                         | 22                                                                     | 23    | 23    | 23              | 24    | 23    | 24                 | 24    | 24    | 23            | x     | x | 23    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                         | 45                                                                     | 42,1  | 41,8  | 40,1            | 39,7  | 39,6  | 39,4               | 38,7  | 36,5  | 34,2          | x     | x | 39,7  |

Quadro 9-A -Parâmetros analisados durante o teste de gaseificação-combustão.

| Teste do dia 07/ 07/2003                                                     |                          | Consumo lenha = 70kg                                                   |       |       | Partida = 08:20 |       |       | Gasificação= 08:30 |       |       | Final = 13:20 |       |   |       |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|---------------|-------|---|-------|
|                                                                              | secção (m <sup>2</sup> ) | Velocidades em intervalos regulares de 30 minutos (m s <sup>-1</sup> ) |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               | média |   |       |
| Ar primário                                                                  | 4,5 10 <sup>-3</sup>     | 0,75                                                                   | 0,78  | 0,83  | 0,79            | 0,84  | 0,85  | 0,88               | 0,82  | 0,87  | 0,82          | x     | x | 0,82  |
| Ar admitido no casulo 1                                                      | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,41                                                                   | 2,42  | 2,54  | 2,43            | 2,42  | 2,45  | 2,33               | 2,41  | 2,38  | 2,46          | x     | x | 2,43  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,26                                                                   | 2,32  | 2,24  | 2,12            | 2,35  | 2,17  | 2,17               | 2,12  | 2,21  | 2,18          | x     | x | 2,21  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,32                                                                   | 2,25  | 2,28  | 2,13            | 2,15  | 2,21  | 1,98               | 2,13  | 2,09  | 2,23          | x     | x | 2,18  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,10                                                                   | 2,12  | 2,21  | 2,12            | 2,12  | 2,23  | 2,28               | 2,02  | 2,24  | 2,26          | x     | x | 2,17  |
|                                                                              | 1,8 10 <sup>-2</sup>     | 2,12                                                                   | 2,23  | 2,34  | 2,19            | 2,23  | 2,26  | 2,15               | 2,19  | 2,09  | 2,26          | x     | x | 2,21  |
| Ar admitido no casulo 2                                                      | 7,2 10 <sup>-2</sup>     | 5,86                                                                   | 5,48  | 5,78  | 5,86            | 5,43  | 5,55  | 5,68               | 5,64  | 5,87  | 5,62          | x     | x | 5,68  |
|                                                                              | 5,0 10 <sup>-2</sup>     | 5,24                                                                   | 5,34  | 5,41  | 5,24            | 5,42  | 5,31  | 5,42               | 5,14  | 5,28  | 5,32          | x     | x | 5,31  |
|                                                                              | 2,0 10 <sup>-2</sup>     | 4,87                                                                   | 4,76  | 4,93  | 4,85            | 5,03  | 5,12  | 4,98               | 5,08  | 5,13  | 5,09          | x     | x | 4,98  |
| ar de secagem                                                                | 9,3 10 <sup>-2</sup>     | 11,25                                                                  | 11,58 | 11,56 | 11,54           | 11,64 | 11,74 | 11,83              | 11,76 | 11,92 | 11,73         | x     | x | 11,66 |
| Temperaturas de pontos do sistema em intervalos regulares de 30 minutos (°C) |                          |                                                                        |       |       |                 |       |       |                    |       |       |               |       |   |       |
| P1 - zona oxidação                                                           |                          | 780                                                                    | 789   | 804   | 807             | 824   | 854   | 805                | 796   | 784   | 742           | x     | x | 799   |
| P2 - zona redução                                                            |                          | 555                                                                    | 589   | 609   | 623             | 612   | 589   | 548                | 541   | 523   | 489           | x     | x | 568   |
| P3 - zona secagem                                                            |                          | 242                                                                    | 284   | 289   | 305             | 313   | 320   | 359                | 367   | 378   | 387           | x     | x | 324   |
| P4 - saída do casulo 1                                                       |                          | 51                                                                     | 57    | 64    | 66              | 72    | 78    | 81                 | 84    | 85    | 87            | x     | x | 73    |
| P5 - combustor                                                               |                          | 584                                                                    | 587   | 604   | 625             | 633   | 612   | 580                | 581   | 542   | 512           | x     | x | 586   |
| P6 - combustor                                                               |                          | 336                                                                    | 364   | 385   | 405             | 423   | 417   | 394                | 385   | 341   | 284           | x     | x | 373   |
| P7 - trocador calor                                                          |                          | 30                                                                     | 35    | 36    | 37              | 35    | 34    | 33                 | 34    | 33    | 31            | x     | x | 34    |
| P8 - saída do casulo 2                                                       |                          | 40                                                                     | 45    | 42    | 41              | 39    | 40    | 41                 | 38    | 35    | 38            | x     | x | 40    |
| P9 - câmara mistura                                                          |                          | 48                                                                     | 55    | 63    | 58              | 55    | 52    | 50                 | 50    | 46    | 43            | x     | x | 52    |
| P10 - ar secagem                                                             |                          | 47                                                                     | 53    | 60    | 57              | 53    | 50    | 49                 | 48    | 45    | 42            | x     | x | 50    |
| P11 - ar.ambiente                                                            |                          | 16                                                                     | 18    | 19    | 19              | 20    | 22    | 23                 | 23    | 24    | 25            | x     | x | 21    |
| Umidade relativa do ar                                                       |                          | 77,7                                                                   | 71,9  | 70,2  | 69,1            | 66,3  | 65,4  | 64,9               | 60,1  | 54,6  | 48,3          | x     | x | 64,9  |

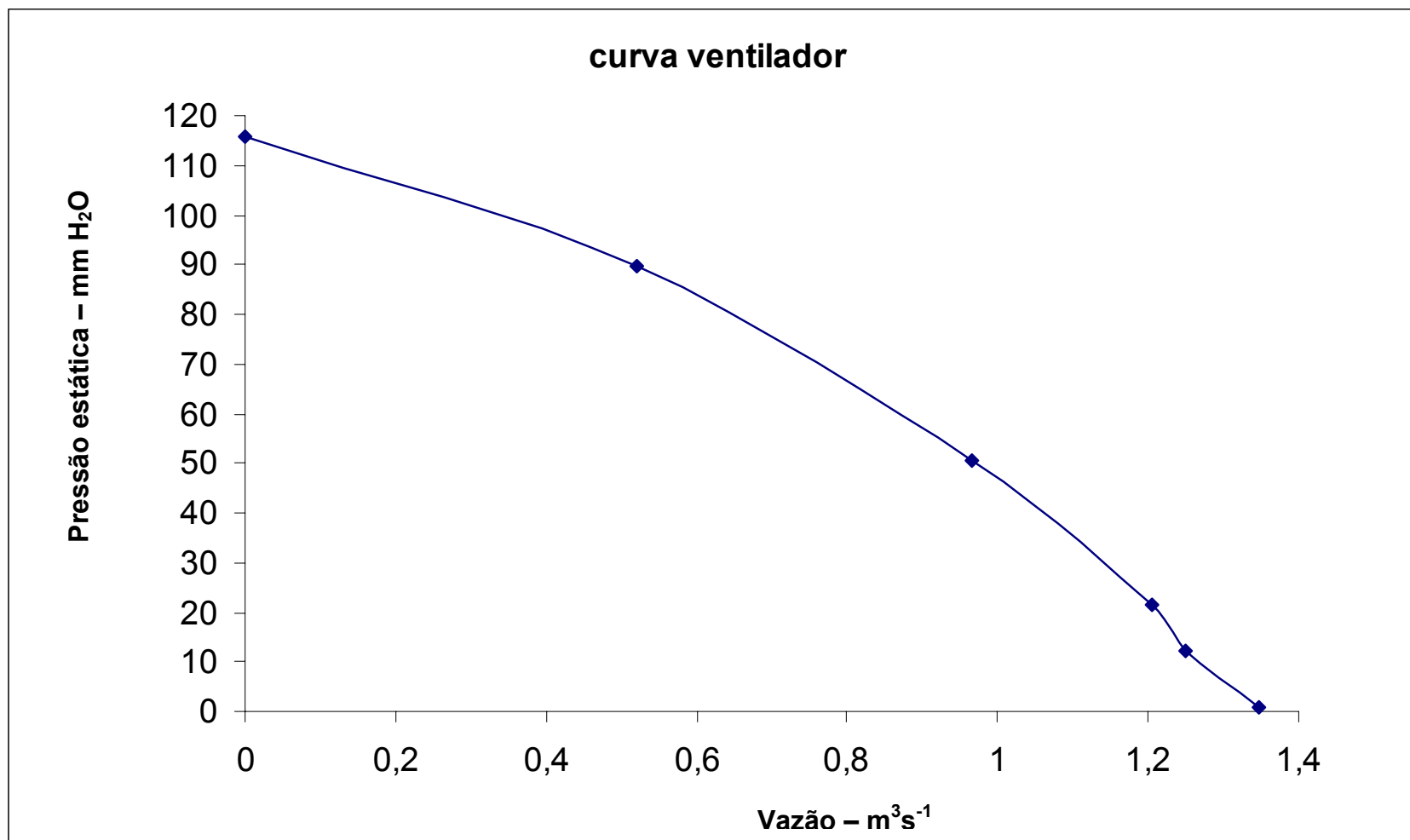
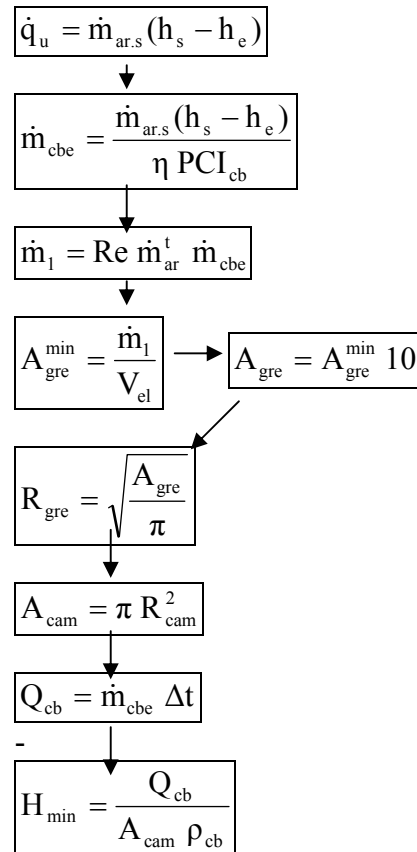


Figura 1 – A – Curva característica do ventilado utilizado.

### Algoritmo usado no dimensionamento do reator de gaseificação.



#### Simbologia utilizada no algoritmo

- $\dot{q}_u$  - Capacidade térmica requerida,  $\text{kJ s}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_{ar.s}$  - Vazão mássica de ar quente requerida,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $h_s, h_e$  - Entalpias do ar de secagem e do ambiente,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;
- $\eta$  - Rendimento esperado do sistema;
- $PCI_{cb}$  - Poder calorífico inferior do combustível utilizado,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_{cbe}$  - Vazão mássica estimada de combustível,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $\dot{m}_l$  - Vazão mássica de ar primário,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $Re$  - Razão de equivalência ou fator de ar;
- $\dot{m}_{ar}^t$  - Vazão mássica teórica de ar estequiométrico,  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $V_{el}$  - Velocidade do ar primário na superfície da grelha,  $\text{m s}^{-1}$ ;
- $A_{gre}^{min}$  - Área mínima da grelha,  $\text{m}^2$ ;
- $A_{gre}$  - Área da grelha,  $\text{m}^2$ ;
- $R_{gre}$  - Raio da grelha, m;
- $R_{cam}$  - Raio da câmara de gaseificação, m;
- $A_{cam}$  - Área da secção da câmara de gaseificação,  $\text{m}^2$ ;
- $Q_{cb}$  - Capacidade mássica de combustível da câmara de caseificação, kg;
- $\Delta t$  - Autonomia pretendida, h;
- $\rho_{cb}$  - massa específica do combustível,  $\text{kg m}^{-3}$ ; e
- $H_{mim}$  - Altura mínima da câmara de gaseificação, m.