

ANTONIO CARLOS VIEIRA

GASEIFICAÇÃO DE BRIQUETES DE CASCA DE EUCALIPTO

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
2005

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V658g
2005

Vieira, Antonio Carlos, 1957-
Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto /
Antonio Carlos Vieira. – Viçosa : UFV, 2005.
ix, 83f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 55-57.

1. Briquetes (Combustível) - Gaseificação. 2. Energia da
biomassa. 3. Resíduos como combustível. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 662.65

ANTONIO CARLOS VIEIRA

GASEIFICAÇÃO DE BRIQUETES DE CASCA DE EUCALIPTO

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 09 de dezembro de 2005.

Prof^a. Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
(Conselheira)

Prof. Dr. Adílio F. de Lacerda Filho

Dr. Sérgio M. Lopes Donzeles

Prof. Dr. Evandro Ferreira Passos

Prof. Dr. Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

Aos meus familiares,
presenças marcantes em todos
os momentos de minha vida,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, fonte inesgotável de toda energia.

A Universidade Federal de Viçosa e em especial aos Departamentos de Física e Engenharia Agrícola, que permitiram a realização deste trabalho.

A EUCABRAZ Produtos de Eucalipto LTDA pela doação dos briquetes usados nesta pesquisa.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela orientação, incentivo e valiosa amizade.

Aos professores conselheiros Delly Oliveira Filho e Ilda de Fátima Ferreira Tinoco, pelo apoio nos momentos necessários.

Ao professor Adílio Flauzino de Lacerda Filho, pelo estímulo e companheirismo ao longo desta jornada.

Ao pesquisador da EPAMIG Sérgio M. Lopes Donzeles e funcionários do Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, José Eustáquio, Hamilton, José Raimundo, Inhame, Catitu, Edson, Juquita, Carlos e Geraldinho pela colaboração e mais ainda pela oportunidade de construir sólidas amizades.

Aos colegas da Pós-graduação, em especial, ao Samuel Martin pela colaboração, convívio, disponibilidade e sugestões.

Ao estudante de Graduação Lucas Dutra de Melo, auxiliar direto na realização do experimento.

Ao Nicholas, Lúcia, Chumbinho, Marcelino, Denilson, Hildeu, Zé Maria, Colméia, Joly e demais amigos que sempre torceram pelo nosso sucesso.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	05
2.1. Energia de biomassa.....	05
2.2. Gaseificação de biomassa.....	06
2.2.1. Fundamentos teóricos.....	06
2.2.2. Gaseificadores.....	07
2.3. Briquetagem de resíduos agro-florestais.....	11
2.4. Aspectos relevantes para a gaseificação.....	13
2.4.1. Poder calorífico.....	13
2.4.2. Análise química elementar.....	15
2.4.3. Análise imediata.....	15
2.4.4. Massa específica.....	16
2.4.5. Ar teórico ou estequiométrico.....	17
2.4.6. Fator de ar.....	19
2.5. Balanço de massa.....	19
2.6. Balanço de energia.....	20
2.7. Eficiência térmica.....	22
2.8. Eficiência global.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1. O gaseificador/combustor.....	24
3.2. Características do combustível.....	27

3.3. Funcionamento e operação do sistema de gaseificação/combustão..	29
3.3.1. Tratamentos realizados.....	29
3.3.2. O processo de gaseificação.....	30
3.3.3. Variáveis mensuradas.....	31
3.3.4. Parâmetros avaliados.....	33
3.5. Cálculo do fator de ar.....	34
3.6. Cálculo da eficiência térmica e eficiência global.....	35
3.7. Análise estatística.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1. O combustível.....	38
4.1.1. Umidade.....	38
4.1.2. Análise química elementar.....	39
4.1.3. Poder calorífico.....	39
4.1.4. Massa específica.....	40
4.1.5. Teor de cinzas.....	41
4.2. Ventilador e motor.....	41
4.3. Desempenho do sistema gaseificador/combustor para aquecimento direto de ar.....	41
4.4. Temperatura média nas diferentes zonas do sistema.....	45
4.5. Análise estatística.....	47
4.6. Análise dos gases de exaustão.....	49
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
APÊNDICES.....	58

RESUMO

VIEIRA, Antonio Carlos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2005. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Conselheiros: Delly Oliveira Filho e Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

O uso de energias renováveis pode colaborar substancialmente para reduzir as emissões atmosféricas e suprir a crescente demanda por recursos energéticos. O desenvolvimento de programas de pesquisa visando a obtenção de tecnologias alternativas de termo-conversão de biomassa de origem vegetal teve um grande avanço a partir da década de 70 e, a gaseificação da biomassa tem se apresentado como uma alternativa sustentável para geração de energia, com baixa emissão de poluentes. No processo de gaseificação a matéria orgânica é queimada em altas temperaturas com ar sub-estequiométrico. Como o oxigênio não é suficiente para queimar toda a matéria orgânica, o resultado é a produção de uma mistura de gases combustíveis como CO, CH₄, H₂ e outros. O gás combustível pode, então, ser usado para fins térmicos, geração de eletricidade ou para fins químicos como, por exemplo, na produção de metanol. O uso térmico da biomassa gaseificada traz a grande vantagem da queima extremamente limpa do gás combustível, quando comparado à queima direta da biomassa. O aproveitamento da biomassa constituída por resíduos de madeiras e agrícolas como alternativa energética, por meio da briquetagem, é estimulado pelo fato de que tais resíduos consistem, em geral, de materiais particulados, com dimensões não uniformes; sua baixa densidade incrementa o custo de transporte e armazenamento, além de que possuem baixo preço de comercialização. A briquetagem é o processo mais utilizado para a compactação de resíduos agro-florestais, objetivando a

produção de combustíveis sólidos. Em 2004, a produção brasileira de celulose alcançou 9,6 milhões de toneladas e de papel 8,5 milhões de toneladas gerando no processo uma grande quantidade de resíduos. Este trabalho foi desenvolvido para avaliar a viabilidade técnica do uso de briquetes de casca de eucalipto para aquecimento de ar, em um reator de gaseificação de fluxo concorrente acoplado a uma câmara para combustão dos gases produzidos. Para análise comparativa foram efetuadas três repetições de quatro tratamentos distintos quanto ao uso puramente de briquetes e misturas de briquetes e lenha de eucalipto em proporções variadas. Pela análise dos resultados concluiu-se que o processo de gaseificação/combustão usando-se apenas briquetes de casca de eucalipto ou a mistura destes com lenha é capaz de gerar ar quente, limpo, isento de fumaça e impurezas. O fator de ar durante os testes, em média, foi de 43%. O sistema apresentou eficiências térmicas médias de 44,8%, 53,1%, 49,7% e 48,6%, para os diferentes tratamentos e eficiência global de 72,2%, 76,4%, 75,1% e 73,2%, na mesma ordem. O consumo de combustível oscilou entre 33,6 e 36,7 kg.h⁻¹. A temperatura média do ar na saída do sistema foi de 110°C. A gaseificação ocorreu entre 2 e 6 minutos após a ignição do combustível e, cerca de 20 minutos para atingir as condições ideais de funcionamento. As temperaturas nas distintas zonas do reator estão de acordo com aquelas previamente apresentadas na literatura. Há um grande potencial de vitrificação das cinzas geradas, devido a ocorrência de altas temperaturas nas zonas de oxidação e redução, o que dificultou a limpeza da grelha após cada repetição. A análise do ar na saída indica baixíssimos teores de monóxido e dióxido de carbono em sua composição.

ABSTRACT

VIEIRA, Antonio Carlos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, December of 2005. **Gasification of briquettes of eucalyptus bark.** Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Committee members: Delly Oliveira Filho and Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

The use of renewable energies can substantially collaborate to reduce the atmospheric emissions, and to supply the increasing demand for energetic resources. The development of research programs focused on obtaining alternative technologies for thermal-conversion of biomass of vegetable origin had a great progress starting from the decade of 70. The biomass gasification has been presenting as a sustainable alternative for energy generation, with low pollutant emission. In the gasification process, the organic matter is burned in high temperatures with sub-stoichiometric air. As the oxygen is not enough to burn all the organic matter, the result is the production of a fuel mixture of gases like CO, CH₄, H₂ and others. So, the fuel gases can be used for electricity generation, for thermal or chemical purposes as for instance, in the methanol production. The thermal use of the gasified biomass brings the great advantage of an extremely clean burning of the fuel gases, as compared to the direct burning of the biomass. The use of the biomass constituted by wood and agricultural residues as an energetic alternative, through the briquetting, has been stimulated by the fact that such residues consist, in general, of materials particled with non uniform dimensions; their low densities increase the transport and storage costs and, in addition, they have low commercialization prices. The briquetting is the most used process for the compactation of agriculture-forest residues aiming the production of solid fuels. In 2004, the Brazilian production

of cellulose and paper reached, respectively, 9.6 million and 8.5 million of tons, generating in the process a great amount of residues. This work was developed to evaluate the technical viability of the use of briquettes of eucalyptus bark for air heating through a gasification reactor of concurrent flow coupled with a combustion chamber for the produced gases. For comparative analysis three repetitions of four distinct treatments were made. Such treatments refer to the use of briquettes only or briquettes and eucalyptus firewood mixed in varied proportions. The analysis of the results indicates that the gasification/combustion process of briquettes and firewood generates hot air exempt of smoke and impurities. The relative moisture during the tests, on average, was of 43%. The system exhibited average thermal efficiencies of 44.8%, 53.1%, 49.7%, and 48.6% for the different treatments, and corresponding global efficiencies of 72.2%, 76.4%, 75.1%, and 73.2%. The fuel consumption oscillated between 33.6 and 36.7 kg.h⁻¹. The average air temperature in the exit of the system was 110°C. The gasification happened between 2 and 6 minutes after the beginning of the fuel burning and, it took about 20 minutes to reach the ideal conditions of operation. The temperatures in the different zones of the reactor were in agreement with those previously reported on the literature. Due to the occurrence of high temperatures in the oxidation and reduction zones, a great amount of vitrified ashes was generated, hindering the cleaning of the grill after each repetition. The analysis of the air at the exit indicates very low contents of monoxide and dioxide carbon in its composition.

1. INTRODUÇÃO

O padrão de desenvolvimento de nossa civilização tem exigido um altíssimo consumo dos recursos energéticos do planeta. A produção de bens e conforto para o ser humano polui intensamente a Terra, prejudicando a qualidade de vida das espécies existentes. Hoje, entre os vários temas em questão, busca-se o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para geração de energia, com alternativas para o desenvolvimento sócio-econômico das populações humanas presentes e futuras, sem que haja um esgotamento de recursos naturais ou queda nos padrões de qualidade de vida devido à degradação ambiental (FERNANDES, 2000).

Quando se busca um desenvolvimento sustentável, a decisão quanto as possíveis formas de geração de energia apresenta-se como fator preponderante. O uso de energias renováveis pode colaborar substancialmente quando se quer reduzir as emissões atmosféricas, e são importantes no desenvolvimento de qualquer que seja a atividade produtiva.

No Brasil, a mata nativa constituiu uma fonte de lenha, usada como energético, que parecia inesgotável tendo em vista a grande quantidade gerada na ampliação das fronteiras agrícolas. Todavia hoje, devido a exploração irracional e devastadora das matas nativas, o país se vê em situação crítica, em várias regiões onde existiam abundantes coberturas florestais, no que se refere à degradação do solo, alteração no regime de chuvas e conseqüente desertificação.

A crescente demanda por produtos florestais impõe a necessidade de se aumentar, a cada ano, os reflorestamentos para fins comerciais, reduzindo o ataque amplo e indiscriminado sobre os remanescentes de matas nativas.

Na produção de lenha para fins comerciais, parte da árvore é rejeitada, constituindo os resíduos florestais. Além disso, as indústrias que usam a madeira para fins não energéticos, como as serrarias, as indústrias de móveis, de papel e celulose geram uma quantidade apreciável de resíduos (serragem, maravalha, cascas, lascas, etc.) de diferentes tamanhos de partículas e densidade, que podem ter aproveitamentos energéticos. Esses resíduos, em geral, são usados como matéria prima para outras indústrias, como material de base (cama) para aviários, como combustível na geração de vapor para estufas de secagem, ou são simplesmente dispostos em determinados locais, muitas vezes causando problemas de poluição ambiental.

O desenvolvimento de programas de pesquisa visando-se a obtenção de tecnologias alternativas de termo-conversão de biomassa de origem vegetal teve um grande avanço a partir da década de 70 (GÓMEZ et al., 2000) e, a gaseificação da biomassa tem se apresentado como uma alternativa sustentável para geração de energia, com baixa emissão de poluentes.

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido em um gás combustível, por meio da queima parcial da biomassa. Neste processo, a matéria orgânica é queimada em alta temperatura com ar sub-estequiométrico. Como o oxigênio não é suficiente para queimar toda a matéria orgânica, o resultado é a produção de uma mistura de gases combustíveis como CO, CH₄, H₂ e outros.

A redução da produção de monóxido de carbono na geração energética é fundamental para controlar a poluição atmosférica e o aquecimento global. Por isto pode se dizer que a própria tecnologia da gaseificação da biomassa é uma forma de controle ou de prevenção da poluição (FERNANDES, 2000).

O gás combustível pode então ser usado para fins térmicos (como em secadores ou aquecedores), para fins de geração de eletricidade ou para fins químicos (na produção de metanol, por exemplo). O uso térmico da biomassa gaseificada traz a grande vantagem da queima extremamente limpa do gás combustível, quando comparado à queima direta da biomassa (MONTENEGRO, 2000).

O Brasil possui em torno de 5.300.000 ha de florestas plantadas, cuja produtividade média se situa na faixa de 30 m³/ha/ano. A casca representa algo em torno de 10% do volume. Assim, podemos estimar uma quantidade de

resíduos, constituídos unicamente pelas cascas, em aproximadamente, 15.900.000 m³/ano.

O aproveitamento da biomassa constituída por resíduos de madeiras e por resíduos agrícolas como alternativa energética, por meio da briquetagem, é estimulado pelo fato de que tais resíduos na forma natural consistem-se de materiais particulados, com dimensões não uniformes. Sua baixa massa específica incrementa o custo de transporte e armazenamento, além do baixo preço de comercialização. A briquetagem é o processo mais utilizado para a compactação de resíduos agro-florestais, objetivando a produção de combustíveis sólidos. (BEZZON, 1997).

Os resíduos briquetados, pela exigência da baixa umidade do processo e pela elevada massa específica aparente (próxima de 1200 kg/m³), são menos higroscópicos e muito mais resistentes ao apodrecimento ou à fermentação do que os resíduos na condição natural, facilitando a estocagem e o transporte. Comparado à lenha, o briquete de resíduos apresenta algumas vantagens, tais como: maior densidade energética e menor teor de água.

O Brasil é o 7º maior produtor mundial de celulose (9,6 milhões de toneladas/ano) e o 11º produtor de papel (8,5 milhões de toneladas/ano) do mundo, gerando grande quantidade de resíduos florestais (casca, cavaco e lixívia) em 220 empresas, 450 municípios, 16 estados e cinco regiões brasileiras, utilizando madeira de reflorestamento, das espécies eucalipto (75%) e pinus (24%) (BRACELPA, 2005).

A Aracruz Celulose, situada no Município de Aracruz-ES, é a maior fábrica de celulose de fibra curta à base de eucalipto do mundo e, diante da grande quantidade de resíduos gerados, estabeleceu uma parceria com a Eucabraz Produtos de Eucalipto LTDA, que retira as cascas do pátio de recepção de madeira para transformá-las em briquetes. Esta empresa processa, em média, 75 toneladas de cascas por semana e está apta a produzir, aproximadamente, 5000 toneladas/mês de briquetes.

Na perspectiva de que os briquetes de casca de eucalipto venham constituir uma fonte energética de elevada importância, no que tange ao aproveitamento de biomassas em sistemas de gaseificação, foi desenvolvido este trabalho com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica do uso de briquetes de casca de eucalipto como alternativa energética para aquecimento direto de ar, usando-se um sistema de gaseificação com posterior queima dos

gases. Para análise comparativa, procedeu-se a gaseificação/combustão utilizando apenas briquetes como combustível e misturas de briquetes e lenha de eucalipto em proporções variadas. Foi feita, ainda, uma análise da qualidade do ar aquecido, nas diversas condições de operação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Energia de biomassa

O aproveitamento da energia da biomassa consiste no uso de lenha, resíduos orgânicos industriais ou domésticos, resíduos agrícolas ou outras fontes de matérias orgânicas para geração de calor, eletricidade e outros fins.

A grande vantagem do uso da biomassa é que geralmente pode-se aproveitar resíduos de baixo custo para geração de energia. O uso da biomassa tem um aspecto ambiental favorável já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera é parcialmente compensada pela absorção do gás durante o desenvolvimento vegetativo de nova biomassa.

As fontes de energias não poluentes e renováveis são as que melhor atendem as necessidades sociais. Ao se utilizar a queima de um combustível fóssil, inevitavelmente são produzidos gases com grande concentração de CO₂ e com presenças de SO₂. Esses podem ser removidos dos gases, mas tal processo requer certo custo e eficiência.

As formas de aproveitamento da biomassa são tão variadas quanto a s variedades de tipos de biomassa usadas. Normalmente, pode-se dividir as formas de aproveitamento em dois grupos: térmico (queima direta, gaseificação e digestão anaeróbia) e elétrico (queima direta em motores, ciclo a vapor, gaseificação e ciclo a gás) (MONTENEGRO, 2000).

Dados do Balanço Energético Nacional (edição 2005) destacaram que o Brasil aumentou as vantagens comparativas com o resto do mundo em termos de utilização de fontes renováveis de energia. No país, em 2004, cerca de 43,9% da Oferta Interna de Energia (OIE), teve origem em fontes renováveis, enquanto que no mundo essa taxa foi de 13,6% e nos países desenvolvidos foi de 6%. Dessa participação da energia renovável, 14,4 pontos percentuais

correspondem à geração hidráulica e 29,5 a biomassa. Os 56,1% restantes da OIE originaram-se de fontes fósseis e outras não renováveis (BRASIL, 2005b).

2.2. Gaseificação de biomassa

2.2.1. Fundamentos teóricos

A gaseificação de combustíveis sólidos é um processo bastante antigo e é realizada com o objetivo de produzir um combustível gasoso com melhor eficiência de combustão e que também possa ser utilizado como matéria-prima em outras aplicações.

Na gaseificação a matéria orgânica é queimada em alta temperatura com ar sub-estequiométrico. Como o oxigênio não é suficiente para oxidar todo o carbono, o resultado é uma mistura de gases cujos principais componentes são: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções.

Os gases produzidos podem ser usados em diversas aplicações, tais como, combustíveis em fornalhas, motores a diesel e a gasolina, turbinas a gás, geradores de vapor, matéria-prima para produção de gás de síntese para metanol, amônia, etc.

O processo de gaseificação da biomassa resulta de complexas reações, ainda não bem conhecidas em sua totalidade. Teoricamente, pode ser subdividido em cinco etapas:

1. Etapa de pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C;
2. Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, método que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação;
3. Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados;
4. Craqueamento do alcatrão – processo de destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO₂, CH₄ e outros gases como produtos; e

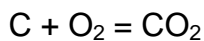
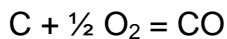
5. Oxidação parcial dos produtos da pirólise.

Dependendo da organização do processo de gaseificação (movimento relativo da biomassa e do gás de gaseificação), estas etapas transcorrem em diferentes regiões do gaseificador, ou em todo seu volume de maneira simultânea. A seguir apresentam-se as reações químicas mais importantes de cada uma destas etapas (COELHO et al, 2002):

I. Pirólise

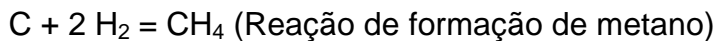
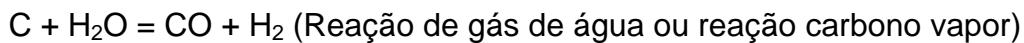
Biomassa + Calor → Coque + Gases + Alcatrão + Condensáveis

II. Oxidação do carbono

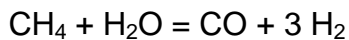
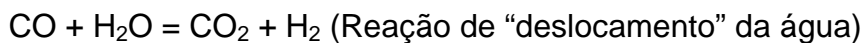


III. Gaseificação

- Reações heterogêneas



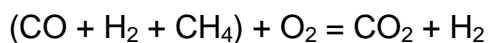
- Reações homogêneas



IV. Craqueamento do alcatrão



V. Oxidação parcial dos produtos da pirólise



Em algumas situações especiais pode-se gaseificar um combustível sólido utilizando oxigênio puro ou ar enriquecido com este gás, reduzindo as perdas de energia associadas à presença de gases inertes, como o nitrogênio, que constitui quase 80%, em volume, do ar atmosférico. O gás produzido, neste caso, apresenta um poder calorífico mais elevado, porém o alto custo de produção de oxigênio é uma importante limitação econômica desta alternativa (COELHO et al, 2002).

2.2.2. Gaseificadores

São diversos os tipos de gaseificadores idealizados e desenvolvidos, até o momento, levando-se em conta as características da matéria prima e as

aplicações a que se destinam os gases produzidos.

A grande maioria dos gaseificadores comercializados ou em fase de desenvolvimento pode ser enquadrada segundo o tipo de leito utilizado, a saber, leito fixo ou leito fluidizado ou circulante. Estima-se que 77,5% dos projetos de gaseificadores são do tipo de leito fixo, 20% são do tipo leito fluidizado ou circulante e 2,5% de outros tipos (COELHO et al, 2002).

Dentre os gaseificadores de leito fixo, pode-se destacar dois subgrupos: os de circulação de gases concorrente e contracorrente, que podem ser classificados de acordo com outros fatores.

- Quanto ao poder calorífico do gás produzido, há os de baixo poder calorífico (até 5 MJ/Nm³), os de médio poder calorífico (5 a 10 MJ/Nm³) e os de alto poder calorífico (10 a 40 MJ/Nm³);
- Dependendo do tipo de agente gaseificador existem os que utilizam ar, vapor de água, oxigênio ou hidrogênio;
- Com relação à pressão de trabalho são conhecidos os de baixa pressão (atmosférica) e os pressurizados (até 2000 kPa); e
- Podem ser também classificados quanto ao tipo e forma de biomassa utilizada (resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa “in natura”, biomassa peletizada e biomassa pulverizada).

Um gaseificador ideal deverá ser capaz de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma grande variedade de combustíveis, de trabalhar eficientemente sem exigir atenção constante por parte do operador, de responder rapidamente às alterações de carga, além de ser barato e durável. Na prática estes requisitos são mutuamente conflitantes, determinando que para cada projeto individual se faça um estudo relacionado ao combustível utilizado e ao uso final particular (SANCHEZ et al., 1997).

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

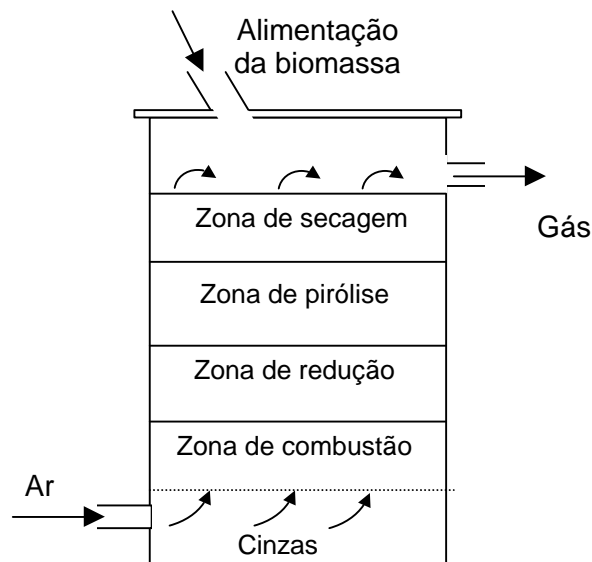


Figura 1 – Croqui: gaseificador de leito fixo e fluxo contracorrente.

Os gaseificadores contracorrente tendem a ter uma eficiência térmica 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 a desvantagem de produzir gás extremamente impuro. Nenhum dos alcatrões e outros produtos de pirólise são craqueados na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para cima do gaseificador e podem causar incrustações nas tubulações (SANCHEZ et al., 1997).

Alguns gaseificadores, particularmente 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 (SANCHEZ et al., 1997).

O projeto da grelha é um elemento importante na maioria dos gaseificadores contracorrente, pois esta suporta diretamente a zona de combustão. A grelha deve ser capaz de deixar as cinzas caírem sem perda excessiva de combustível (SANCHEZ et al., 1997).

Materiais refratários são utilizados para recobrir a zona de combustão, ou às vezes toda a câmara de gaseificação, tanto protegendo as partes metálicas como diminuindo perdas por troca de calor. A temperatura de saída dos gases é aproximadamente de 400°C.

Gaseificadores contracorrente podem ser construídos para utilização de combustíveis com diferentes características como, por exemplo, resíduos

municipais. Mas deve-se ressaltar o fato que o gás produzido normalmente contém grandes quantidades de alcatrões e voláteis o que impede sua utilização direta em motores de combustão interna e o restringe para usos onde é simplesmente queimado (SANCHEZ et al., 1997).

Os gaseificadores mais difundidos são os do tipo **concorrente**. Neles, as zonas de combustão e de redução estão posicionadas de forma oposta aos gaseificadores contracorrente. Com a alimentação de combustível pelo topo, a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível) passando pelas zonas de combustão e redução (Figura 2) (SANCHEZ et al., 1997).

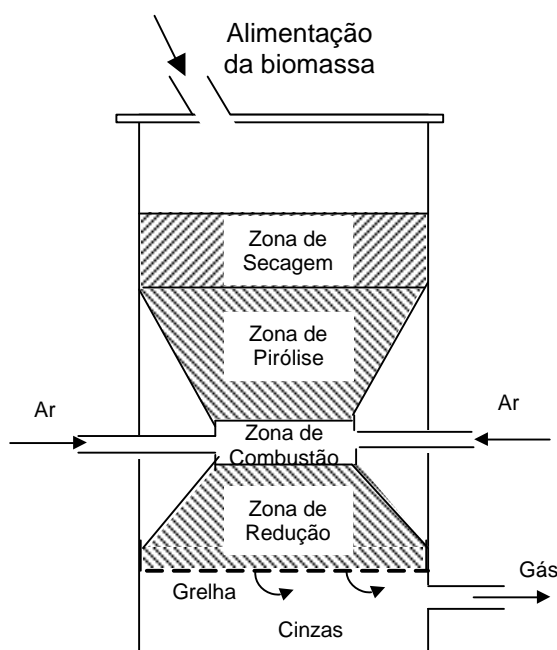


Figura 2 – Croqui: gaseificador de leito fixo e fluxo concorrente.

A característica essencial deste gaseificador é que ele é projetado de modo que os alcatrões e voláteis provenientes da zona de pirólise são direcionados para a zona de combustão onde, em condições de operação controladas, serão craqueados. Quando isto acontece, esses alcatrões serão convertidos em fase leve e coque e a mistura de gases na saída é relativamente livre de alcatrões. O arranjo da zona de combustão é um elemento crítico nos gaseificadores concorrentes. Se forem permitidas regiões de baixa temperatura nesta zona, as substâncias voláteis contaminantes poderão passar por ela sem que craqueiem, perdendo o propósito do projeto. (SANCHEZ et al., 1997).

Em muitos casos, o diâmetro interno é reduzido na zona de combustão, criando uma restrição feita com material cerâmico substituível, onde se posicionam os injetores de ar, posicionados para distribuir o ar de forma uniforme. O objetivo do posicionamento é garantir que seja atingida a temperatura adequada nessa secção, a fim de craquear todos os alcatrões que passem através dela. A temperatura é máxima nas entradas de ar e diminui rapidamente com a distância, isto significa que existe um limite técnico para as distâncias entre as entradas e conseqüentemente para o diâmetro da restrição. Este é um ponto crítico de projeto por limitar a capacidade do gaseificador (SANCHEZ et al., 1997).

Sendo o gás liberado diretamente da zona de redução tende a ter quantidades significativas de cinzas e fuligem, em contraste com os gaseificadores contracorrente onde estas partículas são filtradas quando o gás passa pelo combustível. A temperatura de saída dos gases também tende a ser maior, por volta de 700°C, pois não trocam calor, diretamente, com as zonas de pirólise e secagem (SANCHEZ et al., 1997).

A produção de gás combustível livre de alcatrões e voláteis em um gaseificador concorrente requer cuidados especiais de desenvolvimento, pois além do projeto da restrição e do controle do fluxo de ar, estes são particularmente vulneráveis a problemas causados por combustíveis com alto teor de cinzas e variações no teor de água (SANCHEZ et al., 1997).

Materiais com umidade elevada, maior que 20% bu, podem levar à formação de gases com alto teor de alcatrão (COELHO, 2002).

2.3. Briquetagem de resíduos agro-florestais

A briquetagem consiste na compactação de partículas de dimensões reduzidas de forma a se obter um sólido com dimensão e formato adequados para o tipo de aplicação que se pretende. É o processo mais utilizado para a compactação de resíduos agro-florestais, objetivando a produção de combustíveis sólidos (BEZZON, 1997).

O uso dos resíduos agro-florestais para fins energéticos, por meio da briquetagem é, do ponto de vista ambiental, uma forma de se gerar energia limpa e renovável, levando-se em conta a não emissão de agentes poluentes e a redução dos desmatamentos indesejáveis. Vislumbra-se uma série de

vantagens sócio-econômicas e ambientais para os países que investem na produção e comercialização de combustíveis a partir de resíduos agro-florestais (BEZZON, 1997).

Destacam-se entre os resíduos agro-florestais utilizados nos processos de compactação para fins energéticos o bagaço e a palha de cana, resíduos de madeira e resíduos agro-industriais.

Os métodos de compactação consistem na aplicação de forças de compressão de modo a produzir uma elevação considerável na massa específica da matéria compactada e redução na umidade do produto (BEZZON, 1997).

Os equipamentos comumente utilizados são prensas hidráulicas ou mecânicas, prensas excêntricas e extrusoras.

As principais diferenças entre os métodos de compactação são: intensidade da pressão de compressão, dimensões e forma do produto final, temperatura utilizada na compactação, tipo de insumo e a utilização ou não de ligantes adicionais (BEZZON, 1997).

Em 2004, a produção brasileira de celulose alcançou 9,6 milhões de toneladas e a de papel 8,5 milhões de toneladas. Para 2005, foi projetada uma produção de 10,0 milhões de toneladas para celulose e 8,6 milhões de toneladas para papel, o que representará um aumento de 4% e 2%, respectivamente. No Brasil, a área de florestas plantadas para a produção de celulose e papel corresponde a 1,6 milhão de hectares, sendo 75% de eucalipto, 24% de pinus e 1% de outras espécies (BRACELPA, 2005).

Para a produção de celulose é desejável uma madeira sem extrativos. A casca, por conter alto teor de extrativos, é removida, por isso, a primeira operação em uma fábrica de celulose é o descascamento da madeira.

Em uma fábrica que produz 2000 toneladas de celulose por dia, o volume de casca gerado é de quase 1000 m³/dia, equivalente a aproximadamente 300 toneladas secas/dia. Essa casca se fragmenta, expandindo-se volumetricamente. Esse volume de casca fragmentada pode atingir volumes entre 2000 e 2500 m³, diariamente (FOELKEL, 2005).

A briquetagem é uma forma eficiente de concentrar a energia disponível da biomassa, considerando-se a massa específica aparente e o poder calorífico médio dos briquetes e resíduos. Estima-se que 1,0 m³ de briquetes

contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1,0 m³ de resíduos (QUIRINO, 1991).

2.4. Aspectos relevantes para a gaseificação

Ao se conceber um projeto de gaseificação de biomassa, devido a natureza do processo, torna-se necessário o conhecimento de algumas propriedades físicas e químicas do combustível a ser utilizado, e outros fatores relevantes, visando a operacionalização dos gaseificadores de forma eficiente.

2.4.1. Poder calorífico

O poder calorífico é uma importante característica dos combustíveis e refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível.

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 para o PCS (poder calorífico superior), mas quando este não é considerado tem-se o PCI (poder calorífico inferior) do combustível. Como no ambiente de combustão 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 (LOPES, 2002).

O poder calorífico superior (PCS) é medido, experimentalmente, em calorímetros, entretanto, na ausência deste, pode-se estimar, com boa aproximação, o PCS a partir da composição elementar do combustível, na base seca, e da entalpia de reação dos elementos combustíveis com o oxigênio, utilizando-se a fórmula de Dulong, expressa na equação 1 (LOPES, 2002).

$$PCS = 33774C + 141744 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9238S \quad (1)$$

em que

PCS – poder calorífico superior, kJ.kg⁻¹ de combustível seco;

C – fração de carbono do combustível, kg de carbono.kg⁻¹ de combustível seco;

H₂ – fração de hidrogênio do combustível, kg de hidrogênio.kg⁻¹ de combustível seco;

O_2 – fração de oxigênio do combustível, kg de oxigênio.kg⁻¹ de combustível seco; e

S – fração de enxofre do combustível, kg de enxofre.kg⁻¹ de combustível seco.

O poder calorífico inferior (PCI) é determinado, analiticamente, a partir da equação 2, subtraindo do PCS a entalpia de vaporização da água devido ao vapor d'água formado na reação do hidrogênio com o oxigênio (LOPES, 2002).

$$PCI = PCS - 2440(9H_2) \quad (2)$$

em que

PCI – poder calorífico inferior, kJ.kg⁻¹ de combustível seco;

2440 – entalpia de vaporização da água, kJ.kg⁻¹ de água na temperatura de referência de 25°C; e

9H₂ – parcela de vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio.

Um dos parâmetros de maior influência sobre o poder calorífico dos combustíveis é o teor de água. A umidade é um fator de incremento para a energia necessária à pré-ignição e diminui o calor liberado pela combustão. Nos cálculos referentes à avaliação da eficiência térmica, com base no consumo de combustível úmido, o poder calorífico inferior, calculado pela equação 2, deve ser corrigido para a composição elementar na base úmida considerando, ainda, a umidade presente no combustível, de acordo com a equação 3 (LOPES, 2002).

$$PCI_u = PCS(1 - U_{bu}) - 2440[9H_2(1 - U_{bu}) + U_{bu}] \quad (3)$$

em que

PCI_u – poder calorífico inferior, kJ.kg⁻¹ de combustível úmido; e

U_{bu} – fração de água no combustível úmido, kg.kg⁻¹;

Na Tabela 1 estão apresentados valores de poder calorífico superior de biomassas.

Tabela 1 – Poder calorífico da biomassa, em kJ.kg⁻¹ (base seca)

Biomassa	Poder calorífico superior (kJ.kg ⁻¹)
Pinus ¹	20.020
Eucalipto ¹	19.420
Casca de eucalipto ²	17.580
Carvão ³	30.900

Fontes: ¹ = LORA et al. (1997); ² = REDEENERGIA (2005) e ³ = LOPES (2002).

2.4.2. Análise química elementar

A análise química elementar fornece as frações em peso dos elementos constituintes da biomassa. Os principais elementos são carbono, oxigênio e hidrogênio.

A partir da análise elementar pode-se determinar analiticamente, com boa aproximação, o poder calorífico superior do combustível.

As análises elementares para carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e cloro são determinadas a partir da norma ASTM D-3176 e ASTM E 777, E 775 e E 778. A fração de oxigênio é determinada por diferença.

A análise elementar da madeira tem mostrado, para diferentes espécies, uma certa uniformidade. Na Tabela 2 pode-se observar a composição elementar de diferentes biomassas.

Tabela 2 – Composição elementar típica da madeira e casca

	Composição elementar (%) (base seca)				
	H	C	N	O	S
Madeira de não resinosa ¹	6,4	50,8	0,4	41,8	–
Casca de não resinosas ¹	6,0	51,2	0,4	37,8	–
Madeira de resinosas ¹	6,3	52,9	0,1	39,7	–
Casca de resinosas ¹	5,9	53,1	0,2	37,9	–
Eucalipto ²	6,0	47,5	1,0	44,0	1,5
Carvão ³	3,8	82,7	–	13,5	–

Fonte: ¹ = BRITO e BARRICHELO (1978); ² = VLASSOV (2001); ³ = LOPES (2002).

2.4.3. Análise imediata

A análise imediata fornece as frações em peso de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas de uma amostra de biomassa (SANCHEZ, 2005).

A análise de umidade é feita antes que qualquer outra análise, e é determinada pelo método do forno de secagem conforme a norma ASTM D-3173.

A quantidade de cinzas é determinada aquecendo-se a amostra a 750°C durante duas horas ou para amostras mais sensíveis a 600°C, de acordo com a norma ASTM D-3174. O teor de cinzas do combustível constitui uma característica indesejável. 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, reagir quimicamente com refratários e aumentar as perdas referentes à entalpia “sensível” da própria cinza arrastada para fora do equipamento (SANCHEZ et al., 2005).

Uma das características das cascas de eucalipto é seu teor de sais minerais. O teor de cinzas da casca é bastante alto. Cerca de 3 a 10% de seu peso consiste de minerais na forma de cinzas (FOELKEL, 2005).

A fração de voláteis é determinada aquecendo-se a amostra em um cadinho coberto, durante 6 minutos a 950°C, segundo a norma ASTM D-3175 (SANCHEZ, 2005).

A Tabela 3 contém os resultados da análise imediata da madeira e casca de algumas espécies de eucalipto.

Tabela 3 – Análise imediata de algumas espécies de eucalipto, base seca

Espécie		Valores Médios (%)		
		Voláteis	Carbono Fixo	Cinzas
E. grandis	Madeira	89,9	9,6	0,31
	Casca	79,1	14,5	6,40
E. saligna	Madeira	77,5	16,7	0,41
	Casca	76,1	17,7	6,14
E. resinifera	Madeira	84,2	14,5	0,30
	Casca	81,3	17,3	1,34
E. microcorys	Madeira	86,2	12,3	0,41
	Casca	84,0	14,4	1,57

Fonte: BRITO E BARRICHELO (1978).

2.4.4. Massa específica

A massa específica aparente de um determinado combustível sólido é de fundamental importância por refletir, diretamente, o potencial energético do mesmo. Para combustíveis com poder calorífico próximo, naturalmente que, a

concentração de energia será maior naquele que apresentar maior massa específica.

Numericamente, a massa específica aparente, representa a massa de combustível por unidade de volume.

Para a determinação da massa específica de carvão vegetal, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1981) prescreve a norma NBR 6922/81. A determinação consiste no enchimento de uma caixa, com dimensões internas de 0,6 x 0,6 x 0,6 m, com carvão vegetal proveniente de uma amostra representativa do lote de carvão cuja massa específica se deseja conhecer (LOPES, 2002).

A massa por unidade de volume é calculada pela equação 4.

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (4)$$

em que

D – massa específica, kg.m^{-3} ;

M_1 – massa da caixa vazia, kg;

M_2 – massa da caixa cheia, kg;

V – volume da caixa, m^3 .

2.4.5. Ar teórico ou estequiométrico

O ar necessário, em proporções molares, para realizar a combustão completa de carbono, hidrogênio, enxofre e outros oxidantes presentes no combustível, é denominado “ar teórico” ou estequiométrico.

A determinação da quantidade mínima de oxigênio necessário 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 5, que permite determinar a massa teórica do oxigênio necessário à combustão (PERA, 1990 e LOPES, 2002).

$$m_{\text{O}_2}^{\text{ts}} = \frac{32}{12} \text{C} + 8\text{H}_2 - \text{O}_2 + \text{S} \quad (5)$$

em que

$m_{\text{O}_2}^{\text{ts}}$ – massa teórica de oxigênio, kg kg^{-1} de combustível seco.

Como na prática o combustível apresenta 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 6 (CAMARGO, 1990 e LOPES, 2002).

$$m_{O_2}^{tu} = m_{O_2}^{ts} (1 - U_{bu}) \quad (6)$$

em que

$m_{O_2}^{tu}$ – massa teórica de oxigênio, kg kg⁻¹ de combustível úmido; e

U_{bu} – umidade da biomassa, base úmida, decimal.

Por ser abundante e rico em oxigênio, o ar atmosférico é o principal comburente utilizado nos processos de combustão. O oxigênio entra na composição gravimétrica do ar atmosférico na proporção de 23,2%, permitindo que a massa mínima de ar seco, necessário à combustão, seja estimada pela equação 7 (LOPES, 2002):

$$m_{ar\ seco}^{ts} = \frac{100}{23,2} m_{O_2}^{ts} \quad (7)$$

Substituindo a equação 5 na equação 7, tem-se a equação (8).

$$m_{ar\ seco}^{ts} = \frac{100}{23} \left(\frac{32}{12} C + 8H_2 - O_2 + S \right) \quad (8)$$

em que

$m_{ar\ seco}^{ts}$ – massa teórica de ar comburente seco, kg.kg⁻¹ de combustível seco.

O consumo estequiométrico de ar comburente seco, por quilograma de combustível úmido, pode ser obtido pela equação 9 (LOPES, 2002).

$$m_{ar\ seco}^{tu} = \frac{100}{23} m_{O_2}^{tu} \quad (9)$$

em que

$m_{ar\ seco}^{tu}$ – massa teórica de ar seco, kg.kg⁻¹ de combustível úmido.

Como na composição do ar comburente existe vapor d'água, o consumo de ar teórico úmido, por unidade de combustível úmido, pode ser calculado pela equação 10 (LOPES, 2002).

$$m_{ar\ úmido}^{tu} = m_{ar\ seco}^{tu} (1 + W) \quad (10)$$

em que

$m_{\text{ar úmido}}^{\text{tu}}$ – massa teórica de ar úmido, kg.kg^{-1} de combustível úmido; e

W – razão de umidade do ar úmido, kg de vapor. kg^{-1} de ar seco.

2.4.6. 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 principal de operação, 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 e SANTOS, 2003).

2.5. Balanço de massa

Na Figura 3 pode-se observar os fluxos de massa, entrando e saindo pela superfície de controle, de um volume de controle (VC) aplicado a um sistema de aquecimento de ar.

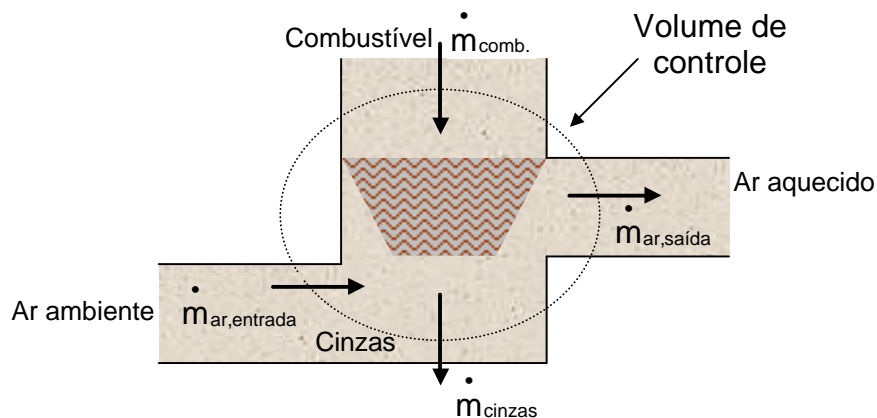


Figura 3 – Volume de controle aplicado a um sistema de aquecimento de ar.

O princípio da conservação da massa aplicada ao volume de controle permite escrever em uma notação matemática, a seguinte equação 11.

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s + \frac{dm_{\text{vc}}}{dt} = 0 \quad (11)$$

em que

$\sum \dot{m}_s$ – vazão mássica instantânea que deixa o volume de controle pela superfície de controle, kg.s^{-1} ;

$\sum \dot{m}_e$ – vazão mássica instantânea que entra no volume de controle pela superfície de controle, kg.s^{-1} ; e

$\frac{dm_{vc}}{dt}$ – taxa de variação da massa dentro do volume de controle, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Considerando 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 as equações 12, 13 e 14.

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

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

$$\dot{m}_{ar,saída} + \dot{m}_{cinzas} = \dot{m}_{ar,entrada} + \dot{m}_{comb.} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{ar,entrada} = \dot{m}_{ar,saída} + \dot{m}_{comb.} - \dot{m}_{cinzas} \quad (14)$$

em que

$\dot{m}_{ar,entrada}$ – vazão mássica de ar ambiente que entra no VC, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\dot{m}_{comb.}$ – vazão mássica de combustível que entra no VC, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\dot{m}_{ar,saída}$ – vazão mássica de ar aquecido que deixa o VC, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; e

\dot{m}_{cinzas} – vazão mássica de cinzas que deixam o VC, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.6. Balanço de energia

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 equação 15.

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) = \frac{dE_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g Z_s \right) + \dot{W} \quad (15)$$

em que

\dot{Q} – taxa de transferência de calor entre o VC e o meio, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$;

h_e, h_s – entalpia dos reagentes e dos produtos na entrada e na saída, respectivamente, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

V_e, V_s – velocidade dos reagentes e dos produtos na entrada e na saída, respectivamente, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

g – aceleração da gravidade, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$;

Z_e, Z_s – termos relativos à energia de posição, m;

\dot{W} – trabalho líquido realizado por dispositivos eletro-mecânicos acoplados ao sistema, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$; e

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ – taxa de variação da energia dentro do VC, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$.

Por meio da equação 15 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., 2003).

Alguns autores, como CAMARGO (1990), não levaram em consideração a energia demandada 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 (LOPES, 2002).

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 constantes, o que permite escrever a equação 16 (LOPES, 2002).

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (16)$$

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 17 (LOPES, 2002).

$$\dot{Q} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad (17)$$

Segundo vários autores, citados por LOPES (2002), a quantidade dos gases de combustão, representados a maior parte por CO₂, não altera significativamente a entalpia específica do ar ao se misturarem, de tal forma que pode-se utilizar, para o ar aquecido, as propriedades termodinâmicas do ar quando se comporta como gás perfeito.

2.7. 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 custo, 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 e LOPES, 2002). De acordo com esta definição, a eficiência térmica pode ser expressa por meio da equação 18.

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{Q}_f} 100 \quad (18)$$

em que

η_t – eficiência térmica, em %;

\dot{Q}_f – energia fornecida ao sistema, kJ.s⁻¹ e

\dot{Q}_d – energia disponível no gás de combustão, na saída do sistema, kJ.s⁻¹.

A eficiência térmica pode ser entendida como sendo a razão entre a energia recebida pelo ar de saída e a energia térmica liberada pelo combustível

para o aquecimento do mesmo. A 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 do gás de combustão, as propriedades físicas dos reagentes e dos produtos da combustão nas suas fases sólidas, líquidas e gasosas, o fluxo de gás e de energia no sistema, as temperaturas do gás, as propriedades dos materiais utilizados e outros parâmetros nem sempre disponíveis na prática (LOPES, 2002).

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 e LOPES, 2002). Em 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 à determinação da eficiência do processo (BAZZO, 1995, PERA, 1990 e LOPES, 2002).

2.8. Eficiência térmica global

A eficiência global é resultante do balanço de energia de todo o sistema, por meio do volume de controle. Pode-se quantificar as perdas de energia do volume de controle, conforme a equação 19 (MARTIN, 2005).

$$\eta_g = \frac{\dot{Q}_{s,total}}{\dot{Q}_{e,total}} 100 \quad (19)$$

em que

η_g – eficiência global, em %;

$\dot{Q}_{s,total}$ – taxa total de energia na saída do volume de controle, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$; e

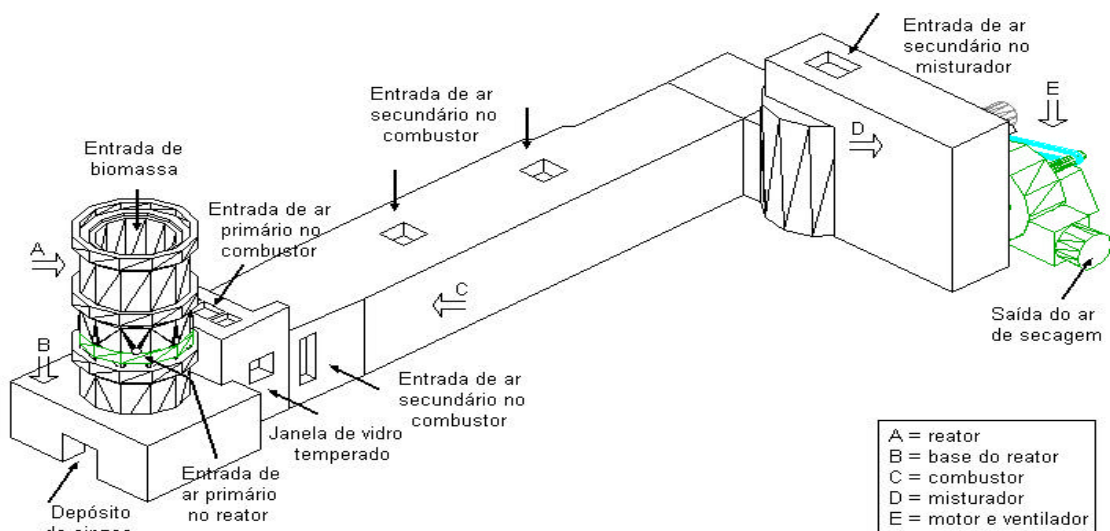
$\dot{Q}_{e,total}$ – taxa total de energia de entrada do volume de controle, $\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia para Secagem de Produtos Agrícolas, 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. O Gaseificador/combustor

Foi utilizado um reator para gaseificação de biomassa, de fluxo concorrente, ao qual se acoplou uma câmara para combustão dos gases produzidos (Figura 4). O sistema para a gaseificação/combustão foi avaliado com o uso de lenha de eucalipto, por MARTIN (2005).



Fonte: MARTIN (2005)

Figura 4 – Croqui: sistema gerador de calor, com detalhes de suas entradas e saída de ar.

O reator de gaseificação, basicamente, é constituído por três manilhas de concreto, de 0,50 m de altura e 0,60 m de diâmetro interno acopladas uma à outra, assentadas sobre uma grelha de ferro fundido disposta sobre duas paredes de tijolos refratários, distanciadas de um metro. A base do reator é revestida lateralmente de tijolo de barro. Internamente, as manilhas têm um revestimento de tijolo refratário.

Na manilha central há oito aberturas circulares de diâmetros 0,05 m, distribuídas uniformemente ao longo do perímetro para a entrada do ar primário no reator.

As tampas da base do reator, que constitui o cinzeiro e da parte superior do reator, usada para o abastecimento do mesmo, são feitas de chapa metálica.

Na base do reator, abaixo da grelha, fica a câmara de combustão. Nessa saída, há um depósito, construído com barras de ferro maciço, onde se dispõe o carvão que, uma vez incandescente, serve de chama piloto para a queima do gás proveniente do reator. Toda esta região da câmara é revestia com tijolo refratário. Há também as entradas de ar primário para o combustor e uma janela de vidro temperado que permite a visualização do gás em combustão (Figura 5).



Figura 5 – Detalhes do gaseificador e das entradas de ar primário no reator e no combustor.

Após a célula de queima tem-se um tubo metálico, cuja função é a manutenção da queima do gás ao longo do mesmo. Uma estrutura de tijolo furado, onde se encontram quatro aberturas para a entrada de ar secundário, servindo também como trocador de calor, envolve todo o tubo metálico.

O ar quente, proveniente do combustor passa então para a câmara de mistura, construída em alvenaria utilizando tijolo furado. Em sua parte superior encontra-se uma abertura de ar secundário, que tem a função de permitir a regulação da temperatura do ar na saída.

O ar aquecido, proveniente da câmara de mistura, é succionado por um ventilador centrífugo acoplado a um motor elétrico trifásico com potência nominal de 2200 W e de baixa rotação nominal (1725 rpm), por meio de correias tipo A (Figura 6).



Figura 6 – Sistema de exaustão do ar aquecido.

A Figura 7 contém uma vista geral de todo o sistema de gaseificação/combustão.

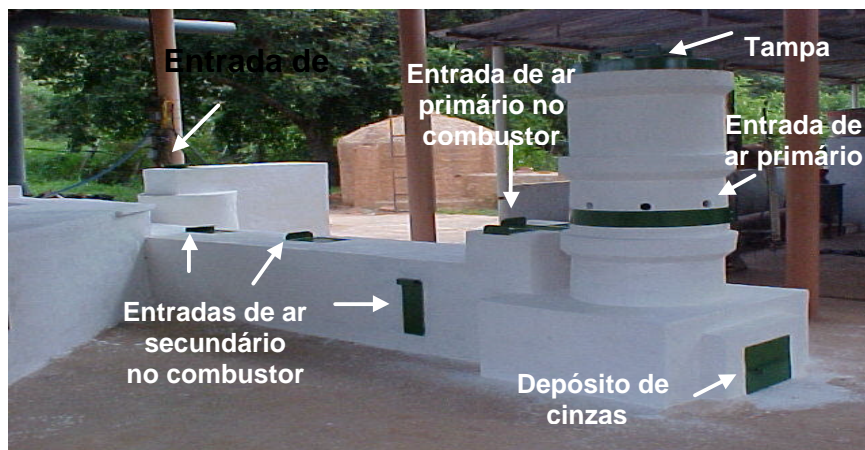


Figura 7 – Vista geral do sistema de gaseificação/combustão.

3.2. Características do combustível

Foram utilizados para a gaseificação, briquetes de casca de eucalipto e misturas de briquetes com lenha de eucalipto em proporções variadas. Na célula de queima, para iniciar e manter a combustão dos gases produzidos, utilizou-se carvão vegetal. Foi usado gás liquefeito de petróleo, GLP, para iniciar o processo de gaseificação e a queima do carvão que serviu como chama piloto do gás.

Os briquetes foram produzidos a partir de casca de eucalipto que, uma vez picada, peneirada e secada, sem a adição de aglomerantes, foi compactada à pressão de aproximadamente 150 MPa. Possuem forma cilíndrica, com diâmetro de 0,10 m e comprimento próximo de 0,50 m.

Tendo em vista as dimensões do reator fez-se necessário o fracionamento dos mesmos para comprimentos de $0,10 \pm 0,04$ m (Figura 8).



Figura 8 – Briquetes de casca de eucalipto, fracionados.

A lenha usada foi eucalipto de reflorestamento da UFV, com diâmetros de $0,08 \pm 0,02$ m com comprimento de $0,12 \pm 0,02$ m (Figura 9).



Figura 9 – Lenha de eucalipto usada no reator de gaseificação em consórcio com os briquetes.

Considerando que os briquetes são obtidos de casca de eucalipto, sem a introdução de aditivo, foram utilizados para cálculos, os valores da composição elementar da casca de não-resinosas constantes na Tabela 2.

Os valores adotados para a composição elementar da lenha de eucalipto foram os citados por VLASSOV (2001), e para a composição elementar do carvão os utilizados por LOPES (2002), Tabela 2.

A umidade dos briquetes e da lenha foi determinada pelo método oficial, utilizando-se uma estufa, com circulação forçada de ar, e uma balança eletrônica com capacidade de 2,2 kg e sensibilidade de 0,01 g. Foram coletadas três amostras em diferentes locais onde se armazenavam a lenha e os briquetes, e após a medição da massa inicial das mesmas foram colocadas na estufa, mantidas à temperatura de 103 ± 3 °C até atingirem massa constante, quando então se mediu a massa final. A umidade foi determinada por meio da equação 20.

$$U_{bu} = \frac{M_i - M_f}{M_i} 100 \quad (20)$$

em que

U_{bu} – umidade, base úmida, %;

M_f – massa final, kg.

M_i – massa inicial, kg.

O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes e da lenha de eucalipto foi determinado por meio de bomba calorimétrica, no Laboratório de Energia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, segundo as normas ASTM D-2015-66. Uma determinada quantidade do combustível é fechada dentro de um recipiente de metal com atmosfera de oxigênio sob alta pressão. A bomba é então mergulhada em um recipiente com parede dupla contendo água em seu interior e na camisa e a ignição do combustível é feita através de conexão elétrica externa. A temperatura da água é medida como uma função do tempo antes e depois do processo de ignição e conhecendo-se a massa de água do sistema, massa e calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e resfriamento da água, a energia liberada durante o processo de combustão pode ser determinada (SANCHEZ, 2005).

O teor de cinzas dos briquetes e da lenha foi determinado segundo a norma ASTM D-3174, no Laboratório de Energia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da UFV.

Calculou-se o poder calorífico superior dos briquetes com base na composição elementar da casca de eucalipto, usando a equação 1.

O poder calorífico inferior seco (PCI_s) e o poder calorífico inferior úmido (PCI_u) dos briquetes e da lenha foram calculados por meio das equações 2 e 3, respectivamente, utilizando-se dados da Tabela 2.

O valor do PCS do carvão foi extraído da Tabela 1, e a determinação do PCI_s foi feita pela equação 2, utilizando-se dados da Tabela 2.

Para a determinação da massa específica dos briquetes e da lenha utilizou-se uma balança com capacidade de até 500 kg e uma caixa de madeira com dimensões conhecidas, conforme o item 2.4.4, aplicando-se então a equação 4.

3.3. Funcionamento e operação do sistema de gaseificação/combustão

3.3.1. Tratamentos realizados

Foram efetuadas três repetições em cada um dos quatro tratamentos realizados, distintos quanto às massas de briquete e lenha usadas nos mesmos (Tabela 4).

Tabela 4 – Massa de combustível usada em cada tratamento

Tratamento	Repetições	Massa de briquete e lenha usada
1	3	60 kg de briquetes
2	3	50 kg de briquetes + 10 kg de lenha
3	3	40 kg de briquetes + 20 kg de lenha
4	3	30 kg de briquetes + 30 kg de lenha

Para todos os tratamentos e repetições o sistema foi alimentado uma vez, dada a dificuldade de se efetuar o reabastecimento, em virtude da alta temperatura na região onde se procede a alimentação.

Procurou-se manter as mesmas condições de operação do sistema em todas as repetições de um determinado tratamento.

3.3.2. O processo de gaseificação

O processo teve início com a queima do carvão para se obter a chama piloto dos gases, utilizando um lança-chamas, acoplado a um botijão de GLP, com o sistema de ventilação desligado. Ao se verificar que o carvão se encontrava incandescente, o lança-chamas era introduzido em uma das aberturas circulares do reator de gaseificação para se iniciar a queima do combustível. Foram mantidas fechadas todas as demais entradas de ar e acionado o sistema de ventilação. Nesta operação de queima do combustível até o início da produção de gás, quando a temperatura na zona de oxidação atingia temperaturas próximas de 650°C, foram usados dois lança-chamas, para acelerar o processo.

Após a retirada dos lança-chamas, foram reguladas as aberturas de entrada de ar primário e secundário do combustor até a obtenção de ar quente e limpo na saída do sistema. A partir daí teve início a coleta de dados.

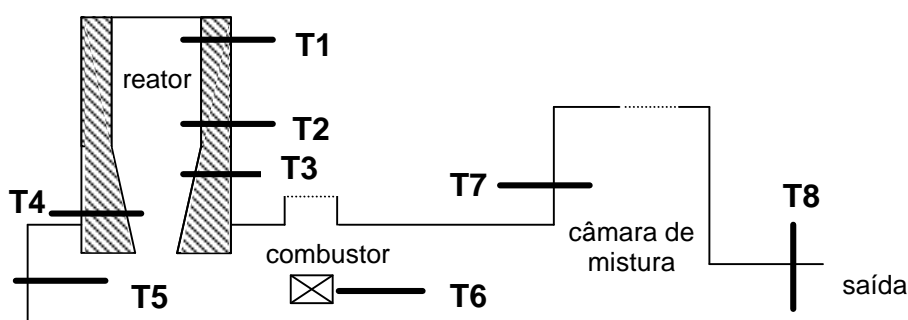
Na Figura 10 pode-se observar o aspecto da chama durante a combustão do gás produzido, com a utilização da célula de queima.



Figura 10 – Aspecto da chama durante a combustão dos gases.

3.3.3. Variáveis mensuradas

Foram efetuadas medições de temperatura, nas zonas do gaseificador, nas câmaras de combustão e de mistura, na saída do sistema de exaustão, a cada 15 minutos. Na Figura 11 estão destacados os pontos onde foram mensuradas as temperaturas.



T1 – Temperatura da zona de secagem.	T2 – Temperatura da zona de pirólise.
T3 – Temperatura da zona de oxidação.	T4 – Temperatura da zona de redução;
T5 – Temperatura do gás de saída da zona de redução.	T6 – Temperatura do combustor.
T7 – Temperatura da câmara de mistura.	T8 – Temperatura do ar na saída.

Figura 11 – Pontos de medição de temperatura.

Foram utilizados termopares tipo K (cromel-alumel), conectados a termômetros digitais, de leituras de temperaturas na faixa de -50 a 1300°C , com precisão de $\pm (0,3\% \text{ da leitura} + 1^{\circ}\text{C})$ (Figura 12). Nos pontos localizados no interior do reator fez-se o uso de uma chave-seletores, conectada aos termopares.



Figura 12 – Termômetro digital e termopares usados na medição de temperatura.

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram registradas em gráfico de um termo-higrógrafo (Figura 13) nos mesmos instantes de determinação das demais temperaturas.



Figura 13 – Termo-higrógrafo usado para registro da temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

Para o cálculo das vazões mássicas de ar primário e secundário nas diversas aberturas do gaseificador/combustor, e do ar quente na saída do sistema de exaustão, foram medidas as velocidades do ar em tais pontos, nos mesmos instantes de medição das temperaturas.

Para medição da velocidade do ar nas diversas aberturas de entrada e na saída do sistema foi usado um termo-anemômetro digital de pás rotatórias, faixa de medição de 0,0 a 45,0 m.s⁻¹ (com sensibilidade de $\pm 0,1$ m.s⁻¹) e registro das medidas em memória de massa (Figura 14). Para determinação das médias das velocidades do ar primário e do ar de saída foram feitas leituras em quatro das oito aberturas existentes no reator e, em quatro locais distintos na tubulação de saída do ar aquecido, respectivamente. Para as demais aberturas de entrada de ar foram feitas duas ou quatro leituras, dependendo das dimensões das mesmas. Para os cálculos da vazão volumétrica em uma dada abertura foi considerada a média das velocidades.



Figura 14 – Termo-anemômetro digital usado nas medições de velocidade do ar nas entradas e saídas do sistema.

Do início da queima do combustível até o encerramento da gaseificação foram também registrados, em intervalos de aproximadamente dez minutos, dados referentes aos teores de CO, O₂ e CO₂ no ar de saída, usando-se um analisador de gases de combustão acoplado a uma sonda modular de gases de combustão, 300 mm Figura 15a . O equipamento permite a leitura, com registro em memória de massa, dos percentuais de O₂, CO e CO₂. Os valores medidos foram impressos e posteriormente analisados (Figura 15).

A sonda foi inserida numa abertura situada na saída do sistema como mostrado na Figura 15b.



Figura 15 (a) – Analisador de gases de combustão; (b) Posicionamento da sonda durante a medição.

Deu-se por finalizado o processo de gaseificação quando não mais se verificou a queima de gás no combustor, correspondendo esse instante ao de coleta final dos dados.

3.3.4. Parâmetros avaliados

Foram determinadas as vazões mássicas dos combustíveis e da cinza produzida, com base no tempo total de queima dos mesmos e, comparados os tempos de duração do processo de produção de ar quente e limpo de forma estável e regular.

As velocidades do ar medidas nas diferentes aberturas do sistema e as medidas das áreas das diversas aberturas permitiram o cálculo das vazões volumétricas de ar nas entradas e saída do sistema.

Conhecidas as temperaturas e umidades relativas do ar ambiente, nos vários instantes ao longo do processo, tornaram-se possíveis os cálculos das

propriedades termodinâmicas do ar ambiente, à pressão atmosférica local de 94,06 kPa, utilizando para tal o programa Grapsi (MELO et al., 2003). Com os dados das temperaturas do ar, na saída do sistema, utilizando o mesmo programa, foram determinadas suas propriedades termodinâmicas, considerando-o como ar ambiente aquecido, mantendo-se a razão de mistura e desconsiderando-se o teor de água nele contido. Por meio da equação 21 foram feitas transformações necessárias, convertendo-se a massa específica do ar seco em massa específica do ar úmido (VAN WYLEN et al., 2003).

$$Me_u = \frac{1 + W_a}{Ve_s} \quad (21)$$

em que

Me_u – massa específica do ar úmido, $kg_{ar\ seco} \cdot m^{-3}$;

W_a – razão de mistura, $kg_{vapor} \cdot kg^{-1}_{ar\ seco}$; e

Ve_s – volume específico do ar seco, $m^3 \cdot kg^{-1}_{ar\ seco}$.

Pelos dados nominais apresentados na placa do motor elétrico, do sistema de ventilação, foi calculado o consumo de energia elétrica do mesmo.

Para o rendimento especificado pelo fabricante, 82,8%, com o índice de carregamento de 100% e, usando a equação 22, tem-se:

$$C = \frac{736 \cdot P \cdot IC}{\eta} 3600 \quad (22)$$

em que

C – consumo de energia elétrica, $kJ \cdot h^{-1}$;

P – potência nominal do motor elétrico, cv;

IC – índice de carregamento, decimal; e

η – rendimento do motor elétrico, decimal;

3.5. Cálculo do fator de ar (FA)

O fator de ar, ou razão de equivalência, que é a razão entre a massa de ar usada na gaseificação e massa de ar necessária para a combustão

completa do combustível úmido (ar estequiométrico), foi calculado com base na composição elementar do mesmo (Equação 23).

$$FA = \frac{\dot{m}_{ar}}{m_{ar,úmido}^{tu} \dot{m}_{comb.}} \quad (23)$$

em que

FA – fator de ar, decimal;

\dot{m}_{ar} – vazão mássica de ar primário no reator, $kg.s^{-1}$;

$m_{ar,úmido}^{tu}$ – massa estequiométrica de ar, $kg_{ar\ úmido}.kg^{-1}_{comb. \ úmido}$ e

$\dot{m}_{comb.}$ – vazão mássica de combustível, $kg.s^{-1}$;

A vazão mássica de combustível foi determinada pela razão entre a massa total de biomassa usada na gaseificação e o tempo total de combustão (Equação 24).

$$\dot{m}_{comb.} = \frac{M_b}{\tau} \quad (24)$$

em que

M_b – massa total de lenha utilizada na gasificação, em kg; e

τ – tempo total de combustão, em s.

3.6. Cálculo da eficiência térmica e eficiência global

A eficiência térmica retrata o potencial de conversão de energia da biomassa em calor, nas condições de operação do sistema. No cálculo da eficiência térmica considerou-se que:

- ✓ ocorreu a completa combustão dos gases produzidos e
- ✓ o sistema operou em regime permanente.

A vazão mássica de ar que entra no volume de controle foi determinada com base no princípio de conservação da massa, item 2.5, equação 14.

A vazão mássica de ar que sai do volume de controle foi determinada pela equação 25.

$$\dot{m}_{ar,s} = \dot{V}_{ar,s} Me_{ar,s} \quad (25)$$

em que

$\dot{m}_{ar,s}$ – vazão mássica de ar úmido na saída do sistema, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$;

$\dot{V}_{ar,s}$ – vazão volumétrica de ar úmido na saída do sistema, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ e

$Me_{ar,s}$ – massa específica do ar de saída, úmido, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

A eficiência térmica pode ser determinada pela equação 26.

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_{ar,s}(h_{ar,s} - h_{ar,e})}{\dot{m}_{comb.} PCI_{comb.} + \dot{m}_{carv.} PCI_{carv.}} 100 \quad (26)$$

Ou ainda, com a substituição da equação 25 na equação 26, tem-se:

$$\eta_t = \frac{\dot{V}_{ar,s} Me_{ar,s} (h_{ar,s} - h_{ar,e})}{\dot{m}_{comb.} PCI_{comb.} + \dot{m}_{carv.} PCI_{carv.}} 100 \quad (27)$$

em que

η_t – eficiência térmica, %;

$h_{ar,s}$ e $h_{ar,e}$ – entalpias do ar úmido na saída e na entrada do sistema, respectivamente, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$\dot{m}_{comb.}$ e $\dot{m}_{carv.}$ – vazão mássica de combustível e carvão, respectivamente, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ e

$PCI_{comb.}$ e $PCI_{carv.}$ – poder calorífico inferior úmido do combustível e carvão, respectivamente, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A eficiência global do sistema foi determinada com base na equação 19, item 2.8, ajustada devidamente ao volume de controle.

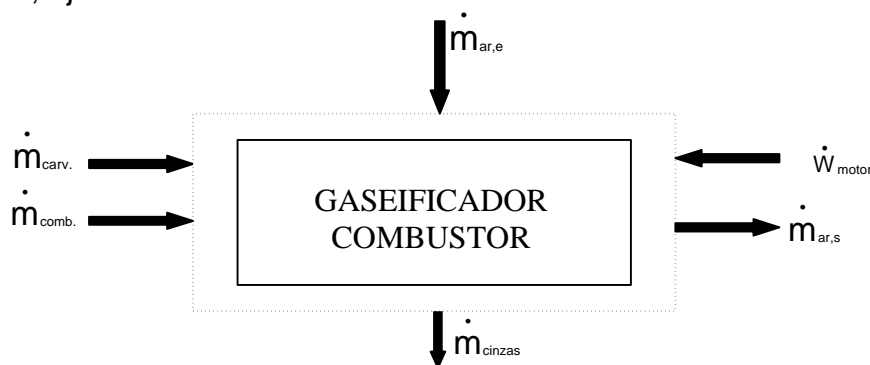


Figura 16 – Volume de controle aplicado ao sistema gaseificador/combustor.

A taxa de energia total na saída do volume de controle, $\dot{Q}_{s,total}$, está associada ao ar aquecido na saída do sistema. Sendo estimada pela equação 28.

$$\dot{Q}_{s,total} = \dot{m}_{ar,s} h_{ar,s} \quad (28)$$

Ao passo que, a taxa de energia total na entrada do volume de controle, $\dot{Q}_{e,total}$, está associada às vazões mássicas de ar ambiente, combustível e carvão para o interior do sistema e à potência elétrica do motor do ventilador. Calculada por meio da equação 29.

$$\dot{Q}_{e,total} = \dot{m}_{ar,e} h_{ar,e} + \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.} + \dot{m}_{carv.} PCI_{carv.} \quad (29)$$

A vazão mássica de ar para dentro do volume de controle foi determinada pela equação 14, item 2.5.

A eficiência térmica global pode ser calculada por meio da equação 30.

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_{ar,s} h_{ar,s}}{\dot{m}_{ar,e} h_{ar,e} + \dot{m}_{comb.} PCI_{comb.} + \dot{m}_{carv.} PCI_{carv.} + \dot{W}_{motor}} \cdot 100 \quad (30)$$

em que

η_g – eficiência global, em %;

\dot{W}_{motor} – energia calculada consumida pelo motor, em $k.h^{-1}$.

3.7. Análise estatística

Para efeito de análise estatística foi considerado um delineamento inteiramente ao acaso com quatro tratamentos e três repetições. Os tratamentos em questão se referem ao uso puramente de briquetes no processo de gaseificação/combustão e o seu uso com a adição de percentuais variados de lenha de eucalipto.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância. Para comparar as médias dos tratamentos foi utilizado o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. O combustível

As propriedades avaliadas dos combustíveis usados, necessárias para a análise de desempenho do sistema, nos diversos tratamentos, foram a umidade, o poder calorífico, a massa específica e o teor de cinzas, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.1.1. Umidade

A umidade dos briquetes e dos pedaços de lenha de eucalipto utilizados nos testes, conforme metodologia descrita no item 3.2, equação 20, estão apresentados nas Tabelas 5.

Tabela 5 – Umidade percentual (base úmida) dos briquetes e da lenha usados nos testes

Biomassa	Amostra			U _{bu} (%)
	1	2	3	
Briquetes	13,83	13,84	13,99	13,9 ± 0,1
Lenha	16,60	16,30	16,15	16,4 ± 0,2

As diferentes amostras dos combustíveis apresentaram teores de água próximos e, menores que 20% bu, portanto, dentro das exigências para o bom funcionamento do sistema de gaseificação.

4.1.2. Análise química elementar

A matéria prima para fabricação dos briquetes foi casca de eucalipto. A composição elementar dos mesmos foi considerada como sendo a das cascas usadas em sua fabricação, a qual foi fornecida pelo fabricante (Tabela 6).

Tabela 6 – Análise química elementar da casca de eucalipto

Elemento	Fração (%)	Elemento	Fração (mg.kg ⁻¹)
C	47,95	B	9,9
H	5,80	Zn	8,5
N	0,32	Cu	2,8
P	0,04	Fe	34,5
K	0,44	Mn	52,8
Ca	3,65	Na	2772,0
Mg	0,25	Al	73,4
S	0,02		
O	41,25		

4.1.3. Poder calorífico

O poder calorífico superior dos briquetes e da lenha foram determinados no Laboratório de Energia da Madeira/DEF/UFV. Os valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Poder calorífico superior, base seca, dos briquetes e lenha

Amostras	Poder calorífico superior	
	cal.g ⁻¹	kJ.kg ⁻¹
Briquetes	4207,2	17611
Lenha	4785,4	20035

Com base na composição elementar apresentada na Tabela 6 e usando a equação 1 foi obtido o valor de 17107 kJ.kg⁻¹ para o PCS, base seca, dos briquetes, inferior ao determinado através da bomba calorimétrica.

Os valores medidos estão na faixa daqueles encontrados na literatura, conforme Tabela 1.

Levando-se em conta a umidade dos briquetes e da lenha foram aplicadas as equações 2 e 3 e, adotadas as composições elementares apresentadas na Tabela 2, para a determinação do poder calorífico inferior,

base seca (PCI_s) e úmida (PCI_u) dos briquetes e da lenha. Foram usados os valores medidos do PCS dos briquetes e lenha.

Para o carvão adotou-se o PCS constante da Tabela 1 e a composição elementar apresentada na Tabela 2 para a determinação do PCI_s . Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Poder calorífico inferior dos briquetes e lenha

Amostras	Poder calorífico inferior, kJ.kg^{-1}	
	bs	bu
Briquetes	16293,7	13691,6
Lenha	18718,1	15258,7
Carvão	30.067,9	–

4.1.4. Massa específica

A massa específica aparente dos briquetes e da lenha utilizados nesta pesquisa foi determinada conforme a norma estabelecida para o carvão vegetal.

Assim, pela equação 4, foram obtidos os valores de massa específica apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Massa específica dos briquetes e lenha, úmidos

Biomassa	Massa específica úmida, kg.m^{-3}
Briquetes	1018,5
Lenha	425,9

O alto valor obtido para a massa específica dos briquetes, aproximadamente, 2,4 vezes superior ao da lenha de eucalipto, é um fator relevante na análise da capacidade energética de um combustível. De posse do poder calorífico inferior e da massa específica dos briquetes e lenha pode-se calcular o potencial energético dos mesmos, chegando-se aos valores de 16,6 e 8,0 MJ.m^{-3} , respectivamente.

4.1.5. Teor de cinzas

Na Tabela 10 estão apresentados os teores de cinza dos briquetes e da lenha, conforme consta no laudo da análise imediata mesmos, feita no Laboratório de Energia da Madeira/DEF/UFV.

Tabela 10 – Teor de cinza dos briquetes e lenha

Biomassa	Teor de cinza (%)
Briquetes	9,20
Lenha	0,48

Os valores obtidos estão consoantes com aqueles citados na Tabela 3 e dentro da faixa prevista por FOELKEL (2005) para a casca de eucalipto.

4.2. Ventilador e motor

O consumo de energia elétrica pelo motor do sistema de ventilação, calculado conforme a equação 22, foi de 2.666,7 W, equivalente a 9.600 kJ.h⁻¹, valor este utilizado nos cálculos de eficiência.

4.3. Desempenho do sistema gaseificador/combustor para aquecimento direto de ar

Para cada tratamento foram realizadas três repetições, procurando manter as mesmas condições de operação do sistema.

O controle do fluxo de ar primário no reator e combustor foi feito, com a regulação das aberturas situadas no combustor e na câmara de mistura e em função da temperatura do ar na saída do sistema. Procurou-se manter as temperaturas de saída do ar inferiores a 120°C para evitar danos térmicos no sistema de ventilação.

Nas três repetições, em cada tratamento o reator foi alimentado uma vez, sem testes de reabastecimento, apesar de ser possível fazê-lo.

Os dados médios dos parâmetros analisados, obtidos nas repetições dos tratamentos 1, 2, 3 e 4, são apresentados nas Tabelas 11, 12, 13 e 14 respectivamente.

Tabela 11 – Valores médios dos parâmetros avaliados no Tratamento 1

Parâmetros avaliados	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Resultado
Tempo total de queima (h)	1,87	2,15	2,07	2,0 ± 0,1
Tempo de gaseificação (h)	1,38	1,80	1,80	1,7 ± 0,2
Consumo de briquete (kg.h ⁻¹)	32,14	27,91	29,03	30 ± 2
Consumo de lenha (kg.h ⁻¹)	–	–	–	–
Consumo de carvão (kg.h ⁻¹)	1,13	1,40	0,58	1,0 ± 0,4
Gasto de GLP na ignição (kg)	0,90	0,60	0,60	0,7 ± 0,2
Produção de cinzas (kg.h ⁻¹)	0,86	0,60	1,74	1,1 ± 0,6
Fator de ar (%)	42,18	50,36	41,00	45 ± 5
Eficiência térmica (%)	42,63	42,59	43,11	42,8 ± 0,3
Eficiência global (%)	77,04	78,46	79,66	78 ± 3

Tabela 12 – Valores médios dos parâmetros avaliados no Tratamento 2

Parâmetros avaliados	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Resultado
Tempo total de queima (h)	1,87	2,23	2,03	2,0 ± 0,2
Tempo de gaseificação (h)	1,57	2,00	1,85	1,8 ± 0,2
Consumo de briquete (kg.h ⁻¹)	26,79	22,39	24,59	25 ± 2
Consumo de lenha (kg.h ⁻¹)	5,36	4,48	4,92	4,9 ± 0,4
Consumo de carvão (kg.h ⁻¹)	1,07	0,76	0,49	0,8 ± 0,3
Gasto de GLP na ignição (kg)	0,30	0,50	0,50	0,4 ± 0,1
Produção de cinzas (kg.h ⁻¹)	0,64	0,90	1,57	1,0 ± 0,5
Fator de ar (%)	48,39	35,70	43,71	43 ± 6
Eficiência térmica (%)	45,61	47,72	46,04	46 ± 1
Eficiência global (%)	79,23	81,49	79,72	80 ± 1

Tabela 13 – Valores médios dos parâmetros avaliados no Tratamento 3

Parâmetros avaliados	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Resultado
Tempo total de queima (h)	2,23	2,22	2,15	2,2 ± 0,1
Tempo de gaseificação (h)	1,73	1,73	1,90	1,8 ± 0,1
Consumo de briquete (kg.h ⁻¹)	17,91	18,05	18,61	18,2 ± 0,4
Consumo de lenha (kg.h ⁻¹)	8,96	9,02	9,30	9,1 ± 0,2
Consumo de carvão (kg.h ⁻¹)	0,49	0,68	0,51	0,6 ± 0,1
Gasto de GLP na ignição (kg)	0,30	0,30	0,50	0,4 ± 0,1
Produção de cinzas (kg.h ⁻¹)	1,34	1,22	1,07	1,2 ± 0,1
Fator de ar (%)	39,40	45,05	48,74	44 ± 5
Eficiência térmica (%)	48,39	51,09	46,22	49 ± 2
Eficiência global (%)	81,96	83,07	80,28	82 ± 1

Tabela 14 – Valores médios dos parâmetros avaliados no Tratamento 4

Parâmetros avaliados	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Resultado
Tempo total de queima (h)	2,28	2,02	1,97	2,1 ± 0,2
Tempo de gaseificação (h)	1,83	1,67	1,67	1,7 ± 0,1
Consumo de briquete (kg.h ⁻¹)	13,14	14,88	15,25	14 ± 1
Consumo de lenha (kg.h ⁻¹)	13,14	14,88	15,25	14 ± 1
Consumo de carvão (kg.h ⁻¹)	0,88	1,09	0,51	0,8 ± 0,3
Gasto de GLP na ignição (kg)	0,60	0,50	0,60	0,6 ± 0,1
Produção de cinzas (kg.h ⁻¹)	1,31	1,04	1,17	1,2 ± 0,1
Fator de ar (%)	40,42	36,52	46,46	41 ± 5
Eficiência térmica (%)	48,39	42,90	44,22	45 ± 3
Eficiência global (%)	81,32	77,55	78,14	79 ± 2

Para efeito de comparação, estão apresentados na Tabela 15 os resultados obtidos das médias das três repetições de cada tratamento. Foi acrescentada uma coluna em que são apresentados os resultados obtidos por MARTIN (2005), em um trabalho realizado em condições de operação

semelhantes a esse, em que utilizou apenas lenha de eucalipto, com as mesmas características da lenha usada neste experimento.

Os dados completos obtidos em intervalos regulares de 15 minutos, em cada uma das repetições dos diferentes tratamentos, encontram-se no Apêndice A - Tabelas 1A a 12A.

Tabela 15 – Comparações dos parâmetros avaliados nos Tratamentos 1, 2, 3, 4 e na gaseificação usando apenas lenha como combustível

Parâmetros avaliados	Trat. 1	Trat. 2	Trat. 3	Trat. 4	Lenha*
Tempo total de queima (h)	2,0	2,0	2,2	2,1	2,2
Tempo de gaseificação (h)	1,7	1,8	1,8	1,7	1,8
Consumo de briquete (kg.h ⁻¹)	30	25	18,2	14	–
Consumo de lenha (kg.h ⁻¹)	–	4,9	9,1	14	28
Consumo de carvão (kg.h ⁻¹)	1,0	0,8	0,6	0,8	0,5
Gasto de GLP na ignição (kg)	0,7	0,4	0,4	0,6	0,6
Produção de cinzas (kg.h ⁻¹)	1,1	1,0	1,2	1,2	0,3
Fator de ar (%)	45	43	44	41	39
Eficiência térmica (%)	42,8	46	49	45	38
Eficiência global (%)	78	80	82	79	77

* Fonte: MARTIN (2005).

Avaliando os resultados da Tabela 15, verifica-se que não houve uma variação significativa no tempo total de queima do combustível, o mesmo ocorrendo em se tratando do tempo de gaseificação.

A diferença no consumo de combustível quer seja na situação em que se utilizou apenas briquete (30 kg.h⁻¹), apenas lenha (28 kg.h⁻¹) e nos tratamentos 2 (24,9 kg.h⁻¹), 3 (27,3 kg.h⁻¹) e 4 (28 kg.h⁻¹) também não se mostrou relevante.

Embora o consumo de carvão tenha sido maior no tratamento 1, não se pode precisar ao certo se, de fato, o processo assim exigiu, ou se houve exagero no abastecimento da célula de queima por medida de precaução quanto à manutenção da queima do gás no combustor.

O consumo de GLP para se iniciar a queima do carvão e dos combustíveis no reator de gaseificação foi ligeiramente superior no tratamento 1, se devendo, em parte, à maior dificuldade de se iniciar a combustão dos briquetes.

O alto teor de minerais na casca do eucalipto, comparado à lenha, justifica a elevada produção de cinzas nos tratamentos em que os briquetes foram utilizados, média de $1,1 \text{ kg.h}^{-1}$, não apresentando grande variação entre eles, em contraste com o baixa produção de cinzas quando se utiliza apenas a lenha de eucalipto, média de $0,3 \text{ kg.h}^{-1}$.

Os fatores de ar médios dos tratamentos também apresentaram uma boa uniformidade uma vez que, durante a operação do sistema, procurou-se manter as mesmas aberturas nos pontos de entrada de ar das câmaras de combustão e mistura nas diversas repetições.

4.4. Temperatura média nas diferentes zonas do sistema

Tomadas as temperaturas médias das repetições nos diversos pontos do sistema em que foram monitoradas, para os quatro tratamentos, verificou-se que as mesmas se situam dentro dos valores previstos na literatura (Tabela 16).

Tabela 16 – Temperaturas médias nas diferentes zonas do sistema de gaseificação/combustão referentes aos Tratamentos 1, 2, 3 e 4 e na gaseificação usando apenas lenha como combustível

Termopares Pontos	Temperatura (°C)				
	Trat. 1	Trat. 2	Trat. 3	Trat. 4	Lenha*
1	209	198	196	205	232
2	334	241	210	207	188
3	809	756	678	799	821
4	963	852	901	890	865
5	906	863	808	834	775
6	243	185	272	284	236
7	124	138	124	127	115
8	108	110	108	112	99
T _{ambiente}	24,5	22,7	23,7	22,5	23,7

*Fonte: MARTIN (2005)

A Figura 17 contém as temperaturas médias observadas nos diferentes pontos do sistema de gaseificação/ combustão mostrados na Figura 12, para os tratamentos 1, 2, 3 e 4.

Dados completos sobre as temperaturas coletadas nos diferentes instantes de cada repetição são apresentados no Apêndice B (Tabelas 1B a 12B).

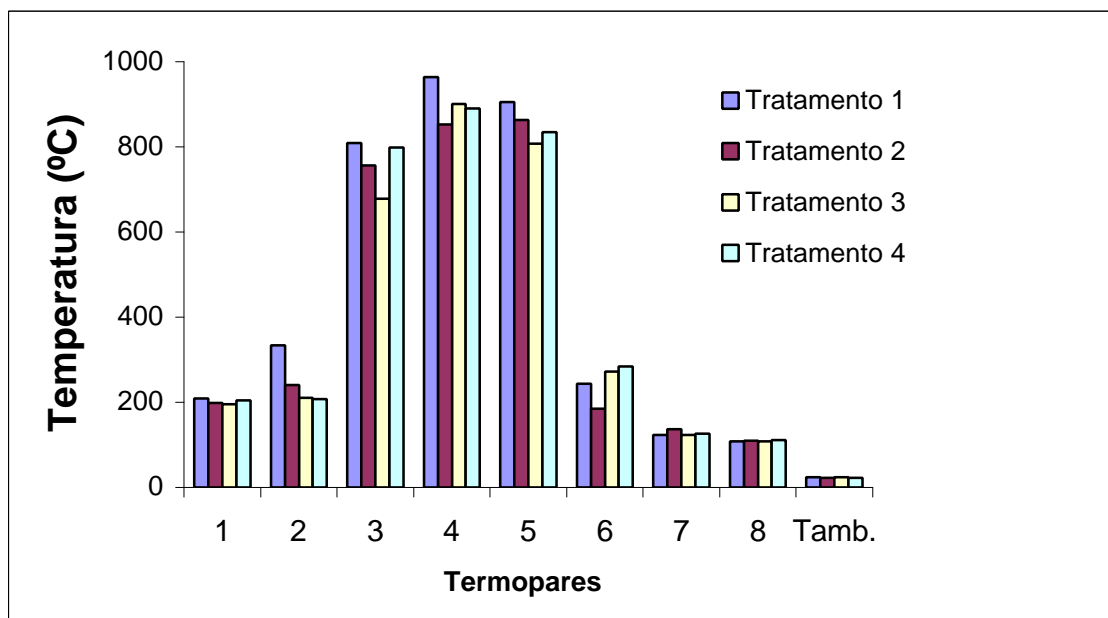


Figura 17 – Temperaturas médias nas diferentes zonas do sistema de gaseificação/combustão.

Embora os testes relativos às várias repetições tenham sido realizados em datas diferentes, a temperatura do ar de entrada (ambiente) apresentou valores próximos, em torno de 23, 4°C.

Com relação às temperaturas no interior do reator de gaseificação, registradas pelos termopares 1 (zona de secagem), 2 (pirólise), 3 (oxidação), 4 (redução) e 5 (saída dos gases) verificou-se maiores valores no tratamento 1, sem variações significativas nos demais tratamentos.

Nos demais pontos, ao longo da câmara de combustão e na câmara de mistura as temperaturas também, apresentaram valores próximos.

A temperatura média de saída do ar (T8) foi de $110 \pm 2^\circ\text{C}$, uma vez que, a mesma foi controlada através da regulagem das aberturas para se evitar valores excessivos que causassem danos térmicos ao ventilador.

A diferença de temperatura entre o ar ambiente e o ar na saída do sistema foi em média $86 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Na Tabela 17 são apresentados os valores de temperatura máximos e mínimos de cada tratamento.

Tabela 17 – Valores de temperatura máximos e mínimos de cada tratamento.

Termopares	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)							
	Trat. 1		Trat. 2		Trat. 3		Trat. 4	
	Máx	Min.	Máx	Min.	Máx	Min.	Máx	Min.
T – 1	325	107	316	99	297	97	359	78
T – 2	680	72	509	65	381	64	458	70
T – 3	1208	525	1112	328	891	406	1207	516
T – 4	1290	474	1263	306	1275	718	1300	656
T – 5	1220	594	1201	494	1138	641	1059	590
T – 6	285	203	324	204	460	179	394	226
T – 7	145	109	253	109	146	107	148	104
T – 8	121	98	120	97	122	96	126	98
T _{ambiente}	27	20	24	21	28	20	27	17

O elevado teor de minerais da casca de eucalipto influenciou negativamente no processo como um todo uma vez que, nas zonas de oxidação e redução ocorrem temperaturas acima de 1200°C , propiciando a vitrificação das cinzas geradas em grande quantidade, dificultando a limpeza da grelha após cada repetição. A Figura 18 apresenta uma amostragem dos resíduos gerados em um dos testes.



Figura 18 – Resíduos decorrentes da vitrificação das cinzas no reator.

4.5. Análise estatística

As eficiências térmica e global do sistema, nos quatro tratamentos com três repetições, foram analisadas por meio de análise de variância.

considerando um delineamento inteiramente ao acaso. Para comparar as médias dos tratamentos foi utilizado o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Os resultados são apresentados nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Resumo da análise de variância das eficiências térmica e global em função do tratamento.

Fator de Variância	Graus de Liberdade	Quadrados médios	
		Eficiência térmica	Eficiência global
Tratamento	3	17,6099*	6,630422 ^{NS}
Resíduo	8	3,8729	2,304725
Coeficiente de variância		4,30	1,90

* = F significativo ao nível de 5% de probabilidade

^{NS} = F não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 19 – Valores médios das variáveis para os respectivos tratamentos

Tratamento	Eficiência térmica (%)	Eficiência global (%)
1	42,78b	78,39a
2	46,46ab	80,15a
3	48,57a	81,77a
4	45,17ab	79,00a

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Pela análise estatística dos resultados obtidos para a eficiência térmica e eficiência global do sistema, no tratamento 3 foram verificadas maiores médias para as duas variáveis, mas se mostrou significativa apenas em relação ao tratamento 1 no que se refere à eficiência térmica.

MARTIN (2005) trabalhando com 60 kg de lenha de eucalipto no mesmo gaseificador/combustor obteve, para as eficiências térmica e global, 37,90% e 76,57%, respectivamente, valores estes, inferiores aos do tratamento 1, que apresentou as menores médias para as mesmas variáveis.

As eficiências térmicas médias obtidas nos quatro tratamentos realizados neste trabalho se mostraram próximas das encontradas por SANTOS (2003) operando com um gaseificador de fluxo contracorrente,

usando lenha de eucalipto como combustível, para aquecimento direto de ar, com o reator envolto por um casulo para aproveitamento do calor residual. A eficiência térmica média para os testes sem recarga foi 46,71% e consumo médio de combustível de 21,17 kg.h⁻¹ com diferença de temperatura média entre o ar de entrada e o ar de saída de 36,71°C, bem inferior às variações de temperatura médias obtidas neste trabalho.

As eficiências térmicas obtidas também se mostraram superiores àquelas obtidas por SAGLIETTI (1991), cujo rendimento foi de 28%, para uma fornalha de aquecimento indireto e por OLIVEIRA (1996), que obteve uma eficiência térmica média de 30% para um sistema de aquecimento com trocador de calor ar-água.

4.6. Análise dos gases de exaustão

Os dados coletados desde o início da queima do combustível até o final da gaseificação, para os testes correspondentes à última repetição de cada tratamento, referentes às porcentagens de O₂, CO e CO₂ no ar de saída, encontram-se no Apêndice C – Tabela 1C.

Nas Figuras 19 a 22 foram plotados em colunas as frações percentuais de O₂, CO₂ e CO contidas no ar de saída, para os tratamentos 1 a 4, respectivamente.

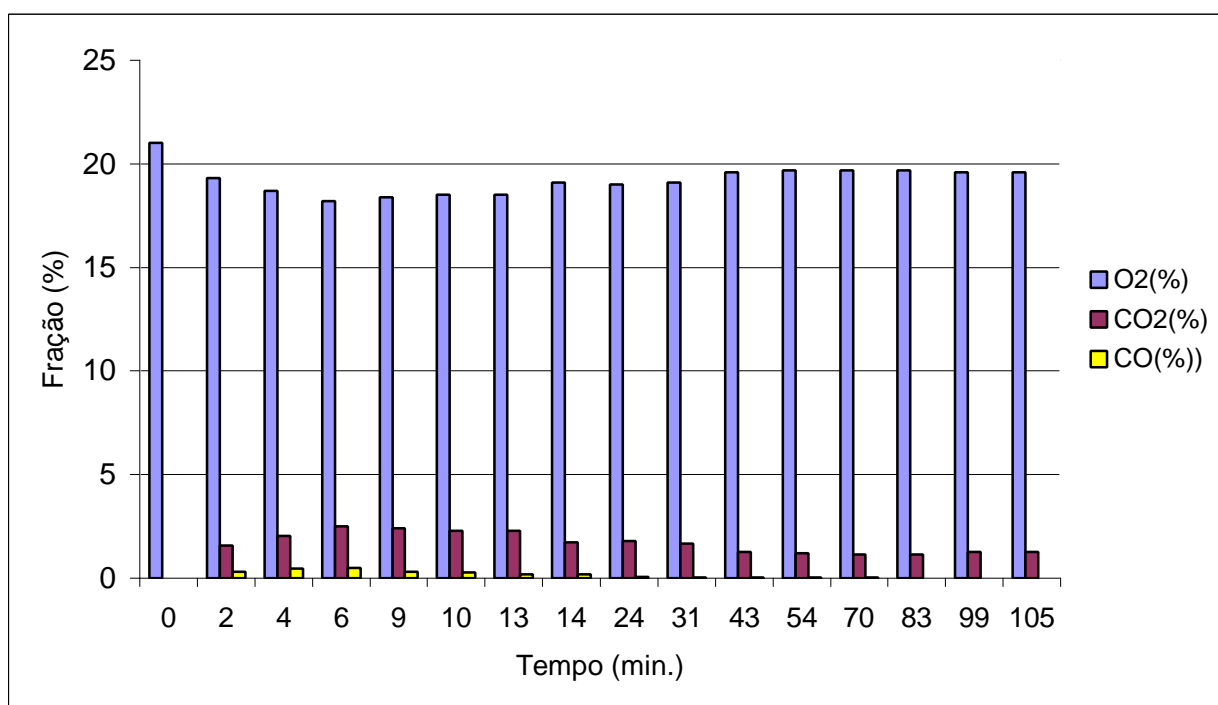


Figura 19 – Teores de O₂, CO₂ e CO no ar de saída referentes ao Tratamento 1.

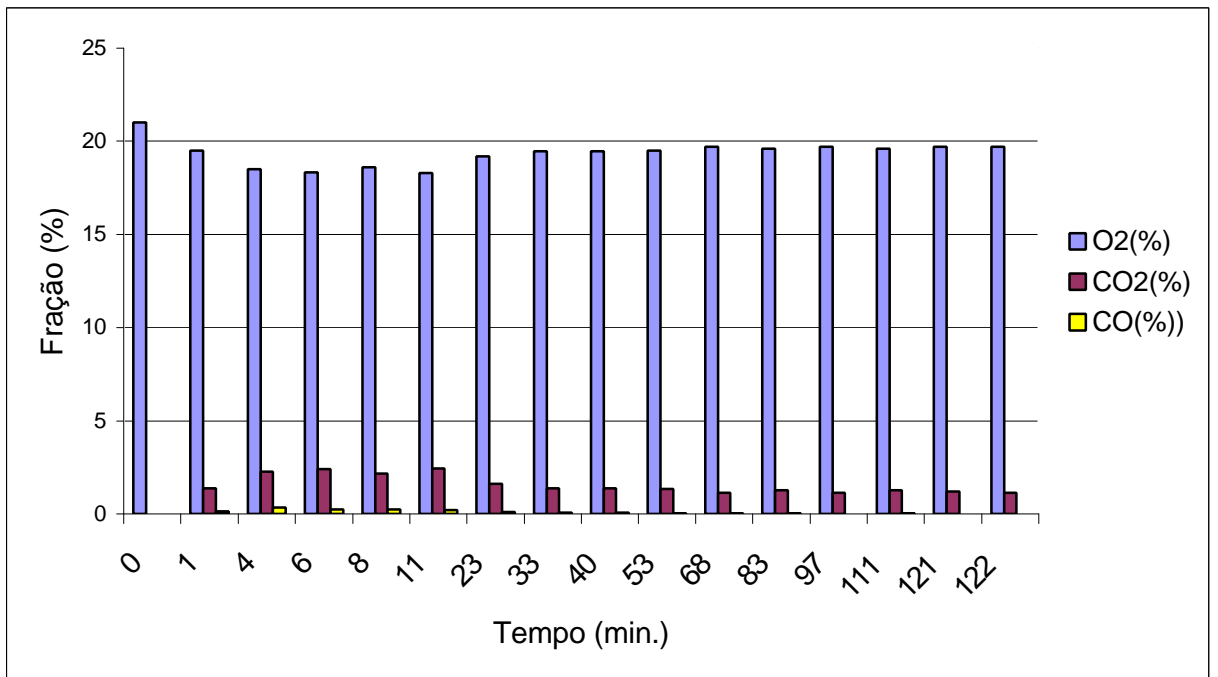


Figura 20 – Teores de O₂, CO₂ e CO no ar de saída referentes ao Tratamento 2.

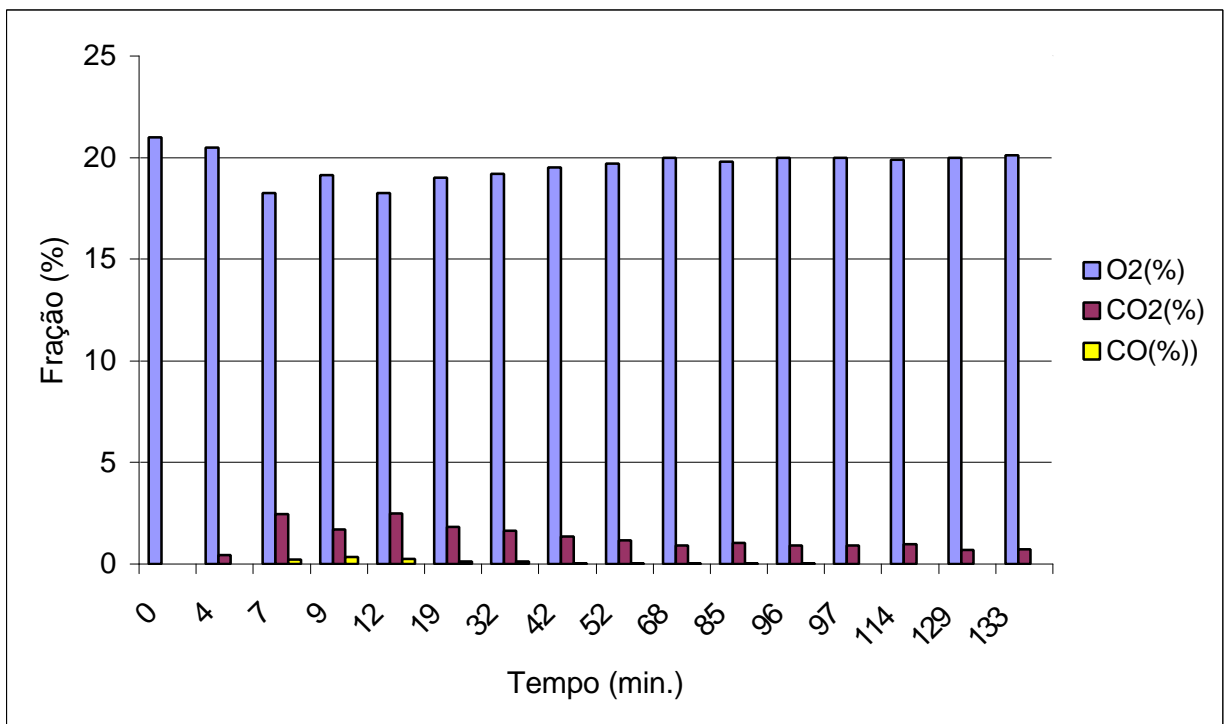


Figura 21 – Teores de O₂, CO₂ e CO no ar de saída referentes ao Tratamento 3.

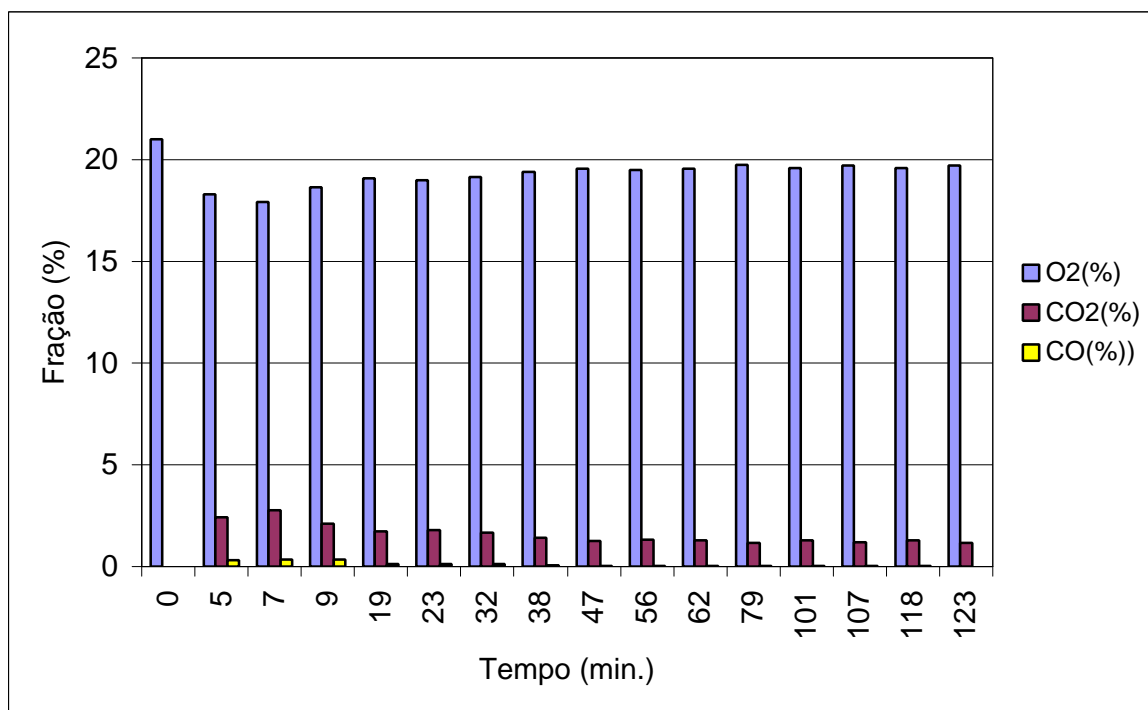


Figura 22 – Teores de O₂, CO₂ e CO no ar de saída referentes ao Tratamento 4.

Inicialmente, o ar de saída consiste apenas de ar ambiente, com teor de O₂ de 21%. Iniciada a queima do combustível há uma pequena redução deste com o aparecimento de pequenas frações de CO₂ e CO. A partir do momento em que a gaseificação se processa de forma regular, ocorre, novamente um aumento na fração de O₂ e a diminuição gradativa dos teores de CO₂ e CO, de tal forma que o ar de saída consiste, basicamente, de ar ambiente aquecido.

Na Figura 23 são apresentados os teores de monóxido de carbono para os diversos tratamentos. As maiores concentrações são verificadas no tratamento 1, no início da queima do combustível.

Os tratamentos 2, 3 e 4 apresentaram comportamentos muito semelhantes no que se refere aos teores de monóxido de carbono no decorrer do processo.

Após 40 minutos de iniciada a ignição do combustível verificou-se que as concentrações de monóxido de carbono no ar de saída foram muito próximas em todos os tratamentos.

A presença de CO no ar de saída indicou que a combustão dos gases produzidos foi incompleta, tornando-se necessário um melhor controle do fator de ar para melhorar a eficiência da combustão dos mesmos.

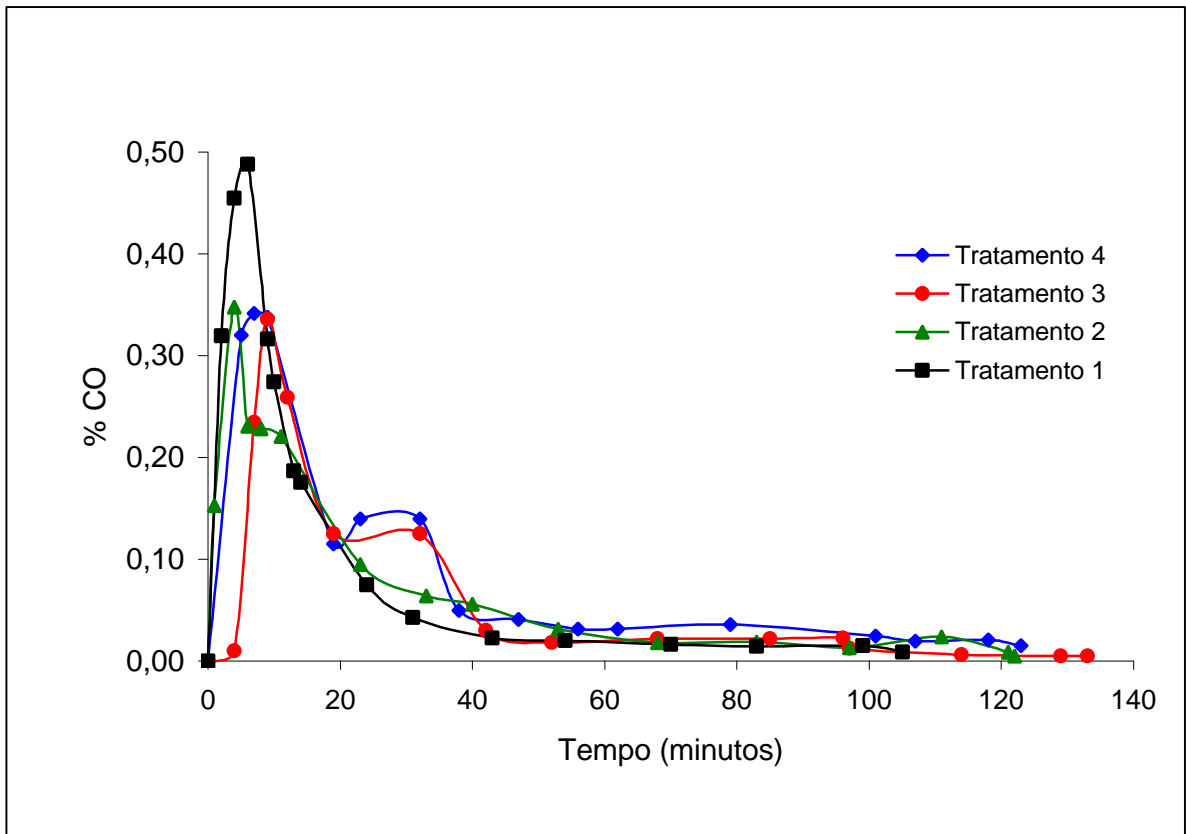


Figura 23 – Concentração de monóxido de carbono no ar de saída.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

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

Um reator de gaseificação do tipo concorrente, acoplado a uma câmara de combustão do gás produzido foi utilizado para se verificar a eficiência do mesmo, em processos de aquecimento direto de ar, usando-se apenas briquetes de casca de eucalipto e proporções variadas de briquetes e pedaços de lenha de eucalipto como combustível para a gaseificação. O sistema foi composto por uma câmara de gaseificação, uma câmara de combustão, uma câmara de mistura e um ventilador para a exaustão dos gases.

Os testes foram realizados, procurando-se manter as mesmas condições de operação do sistema, em três repetições de quatro tratamentos propostos com relação à composição do combustível.

Nos testes foram monitoradas as temperaturas do ar ambiente, do ar aquecido na saída do sistema, nas câmaras de combustão e mistura e feitas também, as determinações das vazões do ar de entrada e saída. Os resultados obtidos, quanto às eficiências térmica e global, foram submetidos a análise de variância e regressão.

Foram também analisados os teores de oxigênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono na composição do ar de saída.

O presente estudo permitiu as seguintes conclusões:

– O acoplamento do reator de gaseificação de biomassa a uma câmara de combustão dos gases produzidos mostrou-se constituir uma alternativa viável tecnicamente, para aquecimento direto de ar, obtendo-se ar quente e limpo para variadas aplicações;

– A utilização de briquetes de casca eucalipto como combustível para a gaseificação, misturados ou não com lenha de eucalipto, proporcionou regularidade no processo;

– A eficiência térmica do sistema apresentou resultados similares a outros sistemas de gaseificação/combustão para os mesmos propósitos, citados pela literatura;

– A mistura de briquetes e lenha na proporção em massa de 2:1, respectivamente, mostrou-se mais eficaz no processo de gaseificação/combustão, em comparação com o uso puro de briquetes.

– A eficiência global do sistema não variou significativamente, ao nível de 5% de probabilidade, nos diversos tratamentos;

– As temperaturas registradas nas zonas de oxidação e redução se situam na faixa daquelas citadas na literatura; e

– O elevado teor de cinzas dos briquetes foi fator limitante, pois devido às altas temperaturas nas zonas de oxidação e redução, ocorreu a vitrificação das mesmas, dificultando, após cada teste, o trabalho de limpeza da grelha.

Tendo em vista a melhoria do sistema no que diz respeito ao aumento das eficiências térmica e global do mesmo, sugere-se, para a realização de futuros trabalhos que:

– Envolver-se o reator com um sistema que permita o aproveitamento do calor residual gerado, minimizando as perdas de calor para o ambiente;

– Seja modificado o sistema de alimentação do reator de tal forma que se facilite o reabastecimento do mesmo, durante o processo, para que se possa efetuar estudos de operação em regime permanente;

– Sejam estudadas adaptações ao reator de tal forma que se torne possível a coleta dos gases produzidos, antes da combustão, para posterior análise, visando outras utilizações dos mesmos além do aquecimento direto de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal – Ensaio físico. Determinação da massa específica (Densidade a granel)**; (NBR 6922). 1981. 2p.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: ed. da UFSC, 1995. 216 p. (Série didática).
- BEZZON, G. Métodos de compactação de biomassa. In: **Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa**. Manaus: EDUA/EFEL, 1997, p39-57.
- BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Desempenho do Setor/2004**. Disponível em <<http://www.bracelpa.org.br/Bracelpa-Br/Index.htm>> Acesso em: 10/10/2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional Ano Base 2004**. Brasília, 2005.
- BRITO, J. O., BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. Piracicaba: IPEF, n. 16, p. 63-70, 1978.
- 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).
- COELHO, S. T., MARTINS, O. S., SANTOS, S. M. A. **Estado da arte da gaseificação**. São Paulo: Centro Nacional de Referência da Biomassa, 2002.
- FERNANDES, M.C. **Avaliação tecno-econômica da gaseificação do capim-elefante para eletrificação rural**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 2000.
- FOELKEL, C. **Casca da árvore do eucalipto: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel**. Disponível em <http://eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf> Acesso em 11/10/2005.

- GOMES, R.A.R.. **Avaliação do desempenho de uma fornalha a lenha de fluxo descendente e com sistema de aquecimento direto.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1988. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- GÓMEZ, E.O., CORTEZ, L.A.B., PÉREZ, J.M.M. et al. **Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.
- LOPES, R.P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola).
- 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.
- 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.
- MARTIN, S., **Desenvolvimento de um gasificador de biomassa de fluxo concorrente.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- MELO, E.C.; LOPES, D. de C.; CORRÊA, P.C. GRAPSI – Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Energia na Agricultura.** Viçosa, v. 12, n. 2, p. 154-162, 2003.
- MONTENEGRO, A.A. **Fontes não-convencionais de energia – as tecnologias solar, eólica e de biomassa.** Florianópolis: UFSC/Labsolar/NCTS, 2000.
- OLIVEIRA, G.A. de. **Desenvolvimento e teste de uma fornalha com aquecimento indireto e autocontrole da temperatura máxima do ar para secagem de produtos agrícolas.** 1996. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.
- PERA, H. **Geradores de vapor; um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia.** São Paulo: Fama, 1990. (Paginação irregular).
- QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos ligno-celulósicos.** Brasília: LPF, 1991. (Circular Técnica, 20).
- REDENERGIA. **Apresenta informações sobre poderes caloríficos de insumos energéticos.** Disponível em: <<http://www.redenergia.com.br>>. Acesso em: 10/10/2005

- SAGLIETTI, J.R.C. **Rendimento térmico de fornalha a lenha de fluxos cruzados**. Botucatu: 1991. 102 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1991.
- SÁNCHEZ, C.G.; LORA, E.S.; GÓMES, E.O. **Gaseificação**. *IN*: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 255-347.
- SÁNCHEZ, C.G. **Tecnologia da gaseificação (Capítulo II)**. Disponível em: <<ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/IM338/Gaseif-Cap2.pdf>>. Acesso em: 20/10/2005.
- SANTOS, I.S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.

APÊNDICES

Quadro 1B – Dados coletados no Tratamento 1 – Repetição 1

Data do Teste: 12/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,9	2,1	60,0	x x x	1,6

Horários	
Início queima carvão	15:40 h
Início queima lenha	15:48 h
Início gaseificação	15:51 h
Retirada lança chamas	15:56 h
Final gaseificação	17:40 h
Final queima lenha	18:00 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	22,7	21,3	20,5	21,2	20,1	21,6	22,4	23,2	23,5	80
0	107	72	606	1049	927	272	145	120	22,0	83
15	160	80	686	918	841	253	141	121	22,0	86
30	168	123	679	976	870	280	133	114	21,5	89
45	231	208	785	922	846	267	128	111	21,5	86
60	251	273	796	970	869	243	119	103	21,0	91
75	210	279	867	1135	1027	223	119	104	20,7	91
83	185	218	747	1233	1136	232	124	108	20,0	91

Quadro 2B – Dados coletados no Tratamento 1 – Repetição 2

Data do Teste: 16/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,6	3,0	60,0	x x x	1,3

Horários	
Início queima carvão	14:26 h
Início queima lenha	14:34 h
Início gaseificação	14:40 h
Retirada lança chamas	14:55 h
Final gaseificação	16:43 h
Final queima lenha	17:00 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R %
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	
Antes	22,1	20,1	19,7	20,1	20	23,3	23,1	25,1	25,0	58
0	121	330	525	745	635	284	121	106,2	25,0	55
15	185	452	663	918	816	237	131	114	25,0	55
30	173	449	669	889	795	268	124	110,1	25,0	56
45	232	366	629	849	789	234	114	103,2	25,0	60
60	191	340	621	838	784	228	117	103,7	25,0	61
75	259	297	696	931	818	240	129	110,8	25,0	61
90	325	347	766	935	855	203	128	111,6	25,0	61
105	233	324	791	1168	1083	213	120	105,4	24,0	64
108	222	292	761	1209	1220	159	109	97,3	24,0	62

Quadro 3B – Dados coletados no Tratamento 1 – Repetição 3

Data do Teste: 06/10/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,6	1,2	60,0	x x x	3,6

Horários	
Início queima carvão	09:13 h
Início queima lenha	09:16 h
Início gaseificação	09:18 h
Retirada lança chamas	09:25 h
Final gaseificação	11:20 h
Final queima lenha	11:45 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	20,6	20,6	22,3	24,2	24,1	21,1	22,6	22,9	25,5	74,5
0	132	190	898	474	594	285	125,6	108,2	27,0	74,0
15	120	444	954	818	864	256	123,2	107,5	26,5	69,0
30	198	680	1062	969	920	273	121,5	106,1	26,0	70,0
45	199	605	1004	897	880	256	120,3	106,5	26,0	70,0
60	317	654	1208	859	851	241	117,4	104,6	27,0	69,0
75	231	329	1179	940	905	231	116,0	103,4	27,0	67,5
90	308	357	1131	942	919	241	109,5	99,6	27,0	67,0
105	248	328	801	1203	1205	211	124,1	108,5	27,0	67,0
108	228	306	701	1294	1190	245	129,1	111,7	27,0	67,0

Quadro 4B – Dados coletados no Tratamento 2 – Repetição 1

Data do Teste: 23/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,3	2,0	50,0	10,0	1,2

Horários	
Início queima carvão	11:53 h
Início queima lenha	11:59 h
Início gaseificação	12:00 h
Retirada lança chamas	12:05 h
Final gaseificação	13:51 h
Final queima lenha	14:00 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	18,4	17	17,6	18,4	18,7	21,1	20,3	22,5	23,0	61
0	99	66	378	306	494	28	140	120,3	23,0	57
15	129	83	620	466	648	32	138,2	118,1	24,0	55
30	147	79	654	554	696	38	137,6	119,4	23,0	55
45	169	85	664	585	697	36	125,6	110,5	23,0	52
60	159	400	672	604	753	41	190	113,2	24,0	50
75	271	276	793	701	855	45	253	119,4	24,0	55
90	216	279	782	824	1030	44	181	106,3	24,0	55
94	199	237	702	827	1022	45	166	99,6	24,0	50

Quadro 5B – Dados coletados no Tratamento 2 – Repetição 2

Data do Teste: 13/09/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,5	1,7	50,0	10,0	2,0

Horários	
Início queima carvão	09:06 h
Início queima lenha	09:10 h
Início gaseificação	09:12 h
Retirada lança chamas	09:23 h
Final gaseificação	11:24 h
Final queima lenha	11:45 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	19,2	19,0	20,5	21,3	21,3	20,8	20,8	20,7	21,5	79,0
0	132	65	328	763	965	292	134,9	112,1	21,0	79,0
15	132	91	567	903	885	270	126,4	109,2	21,0	79,0
30	162	85	754	869	878	236	109,5	98,4	21,0	78,5
45	240	98	671	880	865	269	125,2	108,7	22,0	76,0
60	191	147	685	899	857	233	117,0	103,2	22,2	75,0
75	230	271	728	901	866	231	115,1	101,8	23,0	72,0
90	285	416	797	910	880	204	108,1	97,2	22,5	72,0
105	316	360	883	955	973	229	124,3	107,5	23,0	72,0
120	207	272	761	1263	902	209	129,4	112,2	22,5	73,0

Quadro 6B – Dados coletados no Tratamento 2 – Repetição 3

Data do Teste: 04/10/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,5	1,0	50,0	10,0	3,2

Horários	
Início queima carvão	09:10 h
Início queima lenha	09:14 h
Início gaseificação	09:17 h
Retirada lança chamas	09:21 h
Final gaseificação	11:16 h
Final queima lenha	11:24 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	18,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	20,0	20,0	21,5	73,0
0	116	206	640	798	634	245	133	111,0	21,5	72,5
15	102	124	964	1008	834	324	133	112,0	21,5	73,0
30	170	280	1045	927	811	289	138	116,0	21,5	73,0
45	191	509	1112	1100	861	241	128	112,0	22,0	72,0
60	265	485	1088	899	828	229	119,0	105,0	22,0	70,0
75	261	355	1032	963	912	267	126	111,0	22,5	69,5
90	308	373	1025	974	918	253	122	108,0	23,5	66,0
105	240	331	700	1247	1201	260	128	113,0	24,0	65,0
111	214	298	615	1023	1160	225	127	112,0	24,0	64,0

Quadro 7B – Dados coletados no Tratamento 3 – Repetição 1

Data do Teste: 29/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,3	1,1	40,0	20,0	3,0

Horários	
Início queima carvão	15:25 h
Início queima lenha	15:30 h
Início gaseificação	15:33 h
Retirada lança chamas	15:37 h
Final gaseificação	17:44 h
Final queima lenha	18:04 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	25,5	22,3	20,9	20,9	20,7	25,4	25,7	28,1	26,0	57
0	148	90	419	750	664	320	118	103,8	26,0	60
15	190	113	514	802	682	210	107	96	25,0	61
30	203	162	525	805	705	300	138	116,5	25,0	63
45	213	171	712	817	721	296	112	100	25,0	64
60	246	145	777	872	745	250	122	105,5	24,5	65
75	265	271	799	980	771	270	111	99	23,0	72
90	253	330	856	1005	887	249	121	106,2	22,5	75
104	175	259	712	1100	1008	295	129	112,6	22,0	78

Quadro 8B – Dados coletados no Tratamento 3 – Repetição 2

Data do Teste: 30/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,3	1,5	40,0	20,0	2,7

Horários	
Início queima carvão	15:11 h
Início queima lenha	15:16 h
Início gaseificação	15:19 h
Retirada lança chamas	15:25 h
Final gaseificação	17:29 h
Final queima lenha	17:45 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	27,3	26,5	35,1	34,7	38,2	29,2	28,2	30,8	28,0	54,0
0	128	117	406	730	641	460	140	120,1	27,5	55,0
15	166	257	471	830	658	314	142	122,1	27,0	61,0
30	147	381	583	871	749	279	132	115,9	27,0	65,0
45	165	188	760	900	804	328	126	112,2	26,0	69,0
60	220	340	819	940	815	250	113	101,7	25,0	69,0
75	252	322	877	985	891	271	127	112,2	24,5	74,0
90	254	338	891	980	862	259	121	107,0	23,5	75,0
104	193	272	723	1040	931	288	136	118,7	23,5	78,0

Quadro 9B – Dados coletados no Tratamento 3 – Repetição 3

Data do Teste: 29/09/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,5	1,1	40,0	20,0	2,3

Horários	
Início queima carvão	15:14 h
Início queima lenha	15:18 h
Início gaseificação	15:21 h
Retirada lança chamas	15:27 h
Final gaseificação	17:27 h
Final queima lenha	17:45 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	22,0	20,0	23,0	24,0	25,0	22,0	23	23,0	23,0	63,0
0	97	64	*	718	642	258	146	120,0	22,5	62,0
15	122	77	*	855	730	280	123	107,0	22,5	62,0
30	175	104	*	774	758	179	111	99,0	22,0	62,0
45	190	84	*	832	793	209	114	102,0	22,5	65,0
60	192	122	*	945	851	234	127	110,0	22,0	69,0
75	200	202	*	890	883	265	115	102,0	21,5	71,0
90	297	304	*	947	984	250	120	106,0	21,0	73,0
105	240	302	*	1275	1138	263	122	107,0	20,5	74,0
114	166	247	*	870	880	211	115	104,0	20,5	75,0

*= defeito no termopar

Quadro 10B – Dados coletados no Tratamento 4 – Repetição 1

Data do Teste: 31/08/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,6	2,0	30,0	30,0	3,0

Horários	
Início queima carvão	15:05 h
Início queima lenha	15:08 h
Início gaseificação	15:10 h
Retirada lança chamas	15:18 h
Final gaseificação	17:25 h
Final queima lenha	17:45 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	27,0	26,0	34,0	27,0	38,0	29,0	28,2	29,5	27,0	58,5
0	119	75	622	737	641	394	144	124,0	27,0	59,0
15	167	89	717	879	706	324	148	125,9	27,0	59,0
30	152	156	723	826	703	319	127	113,5	27,0	60,0
45	198	208	771	857	732	307	128	113,0	26,5	64,0
60	202	170	747	888	760	310	137	119,8	26,0	69,0
75	255	214	727	847	753	254	104	114,4	25,5	69,0
90	343	328	806	892	784	226	107	97,5	24,5	75,0
105	258	304	790	1210	1020	280	128	112,9	23,5	77,0
110	210	263	712	1300	988	270	127	113,0	23,0	78,0

Quadro 11B – Dados coletados no Tratamento 4 – Repetição 2

Data do Teste: 09/09/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,5	2,2	30,0	30,0	2,1

Horários	
Início queima carvão	09:41 h
Início queima lenha	09:45 h
Início gaseificação	09:47 h
Retirada lança chamas	09:55 h
Final gaseificação	11:46 h
Final queima lenha	11:55 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	19,2	19,0	19,8	20,5	20,5	19,9	20,6	20,7	21,2	71,0
0	125	75	516	656	590	294	123,5	108,1	23,2	66,0
15	197	100	647	742	641	282	129,4	112,9	23,0	66,0
30	166	86	661	774	820	305	135,3	117,1	23,5	64,0
45	196	105	673	803	924	263	123,4	109,7	23,5	64,5
60	211	232	708	806	951	291	120,4	107,2	23,5	65,0
75	359	458	733	833	980	244	128,6	113,7	23,0	65,0
90	253	353	830	966	1012	259	129	113,7	24,0	63,0
100	230	280	740	1184	1045	272	133,7	118,3	24,0	61,5

Quadro 12B – Dados coletados no Tratamento 4 – Repetição 3

Data do Teste: 28/09/2005

Massa dos combustíveis utilizados e resíduos produzidos, kg				
GLP	Carvão	Briquetes	Lenha	Resíduos
0,6	1,0	30,0	30,0	2,3

Horários	
Início queima carvão	09:48 h
Início queima lenha	09:53 h
Início gaseificação	09:56 h
Retirada lança chamas	10:03 h
Final gaseificação	11:51 h
Final queima lenha	12:00 h

Instante (min.)	Temperaturas registradas (°C)									U.R
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T _{amb.}	%
Antes	16,3	16,2	15,7	15,4	17,4	15,6	17,6	17,5	17,5	89,0
0	78	70	922	716	721	345	143,8	118,8	18,0	87,0
15	129	147	904	760	765	315	127,7	109,7	18,0	86,5
30	147	234	1016	813	788	287	124,1	106,5	18,5	85,5
45	185	183	1037	823	791	283	117,8	104,3	18,0	86,5
60	218	189	1019	855	840	256	116,7	102,9	16,5	85,5
75	270	230	1087	870	854	252	116,3	102,0	18,5	85,0
90	259	347	1207	978	984	239	127,2	108,1	18,5	84,0
100	206	282	656	1235	1059	218	124,7	107,7	18,0	85,0

APÊNDICE C

Tabela 1C – Fração percentual, em volume, de gases no ar de saída

Tratamento 1				Tratamento 2				Tratamento 3				Tratamento 4			
t(min)	O ₂	CO ₂	CO	t(min)	O ₂	CO ₂	CO	t(min)	O ₂	CO ₂	CO	t(min)	O ₂	CO ₂	CO
0	21	0,00	0,00	0	21,0	0,00	0,00	0	21,0	0,00	0,00	0	21,0	0,00	0,00
2	19,3	1,57	0,32	1	19,5	1,38	0,15	4	20,5	0,45	0,01	5	18,3	2,41	0,32
4	18,7	2,03	0,45	4	18,5	2,28	0,35	7	18,3	2,47	0,23	7	17,9	2,77	0,34
6	18,2	2,5	0,49	6	18,3	2,41	0,23	9	19,2	1,70	0,34	9	18,7	2,12	0,34
9	18,4	2,4	0,32	8	18,6	2,16	0,23	12	18,3	2,49	0,26	19	19,1	1,74	0,12
10	18,5	2,3	0,27	11	18,3	2,43	0,22	19	19,0	1,84	0,13	23	19,0	1,80	0,14
13	18,5	2,29	0,19	23	19,2	1,61	0,10	32	19,2	1,65	0,13	32	19,2	1,66	0,14
14	19,1	1,74	0,18	33	19,5	1,37	0,06	42	19,5	1,34	0,03	38	19,4	1,41	0,05
24	19,0	1,79	0,08	40	19,5	1,37	0,06	52	19,7	1,17	0,02	47	19,6	1,27	0,04
31	19,1	1,67	0,04	53	19,5	1,35	0,03	68	20,0	0,93	0,02	56	19,5	1,32	0,03
43	19,6	1,26	0,02	68	19,7	1,15	0,02	85	19,8	1,05	0,02	62	19,6	1,31	0,03
54	19,7	1,19	0,02	83	19,6	1,27	0,02	96	20,0	0,90	0,02	79	19,7	1,15	0,04
70	19,7	1,14	0,02	97	19,7	1,13	0,01	97	20,0	0,90	0,01	101	19,6	1,29	0,02
83	19,7	1,13	0,01	111	19,6	1,27	0,02	114	19,9	0,99	0,01	107	19,7	1,20	0,02
99	19,6	1,27	0,01	121	19,7	1,19	0,01	129	20,0	0,70	0,01	118	19,6	1,30	0,02
105	19,6	1,27	0,01	122	19,7	1,13	0,00	133	20,1	0,72	0,00	123	19,7	1,18	0,01