

---

# REATOR DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA EM FLUXO CONTRACORRENTE PARA AQUECIMENTO DE AR DE SECAGEM<sup>1</sup>

Ivanildo da Silva dos Santos<sup>2</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>3</sup>, Juarez de Souza e Silva<sup>4</sup>, Roberto Precci Lopes<sup>5</sup>

## RESUMO

Na busca de dispositivos que convertam a energia da biomassa em energia térmica de forma, eficientemente e com qualidade, um sistema de gaseificação com câmara de combustão dos gases foi desenvolvido e avaliado, visando o aquecimento direto de ar para utilização na secagem de grãos e outras aplicações. O sistema foi composto por um reator de gaseificação do tipo contracorrente e de uma câmara de combustão do gás produzido, ambos envolvidos em uma estrutura de alvenaria, cujo principal objetivo foi aproveitar o calor dissipado no reator e na câmara de combustão, evitar possíveis acidentes, minimizar os custos e facilitar a manutenção e a construção. Usando lenha de eucalipto como combustível, a eficiência do sistema foi cerca de 56% e na recarga atingiu-se 71% de eficiência. Concluiu-se que o dispositivo atendeu aos propósitos esperados, disponibilizando ar quente limpo, próprio para uso em secagem de produtos agrícolas com boa eficiência térmica ou para outros fins, como por exemplo, no aquecimento de ambientes para criação de animais.

**Palavras-chave:** energia da biomassa, biomassa-gaseificação, gaseificador de fluxo contra-corrente.

## UPDRAFT BIOMASS GASIFIER REACTOR FOR HEATING DRYING AIR

## ABSTRACT

A gasification/combustion system was designed, built and evaluated to produce clean and hot air from biomass for on-farm applications. The system consisted of a counter-current gasifier attached to a combustion chamber to burn the gas produced. Eucalyptus wood was used as a fuel. In order to reduce heat loss and prevent thermal hazards, the unit was enclosed in a brick-mortar structure. The initial thermal efficiency of about 56% increased to 71% at recharge. It was concluded that this system meets proposed objectives of producing clean hot air that can be used for drying purposes and space heating for animal housing.

**Keywords:** biomass energy, biomass gasification, updraft gasifier.

---

**Recebido para publicação em 21/07/2008. Aprovado em 02/02/2010**

1- Pesquisa financiada pelo CNPq.

2- Prof. IFMT . Doutorando DEA/UFV – [ivanildomt@gmail.com](mailto:ivanildomt@gmail.com)

3- Prof. Titular, UFV/DEA – [jadir@ufv.br](mailto:jadir@ufv.br)

4- Prof. Aposentado, UFV/DEA – [Juarez@ufv.br](mailto:Juarez@ufv.br)

5- Prof. Adjunto, UFV/DEA – [roberto.precci@ufv.br](mailto:roberto.precci@ufv.br)

## INTRODUÇÃO

O mundo moderno busca um sistema energético descentralizado, com participação cada vez maior de fontes renováveis de energia, de modo a garantir um desenvolvimento sustentável, com os mesmos níveis de qualidade obtidos nos serviços de iluminação, cozimento, aquecimento, transporte e industrialização, oferecidos pelas fontes convencionais de energia. Os avanços na tecnologia de fabricação de eletrodomésticos, prédios, automóveis e processos industriais melhoraram a eficiência energética desses produtos, resultando em reduções consideráveis no volume de energia utilizada.

Apesar desse progresso, as limitações encontradas no uso das chamadas fontes convencionais de energia e a preocupação com o meio ambiente, de modo geral, têm levado à conversão da biomassa em fonte de energia, para atender à demanda energética em muitas atividades econômicas. Ao contrário da energia de derivados do petróleo, a biomassa, quando proveniente de replantio e produzida de maneira sustentável, é renovável e não contribui para o acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, porque o CO<sub>2</sub> liberado durante a sua conversão em energia é absorvido novamente no processo de fotossíntese. Por estas e outras razões, as tecnologias que utilizam fontes energéticas provenientes da biomassa, em especial lenha, constituem alternativa adequada para produtores rurais e agroindústrias.

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

Nos últimos anos, os aumentos consideráveis na produção agrícola brasileira colocaram o país como um dos líderes na produção mundial de grãos, com expressivas participações no total produzido. Infelizmente, mesmo sendo um dos maiores produtores mundiais, o País sofre grandes perdas durante a colheita e pós-colheita, tornando-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que, comprovadamente, contribuam para a obtenção de produtos de boa qualidade. Dentre as tecnologias utilizadas para a conservação de grãos, a secagem é o processo comercial mais utilizado, sendo, no

entanto, a etapa que mais consome energia no processo de produção agrícola, podendo atingir 60% no pré-processamento de grãos (BROOKER *et al.*, 1992). Por isso, no desenvolvimento de sistemas de aquecimento de ar para secagem de produtos agrícolas, devem-se buscar aqueles em que se racionalize o uso de combustível e de energia elétrica.

A gaseificação, que é a termoconversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em gás combustível, por meio de sua oxidação parcial em temperaturas elevadas, obtida em reatores denominados gaseificadores ou gasogênios, tem várias aplicações práticas, tais como a substituição de combustíveis derivados do petróleo usados em motores de combustão interna, em turbinas para geração de potência ou de energia elétrica (MENDES *et al.*, 1998; SÁNCHEZ, 2004), ou para outros fins, como geração direta de calor.

Segundo Payne e Chandra (1985), o processo apresenta-se como alternativa tecnológica ao uso de GLP ou de gás natural, além de uma opção viável e eficiente para produção da energia limpa, necessária à secagem de grãos e de outros produtos agrícolas, apresentando satisfatório potencial econômico, considerando a agricultura em pequena escala.

O mais simples dos gaseificadores é o de fluxo contracorrente, Figura 1, em que o fluxo de gases ascende e o de combustível descende. É o tipo de gaseificador com maior eficiência térmica, no entanto, produz um gás extremamente impuro, inviabilizando a utilização dos gases produzidos diretamente em motores de combustão interna, restringindo seu uso a dispositivos nos quais é simplesmente queimado (aquecimento direto).

A técnica é, em princípio, extremamente simples, mas existem muitos problemas em transformar este potencial teórico em uma tecnologia viável e prática. Por requerer tecnologia mais sofisticada que a queima direta, deve-se ter especial atenção para evitar vazamentos e a redução da eficiência do sistema, que pode ocorrer por perda de calor do reator para o ambiente.

O processo da gaseificação-combustão para aquecimento do ar para secagem de grãos ou outros fins, tem sido pouco utilizado. Acredita-se que as principais razões para este fato devam-se ao desconhecimento das vantagens desse sistema para o aquecimento direto e a pouca disponibilidade de tecnologias que contemplem sistemas de operações simples, de baixo custo e funcionamento simples.

Os reatores de gaseificação de fluxo contracorrente constituem tecnologia pouco utilizada no Brasil, porém compatível com o nível socioeconômico dos agricultores. Constatou-se, por isso, a fim de agregar valores qualitativos aos produtos agrícolas e diminuir os custos com a secagem, a necessidade de desenvolver e disseminar um dispositivo de gaseificação que abranja tais anseios.

Neste contexto, neste trabalho teve-se os seguintes objetivos:

- construir e testar um reator de gaseificação de biomassa de fluxo contracorrente, com câmara de combustão anexa, para queima dos gases produzidos;
- desenvolver o sistema com dispositivos que permitam aproveitar o calor residual gerado e que se caracterize por ser de operação e construção simples, de baixo custo e funcionamento versátil;
- verificar o efeito da variação da vazão de ar primário sobre a eficiência térmica do sistema.

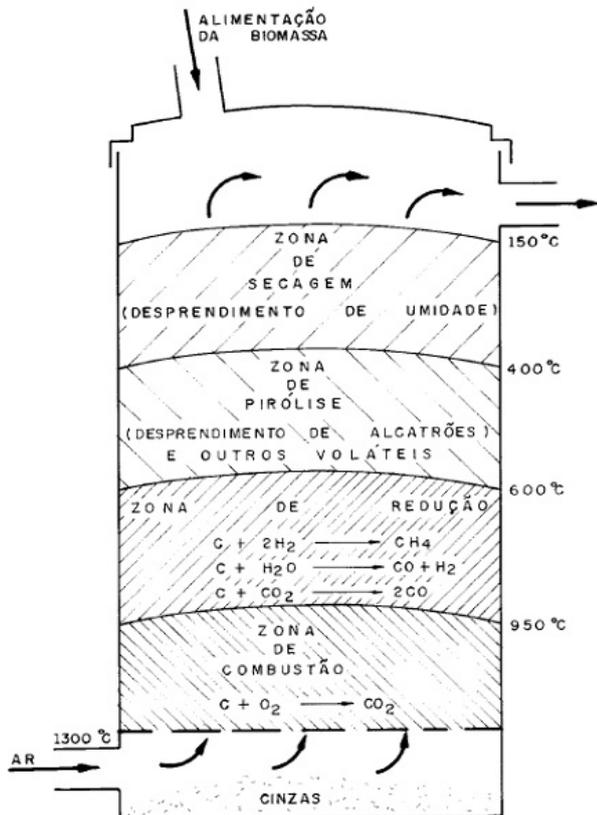


Figura 1. Gaseificador contracorrente.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada para dimensionamento do reator de gaseificação e da câmara de combustão incluiu considerações dos balanços de massa e energia, bem como critérios empíricos para

estimativa do diâmetro do reator e sua altura. Os dados inicialmente necessários foram:

- demanda térmica para o processo considerado (48 kW);
- análise elementar da biomassa a ser gaseificada (VLASSOV, 2001);
- eficiência do gaseificador (valor adotado, 70 %);
- valor da razão de equivalência (valor adotado, 25 %);
- velocidade do ar primário na superfície da grelha (valor adotado, 1,0 m s<sup>-1</sup>); e
- poder calorífico inferior da biomassa (18737 kJ kg<sup>-1</sup>).

Usando os parâmetros acima, montou-se o algoritmo de dimensionamento do reator de gaseificação.

$$\begin{aligned} \dot{q}_u &= \dot{m}_{ar,s} (h_s - h_e) \\ \dot{m}_{cbe} &= \frac{\dot{m}_{ar,s} (h_s - h_e)}{\eta PCI_{cb}} \\ \dot{m}_1 &= Re m_{ar}^t \dot{m}_{cbe} \\ A_{gre}^{min} &= \frac{\dot{m}_1}{V_{el} \cdot \rho} \rightarrow A_{gre} = A_{gre}^{min} 10 \\ R_{gre} &= \sqrt{\frac{A_{gre}}{\pi}} \\ A_{cam} &= \pi R_{cam}^2 \\ Q_{cb} &= \dot{m}_{cbe} \Delta t \\ H_{min} &= \frac{Q_{cb}}{A_{cam} \rho_{cb}} \end{aligned}$$

em que,

$\dot{q}_u$  - Capacidade térmica requerida, kJ s<sup>-1</sup>;

$\dot{m}_{ar,s}$  - Vazão mássica de ar quente requerida, kg s<sup>-1</sup>;

$h_s, h_e$  - Entalpias do ar de secagem e do ambiente, kJ kg<sup>-1</sup>;

$\eta$  - Rendimento esperado do sistema;

$PCI_{cb}$  - Poder calorífico inferior do combustível utilizado, kJ kg<sup>-1</sup>;

$\dot{m}_{cbe}$  - Vazão mássica estimada de combustível,  $kg\ s^{-1}$ ;

$\dot{m}_1$  - Vazão mássica de ar primário,  $kg.s^{-1}$ ;

$Re$  - Razão de equivalência ou fator de ar;

$m_{ar}^t$  - Massa teórica de ar estequiométrico,  $kg.kg^{-1}$ ;

$V_{el}$  - Velocidade do ar primário na superfície da grelha,  $m.s^{-1}$ ;

$A_{gre}^{min}$  - Área mínima da grelha,  $m^2$ ;

$A_{gre}$  - Área da grelha,  $m^2$ ;

$R_{gre}$  - Raio da grelha,  $m$ ;

$R_{cam}$  - Raio da câmara de gaseificação,  $m$ ;

$A_{cam}$  - Área da seção da câmara de gaseificação,  $m^2$ ;

$Q_{cb}$  - Capacidade mássica de combustível da câmara de gaseificação,  $kg$ ;

$\Delta t$  - Autonomia pretendida,  $s$ ;

$\rho_{cb}$  - Massa específica do combustível,  $kg.m^{-3}$ ;

$\rho$  - Massa específica do ar,  $kg.m^{-3}$ ;

$H_{mim}$  - Altura mínima da câmara de gaseificação,  $m$ .

O reator de gaseificação foi composto por uma câmara de gaseificação, construída de chapas metálicas número 12, e um invólucro de alvenaria (denominado de casulo 1), com entrada de ar primário na parte inferior e de ar de refrigeração nas laterais para funcionar como um trocador de calor, compondo assim, um sistema de fácil manutenção, capaz de minimizar perdas de calor e evitar acidentes por queimaduras durante sua operação (Figura 2).

A câmara de combustão dos gases foi construída em chapa metálica número 16 e revestida internamente com massa refratária. Um invólucro de alvenaria, aqui denominado de casulo 2, foi construído para proteção da câmara de combustão (Figura 3).

Após a construção, o conjunto reator de gaseificação e câmara de combustão apresentou-se como mostrado na Figura 4.

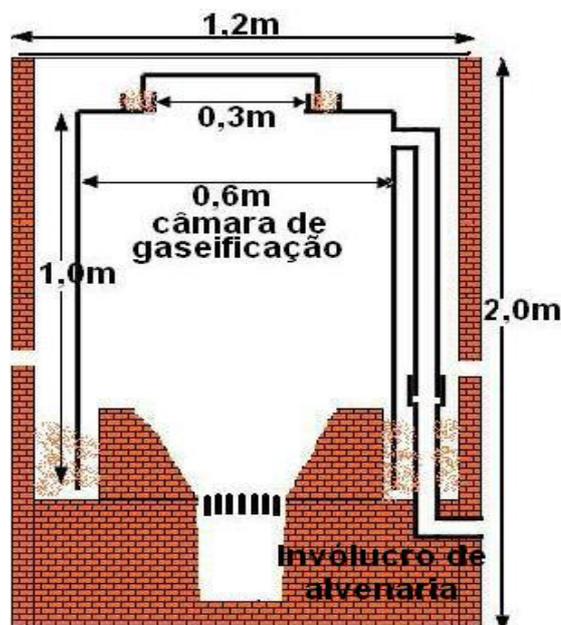


Figura 2. Reator de gaseificação.

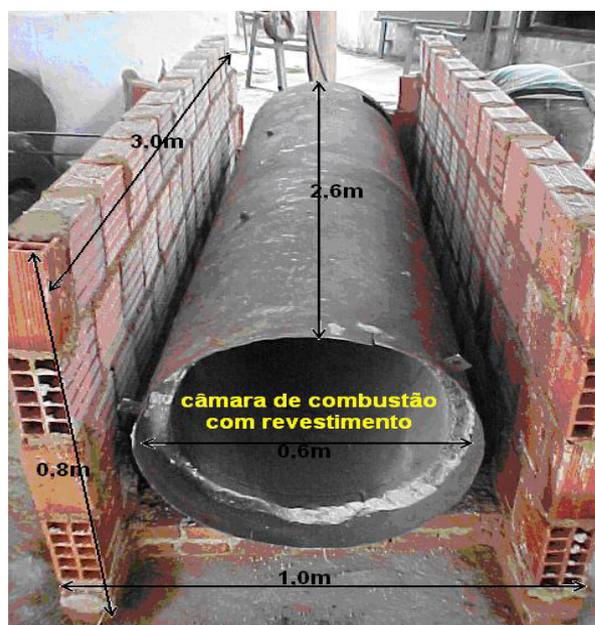


Figura 3. Câmara de combustão dos gases.

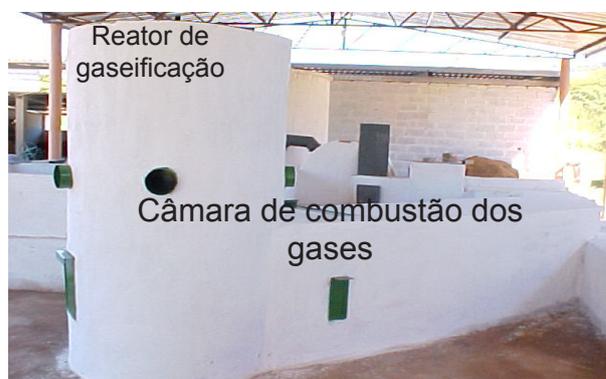
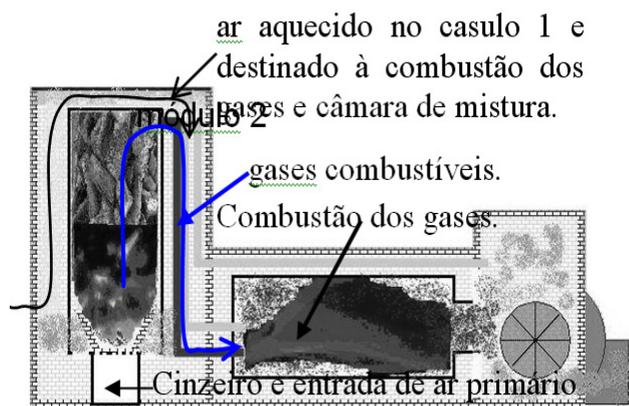


Figura 4. Reator de gaseificação com câmara de combustão dos gases.

Para succionar o ar primário, o gás produzido na câmara de gaseificação, o ar comburente necessário à combustão do gás e o ar ambiente adicionado aos gases da combustão, bem como para fornecer a vazão de ar necessária à secagem, utilizou-se um ventilador centrífugo, cujo rotor foi acoplado, por meio de correias, ao eixo de um motor elétrico trifásico, de potência nominal de 3,68 kW (5,0 cv) e 1750 rpm. Na Figura 5, é ilustrado todo o sistema de gaseificação e combustão, bem como os fluxos de ar e gases.



**Figura 5.** Fluxo dos gases no reator de gaseificação de biomassa.

Na saída do ventilador, construiu-se um dispositivo direcionador do ar proveniente do sistema. No início do funcionamento, por conter grande quantidade de fumaça, o ar era direcionado para uma chaminé e, quando o sistema atingia o regime permanente, produzindo ar quente propício para secagem, este era direcionado para um secador.

O funcionamento do reator de gaseificação, cuja capacidade da câmara de gaseificação era aproximadamente de 0,2 m<sup>3</sup> de biomassa, teve início com o abastecimento com lenha de eucalipto, com diâmetros de 75 ± 25 mm e comprimento de 110 ± 20 mm.

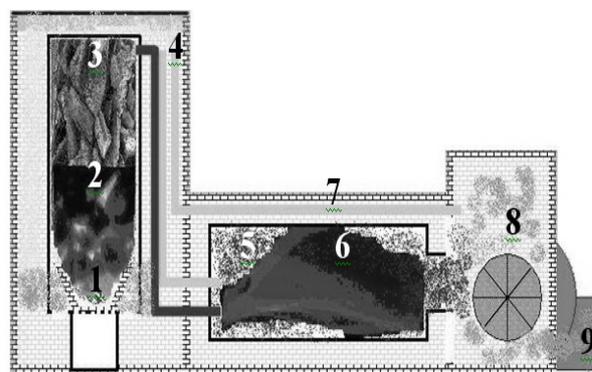
Com o auxílio de um lança-chamas, fez-se a ignição de lenha (via grelha), para dar início ao processo de aquecimento da câmara de gaseificação. Durante esse processo, que é endotérmico, somente a entrada de ar primário permanecia aberta e o ventilador ficava ligado, com a abertura do registro direcionada para a chaminé. Assim que a temperatura na câmara de gaseificação atingia valores entre 400 e 600 °C, o processo tornava-se exotérmico e o calor gerado era suficiente para proporcionar reações de gaseificação. O lança-chamas era direcionado, então, para a câmara de combustão dos gases e permanecia ali até que os gases produzidos entrassem em

combustão, mantendo chama constante. Esse processo durava cerca de vinte minutos.

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

Para acompanhar, avaliar e controlar, sistematicamente, os parâmetros que afetam o desempenho, com vistas à determinação da melhor performance do sistema, monitoraram-se: as temperaturas, por meio de sondas termométricas tipo K, com 0,15 m de comprimento e 1,5 mm de diâmetro, conectadas a instrumentos de aquisição de dados, marca Dayon, modelo TC10, com sensibilidade de 0,1 °C; a umidade relativa do ar ambiente, por meio de um *DATALOGGER* da marca Sato, modelo SK-L200-TH e precisão de 0,1%; a vazão de ar primário, de mistura e de secagem, com um termo-anemômetro digital de fio quente, marca *Hygro-Therm* e modelo *airflow*<sup>TM</sup> – TA3, com sensibilidade de 0,01 m.s<sup>-1</sup> e a medição do consumo de combustível, usando balança digital com sensibilidade de 0,1 kg.

Na figura 6, representa-se um corte lateral do sistema, com os pontos de medidas das temperaturas.



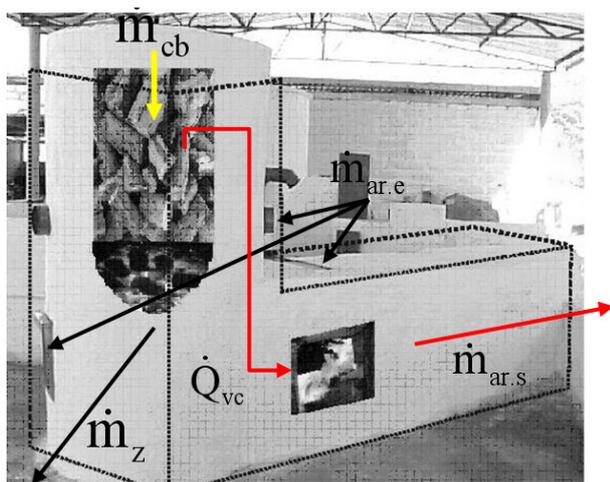
**Figura 6.** Pontos de medidas das temperaturas no reator de gaseificação de biomassa.

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

A eficiência térmica do conjunto reator de gaseificação-câmara de combustão foi determinada, considerando-se o volume de controle, representado

na Figura 7, e também que:

- a combustão dos gases foi completa;
- a quantidade de partículas de carbono arrastadas ou presentes nas cinzas foi desprezível;
- o sistema opera em regime permanente;
- o consumo de energia por equipamentos eletromecânicos é desprezível;
- a vazão mássica total do ar que entra no volume de controle é a diferença entre a vazão mássica do ar de saída e a vazão mássica de combustível gaseificado.



**Figura 7.** Volume de controle aplicado ao sistema de gaseificação-combustão para aquecimento de ar.

Assim sendo, a equação abaixo foi a utilizada nos cálculos de eficiência térmica do sistema.

$$\eta = \left( \frac{\dot{m}_{ar,s}(h_s - h_e)}{\dot{m}_{cb} PCI} + \frac{h_e}{PCI} \right) 100 \quad (1)$$

$\eta$  - eficiência térmica, decimal;

$\dot{m}_{ar,s}$  - vazão mássica do ar de secagem que deixa o volume de controle, kg s<sup>-1</sup>;

$h_s, h_e$  - entalpias do ar que sai e entra no volume de controle, kJ kg<sup>-1</sup>;

$\dot{m}_{cb}$  - vazão mássica de combustível, kg.s<sup>-1</sup>; e

PCI – poder calorífico inferior do combustível, kJ kg<sup>-1</sup>.

O desempenho do reator de gaseificação-combustão para aquecimento direto do ar foi estudado, fazendo-se variar a área de entrada de ar de refrigeração na estrutura de alvenaria (casulo 2) da câmara de combustão e, conseqüentemente, as velocidades do ar nos diversos pontos de admissão do sistema. Realizou-se um teste com uma abertura de 0,07 m<sup>2</sup>, três com 0,09 m<sup>2</sup>, dois com 0,12 m<sup>2</sup> e, efetuando-se uma recarga, um com 0,14 m<sup>2</sup>,

totalizando nove testes.

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

Não se realizou análise estatística, por se constatarem condições ambientais diferentes em todos os testes.

Durante a execução do sistema, foi elaborada uma análise de custo, visando a futuras comparações com sistemas atualmente usados no processo de aquecimento de ar. Nesta análise, dentro dos custos fixos e variáveis, verificaram-se a depreciação anual, o custo de oportunidade, a manutenção, o combustível, a energia elétrica e a mão de obra, relacionados com os praticados na região.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando-se as temperaturas do ar aquecido na saída do ventilador, o consumo de combustível e a eficiência térmica do sistema, verificou-se a resposta do reator de gaseificação-combustão às variações da área de admissão do ar de refrigeração, no trocador de calor da câmara de combustão (estrutura de alvenaria).

O aumento da área de admissão de ar na câmara de combustão (no casulo 2) provocou queda na temperatura final do ar aquecido. As temperaturas médias do ar de secagem, nas diversas situações, estão ilustradas no Quadro 1.

A diminuição da temperatura de um teste para outro é indicativa da ocorrência de dois fatos:

- decréscimo na produção de gás combustível, provocada pela diminuição na disponibilidade de ar primário na câmara de gaseificação;

- aumento da proporção do ar de mistura em relação aos gases da combustão, na câmara de mistura.

Nas primeiras situações de testes, a maior disponibilidade de ar primário na câmara de gaseificação, não ocasionou razão de equivalência acima da permitida para gaseificação, que é de 40%. O aumento da área de admissão de ar de refrigeração, na câmara de combustão (no casulo 2), provocou queda na quantidade de ar primário admitido na câmara de gaseificação, ocasionando redução das reações químicas e, conseqüentemente, de consumo de combustível. Com o decréscimo no consumo de combustível e com a temperatura do ar de secagem mantendo-se entre 50 e 60 °C, ocorreu um aumento na eficiência térmica (Quadro 1) do sistema.

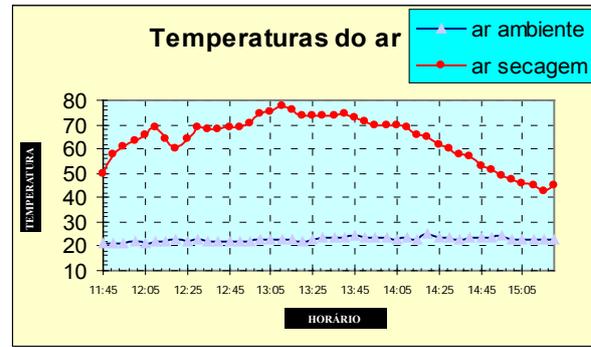
**Quadro 1.** Temperatura do ar, consumo de combustível e rendimento térmico do sistema nas diversas situações de teste

TESTE	Situações de testes Aberturas em m <sup>2</sup>		Temperatura média do ar -°C		Velocidade média do ar primário m s <sup>-1</sup>	Razão de equivalência %	Consumo de lenha-kg h <sup>-1</sup>	Vazão mássica ar quente- kg s <sup>-1</sup>	Duração dos testes - h	Rendimento térmico - %
	entra	saí	entra	saí						
1°	0,07	22	73	2,12	25,5	32,4	1,04	2,0	<b>36</b>	
2°	0,09	19	60	1,33	23,7	22,3	1,23	3,0	<b>48</b>	
3°	0,09	26	63	1,29	22,3	22,3	1,23	2,5	<b>44</b>	
4°	0,09	24	57	1,25	21,9	22,3	1,26	3,0	<b>41</b>	
5°	0,12	25	52	0,89	23,2	15,1	1,33	4,0	<b>51</b>	
6°	recar	21	64	1,08	21,4	20,2	1,24	3,0	<b>58</b>	
7°	0,12	15	54	1,14	22,9	19,8	1,34	3,0	<b>56</b>	
8°	recar	23	63	0,90	22,6	15,8	1,29	3,5	<b>71</b>	
9°	0,14	21	50	0,82	23,2	14,0	1,17	5,0	<b>51</b>	

Quando o sistema trabalhou com reabastecimento, constatou-se que a eficiência do teste da recarga foi maior que a eficiência do teste da carga inicial, simplesmente porque, no reabastecimento, a câmara de gaseificação encontrava-se nas condições ideais de temperatura (600 a 800 °C) para a ocorrência das reações de gaseificação. Esta observação é muito importante na análise do desempenho do sistema, pois representa a situação real de campo.

Segundo Lopes (2002), a maioria dos secadores utilizados no meio rural opera disponibilizando ar à temperatura de 60 °C e, tomando-se essa condição de funcionamento como ideal, observa-se, na Figura 8, que o sistema disponibilizou ar com esse potencial e até superior, quando em regime permanente. As temperaturas menores que 60 °C situaram-se em intervalos referentes ao momento de partida e após o instante indicativo da necessidade de reabastecimento. As temperaturas nos pontos do sistema, durante a operação de gaseificação com combustão dos gases, situaram-se dentro dos intervalos usuais para gaseificadores contracorrentes.

A mudança de uma situação de teste para outra não ocasionou grandes variações de temperatura nesses pontos. No Quadro 2, podem-se observar as temperaturas médias nos vários pontos do tema, referentes ao 8° teste (recarga do 2° teste com abertura de 0,12 m<sup>2</sup>).

**Figura 8.** Temperatura do ar de secagem e ambiente durante o 8° teste.**Quadro 2.** Temperaturas do ar em diferentes pontos do sistema

Localização	Temperatura média-°C
1- zona de oxidação	922
2- provável zona de redução	667
3- zona de secagem	332
4- saída do casulo 1	73
5- combustor	705
6- combustor	454
7- trocador de calor	35
8- saída do casulo 2	48
9- ar de secagem	63
10- ar ambiente	23

A temperatura no ponto 4, por se tratar de uma região do sistema que foi construída com o objetivo de aproveitar o calor dissipado pela câmara de gaseificação e evitar acidentes por queimaduras, funcionou de forma esperada. Este ar foi direcionado para a câmara de combustão dos gases, mas poderia ser utilizado na desidratação de produtos que requerem aquecimento indireto do ar.

Os dados demonstraram que, no decorrer dos testes, os 0,20±0,02 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> de ar ambiente, com temperatura média de 23 °C, que entram nesta região, saíam dela com aumento de temperatura acima da temperatura ambiente.

As regiões dos pontos 7 e 8 possuíam o mesmo objetivo, descrito, anteriormente, em relação ao combustor. Apesar de o aumento da temperatura do ar que atravessava a região não ter sido tão elevado, por causa da grande quantidade de ar ambiente admitida nessa região (0,92±0,07 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), o sistema também funcionou de forma esperada.

As temperaturas dentro do combustor (pontos 5 e 6) situaram-se entre 280 e 770 °C, oferecendo, assim, situações propícias para queima dos gases combustíveis produzidos. Estes valores são compatíveis

com os encontrados por Andrade (1984) e Lima (1974) para ignição de alguns combustíveis. Deve-se ressaltar que esses pontos não estavam localizados na região de atividade máxima da chama. Em testes preliminares, as temperaturas verificadas na região de atividade máxima da chama foram superiores a 700 °C.

No Quadro 3, é apresentado um resumo dos indicadores de custos, obtidos com a implantação e operação do reator de gaseificação-combustão no aquecimento de ar, levando-se em conta uma safra com duração de 120 dias. Observa-se um alto custo variável total, que refere-se a mão de obra, combustível (lenha) e eletricidade, custo este semelhante em outros sistemas de aquecimento.

**Quadro 3.** Indicadores de custos do sistema de aquecimento

Parâmetros Econômicos	Unidades	Valor
<b>Custos totais no aquecimento do ar</b>		
Custo fixo total	R\$ ano <sup>-1</sup>	624,00
Custo variável total	R\$ ano <sup>-1</sup>	9932,00
Custo total	R\$ ano <sup>-1</sup>	10556,00
<b>Custo médio</b>		
Custo total médio	R\$ h <sup>-1</sup>	3,67

## CONCLUSÕES

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

- Em regime permanente, a gaseificação de biomassa processou-se de forma contínua e regular, com temperaturas ideais nas zonas de oxidação, redução, pirólise e secagem;
- A produção contínua e regular de gás na câmara de gaseificação permitiu manter estável a queima do gás na câmara de combustão, bem como a temperatura do ar aquecido para secagem;
- Há necessidade de se colocarem obstáculos no interior da câmara de combustão dos gases, para aumentar o tempo de residência do gás, permitindo, assim, sua queima completa;
- A construção e a operação do sistema estudado são simples, não requerendo mão de obra especializada durante o processo, fator que pode elevar o custo do aquecimento;
- A utilização do sistema com os casulos de alvenaria atendeu às expectativas para as quais eles foram construídos, isto é, evitar acidentes e permitir o

aproveitamento do calor dissipado nas câmaras de gaseificação e combustão;

- O sistema responde imediatamente ao reabastecimento de combustível, assegurando a estabilidade e continuidade operacional, no caso de secagem contínua ou por longos períodos;
- Há necessidade de se operar o sistema com controles adequados das entradas e velocidades do ar nas câmaras de gaseificação e combustão, para permitir adequado tempo de residência dos gases combustíveis nesta última e sua consequente queima completa, evitando-se o arraste de gases não consumidos no processo de queima;
- O dispositivo atendeu aos propósitos esperados, disponibilizando ar quente limpo, próprio para uso em secagem de produtos agrícolas e com potencial para utilização em outras aplicações, com boa eficiência térmica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E.B., SASSERON, J. L., OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa: CENTREINAR, 1984. 39 p.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W. HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI, 1992. 450 p.
- LIMA, L da R. **Elementos básicos da engenharia química**. São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 412p.
- LOPES, R.P.; **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar**. 2002. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2002.
- MENDES, L.M.; SILVA, J.R. da; TRUGILHO, P.F. **Gaseificação de carvão vegetal ou madeira para geração de energia em pequena escala**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.
- PAYNE, F. A.; CHANDRA, P.K. Mass Balance for biomass gasifier-combustor. **Transaction of the ASAE** 28 (6): 2037-2041, 1985.
- SÁNCHEZ, C.G. **Tecnologia da gaseificação (Capítulo I)**. Disponível em: <ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/IM338/Gaseif-Cap1.pdf> . Acesso em: 20/09/2004a.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 185p.