

Avaliação de um gerador de calor de fluxo descendente, acoplado a um secador tipo camada fixa

Carlos Augusto da Silva Braga*, Cláudio Alves Moreira e José Valdemar Gonzalez Maziero

Centro de Mecanização e Automação Agrícola, Instituto Agronômico de Campinas, C.P. 26, 13201-970, Jundiaí, São Paulo, Brasil. *Author for correspondence. e-mail: braga@dea.iac.br

RESUMO. Um sistema destinado à secagem de produtos agrícolas, do tipo camada fixa, foi construído e o seu desempenho testado. O sistema é composto de um depósito formado por painéis modulados, cujo número pode variar em função da capacidade necessária, dois ventiladores axiais para movimentação do ar e dois geradores de calor, a lenha. Os geradores são de fluxo descendente, com ar primário para combustão sob baixa pressão, impulsionado por pequeno ventilador. Os testes realizados com amendoim (*Leguminosae-Faboideae*), levaram a resultados que comprovam a praticidade do sistema proposto, e que pode ser construído e operado nos próprios locais de produção.

Palavras-chave: energia, gerador de calor, secador, secagem, amendoim.

ABSTRACT. Evaluation of a down-draft, heat generator associated with batch dryer. A batch dryer for agricultural products was built and tested. The set comprises a tank to accommodate the appliance, with an adequate size for the required volume, two fans and two firewood heated generators. Primary air for combustion was supplied by a small fan. Tests were performed with peanuts (*Leguminosae-Faboideae*). Suggested system is a simple, low-cost appliance that may be built by the farmers.

Key words: energy; heat generator; dryer; drying; peanuts.

Nas instalações para secagem de produtos agrícolas, que têm como fonte de calor a combustão de lenha, o aquecimento do ar utilizado no processo se faz de maneira indireta e direta.

No primeiro caso, cuja eficiência energética é menor, empregam-se trocadores de calor, que evitam o contato do produto com os gases dela resultantes.

No segundo caso, a eficiência é maior, mas existe o risco de contaminação por particulados e hidrocarbonetos liberados, tendo, como consequência, possível prejuízo à qualidade do produto.

Projetos de geradores de calor para secagem de produtos agrícolas têm sido abundantemente descritos na literatura técnica. Payne *et al.* (1981) desenvolveram um modelo de fluxo ascendente, com câmara de combustão próximo à de gaseificação e que, sob condições de operação controladas, libera gases praticamente livres de particulados e de hidrocarbonetos. Nesse projeto, apenas um ventilador promove a movimentação do ar primário (no gaseificador) e do secundário (no combustor). Porém, devido à pequena depressão

através do primeiro, a utilização de combustível sólido em pedaços relativamente grandes tornou-se problemática. No caso de lenha com 1,22 m de comprimento e 27,0%, 29,6% e 34,4% de umidade, notou-se uma diminuição da eficiência energética, decorrente da diminuição da temperatura na câmara de combustão aquém de 1000°C com o aumento do diâmetro da lenha, respectivamente 8, 15 e 23 cm. A utilização de lenha com 15 cm de diâmetro, propiciou dissipação de até 1,0 g/h de calor, com eficiência entre 70% e 80%, ao passo que a de 23 cm indicou a necessidade de fechar a válvula do ar secundário, levando o gerador a funcionar como se fosse de simples estágio (fornalha), isto é, com todo o ar da combustão fluindo através da grelha. Os teores de CO₂ acima e abaixo de 15% estiveram associados a maiores ou a menores percentagens de fuligem, avaliadas pelos índices Bacharach, de fumaça. O gaseificador, com volume aproximado de 2,43 m³ (0,80 m x 1,27 m x 2,40 m), pode acomodar até 900 kg de lenha, ocorrendo o recarregamento com 600 kg do combustível a cada 4-8 h.

Srivastava e Posselius (1981) informam que, nos geradores de fluxo descendente, as moléculas de grande massa, dos produtos voláteis da combustão podem ser “quebradas”, ao passar pela zona de reação (combustão) onde as temperaturas são mais altas. A queima torna-se mais fácil, e os gases resultantes, praticamente livres de alcatrão, são adequados à secagem de produtos agrícolas e à movimentação de motores de combustão interna.

Warren e Hemadri (1981) avaliaram projetos de geradores de calor de um estágio (fornalha) e dois estágios (gaseificador/combustor), nos quais utilizaram resíduos agrícolas, tais como o sabugo de milho e o capim em fardos, como alternativas ao uso do gás propano.

Richey *et al.* (1981) informam ser possível obter gases praticamente livres de particulados e de alcatrão a partir de cavacos de madeira nos combustores de fluxo descendente, ao passo que nos de fluxo transversal é necessário o emprego de carvão vegetal para se alcançar o mesmo efeito. Os autores concluíram que, no caso do fluxo descendente, a combustão ocorre em temperaturas mais altas, em torno de 1350°C, porém, no caso de ela ocorrer com reduzido volume de ar (gasogênios), a sua distribuição na câmara de gaseificação pode não ser uniforme, levando a um aumento na formação de CO₂ e uma diminuição na de CO, ao contrário do desejado. A vazão do ar de combustão (primário e secundário), de 0,129 m³.s⁻¹ é provida por um ventilador centrífugo de alta pressão, necessária para vencer a perda de carga através dos orifícios dos tubos de alimentação localizados na parte inferior do gaseificador, cujo volume é de 1,160 m³ com leito de 0,59 m² e altura de 1,96 m. A carga máxima de 256 kg de sabugos de milho deve ser reabastecida após o seu nível baixar em 1 m, o que corresponde a 132 kg do combustível. Os valores relatados para o poder calorífico inferior e para a potência dissipada são de 14.390 kJ.kg⁻¹ e 1.151 MJ.h⁻¹, respectivamente.

Silva *et al.* (1991) construíram e avaliaram fornalha uma de fluxo descendente, com aquecimento direto, cuja eficiência energética variou de 44,4% a 83%, em função direta das percentagens de excesso de ar. Segundo os autores, estes altos níveis de eficiência são possíveis devido ao aproveitamento ótimo da energia liberada, eliminando-se perdas através de trocadores de calor e chaminés, como no caso dos sistemas de aquecimento indireto. Para esta fornalha, a diminuição do excesso de ar implica em uma economia de combustível (kg.h⁻¹), embora acarrete a sub-utilização do mesmo em termos energéticos. O

maior rendimento correspondeu a um excesso de ar da ordem de 362% e, mesmo no caso em que este valor foi apenas de 130%, a concentração de CO nos gases de combustão foi praticamente nula. Isto evidencia a ocorrência de uma combustão eficiente, cujos gases podem ser utilizados diretamente na secagem de produtos agrícolas diversos.

O trabalho proposto tem por objetivo avaliar o desempenho energético de um gerador de calor, operando como fonte de aquecimento do ar em um secador tipo camada fixa.

Material e métodos

Descrição do sistema

O equipamento desenvolvido para este trabalho é composto de um secador propriamente dito, com uma câmara “plenum”, separada da câmara de secagem por um estrado de madeira sobre o qual é depositado o produto a ser secado, dois ventiladores para movimentação do ar de secagem e dois geradores de calor de fluxo descendente. Os geradores são alimentados com ar primário sob pressão, fornecido por um pequeno ventilador colocado na parte superior do mesmo.

A opção por este sistema em questão foi devida:

- à facilidade de construção e de operação;
- à hermeticidade da câmara de gaseificação, que não é crítica;
- ao tamanho dos pedaços de madeira que é menos crítico em relação à eficiência na combustão, devido ao suprimento controlado do ar primário, possibilitando, assim, a utilização de lenha com comprimentos usuais (0,80-1,00 m);
- à possibilidade de controle mais efetivo da intensidade da combustão pela dosagem do ar primário;
- à facilidade de se obter gases mais “limpos”.

Secador

O secador ao qual vão acoplados dois ventiladores axiais, com diâmetro de 0,80 m, é uma ampliação de modelo descrito por Moreira *et al.* (1987).

O tamanho adotado, por sugestão de vários produtores de amendoim, é de 14,00 m de comprimento, 3,50 m de largura e 1,20 m de altura na câmara de secagem.

A construção modulada facilita o manuseio, em termos de montagem e desmontagem, o transporte para locais de trabalho e a sua adequação às necessidades de cada usuário (Figura 1).

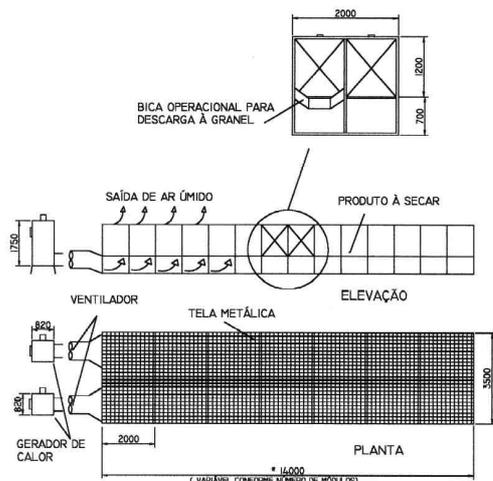


Figura 1. Vistas em planta em elevação do secador e detalhe do painel modulado

Gerador de calor

Consiste de uma caixa metálica dividida em duas partes, revestidas internamente com tijolos refratários, e tem dimensões externas de 0,82 m x 0,82 m x 1,75 m (Figura 2).

As dimensões internas da câmara de gaseificação na parte superior são 0,6 m x 0,6 m x 0,9 m ou 0,32 m³, e as da câmara de combustão, cinzeiro e maçarico na parte inferior, 0,6 m x 0,6 m x 0,5 m ou 0,15 m³. A grelha com 0,36 m² apresenta uma área vazada de 0,18 m².

A reduzida seção transversal interna no gaseificador contribui para que o carvão formado pela combustão da lenha na parte mais próxima à grelha tenha uma tendência a se distribuir uniformemente sobre ela, diminuindo a formação de canais preferenciais para escoamento dos gases. Com isto, a passagem forçada dos mesmos pela zona mais quente, devido à pressão interna, contribui para “quebrar” as moléculas mais pesadas, eventualmente presentes, as quais têm chance de reagir na parte inferior do gerador, completando a combustão.

A entrada do ar primário pela parte superior realiza o arrefecimento da fornalha, contribuindo para reduzir as perdas por irradiação, melhorando a eficiência energética.

A grelha de tijolos refratários, apoiada em arcos construídos com o mesmo material, tem resistência mecânica necessária para absorver os impactos das achas de lenha atiradas dentro da câmara de gaseificação por ocasião do abastecimento.

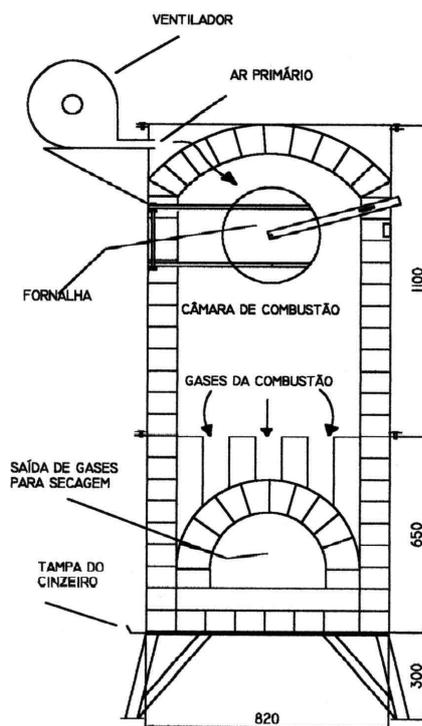


Figura 2. Vista em corte transversal de um gerador de calor

Cálculo do sistema

O tamanho do gerador foi calculado a partir da quantidade de calor necessária para o aquecimento do ar. Foi considerada uma vazão de 12 m³.min⁻¹ por metro quadrado de área da frente de secagem e um aumento de 35°C na temperatura, englobando uma perda de 5°C entre o ponto de entrada na câmara plenum e o extremo oposto do depósito, ou seja, uma distância de 14 m.

Considerando o modelo para o cálculo da potência liberada em (kJ.h⁻¹),

$$Q = V \rho C_p \Delta T: \text{ em que} \quad (1)$$

Q é potência liberada (kJ.h⁻¹);

V é a vazão de ar de secagem (m³.h⁻¹);

ρ é a densidade do ar (kg.m⁻³);

C_p é o calor específico do ar à pressão constante (kJ.kg⁻¹.°C⁻¹) e

ΔT é o acréscimo da temperatura do ar de secagem (°C).

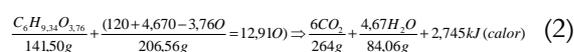
Sendo a massa de ar destinada à combustão muito menor do que a necessária à secagem, a contribuição da primeira pode ser desconsiderada, mesmo no caso do sistema operar com excesso do

comburente, daí que se adote a segunda como básica. Assim, tem-se que:

$$Q = 12 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min}) \times 49,0 \text{ m}^2 \times 1,14 \text{ kgm}^{-3} \times 60 \text{ min} \cdot \text{h}^{-1} \times 1,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \times 35 \text{ °C} = 1.407.672 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Considerando o poder calorífico inferior da lenha como $18.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, são necessários $78,2 \text{ kg}$ de lenha por hora de operação ($1.407.672 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} / 18.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Adotando-se a fórmula ($\text{C}_6\text{H}_{9,34}\text{O}_{3,76}$) sugerida por Payne *et al* (1981) para caracterização química da madeira, em cuja composição mássica entram 50,9% de Carbono, 6,6% de Hidrogênio e 42,5% de Oxigênio, tem-se a seguinte reação de oxidação



Assim, para combustão completa são necessários cerca de $1,46 \text{ kg}$ de oxigênio por quilo de lenha. Isto corresponde a $6,35 \text{ kg}$ de ar por quilo de lenha, uma vez que este contém, em termos de massa, aproximadamente 23% daquele gás.

Os trabalhos foram realizados em propriedades localizadas em: Jaboticabal (local1); Sertãozinho (local 2) e Lucélia (local 3), municípios do Estado de São Paulo, no período de janeiro a março.

O produto utilizado nos testes foi o amendoim em casca, variedade "Tatu" (Leguminosae-Faboideae), com umidade inicial em torno de 20 a 25% (base úmida) e a final, em torno de 10%, valor considerado seguro para armazenamento.

Resultados e discussão

Para os dados obtidos com testes de secagem de amendoim (Tabela 1), realizados em três locais e em três ocasiões diferentes, foram utilizados dois geradores iguais, acoplados ao secador, conforme esquema da Figura 1.

Tabela 1. Médias dos valores de desempenho

| Item | Local 1 | Local 2 | Local 3 |
|--|---------|---------|-----------|
| Consumo de lenha ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 47 | 49 | 60 |
| Vazão mássica de ar ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$) | 551,8 | 551,8 | 551,8 |
| Vazão mássica de ar primário ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 91 | 91 | 91 |
| Acréscimo médio temp. ($^{\circ}\text{C}$) | 20 | 22 | 27 |
| Potência liberada ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$) | 846.000 | 882.000 | 1.080.000 |
| Potência necessária ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$) | 662.112 | 728.376 | 893.916 |
| Taxa de combustão ($\text{km}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) | 65,3 | 68 | 83,3 |
| Potência específica ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$) | 326 | 340 | 417 |
| Volume da câmara (m^3) | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| Área da grelha (m^2) | 0,72 | 0,72 | 0,72 |

Levando-se em conta a vazão mássica e o acréscimo de temperatura observado, por exemplo, no ensaio n° 2, seriam necessários $728.376 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ para o aquecimento do ar. Porém, considerando-se o

consumo de lenha observado e o seu poder calorífico inferior adotado ($18.000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), chega-se a uma liberação de $882.000 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$, com um aproveitamento, portanto, de 82,6%.

O consumo de 49 kg de lenha/h e a razão de $1,85 \text{ kg}$ de oxigênio por 1 kg de lenha ($91/49$), apresentados na Tabela 1, indicam que os geradores operaram como gasogênio abaixo da sua capacidade máxima, uma vez que os valores obtidos para aqueles parâmetros, através das equações (1) e (2), são $78,2 \text{ kg}$ lenha/h e $6,35 \text{ kg}$ ar/kg de lenha, respectivamente.

Na Tabela 2, são mostrados alguns dados comparativos de desempenho do gerador descrito no presente trabalho (local 2), (a) e dos obtidos por Silva *et al.* (1991), (b) e por Payne *et al.* (1981), (c).

Tabela 2. Valores de desempenho de 3 geradores de calor

| Item | (a) | (b) | (c) |
|--|--------|--------|--------|
| Consumo de lenha ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) | 49 | 16,3 | 175 |
| Volume câmara (m^3) | 0,64 | 0,38 | 2,43 |
| Área da grelha (m^2) | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| Potência específica ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$) | 340 | 175 | 114 |
| Taxa combustão ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) | 68 | 83 | 147 |
| Poder calor. inferior.- lenha ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | 18.000 | 20.000 | 20.000 |

Em relação à taxa de gaseificação, nota-se que os valores obtidos no presente trabalho se situaram abaixo dos relatados por Silva *et al.* (1991) em um gerador de fluxo descendente, com ar primário sob pressão atmosférica, e por Payne *et al.* (1981), em um de fluxo ascendente.

A potência específica foi maior do que a encontrada por Silva *et al.* (1991) e por Payne *et al.* (1981), conforme esperado, o que pode ser explicado pela maior produção de calor em função da alimentação forçada do ar primário.

Durante os testes, verificou-se que ocorre sucção de fagulhas e cinza por ocasião da introdução da lenha, devida ao fluxo descendente e à inexistência do separador ciclônico a ser desenvolvido, o que, entretanto, não chegou a comprometer a execução do trabalho.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

1. O equipamento apresentou desempenho considerado satisfatório, com eficiência energética semelhante à obtida com outros similares;
2. A potência específica situou-se em níveis acima dos obtidos em geradores semelhantes, devido, possivelmente, ao fornecimento controlado do ar primário sob pressão;
3. A construção e utilização são facilitadas pela simplicidade do projeto e pelo custo relativamente baixo do equipamento.

Referências

- MOREIRA, C.A. *et al.* Observações sobre secagem de amendoim em sacas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16, 1987, Jundiaí. *Anais...* Jundiaí: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1.987. p. 490-494.
- PAYNE, F.A. *et al.* *Cordwood gasification and gas combustion system*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981.
- RICHEY, C.B. *et al.* *Biomass downdraft-channel gasifier-furnace for drying corn*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981.
- SILVA, J.S. *et al.* Estudo de uma fornalha para secagem de grãos de aquecimento direto. *Revista Engenharia na Agricultura*, Série Armazenamento, v. 1, n. 2, p. 19, 1991.
- SRIVASTAVA, A.K.; POSSELIUS, J.H. *Dimensional analysis and similitude modeling of the gasification process*. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981.
- WARREN, T.J.; HEMADRI, K. *Feasibility of small-scale biomass combustion systems for on-farm grain drying*. Illinois: Institute of Natural Resources, 1981.

Received on June 05, 2001.

Accepted on September 12, 2001.