

1. INTRODUÇÃO

A busca por qualidade é hoje uma das maiores preocupações nos diversos segmentos produtivos. O café é um dos poucos produtos cujo valor cresce muito com a melhoria da qualidade. Um produto de qualidade inferior pode sofrer redução significativa no seu valor de comercialização. Os processos de preparo, secagem e armazenagem apresentam contribuições expressivas sobre a qualidade final do produto, sendo, portanto, muito importantes na escolha correta da infra-estrutura para atender à fase final da produção do café. A qualidade final do produto, bem como a viabilidade econômica da cafeicultura, estão fortemente relacionadas com técnicas corretas e manejo racional do sistema de processamento.



Devido a tal importância, o Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café, CBP&D-Café, vem trabalhando na busca de alternativas tecnológicas, viáveis em diversas escalas de produção, que contribuam para o incremento qualitativo do café brasileiro.

2. OBJETIVO

No mercado extremamente competitivo do café, a viabilidade econômica da cafeicultura está diretamente relacionada com técnicas cada vez mais eficientes e econômicas de beneficiamento do produto.

Com esta visão atual de que é necessário a utilização racional dos recursos, para que se possa tornar o processo de secagem do café mais eficiente e econômico para o pequeno e médio produtor, o presente trabalho objetiva o aumento da eficiência térmica e conseqüentemente a redução do consumo de lenha nos processos de troca de calor, envolvidos num processo conhecido como secagem de queima indireta. Utilizando para tanto, uma técnica que requer pequeno investimento inicial e pode proporcionar grandes resultados; a combustão pulsante.

3. PROCESSO DE SECAGEM DO CAFÉ

A secagem do café é comparativamente mais difícil de ser executada do que a de outros produtos, em virtude de o teor de umidade inicial ser bastante elevado, geralmente ao redor de 60%. Com isso, a velocidade de deterioração em sua primeira fase de secagem é maior, causando redução na qualidade do produto. Deve-se, portanto, promover a sua secagem imediata logo após a colheita e promover o armazenamento em condições que permita manter a qualidade do produto após a secagem. Independentemente do método de secagem utilizado, devem ser ressaltados os seguintes aspectos para se obter êxito no processo pós-colheita do café: evitar fermentação indesejável durante o processo e temperaturas excessivamente elevadas (o café tolera a temperatura do ar de secagem próximo a 40 °C por um ou dois dias, 50 °C por poucas horas e 60 °C por menos de uma hora sem se danificar); secar os grãos no menor tempo possível até 18% b.u. de umidade e procurar obter um produto que apresente uniformidade em coloração, tamanho e densidade.

No Brasil, conforme os aspectos tecnológicos envolvidos, utilizam-se basicamente dois métodos para secagem de café: secagem natural em terreiro ou secagem artificial utilizando secadores mecânicos.

Na secagem em terreiros, esparrama-se o produto em pisos, que podem ser de cimento, tijolo, chão batido ou asfalto. Esse método é o mais utilizado pelos produtores em pelo menos uma fase do processo de secagem. Entretanto, a baixa taxa de secagem e a exposição do produto a agentes biológicos, juntamente com a possibilidade de ocorrência de condições climáticas desfavoráveis, como acontece no sul da Bahia e norte do Espírito Santo e parte da Zona da Mata mineira, por ocasião da colheita, ocasiona perda de qualidade do café.



Figura 3.01 – Secagem natural em terreiro

A outra alternativa para a secagem de café é a secagem artificial utilizando secadores mecânicos, que consiste basicamente na secagem dos grãos de café com ar aquecido até um limite seguro de temperatura e umidade.



Figura 3.02 – Secagem artificial através de secadores mecânicos

3.1. IMPORTÂNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DO CAFÉ

A secagem é um fator crítico do processo, pois influi diretamente no aspecto e no resultado da torração do café. Uma seca perfeita, que deve ser lenta e uniforme para não quebrar a estrutura celular do grão, confere ao café uniformidade de cor e consistência dos grãos, mantendo as características de sabor do produto.

O mau uso de secadores deprecia o aspecto e o tipo do café, acarretando uma redução de aproximadamente 15% do valor do produto. Secador é uma máquina importante, entretanto, deve ser utilizado com cuidado. Os secadores mecânicos devem ter 2 termômetros, um na saída da fornalha e outro no interior da massa do café. Nesse, em qualquer condição a temperatura não pode passar de 45°C.

3.2. COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE SECAGEM DO CAFÉ

A secagem artificial teve maior impulso somente a partir da década de 60, com o aparecimento de secadores de grande porte. Anteriormente, quase todos os produtos agrícolas eram secados no próprio campo ou terreiro onde eram expostos diretamente à radiação solar e revolvidos periodicamente a fim de acelerar o processo.

Entre os combustíveis utilizados na secagem tem-se feito uso da lenha, do GLP (gás liquefeito de petróleo) e resíduos agrícolas. O GLP é um combustível de uso recente na secagem do café. Sua principal vantagem é a praticidade no manuseio e a constância no fornecimento de calor, além de possuir boa eficiência térmica (60%) e um poder calorífico alto (47440 kJ.Kg^{-1}) em relação à lenha. Como desvantagem o GLP possui a instabilidade do seu preço por estar vinculado ao preço do petróleo.

4. SECADORES EXISTENTES NO MERCADO

Existem, basicamente, três tipos de secadores com sistemas distintos de operação, com os quais se obtêm produtos finais com qualidades semelhantes. São eles:

- Secadores horizontais rotativos intermitentes;
- Secadores do tipo barcaça ou de leito fixo;
- Secadores verticais com câmara de repouso.

4.1. SECADORES HORIZONTAIS ROTATIVOS INTERMITENTES



Figura 4.01 – secador horizontal rotativo da marca Pinhalense

Os secadores horizontais rotativos intermitentes, também conhecidos como pré-secadores, podem receber café com qualquer grau de umidade, mas nunca, trabalhar totalmente cheios. Deve-se sempre deixar um vão livre de 20 a

30 cm para que o produto se movimente. Algumas observações devem ser consideradas:

- Caso o café venha direto da lavoura ou do lavador para o secador, deve-se carregá-lo e colocá-lo em movimento por cerca de duas horas antes de acender a fornalha;
- A temperatura do termômetro de ar quente não deverá ultrapassar 60°C até a condição de meia seca, ou seja, a massa de café com aproximadamente 30% de umidade e o café não colando na mão quando apertado;
- Após atingir a meia seca, o café pode ser passado para secadores verticais ou continuar secando no secador horizontal. Neste caso, deve-se elevar a temperatura, do ar para 90°C ou controlar a da massa em 45°C, temperatura que não deve ser ultrapassada;
- Quando a massa do café estiver com 17% de umidade (os grãos começam a chocalhar dentro de casa), deve-se baixar a temperatura do ar para 60°C e prosseguir assim até o final da seca;
- Se o café sofre a meia seca no terreiro, carregar o secador e proceder como se o produto já tivesse sido pré-secado no secador .

4.2. SECADORES DO TIPO BARCAÇA OU DE LEITO FIXO

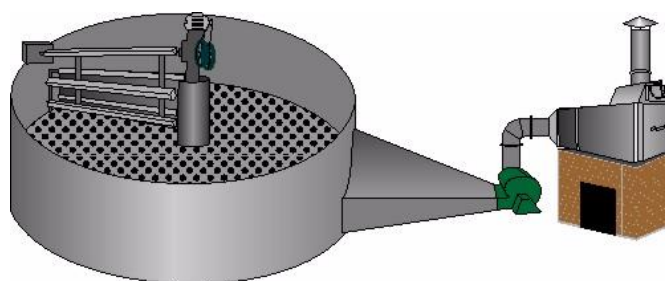


Figura 4.02 – secador tipo barcaça ou de leito fixo

Os secadores tipo barcaça ou de leito fixo podem receber café com qualquer grau de umidade. As observações relativas a este tipo de secador são:

- A camada de café não deverá ter uma altura superior 50 cm;
- Após carregar a barcaça, colocar fogo na fornalha, não deixando a temperatura do ar ultrapassar os 50°C;
- Revolver a massa de café no máximo a cada duas horas. Este intervalo deve ser tanto menor quanto maior for a umidade dos frutos.

4.3. SECADORES VERTICAIS COM CÂMARA DE REPOUSO



Figura 4.03 – secador vertical com câmara de repouso ou tipo baú

Os secadores verticais com câmara de repouso ou tipo baú exigem que o café receba uma pré-secagem, seja ele em terreiro, em secadores horizontais ou em barcaça. Para a utilização destes secadores, algumas considerações devem ser observadas:

- Fazer primeiramente a pré-secagem ou meia-secagem, que ocorre quando o café perde a umidade externa e já não cola mais se apertado com a mão, o que corresponde a uma umidade de aproximadamente 30%;
- Carregar o secador ao máximo, para que não haja perda de calor, aumentando o tempo de secagem ou prejuízos, tais como maior consumo de energia e mão-de-obra;
- Acender a fornalha e trabalhar as primeiras cinco horas com a temperatura do ar máxima a 60°;
- Passar a seguir a temperatura do ar para 70 °C;
- Baixar a temperatura para 50°C e prosseguir assim até o final da seca, quando a massa de café atingir cerca de 17% de umidade.

5. PROBLEMAS EXISTENTES COM O SECADOR UTILIZADO

Dentre os tipos de secadores citados anteriormente, o secador horizontal rotativo será o de maior importância para o presente trabalho. Este tipo de secador é utilizado na secagem de cafés nobres destinados à exportação, num processo conhecido como secagem de queima indireta.

No processo de secagem de queima indireta, o ar é aquecido em uma fornalha em que o ar de secagem não entra em contato com os produtos da combustão, desta forma o ar de secagem fica livre de resíduos que possam contaminar o café.

Para atender essa exigência, os trocadores de calor utilizados para esse fim utilizam o ar como veículo de transmissão do calor gerado por meio da queima da lenha ou outra matéria orgânica. O ar é captado do ambiente, sendo em

seguida aquecido em tubulações e soprado sobre o café em seu processo de secagem.



Figura 5.01 – Fornalha utilizada para secagem de queima indireta



Figura 5.02 – Interior da fornalha

Pela concepção do projeto destes trocadores de calor, envolvidos no processo de secagem de queima indireta, pode se notar que a eficiência térmica é muito baixa, pois o coeficiente de transmissibilidade térmica por convecção (h_{ar})

do ar é muito baixo, apresentando desta forma o problema de um elevado consumo de lenha que também gera despesas de manutenção de um estoque considerável de matéria orgânica para posterior queima.

Um outro problema também apresentado por este tipo de trocador de calor, utilizado no processo de queima indireta, é a corrosão que pode chegar ao ponto de perfurar os tubos, permitindo a mistura do ar de secagem com os produtos da combustão. O café, desta forma, será contaminando e terá a sua qualidade final comprometida.



Figura 5.03 – Tubos do trocador de calor perfurados pela corrosão

6. ALTERNATIVAS PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DO CAFÉ

6.1. SECAGEM DE CAFÉ POR AR QUENTE UTILIZANDO ÁGUA QUENTE COMO FONTE DE CALOR

O uso do vapor para aquecer o ar na secagem do café já é uma prática largamente utilizada por diversos cafeicultores a partir do trabalho de pesquisa realizado. O sistema foi bem aceito, principalmente por aqueles que possuem bateria de secadores, normalmente acima de cinco unidades.

As vantagens observadas no sistema são: a melhoria da qualidade do café, a economia de mão-de-obra, de energia e combustível (lenha), ocasionando, no final da seca, maiores ganhos para o cafeicultor.

Mas, o processo só é viável economicamente quando se tem várias unidades secadoras. Para o caso de instalações menores, onde se enquadra a maioria dos produtores, uma alternativa viável é a utilização de água quente no lugar do vapor.

Em trabalhos realizados na Fazenda Experimental de Varginha (MAARA) foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Uma caldeira como fonte geradora de calor com capacidade de 350 L d'água;
- Um trocador de calor com 1,010 m² de área de face; tubos aletados ¾" (74 tubos dispostos em 3 fileiras);
- Um secador vertical com capacidade de 12 m³; vazão de ar no ventilador = 240 m³ / minuto;
- Uma bomba centrífuga; 1 estágio, 2 cv , monofásica.

Praticamente não houve consumo de água, uma vez que o sistema opera em circuito fechado. Na caldeira, a água é aquecida e em seguida é encaminhada para o trocador de calor, onde libera calor para o ar de secagem e posteriormente é succionada pela bomba, que fecha o circuito retornando-a para a caldeira novamente.

Foram observadas as seguintes vantagens em relação à secagem com vapor:

- a) menor custo de instalação, devido aos equipamentos trabalharem com temperaturas e pressões menores;
- b) dispensa a instalação de purgadores, filtros e válvulas;
- c) baixo consumo de água;
- d) é viável para instalações pequenas.

A secagem utilizando água quente ainda apresenta se comparada com a secagem de queima indireta, citada anteriormente, onde os produtos da combustão são utilizados para aquecer o ar de secagem, um consumo de combustível (lenha) muito inferior.

A economia de combustível, proporcionada pelo uso da água quente para aquecer o ar de secagem, em relação à secagem de queima indireta, se deve ao fato do coeficiente de transmissibilidade térmica por convecção da água ($h_{\text{água}}$) ser bastante superior ao coeficiente de transmissibilidade térmica do ar (h_{ar}), aumentando, desta forma, a eficiência da transferência de calor no processo de secagem do café.

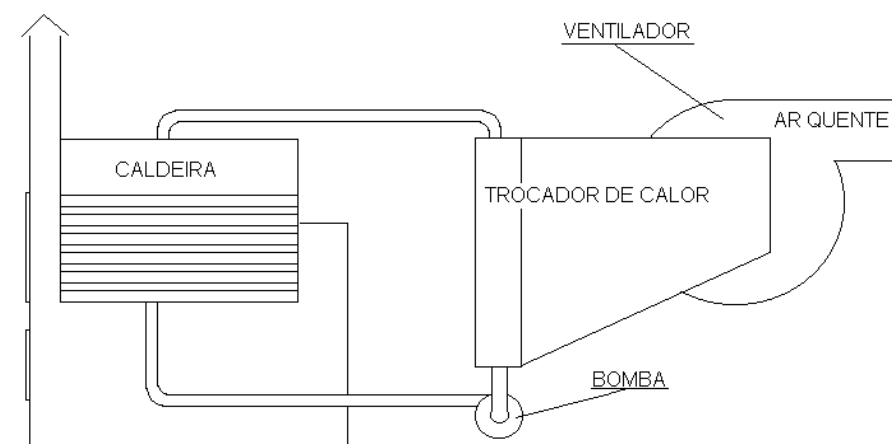


Figura 6.01 – Secador de café utilizando água quente como fonte de calor



Figura 6.02 – Trocador de calor utilizando água quente

6.2. SECAGEM DE CAFÉ POR AR QUENTE ASSISTIDO A MICROONDAS

Uma tecnologia não-convencional que começa modernamente a tomar corpo nas indústrias de processamento, particularmente naquelas que lidam com alimentos termo-sensíveis é a da aplicação de microondas às etapas de aquecimento dos processos industriais, entre eles, a secagem, visando uma eficiência de tratamento ampliada e uma qualidade de produto melhorada de modo significativo.

Um sistema inovador, que utiliza um aplicador cilíndrico-rotativo de eixo inclinado, por dentro do qual escoam o café, de forma contínua e agitada, submetido à ação simultânea da energia de aquecimento das microondas e ao calor convectivo do ar quente, responsável pelo arraste da umidade desprendida do produto, é esquematizado na figura abaixo, encontrando-se disponível no Laboratório de Microondas (LMO), do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA), Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em Campinas, SP. O funcionamento deste sistema foi

recentemente testado com matéria prima proveniente da última safra de café, previamente processada, tendo inicialmente a sua umidade sido reduzida a um nível intermediário pelo método convencional a ar quente.

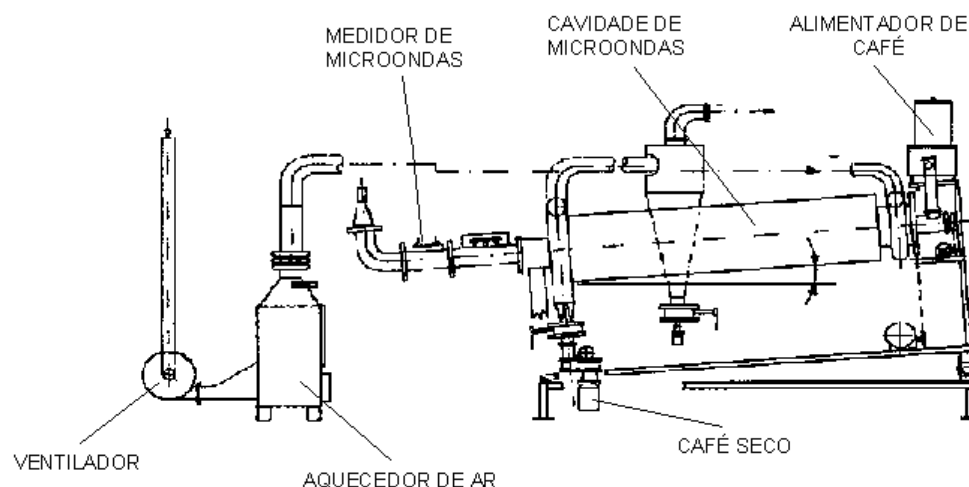


Figura 6.03 – Sistema de secagem assistida à microondas

Foi possível, após um tempo aproximado de 8 a 10 horas de pré-secagem com ar quente a 40° C, terminar a secagem por microondas e ar quente (40°C), desde o nível intermediário (ao redor de 30% b.u.) até o valor final de 11 a 13% b.u., em cerca de pouco mais de uma hora, sem prejuízo da qualidade final do produto e evitando perdas de qualidade que poderiam ocorrer na estocagem prévia à secagem. Estes primeiros resultados positivos puderam ser confirmados, após algumas análises comparativas, mediante a microscopia de varredura dos grãos submetidos aos diversos tratamentos, com e sem microondas, complementada por avaliações de natureza sensorial das bebidas preparadas com as respectivas amostras do café assim tratado.

7. MÉTODO ADOTADO PARA MELHORAR EFICIÊNCIA

Para melhorar a eficiência dos processos de transferência de calor envolvidos na secagem do café, a utilização da combustão pulsante mostra-se uma alternativa bastante viável, por oferecer uma série de vantagens como

economia de combustível, redução da formação de poluentes, aumento da taxa de transferência de calor por convecção além de exigir um investimento reduzido para sua implementação em relação às outras alternativas apresentadas acima.

7.1. COMBUSTÃO PULSANTE

Entende-se por combustão pulsante o processo de queima que apresenta como principal característica o fato das variáveis de estado (pressão, temperatura, etc...), que descrevem as condições na zona de queima, ocorrerem sob condições oscilatórios.

A combustão pulsante pode ocorrer de forma espontânea, ou pode ser forçada, sendo mecanicamente excitada, por exemplo, com o auxílio de um alto falante, válvulas, dentre outras formas. Pretende-se desenvolver estas condições na câmara de combustão visando obter um melhor desempenho na transferência de calor.

7.1.1. HISTÓRICO

Ondas acústicas podem ocorrer nos gases que ocupam o interior de tubos. Quando isto ocorre as extremidades abertas do tubo constituem nodos de pressão acústica e antinodos de deslocamento; as extremidades fechadas têm características opostas.

As frequências de ressonância correspondem à frequência natural do tubo e seus harmônicos. Assim, em tubo aberto, os comprimentos de onda dos modos de oscilação são proporcionais a $2L / n$, onde n é qualquer número inteiro positivo e L é o comprimento do tubo. Neste texto o modo fundamental ou primeiro harmônico é identificado por n igual 1, o segundo modo de oscilação ou segundo harmônico é identificado por n igual a 2 e assim sucessivamente. Aproximando-se um alto-falante da extremidade de um tubo e fazendo-se variar a frequência das

vibrações é possível notar as frequências de ressonância. Não só em tubos, mas em quaisquer volumes é possível observar a ressonância.

As ondas acústicas em tubos podem também ser termicamente excitadas, esse processo é conhecido desde o final de século XVIII quando Higgins descreveu pela primeira vez o fenômeno das chamas sonoras de hidrogênio ocorrentes no interior de um tubo (Tyndall, 1970). Em meados do século passado Rijke provocou oscilações termoacústicas posicionando uma tela metálica aquecida na metade inferior de um tubo aberto mantido na vertical (Rayleigh, 1945). A excitação de ondas acústicas por uma fonte de calor surge devido aos efeitos da expansão térmica localizada.

Segundo Rayleigh (1945) as oscilações termoacústicas surgem devido a perturbações que são amplificadas desde que, na média, o calor seja adicionado em fase com o crescimento de pressão durante um período do ciclo. Esta é a explicação geralmente aceita para os fenômenos termoacústicos e ficou conhecida como critério de Rayleigh.

7.1.2. EFEITO E APLICAÇÕES DA COMBUSTÃO OSCILATÓRIA

As pulsações acústicas associadas aos processos de combustão podem apresentar vantagens tecnológicas, econômicas e ambientais. Por exemplo, na presença destas oscilações as taxas de queima e transferência convectiva de calor são incrementadas, em consequência, os equipamentos podem ser menores. As oscilações ainda podem reduzir a formação de poluentes. Por outro lado, dependendo das aplicações, as oscilações acústicas podem ser desvantajosas, como no caso de instabilidades acústicas em motores foguete as quais precisam ser evitadas.

A queima de partículas individuais de carvão em condições estacionárias de escoamento e em regime pulsado foi objeto de experiências

conduzidas por Sabnis e Lyman (1982), eles concluíram que o tempo de queima é consideravelmente reduzido sob o regime de pulsos, observando uma redução de 50% neste tempo para partículas de 1,3mm na frequência de 54 Hz. Nag e Mukherjee (1983) incomodaram pulsações por meios mecânicos ao escoamento de ar através de um leito fixo de carvão em combustão. Nas suas experiências a frequência variou de 3,83 a 10,71 Hz com amplitudes de 0,3 a 0,8 KPa. Obtiveram acréscimos de 78% na taxa de combustão.

São variadas as aplicações da combustão pulsante, como o bombeamento e o aquecimento de fluidos, a geração de vapor, a gaseificação, etc. Os propulsores das bombas voadoras germânicas do tipo V-1, empregadas na 2ª Guerra Mundial, constituem um exemplo conhecido de aplicação da tecnologia de combustão oscilatória. Tais motores podem ser visualizados como um tubo aberto numa extremidade e fechado na outra que, em termos acústicos, são definidos como tubo de quarto de onda. Durante a operação de combustores deste tipo o tempo de reação da mistura combustível deve ser da ordem da metade do período da oscilação, pois a cada ciclo praticamente toda a massa reacional é expulsa do equipamento (Putnam e Brown, 1974).

7.1.3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A oscilação acústica em um escoamento de gás pode afetar significativamente o processo de transferência de calor. Pesquisas realizadas mostraram que os resultados estão fortemente ligados ao tipo de oscilação acústica, a intensidade da oscilação, e o local em que o fluxo de calor é medido.

O fluxo de calor observado sob oscilações de ressonância, em um escoamento gasoso é apreciavelmente maior que o fluxo de calor observado em um escoamento sem oscilações. Estas oscilações de ressonância são responsáveis por destruir a camada limite térmica do escoamento, possibilitando

um aumento da ordem de cinco a nove vezes o coeficiente de transmissibilidade térmica por convecção (Sérgio Leite).

Uma vez iniciado o processo oscilatório, as próprias pulsações tem o efeito de misturar os reagentes, no caso de combustíveis gasosos, uniformizando a liberação de calor. No caso de combustíveis sólidos, as pulsações agitam o leito combustível conduzindo ao mesmo efeito.

7.2. MONTAGEM

A montagem realizada para a pulsação, da câmara de combustão da fornalha de queima indireta, foi composta dos seguintes equipamentos e materiais:

- Um alto falante;
- Um tubo metálico;
- Um sensor (microfone);
- Um amplificador;
- Circuito eletrônico;
- Osciloscópio.



Figura 7.01 – Tubo metálico com alto – falante



Figura 7.02 – Posicionamento do sensor (microfone)

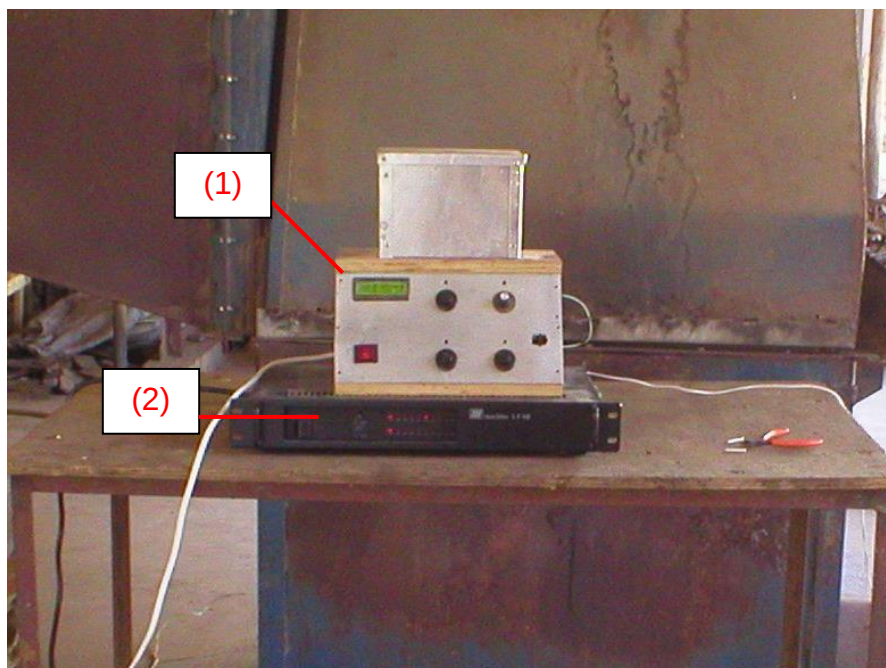


Figura 7.03 – Circuito eletrônico (1) e amplificador (2)

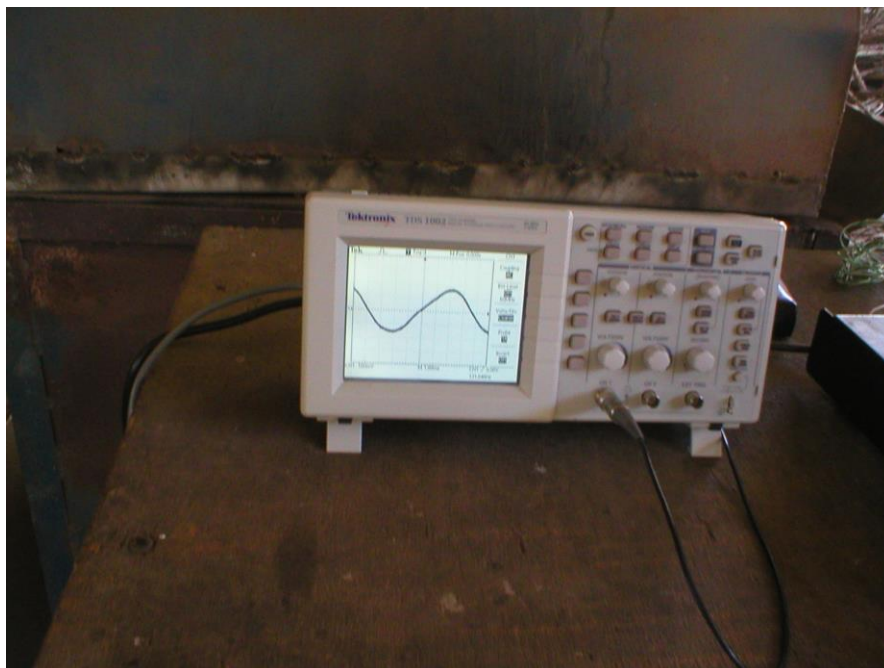


Figura 7.04 – Osciloscópio



Figura 7.05 – Montagem realizada para pulsação

Através do posicionamento correto do microfone, foi possível observar no osciloscópio as amplitudes das oscilações acústicas provocadas pelo alto falante, e assim, ajustar da melhor forma a frequência gerada pelo circuito eletrônico que era auxiliado pelo amplificador.

O ajuste desta frequência foi realizado de forma a possibilitar as maiores amplitudes possíveis das oscilações, se aproximando ao máximo, desta forma, da frequência de ressonância da câmara de combustão.

7.3. CÁLCULOS DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM

Para que pudesse ser verificada a eficiência do processo de secagem, foi primeiramente necessário determinar as vazões do ar de secagem e exaustão, juntamente com as temperaturas do ar de secagem, do ar de exaustão, temperatura da fornalha e temperatura ambiente. Sendo utilizado para tanto, um Tubo de Pitot e um Termopar para determinar as vazões e temperaturas respectivamente.

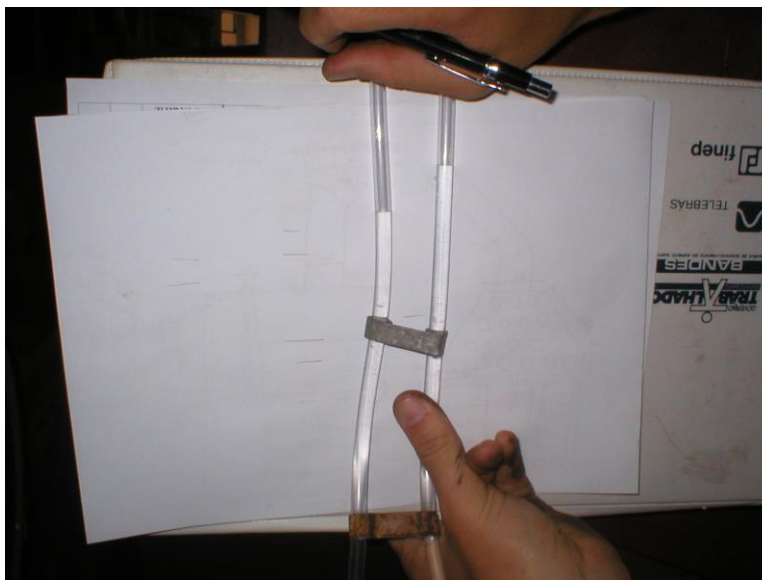


Figura 7.06 – Utilização do Tubo de Pitot para determinar vazão



Figura 7.07 – Utilização do Termopar para determinar temperatura

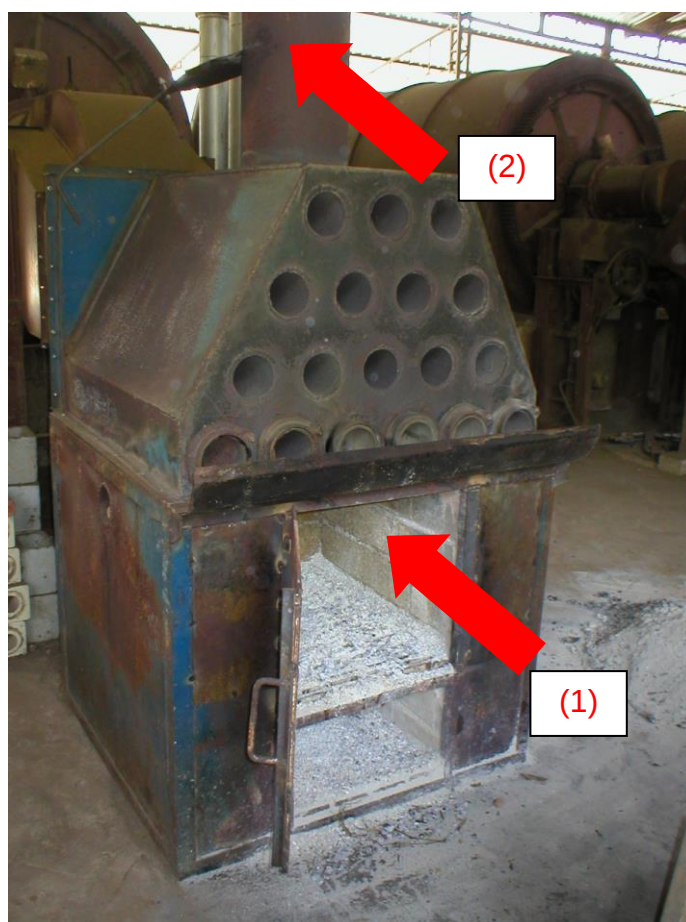


Figura 7.08 – Local de medida da temperatura da fornalha (1), local de medida da vazão e temperatura do ar de exaustão (2)



Figura 7.09 – Local de medida da temperatura e vazão do ar de secagem

7.3.1. CÁLCULO DA VELOCIDADE UTILIZANDO TUBO DE PITOT

O cálculo da velocidade do escoamento de um fluido, utilizando um Tubo de Pitot, é feito através da seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{2.g.h}$$

Onde:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

h = desnível medido da coluna de água x ($\rho_{\text{água}} / \rho_{\text{ar}}$)

$$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ Kg / m}^3$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 20^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,1 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 50^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_{\text{ar}} = 1,0 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 60^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_{\text{ar}} = 0,6 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 350^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_{\text{ar}} = 0,5 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 450^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_{\text{ar}} = 0,4 \text{ Kg / m}^3 \quad (T \sim 550^{\circ}\text{C})$$

7.3.2. CÁLCULO DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM COM SECADOR VAZIO E FUNCIONAMENTO NO MODO NORMAL

Sob as seguintes condições:

- Fornalha acesa (*Temperatura do ar de secagem = 60°C*)
- Secador vazio (*Escoamento sem perda de carga*)
- $\rho_{ar} = 1,0 \text{ Kg / m}^3$ (*T ~ 60°C - Temperatura do ar de secagem*)
- Desnível da coluna de água = 0.024 m

- Velocidade:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

$$V = 78,1 \text{ Km/h}$$

$$V = 21,7 \text{ m/s} \Rightarrow \text{velocidade medida através de um Tubo de Pitot}$$

- Área da seção transversal da tubulação onde foi realizada a tomada de velocidade pelo Tubo de Pitot:

$$\text{Área da seção transversal quadrada } A_q = 0,16 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da seção transversal circular } A_c = 0,13461 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da seção transversal } A = (A_c + A_q) / 2$$

$$A = 0,147305 \text{ m}^2$$

Obs: esta área foi obtida através de uma média entre a área da seção quadrada e seção circular da tubulação na tentativa de encontrar um valor aproximado do valor real.

Daí,

$$U = \rho_{ar} \times V \times A$$

$$U = 1,0 \times 21,7 \times 0,147305$$

$$U = 3,2 \text{ Kg /s}$$

7.3.3. CÁLCULO DA VAZÃO DO AR DE EXAUSTÃO NO MODO NORMAL

Sob as seguintes condições:

- Temperatura do ar de exaustão = 450°C
- $\rho_{ar} = 0,5 \text{ Kg / m}^3$ ($T \sim 450^\circ\text{C}$ - Temperatura do ar de exaustão)
- Desnível da coluna de água = 0.004 m

- Velocidade:

$$V = \sqrt{2.g.h}$$

$$V = 45,1 \text{ Km/h}$$

$$V = 12,5 \text{ m/s} \Rightarrow \text{velocidade medida através de um Tubo de Pitot}$$

- Área da seção transversal da chaminé onde foi realizada a tomada de velocidade pelo Tubo de Pitot:

$$A = 0,071 \text{ m}^2$$

Daí,

$$U = \rho_{ar} \times V \times A$$

$$U = 0,5 \times 12,5 \times 0,071$$

$$U = 0,5 \text{ Kg /s}$$

7.3.4. CÁLCULO DA VAZÃO DO AR DE SECAGEM COM SECADOR VAZIO E FUNCIONAMENTO NO MODO PULSANTE

Sob as seguintes condições:

- Fornalha acesa (*Temperatura do ar de secagem = 52°C*)
- Secador vazio (*Escoamento sem perda de carga*)
- $\rho_{ar} = 1,1 \text{ Kg / m}^3$ (*T ~ 50°C - Temperatura do ar de secagem*)
- Desnível da coluna de água = 0.024 m

- Velocidade:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

$$V = 74,5 \text{ Km/h}$$

$$V = 20,7 \text{ m/s} \Rightarrow \text{velocidade medida através de um Tubo de Pitot}$$

- Área da seção transversal da tubulação onde foi realizada a tomada de velocidade pelo Tubo de Pitot:

$$\text{Área da seção transversal quadrada } A_q = 0,16 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da seção transversal circular } A_c = 0,13461 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da seção transversal } A = (A_c + A_q) / 2$$

$$A = 0,147305 \text{ m}^2$$

Obs: esta área foi obtida através de uma média entre a área da seção quadrada e seção circular da tubulação na tentativa de encontrar um valor aproximado do valor real.

Daí,

$$U = \rho_{ar} \times V \times A$$

$$U = 1,1 \times 20,7 \times 0,147305$$

$$U = 3,3 \text{ Kg /s}$$

7.3.5. CÁLCULO DA VAZÃO DO AR DE EXAUSTÃO NO MODO PULSANTE

Sob as seguintes condições:

- Temperatura do ar de exaustão = 330°C
- $\rho_{ar} = 0,6 \text{ Kg / m}^3$ ($T \sim 350^\circ\text{C}$ - Temperatura do ar de exaustão)
- Desnível da coluna de água = 0.004 m

- Velocidade:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

$$V = 41,2 \text{ Km/h}$$

$$V = 11,4 \text{ m/s} \Rightarrow \text{velocidade medida através de um Tubo de Pitot}$$

- Área da seção transversal da chaminé onde foi realizada a tomada de velocidade pelo Tubo de Pitot:

$$A = 0,071 \text{ m}^2$$

Daí,

$$U = \rho_{ar} \times V \times A$$

$$U = 0,6 \times 11,4 \times 0,071$$

$$U = 0,5 \text{ Kg /s}$$

7.3.6. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR TRANSFERIDO NO PROCESSO DE SECAGEM

Para o cálculo da quantidade de calor transferido no processo de secagem, foi utilizada a seguinte expressão, considerando o ar atmosférico como gás perfeito:

$$Q = \left(\int_{T_e}^{T_s} C_{po} dt \right) \times U$$

onde:

C_{po} = calor específico do ar;

T_e = temperatura de entrada do ar;

T_s = temperatura de saída do ar;

U = fluxo de massa de ar;

Sendo:

$$C_{po} = 38,7344 + 4,0204 \times 10^{-3} \theta^{1,5} - 445,946 \theta^{-1,5} + 905,536 \theta^{-2} - 656,32 \theta^{-3}$$

$$C_{po} = [\text{KJ} / \text{Kmol K}]$$

$$\theta = T [\text{Kelvin}] / 100$$

Após a integração:

$$Q = [38,7344 T + 1,60816 \times 10^{-6} T^{2,5} + 8,91892 \times 10^5 T^{-0,5} - 9,05536 \times 10^6$$

$$T^{-1} + 3,2816 \times 10^8 T^{-2}]_{T_e}^{T_s} \times U$$

7.4. RESULTADOS OBSERVADOS

7.4.1. CALOR TRANSFERIDO NO PROCESSO DE SECAGEM SEM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE

As tabelas a seguir apresentam os resultados, para o processo de secagem sem a utilização da combustão pulsante.

Tabela 7.01 - Calor máximo que pode ser fornecido

Cálculo do Calor Máximo que pode ser Fornecido		
Temperatura de Entrada (765°C)	1038	Kelvin
Temperatura de Saída (24°C ambiente)	297	Kelvin
Variação de Entalpia	799,8	KJ/Kg
Vazão do ar de exaustão	0,9	m³/s
Peso Específico do ar de exaustão (24°C ambiente)	1,2	Kg/m³
Fluxo de Massa	1,1	Kg/s
Quantidade Total de Calor	863,8	KJ/s

Tabela 7.02 - Calor real fornecido

Cálculo do Calor Real Fornecido		
Temperatura de Entrada (765°C)	1038	Kelvin
Temperatura de Saída (450°C)	723	Kelvin
Variação de Entalpia	355,0	KJ/Kg
Vazão do ar de exaustão	0,9	m³/s
Peso Específico do ar de exaustão (450°C)	0,5	Kg/m³
Fluxo de Massa	0,5	Kg/s
Quantidade Total de Calor	159,8	KJ/s

Tabela 7.03 - Calor real transferido para o ar de secagem

Cálculo do Calor Real Transferido para o Ar de Secagem		
Temperatura de Entrada (24°C ambiente)	297	Kelvin
Temperatura de Saída (60°C)	333	Kelvin
Variação de Entalpia	36,6	KJ/Kg
Vazão do ar de Secagem	3,2	m³/s
Peso Específico do ar de secagem (60°C)	1,0	Kg/m³
Fluxo de Massa	3,2	Kg/s
Quantidade Total de Calor	117,4	KJ/s

7.4.2. EFICIÊNCIA OBSERVADA NO PROCESSO DE SECAGEM SEM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE

η = calor real transferido para o ar de secagem / calor máximo que pode ser fornecido

$$\eta = 117,4 / 863,8$$

$$\eta = 13,6 \%$$

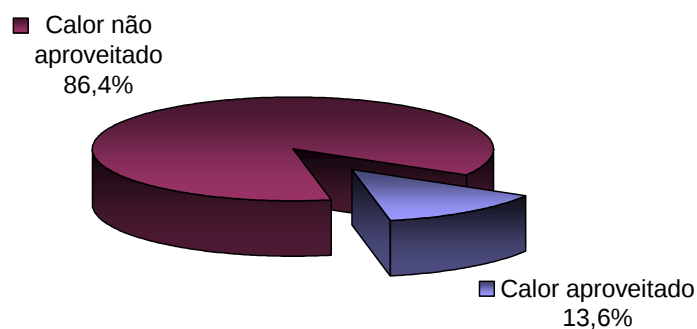


Gráfico 7.01 – Eficiência do processo de secagem sem o uso da combustão pulsante

7.4.3. CALOR TRANSFERIDO NO PROCESSO DE SECAGEM COM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE

As tabelas a seguir apresentam os resultados, para o processo de secagem com a utilização da combustão pulsante.

Tabela 7.04 - Calor máximo que pode ser fornecido no modo pulsante

Cálculo do Calor Máximo que pode ser Fornecido		
Temperatura de Entrada (550°C)	823	Kelvin
Temperatura de Saída (24 °C ambiente)	297	Kelvin
Variação de Entalpia	555,2	KJ/Kg
Vazão do ar de exaustão	0,8	m ³ /s
Peso Específico do ar de exaustão (24°C ambiente)	1,2	Kg/m ³
Fluxo de Massa	1,0	Kg/s
Quantidade Total de Calor	533,0	KJ/s

Tabela 7.05 - Calor real fornecido no modo pulsante

Cálculo do Calor Real Fornecido		
Temperatura de Entrada (550°C)	823	Kelvin
Temperatura de Saída (330°C)	603	Kelvin
Variação de Entalpia	239,7	KJ/Kg
Vazão do ar de exaustão	0,8	m ³ /s
Peso Específico do ar de exaustão (330°C)	0,6	Kg/m ³
Fluxo de Massa	0,5	Kg/s
Quantidade Total de Calor	115,1	KJ/s

Tabela 7.06 - Calor real transferido para o ar de secagem no modo pulsante

Cálculo do Calor Real Transferido para o Ar de Secagem		
Temperatura de Entrada (24°C ambiente)	297	Kelvin
Temperatura de Saída (52°C)	325	Kelvin
Variação de Entalpia	28,4	KJ/Kg
Vazão do ar de Secagem	3,1	m³/s
Peso Específico do ar de secagem (52°C)	1,1	Kg/m³
Fluxo de Massa	3,3	Kg/s
Quantidade Total de Calor	93,2	KJ/s

7.4.4. EFICIÊNCIA OBSERVADA NO PROCESSO DE SECAGEM COM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE

η = calor real transferido para o ar de secagem no modo pulsante / calor máximo que pode ser fornecido no modo pulsante

$$\eta = 93,2 / 533,0$$

$$\eta = 17,5 \%$$

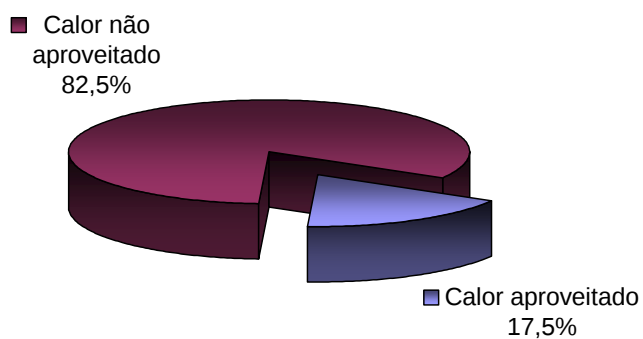


Gráfico 7.02 – Eficiência do processo de secagem com o uso da combustão pulsante

7.4.5. COMPARATIVO ENTRE A EFICIÊNCIA OBSERVADA NO PROCESSO DE SECAGEM SEM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE E COM A UTILIZAÇÃO DA COMBUSTÃO PULSANTE

$$i = (\text{eficiência pulsante} - \text{eficiência normal}) / \text{eficiência normal}$$

$$i = (17,5 - 13,6) / 13,6$$

$$i = 28,7 \%$$

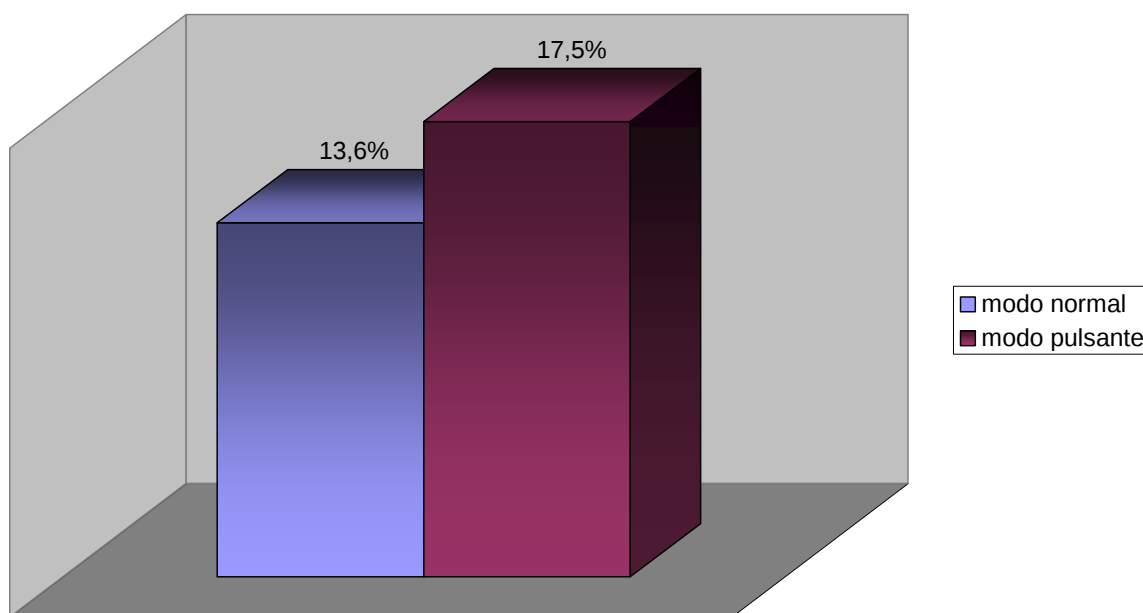


Gráfico 7.03 – Comparativo entre as eficiências do processo de secagem no modo normal e no modo pulsante

A partir dos resultados apresentados pelas tabelas anteriores, foi possível observar a eficiência do processo de secagem para ambos os modos de funcionamento, o modo normal e o modo pulsante, percebendo-se um aumento de 28,7% da eficiência do processo de secagem, para o funcionamento no modo pulsante, representado pelo gráfico acima.

8. CONCLUSÃO

A combustão pulsante mostrou-se realmente uma alternativa viável, melhorando a eficiência dos processos de transferência de calor envolvidos na secagem de café.

Através dos resultados obtidos, e o consumo de lenha medido, foi constatado uma economia significativa no consumo de combustível (lenha) e consequentemente maiores ganhos para o produtor de café.

Na secagem de queima indireta em modo normal, o consumo de lenha era da ordem de 260 Kg / h, com o aumento de 28,7% da eficiência do processo de secagem, após realizada a montagem para a pulsação, o consumo de lenha passou para aproximadamente 190 Kg / h, proporcionando uma economia de 70 Kg / h.

Considerando que o preço da lenha é de R\$ 25,00 / m³ (Bruno Krohling) e o seu peso específico é de aproximadamente 450 Kg / m³ (PRO-TEC), a economia então será de R\$ 3,90 / h; em uma secagem que dura em torno de 24h, esta economia pode chegar a 1680 Kg de lenha, proporcionando, uma economia de R\$ 100,00 para o produtor.

Levando-se em conta o investimento inicial e o consumo de energia elétrica para a utilização da combustão pulsante, esta se torna ainda mais vantajosa em relação às outras alternativas utilizadas até agora para melhorar a eficiência do processo de secagem do café, pois os equipamentos utilizados para a pulsação são relativamente de baixo custo e apresentam um consumo de energia elétrica de apenas 100W (Sérgio Leite).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, 4. ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1995.
- PROVENZA, Francesco. **Projetista de Máquinas**, 5. ed., São Paulo: PROTEC, 1984.
- FERREIRA, Marco Aurélio. **Abordagem Teórica e Experimental de Combustores do Tipo Rijke**. 1997. 227p. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1997.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 21. , 1995, Caxambu, MG. **Trabalhos Apresentados...** Rio de Janeiro: MAARA / PROCAFÉ, 1995.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 25. , 1999, Franca, SP. **Trabalhos Apresentados...** Rio de Janeiro: MAA / PROCAFÉ, 1999.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 28. , 2002, Caxambu, MG. **Trabalhos Apresentados...** Rio de Janeiro: MAPA / PROCAFÉ, 2002.
- CUIDADOS na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **INFORME AGROPECUÁRIO**, Belo Horizonte, ano 14, n. 162, p. 33 - 44, 1989.
- EQUIPAMENTOS para café. Disponível em: <<http://www.pinhalse.com.br/produtos/café/prod-04-port.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2004.
- CAFÉ - Revista Minas Faz Ciência no_ 8 – Fapemig. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens>>. Acesso em: 15 jul. 2004.
- NOVAS TECNOLOGIAS de secagem para café. Disponível em: <<http://www.pos-colheita.com.br/>>. Acesso em: 15 jul. 2004.
- D'ANDREA secadores de café. Disponível em: <<http://www.agrotrends.com.br/portugues/portugues.htm>>. Acesso em: 03 set. 2004.

- MÁQUINAS GRACIANO. Disponível em: <<http://www.mgraciano.com.br/>>. Acesso em: 03 set. 2004.
- SECADOR de leite fixo. Disponível em: <<http://www.polidryer.com.br/Seclf.htm>>. Acesso em: 03 set. 2004.
- IMPORTÂNCIA do secador de café. Disponível em: <<http://www.agridata.mg.gov.br/preparo.htm#item2>>. Acesso em: 03 set. 2004.
- SECAGEM utilizando água quente como fonte de calor. Disponível em: <<http://www.caldeiras.com/agricola.htm#A%20SOLUÇÃO%20DEFINITIVA>>. Acesso em: 03 set. 2004.

ANEXOS

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E ECONOMICA DO GLP E DA LENHA NA SECAGEM DO CAFÉ

Entre os combustíveis utilizados na secagem tem-se feito uso principalmente da lenha, e mais recentemente, do GLP (gás liquefeito de petróleo).

A lenha, combustível á base de celulose e empregada em diversos países, tem como vantagem a possibilidade do emprego de mão-de-obra não qualificada, porém possui baixa eficiência térmica (17%) e baixo poder calorífico ($13.000 \text{ kJ.kg}^{-1}$) quando comparado ao GLP. Além disso, o uso da lenha apresenta sérias limitações no que se refere à questão ambiental. Além de produzir resíduos poluentes provenientes da queima incompleta, diminui a área coberta com vegetação nativa podendo causar sérios impactos na fauna e na estabilização dos mananciais aquáticos.

O GLP é um combustível de uso recente na secagem do café. Sua principal vantagem é a praticidade no manuseio e a constância no fornecimento de calor, além de possuir boa eficiência térmica (60%) e um poder calorífico alto (47440 KJ.kg^{-1}) em relação à lenha. Como desvantagem, o GLP possui instabilidade no custo, pois seu preço está vinculado ao preço do petróleo, além de exigir mão-de-obra qualificada.

Existe grande divergência entre técnicos da área de secagem na recomendação da opção mais econômica para o combustível a ser usado na secagem. Muitos produtores e técnicos consideram apenas o custo de combustível para a avaliação econômica. No entanto, custos de depreciação, energia elétrica e mão-de-obra devem ser considerados para obter uma análise mais completa.

Neste contexto, tendo em vista a necessidade de reduzir o custo de produção e visto que o processo de secagem tem grande influência no custo total de produção, este trabalho teve como objetivos principais avaliar técnica e economicamente a secagem do café usando lenha e GLP como combustíveis para o aquecimento do ar. O presente estudo foi realizado no Pólo de Tecnologia em Pós-Colheita de café, na Universidade Federal de Lavras, MG. Foram realizados dois testes usando simultaneamente dois secadores rotativos com capacidade de 5.000 litros.

Para a avaliação do desempenho dos sistemas de secagem foram realizadas as seguintes medições: temperatura da massa de café, do ar de secagem, do ar no plenum e do ar de exaustão, pressão estática no plenum, umidade inicial e final do café, umidade relativa e temperatura do ar ambiente, consumo total de combustível, consumo de energia elétrica e tempo total de secagem.

A temperatura do ar de secagem e da massa de café foi realizada por meio de termopares instalados, respectivamente, no duto de entrada de cada secador e em diversos pontos na massa de café. Amostras foram retiradas a cada duas horas de secagem e a umidade foi determinada pelo método padrão de estufa 105+ - 1º C durante 24 horas.

A pressão estática foi medida em 3 pontos distribuídos longitudinalmente dentro do plenum. O consumo do GLP foi determinado por meio de gasômetro da marca Equimeter, modelo S-275 instalado na linha de alimentação de cada secador.

A avaliação do desempenho da secagem foi realizada segundo metodologia adaptada proposta por Barkker Arkema et al (1978). A avaliação econômica foi feita calculando-se os custos de mão-de-obra, combustível, energia

elétrica, depreciação de capital fixo e custo total. Os resultados da avaliação do desempenho dos secadores nos testes 1 e 2 são apresentados na Tabela 1.

Observa-se que os conteúdos de umidade iniciais e finais para cada teste foram bem próximos, mostrando a uniformidade da matéria-prima neste experimento. As temperaturas médias do ar de secagem foram menores para as secagens que usaram lenha, em relação às secagens que usaram GLP nos testes 1 e 2. Nos testes que usaram lenha observou-se maior consumo total de energia elétrica devido ao maior tempo de funcionamento do sistema de secagem. Além disso, verificou-se que o consumo específico de energia para as secagens que utilizaram lenha foi maior que as secagens que usaram GLP. Observou-se eficiência mais baixa nas secagens que usaram lenha quando comparadas com as secagens que utilizaram GLP.

A análise da eficiência de sistemas de secagem considera tanto as perdas de energia não aproveitada para a retirada de água da massa do café como também aquelas ocorridas na queima do combustível, nos trocadores de calor da fornalha, nos dutos de ventilação, no ventilador e plenum do secador.

Nos testes 1 e 2, os custos de combustível para os tratamentos que usaram GLP representam 74,69% e 76,81% do custo total de secagem. Já a participação do custo do combustível nos testes com lenha representaram respectivamente, 16,58% e 14,28% do custo total da secagem.

Esses autores, analisando sistemas de aquecimento do ar pela queima de GLP, lenha de eucalipto e palha de café, verificaram que a operação realizada com GLP apresentou um maior custo de combustível. Entretanto, em muitos casos a decisão de optar por um sistema de outro aquecimento do ar é feito apenas baseado no custo do combustível não levando em conta outros custos, que podem resultar na escolha de sistemas de custos totais mais elevados, ou mesmo, com custos semelhantes, porém, com desvantagens operacionais.

Tabela 1 - Resultado experimental da avaliação energética do sistema

Parâmetros:	Teste 1		Teste 2	
	GLP	Lenha	GLP	Lenha
1)Do produto				
Teor de umidade inicial(%b.u.)	30,83	30,83	32,26	32,26
Teor de umidade final(%b.u.)	11,78	11,90	10,27	10,79
2)Do ar				
Temperatura de secagem (°C)	80,50	71,09	86,14	73,48
Temperatura ambiente (°C)	22,00	21,89	24,74	24,74
3) Do secador				
Vazão de ar(m ³ .mim ⁻¹)	79,50	83,25	79,73	83,56
Densidade de fluxo (m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²)	18,93	19,82	18,98	19,90
Espessura de camada(m)	0,63	0,63	0,63	0,63
Área de secagem(m ²)	4,20	4,20	4,20	4,20
Pressão estática (mm.c.a.).	4,00	4,00	4,00	4,00
4)Da energia				
Tipo de combustível	GLP	Lenha	GLP	Lenha
Massa de combustível(kg)	86,91	542,00	93,61	458,50
Poder calorífico inferior (kj.kg ⁻¹)	49191,	14664,5	49191,	14664,5
Energia elétrica (kWh.)	51,03	41,44	39,62	53,17
5)Do desempenho				
Duração do teste (horas)	21,58	24,58	21,01	24,25
Redução de umidade(%b.u.)	19,05	18,93	21,99	21,47
Cons.Específico real(kj.kg ⁻¹)				
Com energia elétrica (kj.kg ⁻¹)	8566,5	15925,1	8240,2	12284,8
Sem energia elétrica (kj.kg ⁻¹)	8277,7	15565,3	7992,6	11944,8
Eficiência de secagem(%)	36,65	19,08	37,52	24,24

O maior custo de depreciação para os testes que usaram lenha deve-se ao fato da vida útil da fornalha ser menor do que a do queimador. De acordo com os fabricantes, a vida útil de uma fornalha é de 6 anos, possuindo um valor de sucata de R\$ 1.500,00. Já o queimador possui uma vida útil de 20 anos e um valor de sucata de R\$ 750,00. A vida útil da fornalha e do queimador pode variar entre fabricante e de proprietário para proprietário, dependendo dos cuidados tomados.

O custo de energia elétrica é proporcional ao tempo de funcionamento do secador. Observa-se que o custo de energia elétrica foi maior nas secagens que usaram lenha, pois foram os testes com maior tempo de funcionamento.

Considerando os custos fixos e variáveis, observa-se que o custo total de secagem de café com lenha ou GLP foram considerados praticamente iguais, apresentando pequenas diferenças resultantes de variações que normalmente ocorre durante a condução dos testes e não especificamente em função da opção entre o sistema de aquecimento do ar.

A partir dos dados observados, conclui-se que:

- Energeticamente, a secagem com lenha foi menos eficiente que a secagem com GLP, apresentando menores valores de eficiência e maiores consumos específicos de energia.
- Economicamente, o custo de combustível na secagem a lenha foi 4,5 vezes menor do que a secagem em que se fez o uso de GLP. No entanto, o custo total demonstrou valores praticamente iguais para ambas as secagens.