

Fornalhas para Secagem

O objetivo principal deste tópico é o de construir sistemas e praticar a utilização racional da energia na secagem de modo a contribuir, de maneira ecológica, para a economia de combustível e, obviamente, para a redução dos custos de secagem, principalmente para aqueles produtos de menor valor comercial. Adicionalmente, alerta-se para uma redução na disponibilidade de energia para a secagem e que isso deve constituir-se numa preocupação para o cafeicultor. A preocupação se deve não só à escassez dos recursos naturais utilizados como fontes de energia, como também à elevação frequente dos preços dos derivados do petróleo que são ainda utilizados na secagem de produtos agrícolas.

O entendimento e o manejo correto de um sistema para o aquecimento do ar, bem projetado, farão com que proprietários de algumas fazendas de café deixem de utilizar fornalhas a lenha com elevado consumo, algumas em péssimo estado de conservação, mal dimensionadas e com excessiva perda de calor. A maioria dessas fornalhas utilizadas em fazendas de café não dispõe de mecanismo de controle do processo de combustão, sendo, de modo geral, operadas inadequadamente e produzindo grande poluição do ar no campo e mesmo próximo aos centros urbanos. Esse fato vem fazendo com que o Ministério Público e a polícia ambiental lacrem algumas unidades de secagem devido à quantidade de poluição causada, principalmente, pela queima da palha do café.

6.1. Combustão

Na prática diária com a secagem de café em secadores mecânicos, a conversão da biomassa (lenha, carvão e restos culturais) em energia dá-se em fornalhas e queimadores especiais. Dependendo da conveniência quanto à utilização, o calor gerado pela combustão pode ser transferido para um fluido e até mesmo para um material sólido antes de ser transferido para o ar de secagem.

O processo de combustão consiste essencialmente na reação química entre o hidrogênio e o carbono, presentes no combustível (fóssil ou biomassa), com o oxigênio proveniente do ar atmosférico. Uma combustão eficiente (sem geração de fumaça) é aquela em que todos os elementos, resultantes do processo de queima, são transformados totalmente em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e CALOR (o que mais interessa no processo). A Tabela 4 mostra a composição média das principais biomassas usadas em fornalhas para uso em fazendas.

A combustão, ou queima direta, pode ser definida como o processo de oxidação de um combustível (biomassa) sob uma combinação de fatores que ocorrem simultaneamente em uma reação química exotérmica (geração de calor). Para que ocorra a reação de oxidação, os seguintes fatores devem estar disponíveis simultaneamente, como: biomassa, comburente (oxigênio) e temperatura de ignição. Esses fatores são normalmente conhecidos como triângulo da combustão ou do fogo (Figura 173).

Tabela 4 - Composição química básica de algumas biomassas

Elementos (%)	Carvão vegetal	Lenha seca	Casca de Arroz	Sabugo de Milho
Carbono	74,5	50,2	41,0	46,6
Hidrogênio	3,0	6,3	4,3	5,9
Oxigênio	17,0	43,1	35,9	45,5
Enxofre	0,5	-	-	-
Nitrogênio	1,0	0,06	0,4	0,5
Cinza	4,0	0,38	18,3	1,4

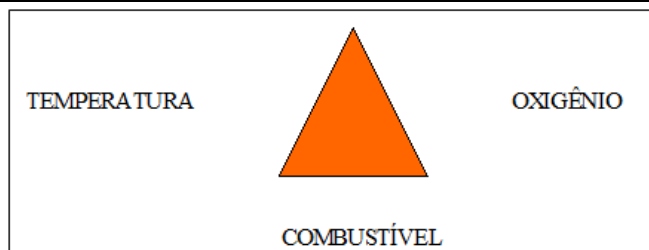


Figura 173 - Triângulo da combustão.

6.2. Combustíveis

Como mencionado, combustíveis são substâncias ricas em carbono e hidrogênio que, ao reagirem quimicamente na presença de oxigênio, liberam CO_2 , água e energia sob a forma de calor. O alto poder calorífico deve ser a principal 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. Para os combustíveis sólidos, ele é expresso, geralmente, em kJ.kg^{-1} , e para os combustíveis gasosos, em kJ.m^{-3} .

Quando na determinação do poder calorífico se considera o calor latente de condensação da umidade presente no combustível, tem-se o poder calorífico superior (PCI); quando não é considerado, tem-se o poder calorífico inferior (PCI) do combustível, que é o que mais interessa.

Os combustíveis, de acordo com o seu estado físico, podem ser classificados em sólidos, líquidos e gasosos, e, quanto à origem, em naturais e derivados. Os combustíveis naturais são utilizados nas formas em que foram obtidos, como o gás natural e a lenha. Os derivados, ou secundários, são os combustíveis resultantes de um processo de preparação, como o carvão vegetal e os derivados de petróleo.

As substâncias comburentes são definidas como todas aquelas capazes de fornecer o oxigênio necessário à reação de oxidação do combustível. No caso de secagem do café ou de outros produtos agrícolas, o oxigênio é proveniente do ar atmosférico.

A temperatura de ignição corresponde à temperatura que a mistura combustível e comburente deve atingir para iniciar o processo de combustão e está relacionada com a pressão na qual a reação irá correr, bem como com o tipo de combustível.

Além da temperatura de ignição, a reação de oxidação é função da turbulência do comburente e do tempo disponível para a combustão (tecnicamente chamados de três Ts: temperatura, turbulência e tempo), como esquematizado na Figura 174, que fornece, também, a temperatura de ignição dos combustíveis mais usados. A disponibilidade

desses elementos fundamentais está relacionada com a ocorrência da combustão, da seguinte forma:

- a) Disponibilidade de combustível e oxigênio: para que haja uma combustão perfeita, o combustível deve ser dosado de forma correta e deve contemplar um excesso de oxigênio, ou seja, mais do que o necessário para a reação química completa. Para os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos são recomendados, respectivamente, 30 a 60%; 10 a 30%; e 5 a 20%. Portanto, ao alimentar uma fornalha, devemos verificar se o combustível e o ar injetado na fornalha estão na dose certa. Geralmente, para as fornalhas comuns, a quantidade de ar é comandada pela abertura do ar primário e pela chaminé.
- b) Contato do combustível com o oxigênio: o combustível e a fonte do comburente (ar ambiente), durante o processo de combustão, devem ter maior contato, para facilitar as reações químicas de oxidação, sendo isso facilitado com a pulverização, desintegração e/ou aumentando a turbulência do comburente no interior da câmara de combustão.
- c) Disponibilidade de tempo e espaço: para uma combustão perfeita e completa, o processo deve dispor de espaço físico e tempo suficiente para a realização das reações químicas.
- d) Ocorrência da temperatura de ignição: a mistura combustível e a substância comburente devem ser aquecidas até atingirem a temperatura de ignição do combustível.

Combustível	Temperatura de Ignição (°C)
Carvão Mineral	400 – 500
Carvão Vegetal	340 – 400
Lenha Seca	300
Gás Metano	650
Monóxido de Carbono	650
GLP	500

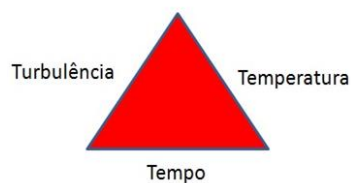


Figura 174 - Temperatura de ignição de alguns combustíveis e os 3Ts da combustão.

Para o dimensionamento de equipamentos utilizados na queima ou oxidação do combustível (fornalhas), para o controle da combustão e para o dimensionamento de equipamentos que utilizarão o calor gerado, torna-se necessário o conhecimento da taxa de alimentação do ar de combustão e das características dos gases gerados (composição, volume, temperatura, etc.). Caso contrário, o sistema de secagem consumirá combustível em excesso, necessitará de fornalhas com tamanho desnecessário, terá a taxa de transferência de calor prejudicada, necessitará de manutenção e limpeza mais frequentes e, acima de tudo, produzirá muita poluição (Figura 175).



Figura 175 - Poluição ambiental devido a fornalha operada inadequadamente com queima de palha de café.

O excesso de área calculado a partir da composição química do combustível se dá em função de uma série de fatores, como: tipo de combustível, método de queima, temperatura a ser atingida na fornalha, etc.

Como foi estabelecido, combustíveis sólidos como a lenha são os que mais exigem excesso de ar, ou seja, entre 30 e 60% do valor do ar teórico. Uma vazão insuficiente de ar provocará combustão incompleta, como aparecimento de monóxido de carbono (CO) e até mesmo fuligem nos produtos da combustão, reduzindo a eficiência da queima do combustível. Por outro lado, um excesso de ar muito elevado é igualmente indesejável, porque resfria a fornalha e arrasta para fora a energia térmica útil.

A quantidade de ar atmosférico necessária para a combustão completa do combustível, considerando o excesso de ar, pode ser calculada pelas equações 2 e 3. A Tabela 5 apresenta os valores de referência recomendados para o excesso de ar (l).

a) em kg de ar/kg de combustível:

$$GAR = l \text{ GAR}_{\min} \quad \text{eq. 2}$$

b) em m³ de ar/kg de combustível:

$$VAR = l \text{ VAR}_{\min} \quad \text{eq. 3}$$

Por exemplo, a VAR_{min} para a queima de 1 kg de lenha seca é de 4,75 m³ de ar. Para uma queima perfeita, seria necessário um excesso de ar, ou seja, 7,1 m³.

Tabela 5 - Valores de referência recomendados para excesso de ar para diferentes combustíveis

Combustível	Dispositivo de Queima	Excesso de Ar(l)
Carvão britado	Grelhas planas com ar natural	1,50 a1,65
Lenha	Grelha plana com ar natural	1,40 a1,50
	Grelha plana com ar forçado	1,30 a1,35

6.3. Fornalhas para secagem de café

Fornalhas são dispositivos projetados para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, em condições que permitam o aproveitamento da energia térmica liberada da combustão, obtendo-se o maior rendimento térmico possível. O projeto de uma fornalha para secagem de café deve ser

baseado nos 3Ts da combustão: temperatura, turbulência e tempo. O tamanho e a forma da fornalha dependem do tipo de combustível, do dispositivo usado para queimá-lo e da quantidade de energia a ser liberada num intervalo de tempo. Para que ocorra a combustão completa do combustível, deve-se buscar uma mistura ar-combustível homogênea, na dosagem ideal e no tempo correto. Com isso, obtém-se um aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável.

As fornalhas podem ser classificadas, quanto à natureza dos combustíveis, em:

- Fornalhas para combustíveis sólidos (lenha, carvão vegetal, sabugo de milho, etc.).
- Fornalhas para combustíveis sólidos pulverizados (carvão em pó, casca de arroz, de café, etc.).
- Fornalhas para combustíveis líquidos (óleo diesel, óleo BPF, álcool, etc.).
- Fornalhas para combustíveis gasosos (gás natural, gás GLP, biogás, etc.).

Tipos de fornalha para a secagem do café

Dependendo da forma de processamento do café (se via seca ou via úmida) e da qualidade da combustão, podem-se usar dois tipos de fornalha para a secagem:

- Fornalha com aquecimento direto** – neste tipo de fornalha, a energia térmica proveniente dos gases resultantes da combustão e misturada com o ar ambiente é utilizada diretamente na secagem do café. Entretanto, a mistura de parte do gás comburente com os gases resultantes da combustão pode se tornar indesejável nos casos em que o processo de combustão é incompleto, gerando compostos contaminantes, como o monóxido de carbono e a fumaça. Com o aproveitamento direto da energia térmica dos gases da combustão, as fornalhas com aquecimento direto, quando sob combustão completa, apresentam maior rendimento. Nessas fornalhas, precisa ser acoplado um decantador tangencial ou ciclone, no qual as partículas, principalmente as incandescentes, entram em movimento espiral e são separadas do fluxo gasoso pela ação da força centrífuga.
- Fornalha com aquecimento indireto** – nas fornalhas com sistema de aquecimento indireto, a energia térmica dos gases provenientes da combustão é encaminhada a um trocador de calor, que tem a finalidade de aquecer, indiretamente, o ar de secagem ou uma segunda substância, como, por exemplo, uma caldeira geradora de vapor. Neste tipo de sistema, há perda de energia térmica pela chaminé e para o sistema, resultando em uma menor eficiência quando comparado à fornalha de aquecimento direto. As fornalhas com aquecimento indireto destinam-se a produtos agrícolas que requerem temperatura controlada e não muito alta durante a secagem, como na secagem de sementes, cacau e café cereja descascado.

Com relação à lenha, observa-se que as fornalhas com aquecimento indireto, em geral, apresentam excessiva perda de calor, consomem grande quantidade de combustível, não dispõem de mecanismos precisos para controle da combustão e da temperatura do ar de secagem e, apesar disso, são as mais usadas em secadores convencionais para café.

Além das desvantagens apontadas, a fornalha com aquecimento indireto, quando a lenha é de má qualidade e não adequadamente seca, produz fumaça ao queimar, causando desconforto e deixando cheiro ou gosto no produto quando o trocador de calor ou um dos elementos de ligação com o ventilador é danificado pelo processo de corrosão (Figuras 176 e 177).

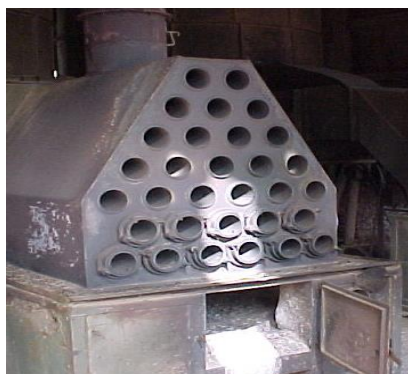


Figura 176 - Vista frontal de um trocador de calor de uma fornalha a fogo indireto (ar/ar) com tubos reformados.



Figura 177 - Detalhes de um trocador de calor (ar/ar) seriamente danificado pelo processo de corrosão.

Embora seja um combustível muito utilizado, a lenha requer fornalhas bem dimensionadas, construídas com materiais duráveis e critérios bem definidos para o seu uso (tamanho, qualidade, umidade do combustível, etc.).

As fornalhas com aquecimento indireto, quando utilizam trocadores de calor com fluidos térmicos (Figura 178), apresentam, além de outras vantagens, a facilidade do controle da temperatura do ar de secagem. Atualmente, na secagem de café, têm sido empregadas caldeiras a vapor para o aquecimento indireto do ar.

Embora seja uma tecnologia disponível e que resulta em produto de boa qualidade, as caldeiras são acessíveis somente aos grandes cafeicultores, sendo recomendadas para aqueles que operam mais de dois secadores simultaneamente. O elevado custo de implantação de uma caldeira convencional e o pequeno volume de café produzido não permitem que os pequenos produtores possam usufruir dessa tecnologia como uma das opções para proporcionar melhorias na qualidade do café.

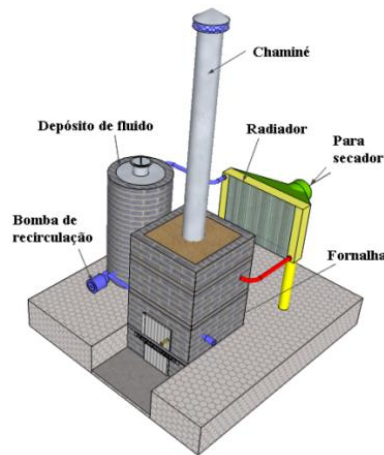


Figura 178 - Fornalha com aquecimento indireto, com autocontrole da temperatura máxima do ar de secagem.

O desinteresse das indústrias tradicionais de equipamentos para a cafeicultura em desenvolver sistemas de pequeno porte, compatíveis com o volume de produção dos pequenos cafeicultores, é facilmente entendido por se tratar de equipamentos cujo retorno econômico não é vantajoso em relação aos de grande capacidade. Assim, as indústrias de pequeno porte e de caráter regional é que podem ter melhores condições de atender a esse segmento da cafeicultura.

Considerando-se: a) a dificuldade de produção, em grande escala, de fornalhas a lenha que sejam econômicas, duráveis e que possam ser utilizadas para a secagem de café cereja descascado; b) as vantagens na queima direta da lenha como fonte de energia na secagem; c) o potencial de produção da lenha de eucalipto ou do resíduo da poda drástica do cafeeiro; d) o fato de a biomassa ser uma fonte renovável de energia; e) a disponibilidade de produção da biomassa no local de uso; f) a importância da qualidade do ar para a secagem do café; e g) a necessidade de aprimorar um sistema já bastante difundido para a secagem do café, optou-se por disponibilizar, neste manual, projetos que possam ser executados com recursos de oficinas modestas, comandadas por pequenos empresários regionais.

Fornalhas e princípio de funcionamento

O conhecimento do princípio de funcionamento de fornalhas e a operação adequada delas são condições imprescindíveis para o uso racional da energia na secagem do café e de grãos em geral.

Como já mencionado, para que ocorra a combustão completa do combustível, deve-se buscar uma mistura: ar-combustível, homogênea, na dosagem ideal e no tempo correto. Com isso, obtém-se aquecimento do combustível até a sua ignição autossustentável. Comumente, as fornalhas destinadas à queima de combustíveis sólidos não pulverizados, como a lenha ou carvão (de eucalipto ou da receita do café), possuem os itens descritos a seguir:

- a) **Depósito de combustível** – em caso de utilização de combustíveis como cavacos de madeira, carvão em fragmentos padronizados, “pellet” de biomassa, frutos secos de palmeiras, entre outros, algumas fornalhas apresentam um depósito de combustível para alimentação da grelha na câmara de combustão (Figura 179).

- b) **Câmara de combustão** – constitui o espaço destinado ao processo de combustão propriamente dito, onde todos os compostos combustíveis devem ser oxidados, liberando energia térmica (Figura 180). O importante em qualquer fornalha é ter um bom dimensionamento da câmara de combustão, da área da grelha e da abertura do ar primário, a fim de que se possa obter oxigênio em quantidade suficiente para, se convenientemente misturado com o combustível, gerar o máximo de gases quentes com o mínimo de fumaça.
- c) **Grelha** – é a estrutura que mantém o combustível sólido suspenso durante o processo de combustão, enquanto o ar comburente circula por sua superfície (Figura 181).
- d) **Cinzeiro** – é o depósito localizado abaixo da grelha e destinado a armazenar os resíduos da combustão (cinzas e pequenas brasas). Para o bom funcionamento da fornalha, o cinzeiro deve ser limpo periodicamente.
- e) **Entradas de ar** – entradas reguláveis, localizadas em pontos estratégicos no corpo da fornalha. São responsáveis pela passagem do ar comburente para o interior da fornalha e devem estar localizadas de forma que facilitem a mistura ar-combustível.
- f) **Saídas dos gases** – são aberturas destinadas à saída dos gases resultantes da combustão e do excesso de ar comburente e que podem ser utilizados como fonte de energia térmica para diversas finalidades quando se trata do aquecimento direto. Para as fornalhas de aquecimento indireto, a saída dos gases ocorre pelo sistema chaminé (Figura 178).



Figura 179 - Fornalha com depósito de combustível (carvão ou briquet) para secagem com queima direta do combustível.



Figura 180 - Câmara de combustão da fornalha de uma pequena caldeira.

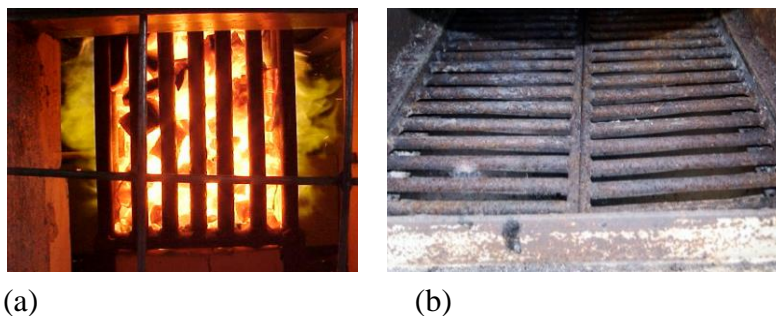


Figura 181 - (a) Grelha para queima de carvão vegetal; (b) grelha para queima de lenha.

Fornalha com aquecimento indireto para secagem

Nas fornalhas com sistema de aquecimento indireto, os gases provenientes da combustão são introduzidos num trocador de calor, que, em contato com o ar ambiente, o aquecerá. Nesse tipo de fornalha, há perdas de energia térmica pela chaminé e no trocador de calor, resultando em menor eficiência quando comparada com as fornalhas com aquecimento direto.

As fornalhas com aquecimento indireto são destinadas à secagem de produtos agrícolas, como cacau e café descascado ou despulpado, que requerem ar quente com temperatura relativamente baixa e sem elementos contaminantes, como fumaça e resíduos da combustão.

Um modelo bastante interessante possui um trocador de calor do tipo tubo-carcaça, câmara de combustão e aquecedor de fluido térmico. O ar frio, ao entrar pelos tubos do trocador de calor, é aquecido pelo fluido circulante na carcaça do trocador de calor, até uma temperatura máxima determinada pela temperatura de ebulição do fluido circulante e pelo comprimento do trocador de calor.

Além da grande durabilidade, por trabalhar com fluido térmico sob temperaturas relativamente baixas, a fornalha em questão apresenta como vantagem a não contaminação do ar de secagem, mesmo quando a combustão é incompleta. Esse aspecto é de especial atenção na secagem de café, pois, quando apresenta cheiro de fumaça, pode sofrer deságio por parte de alguns compradores. A Figura 182 ilustra uma fornalha com aquecimento indireto com fluido circulante que foi projetada e construída no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV) para secagem de sementes.

Por outro lado, as fornalhas dotadas de trocador de calor ar/ar apresentam menor durabilidade quando construídas em aço carbono, devido à alta temperatura a que ficam submetidas as superfícies de troca. Com o tempo, são comuns o desgaste e a necessidade de reparos frequentes, para que não haja contaminação do produto com a fumaça que passa pelas perfurações nos tubos ou espelho do trocador.

As Figuras 176 e 177 mostram detalhes de uma fornalha com aquecimento indireto (ar/ar), muito comum na secagem de café. Na Figura 176, nota-se que a fornalha em questão já sofreu substituição de tubos inferiores mais próximos da chama. Se necessitar de uma reforma completa, como no caso da Figura 177, é melhor a aquisição de uma nova fornalha.

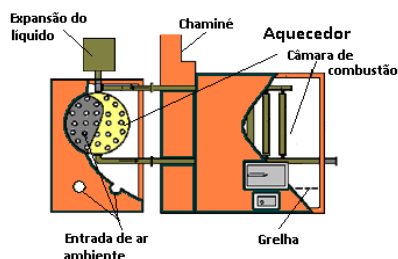


Figura 182 - Fornalha de aquecimento indireto com autocontrole de temperatura máxima do ar.

De modo geral, por desconhecer o princípio de funcionamento e o bom manejo de fornalha por aquecimento direto, o cafeicultor tem dado preferência à fornalha de aquecimento indireto, por possibilitar a secagem com qualidade do café descascado, principalmente. Entretanto, quando se trata do café natural (em coco), essa forma de aquecimento apresenta-se ineficiente sob o ponto de vista da utilização racional da energia; muitas vezes, devido ao desgaste no trocador de calor, essas fornalhas passam a funcionar como de aquecimento direto e sem controle da combustão.

Outro fato muito importante e que pode prejudicar a secagem de café de qualidade com o uso de aquecimento indireto é a falta de controle da tiragem da fornalha, o que causa grande quantidade de fumaça que entra diretamente na tomada de ar do secador (Figura 175).

Nesse sentido, os projetos modernos de aquecimento de ar que utilizam vapor (Figura 183) devem incorporar economizadores e/ou pré-aquecedores de ar, cujos benefícios resultam em economia de combustível e aumento de rendimento.

Uma fornalha com opção para aquecimento direto ou indireto do ar de secagem, de acordo com o café a ser secado, que permita o controle do processo de combustão e incorpore meios de aproveitamento da entalpia dos gases de combustão (Figura 184) foi recentemente desenvolvida e testada no DEA/UFV e muito contribuirá para o uso racional da energia na secagem de café (MELO, 2003). Nessa fornalha, a alimentação, no caso de biomassa fragmentada, é realizada por um transportador pneumático; e, quando se usa a lenha, é feita manualmente, pela porta da câmara de combustão.

Independentemente da forma de alimentação, a troca de calor é em fluxos contracorrentes (Figura 184). Quando se usam os gases de combustão, depois de a fornalha devidamente aquecida (após duas horas de funcionamento), fecha-se o registro da chaminé e abre-se o registro dos gases, que são mesclados com o ar aquecido pelo trocador de calor.



Figura 183 - Linha de vapor e trocadores de calor ar/vapor empregados na secagem de café.

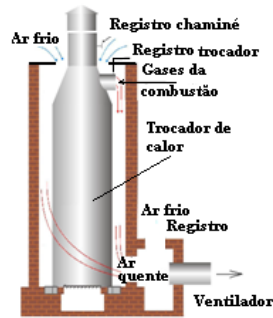


Figura 184 - Fornalha com opção para aquecimento direto e indireto do ar de secagem.

6.4. Construção da Fornalha Horizontal Tipo Tubo/Carcaça

A fornalha (Figura 185) proposta neste manual foi desenhada para ser utilizada em secadores que demandam em torno de 90 kg de ar quente por minuto, por serem os tamanhos mais adotados na cafeicultura.

Para maior durabilidade e menor custo de manutenção, os componentes metálicos da fornalha devem ser construídos em aço inox 304. Nada impede, entretanto, que a fornalha seja construída em aço carbono. Na opção pela segunda alternativa (aço carbono), o cafeicultor deve levar em consideração a possibilidade de, em um curto período, gastar tempo e dinheiro para corrigir os danos por corrosão térmica (Figuras 176 e 177) e sem garantia de bom funcionamento e durabilidade da reforma.

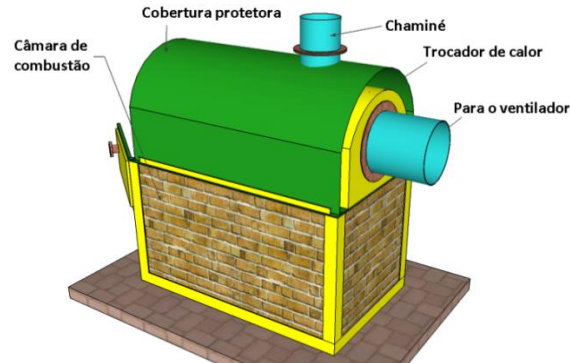


Figura 185 - Fornalha com trocador de calor (ar/ar) para secagem de café.

Características da fornalha

Para atender às demandas energéticas de 2.800 kJ por minuto (em torno de 90 kg por minuto de ar de secagem com temperatura de 55 °C, ou aproximadamente 80 m³/min), estabelecidas para os secadores mais comuns e utilizados na secagem do café, a fornalha, cujos componentes serão descritos mais adiante, deve apresentar as seguintes características:

- Área mínima de transferência de calor (4 m²). Essa área é a soma das superfícies dos tubos e a superfície da carcaça.
- Altura da câmara de combustão (0,4 m). Distância entre a grelha e a primeira fila de tubos.
- Área mínima da grelha (0,18 m²).

- d) Área livre da grelha ($0,04 \text{ m}^2$).
- e) Consumo aproximado de lenha seca de eucalipto (15 kg por hora).
- f) Comprimento de tubo (1 m).
- g) Diâmetro dos tubos (0,05 m).
- h) Número mínimo de tubos (17).
- i) Tensão térmica da grelha para o consumo em questão ($450 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$).

Componentes da fornalha

- a) **Base de sustentação:** deverá ser em aço inox 304, preferencialmente, e confeccionada com cantoneiras de abas iguais de 70 x 70 mm e espessura de 5 mm. As outras dimensões da base são mostradas na Figura 186.

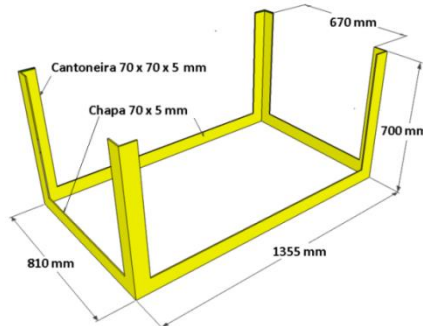


Figura 186 - Base de sustentação da fornalha.

- b) **Plataforma de sustentação do trocador de calor e coletor:** deve ser confeccionada em chapas inox de 5 mm de espessura, convenientemente cortadas, que, depois de soldadas, ficam com a aparência de uma placa de 1.345 x 800 mm, com vazamento interno de 945 x 600 mm. Sobre as laterais da plataforma são soldadas as guias (duas de cada lado), para facilitar a retirada e a reposição da cobertura do trocador de calor durante a manutenção e limpeza das tubulações. As guias, também em aço inox, são constituídas de tiras de 5 x 30 x 1.227 mm. As outras dimensões da plataforma são mostradas na Figura 187.

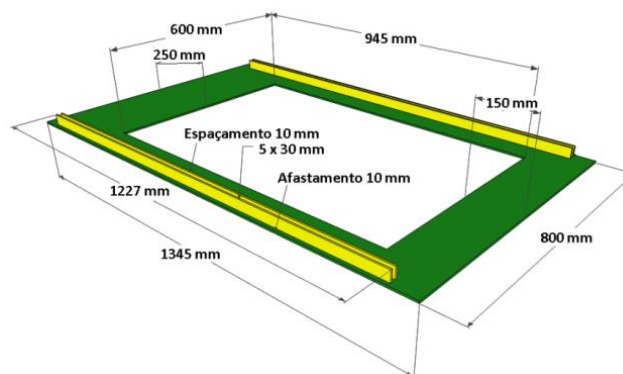


Figura 187 - Plataforma de sustentação do trocador de calor e coletor.

- c) **Caixa coletora de ar com saída para o ventilador:** deve ser fixada em uma moldura de 700 x 1.245 mm, construída com barras de aço inox de 5 x 50 mm. A caixa coletora tem a área transversal semelhante à carcaça do trocador de calor e pode ser fixada a este por meio de parafusos ou solda. Na face frontal da caixa coletora deve

haver uma abertura circular, na qual será fixado o duto que liga a fornalha ao ventilador (Figura 188).

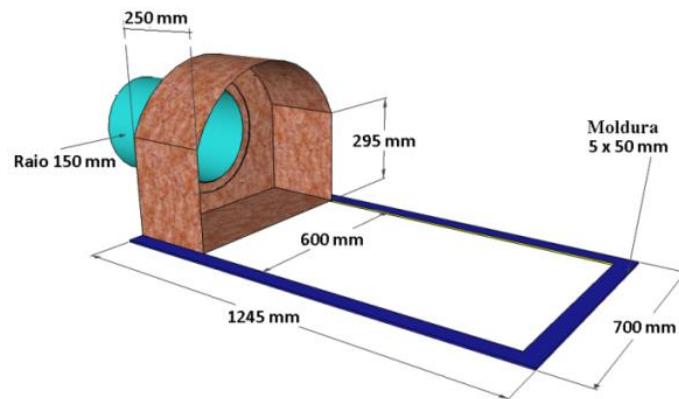


Figura 188 - Caixa coletora com abertura para saída do ar, montada sobre a moldura do trocador.

d) **Trocador de calor:** é composto por carcaça construída em aço inox (3 mm), espelhos em aço inox (5 mm) e tubos trocadores com 50 mm de diâmetro, 5 mm de espessura e 1.000 mm de comprimento (Figura 189). O trocador de calor, tipo tubo carcaça, deve ser fixado ao coletor e à moldura (Figuras 189, 190 e 191).

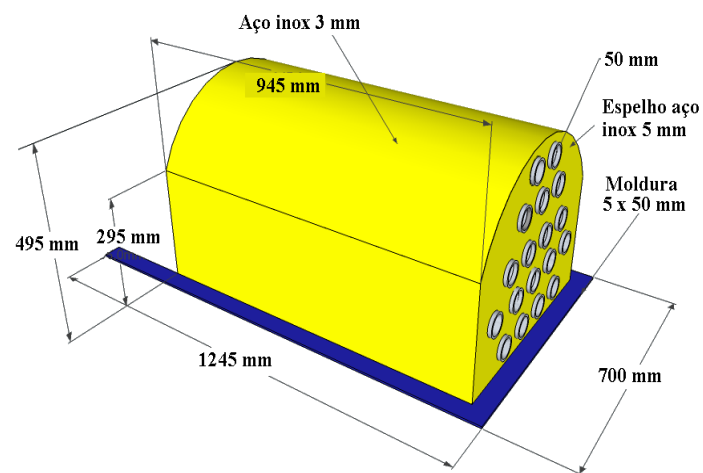


Figura 189 - Trocador de calor com os tubos e moldura de apoio.

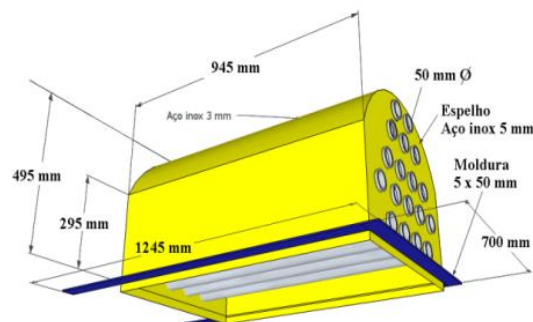


Figura 190 - Trocador de calor com os tubos e moldura de apoio – vista por baixo.

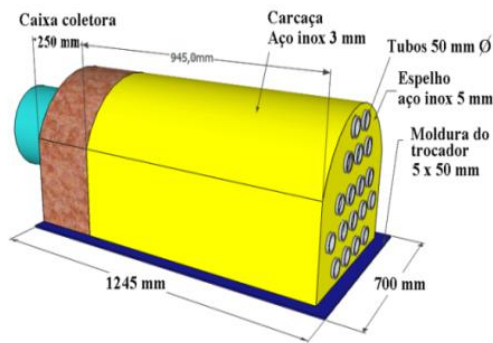


Figura 191 - Trocador de calor e caixa coletora fixada na moldura de apoio.

e) **Grelha:** pode ser construída em aço inox ou em ferro fundido. Estabeleceu-se que a área mínima calculada seria de $0,18 \text{ m}^2$ e que a largura, para abertura interna da plataforma, deveria ser de no mínimo 600 mm; o comprimento mínimo da grelha deve ser determinado em função do comprimento dos pedaços de lenha (60 cm é muito comum). Portanto, a grelha para a fornalha em questão terá a configuração mostrada na Figura 192. A guia da grelha deve ser fixada à base da fornalha, de modo que permita a retirada e reposição da grelha após as operações de limpeza e manutenção.

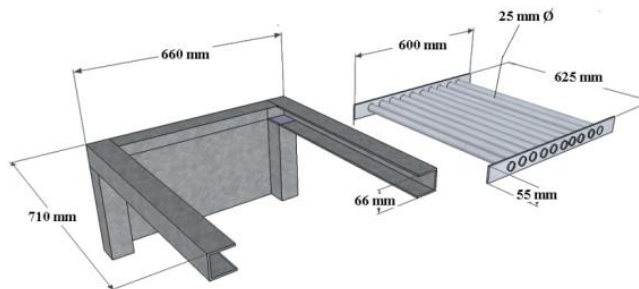


Figura 192 - Detalhe da grelha com a respectiva guia.

f) **Estrutura básica (chassi da fornalha):** com a plataforma, as guias da cobertura do trocador e a guia da grelha, convenientemente acopladas ou soldadas na base, a estrutura geral de sustentação da fornalha fica com o aspecto apresentado na Figura 193.

g) **Revestimento da base:** o revestimento interno da base da fornalha pode ser feito com alvenaria de tijolos comuns. Pensando em longo prazo, entretanto, seria muito importante adicionar uma camada interna com tijolos refratários espelhados. Com esse procedimento, a base da fornalha teria maior durabilidade e eficiência. A Figura 194 mostra o aspecto final da base da fornalha.

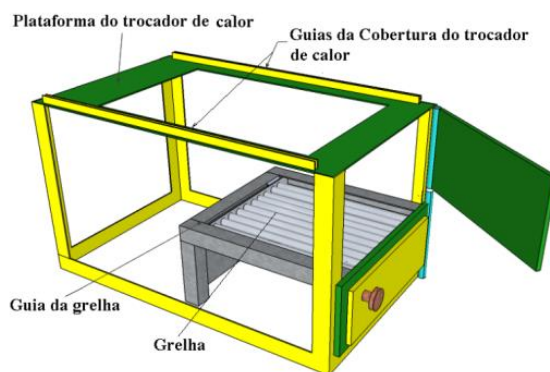


Figura 193 - Estrutura básica fornalha, mostrando a grelha e as portas da câmara de combustão e do cinzeiro.



Figura 194 - Base da fornalha pronta para receber o trocador de calor.

h) **Montagem do trocador de calor:** com a base da fornalha no local de uso e devidamente revestida, basta aparafusar o conjunto trocador de calor, moldura e caixa coletora sobre a plataforma de sustentação e entre as guias da cobertura do trocador de calor (Figuras 195 e 196).

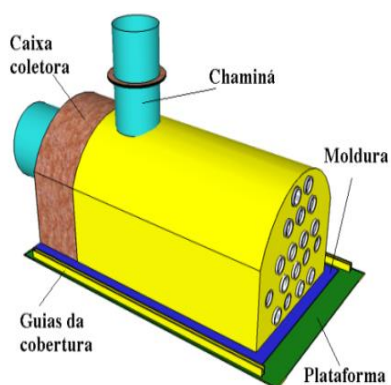


Figura 195 - Montagem do trocador de calor e caixa coletora sobre a plataforma de sustentação.

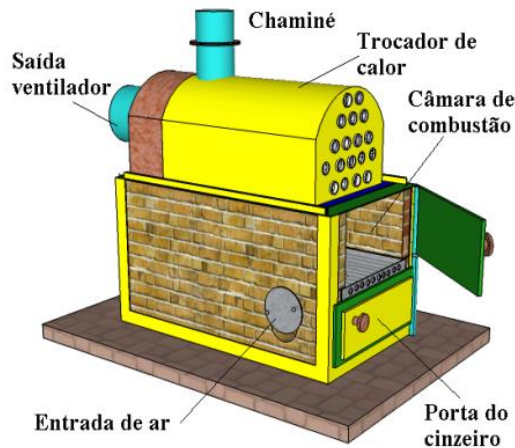


Figura 196 - Plataforma de sustentação com seus elementos sobre a base da fornalha.

i) **Chaminé e cobertura do trocador de calor:** finalmente, após a montagem de todos os componentes da fornalha e da chaminé, construída em aço inox de 2 mm e 200 mm de diâmetro, deve-se, além da proteção tipo chapéu chinês, ultrapassar pelo menos 1,50 m acima do telhado que cobrirá a fornalha. Para melhor desempenho da fornalha, é necessário acoplar a cobertura protetora, que, além de evitar contato de pessoas com a superfície quente da carcaça do trocador de calor, tem a finalidade de direcionar o ar, que será pré-aquecido pela superfície externa da carcaça, entrará pelos tubos do trocador e, por fim, passará pelo ventilador como ar de secagem (Figuras 197 e 198).

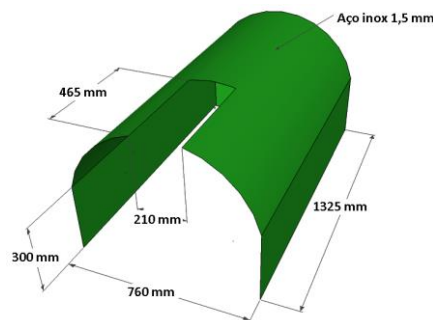


Figura 197 - Cobertura do trocador de calor.

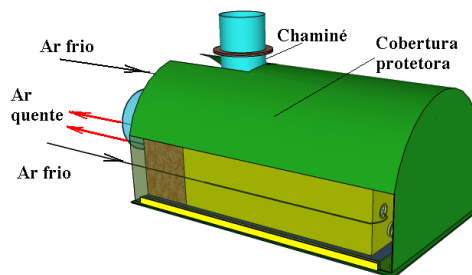


Figura 198 - Fluxo de ar frio e quente pela cobertura e trocador de calor (tubos).

j) **Finalização do conjunto:** depois de todos os elementos devidamente montados, a fornalha terá o aspecto final mostrado nas Figuras 199 e 200.



Figura 199 - Fornalha completa e seus componentes, como combustão e cinzeiro (vista anterior).

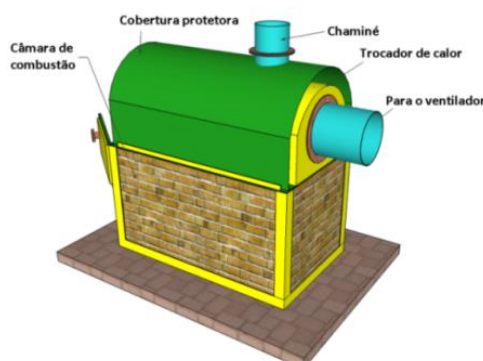


Figura 200 - Fornalha completa, mostrando saída de ar para ventilador e chaminé (vista posterior).

Recomendações para o Uso Correto da Fornalha

Utilize eficientemente a lenha. A utilização de lenha úmida em fornalhas constitui um obstáculo à produção de calor. A evaporação da água durante a combustão da lenha subtrai calor durante a queima, resultando em menor quantidade de energia para o aquecimento do ar de secagem. Quanto mais seca e mais densa for a lenha, maior o seu aproveitamento. Por essa razão, sugerimos ao extensionista ou fabricante a orientar o cafeicultor para providenciar lenha com bastante antecedência e, depois de convenientemente seca ao sol, que a guarde em local protegido de chuvas. O teor de umidade da lenha para queima em fornalhas deve ser inferior a 20% (Figura 201).



Figura 201 - Secagem da lenha ao sol e devidamente preparada e protegida para uso.

Para o bom funcionamento do sistema, devem-se obedecer as recomendações que seguem:

- 1) Que a fornalha seja alimentada constantemente a intervalos preestabelecidos e com lenha de comprimento e diâmetro uniformes. Apesar de trabalhoso, deve-se evitar que o fogo abaixe muito para alimentar a fornalha, de uma só vez, com muita lenha. Como as fornalhas com aquecimento direto não possuem controles, uma alimentação cuidadosa auxilia na manutenção de temperaturas próximas das recomendadas para uma secagem eficiente.
- 2) A lenha deve ser separada em lotes homogêneos em comprimento e diâmetro. O uso de lenha de mesma classe facilitará a combustão e o melhor desempenho da fornalha.
- 3) Evite arremessar a lenha para dentro da câmara de combustão, uma vez que esse procedimento pode provocar rachaduras e contribuir para a diminuição da vida útil da fornalha.
- 4) Durante a alimentação de fornalhas com aquecimento indireto, a tiragem promove o ingresso de grande excesso de ar, que faz baixar a temperatura da chama, diminuindo a disponibilidade de energia e provocando grande perda de calor sensível pela chaminé. Portanto, evite abrir desnecessariamente a porta de alimentação da fornalha.
- 5) Para obter uma combustão eficiente e circulação adequada dos gases, mantenha uma programação diária para limpeza de todos os componentes da fornalha e do secador.

6.5. Construção de Fornalha com Fluido Térmico

Um tipo bastante interessante de fornalha de aquecimento indireto possui trocador de calor do tipo tubo-carcaça (Figura 202) ou radiador (Figura 203), câmara de combustão e aquecedor de fluido térmico. O ar frio, ao entrar pelos tubos do trocador de calor ou na colmeia do radiador, é aquecido pelo fluido circulante na carcaça do trocador de calor ou nas aletas do radiador. A temperatura máxima do ar de secagem é determinada pelo equilíbrio com a temperatura de ebulição do fluido quente circulante e o tamanho do trocador de calor ou radiador. Portanto, a temperatura do ar de secagem nunca atingirá a temperatura de ebulição do fluido quente, ou seja, se o fluido circulante for a água, dificilmente se conseguirá temperaturas superiores a 80 °C, mesmo aumentando a taxa de combustão para os fluxos de ar usuais de secagem.

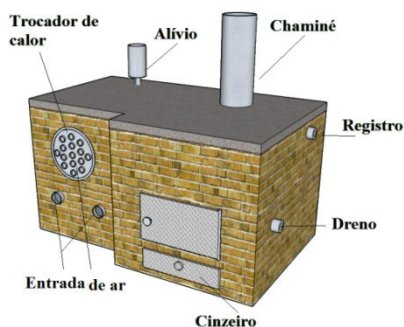


Figura 202 - Fornalha com recirculação de fluido térmico e trocador de calor do tipo tubo-carcaça.

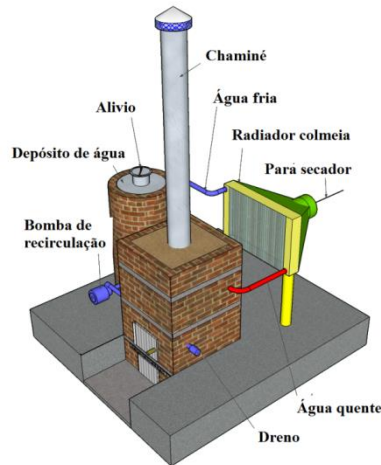


Figura 203 - Fornalha com recirculação de fluido térmico e trocador de calor tipo radiador.

A temperatura máxima de secagem é determinada pelo fluxo de ar, pelo tamanho do sistema e pela temperatura de ebulição do fluido quente. Além da grande durabilidade, por trabalhar com fluido térmico sob temperaturas relativamente baixas, as fornalhas em questão apresentam como vantagem a não contaminação do ar de secagem. Por não trabalhar em temperaturas elevadas, dificilmente o trocador de calor ou o radiador serão danificados. Esse aspecto é de especial atenção na secagem de café, pois, quando apresenta cheiro de fumaça, sofre deságio por parte de alguns compradores.

Apesar de bastante semelhantes quanto à forma de aquecimento do fluido quente, que é feita por um conjunto de placas paralelas, com paredes duplas, e espaçadas de 5 cm, conforme Figuras 204 e 205, aconselha-se que tanto as placas como as tubulações sejam confeccionadas em aço inox com espessura mínima de 3 mm. Por outro lado, as fornalhas apresentam diferenças quanto à forma de transferência de calor para o fluido frio.

Na fornalha da Figura 202 a troca de calor é feita por trocador de calor do tipo tubo-carcaça (Figura 206), cujo modo de união dos componentes é detalhado na Figura 207. Já na fornalha da Figura 203 a troca de calor para o fluido frio pode ser feita por radiador tipo colmeia (Figura 208) ou do tipo tubular (Figura 183). O radiador da Figura 208, muito eficiente, é o mesmo usado em instalações de câmaras de refrigeração; dependendo do tamanho do sistema a ser construído, podem-se usar radiadores para caminhões.

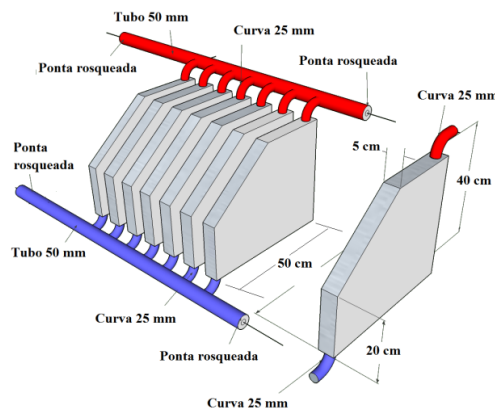


Figura 204 - Conjunto de placas paralelas de parede dupla, para aquecimento do fluido quente.

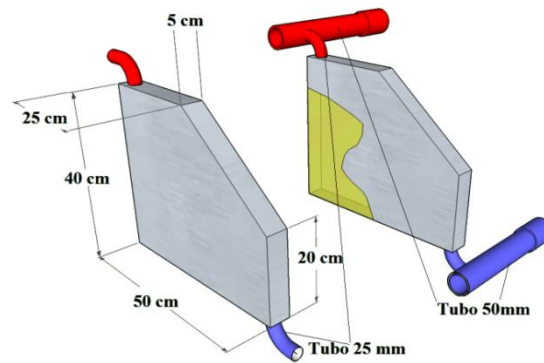


Figura 205 - Detalhes da placa de aquecimento do fluido quente com parede dupla.

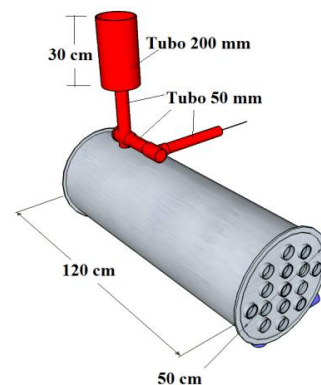


Figura 206 - Trocador de calor tipo tubo-carcaça com sistema de alívio.

Como o radiador mostrado na Figura 208 é muito sensível a choques (danificação da colmeia), recomenda-se a proteção com grade metálica, conforme mostrado na Figura 208. Outra diferença significativa entre as fornalhas é que a fornalha com radiador necessita de uma bomba hidráulica (1/3 cv) e um depósito isolado para água quente. Em ambas as fornalhas, deve-se providenciar um depósito aberto à pressão atmosférica para compensar a dilatação da água. A Figura 209 mostra o arranjo do conjunto metálico para a fornalha com aquecimento do ar por radiador.

Tanto a fornalha com trocador de calor quanto aquela com radiador devem ser construídas em alvenaria de tijolos e, se possível, travadas com cantoneiras de aço (5 x 0,5), para a devida proteção do sistema.

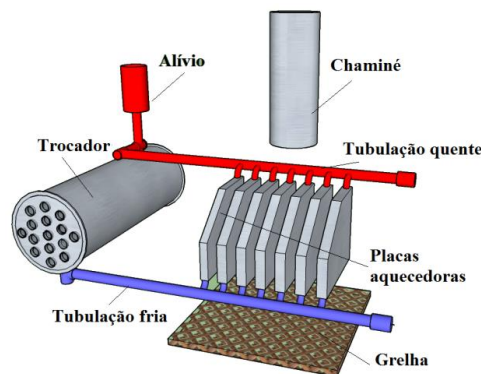


Figura 207 - Conjunto aquecedor e trocador de calor para a fornalha da Figura 202.



Figura 208 - Radiador com sistema de proteção usado para transferência de calor para o fluido frio, para a fornalha da Figura 203.

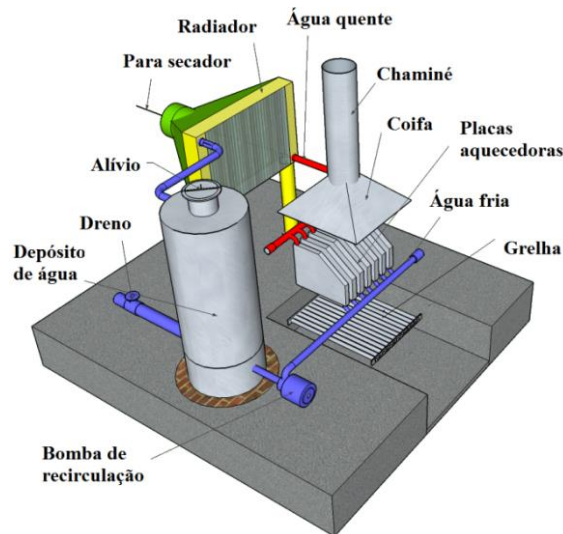


Figura 209 - Detalhes do arranjo do conjunto metálico para a fornalha com radiador, segundo vista geral na Figura 203.

6.6. Fornalhas com Aquecimento Direto para Secagem

Nas fornalhas com sistema de aquecimento direto, a energia térmica proveniente dos gases resultantes da combustão é utilizada diretamente com o ar ambiente para o processo de secagem de produtos agrícolas. A mistura de parte do gás comburente com os gases resultantes da combustão pode se tornar indesejável nos casos em que o processo de combustão é incompleto, gerando compostos contaminantes, como o monóxido de carbono e a fumaça.

Com o aproveitamento direto da energia térmica dos gases da combustão, as fornalhas de aquecimento direto, quando bem projetadas e sob combustão completa, apresentam maior rendimento. Entretanto, nestas fornalhas precisa ser acoplado um decantador tangencial ou ciclone, onde as partículas incandescentes, formadas principalmente de carbono, entram em movimento espiral e são separadas do fluxo gasoso pela ação da força centrífuga.

As fornalhas de aquecimento direto podem ser classificadas, de acordo com o fluxo de gases provenientes da combustão, em fornalhas de fluxo ascendente e fornalha de fluxo descendente. No primeiro caso, a substância comburente entra na parte inferior da câmara de combustão, atravessa a grelha, entrando em contato com o combustível, e

se mistura aos gases voláteis. Esse movimento dos gases no interior da fornalha é na forma ascendente. No segundo caso, a substância comburente entra na parte superior da fornalha, entra em contato com o combustível, atravessa a grelha e, misturando-se com os gases voláteis, forma um fluxo descendente no interior da fornalha. Nesse caso, a chama resultante da oxidação dos gases voláteis é formada sob a grelha.

A câmara de combustão nas fornalhas de aquecimento direto confunde-se com a própria fornalha e pode ser dividida em três partes distintas: a primeira destina-se à carga, à ignição do combustível e à entrada do ar comburente; a segunda compreende o espaço onde se desenvolve a chama e onde se completa a combustão dos compostos voláteis; e, finalmente, a terceira parte da fornalha tem a função de interligar a fornalha ao ciclone e de aumentar o tempo de permanência dos gases na fornalha.

Neste manual serão descritos dois tipos de fornalhas que podem ser construídas com diferentes materiais. Recomenda-se, no entanto, o material mais comum ou facilmente encontrado nas proximidades da propriedade agrícola, pois, com esse procedimento, o custo da construção ou adaptação ficará bastante reduzido.

Nos dois tipos de fornalha de aquecimento direto, os gases de combustão são misturados com o ar ambiente e succionados pelo ventilador e injetados diretamente na massa de grãos (Figuras 210 e 211).



Figura 210 - Fornalha a lenha com aquecimento direto e combustão paralela descendente.



Figura 211 - Fornalha a carvão vegetal com aquecimento direto e combustão em fluxos cruzados.

Caso o secador não possua um sistema seguro que possa succionar a mistura de gases e ar através da fornalha, os modelos propostos e que serão detalhados a seguir não poderão ser usados; nesse caso, deve-se optar por outro tipo de fornalha.

A opção por aquecimento direto deve-se ao fato de não haver necessidade de construção de chaminés nem de trocadores de calor, elementos que tornam uma fornalha, com aquecimento indireto, termicamente ineficiente e mais cara.

O material usado na construção da fornalha a lenha (Figura 210) consiste basicamente de tijolos comuns, areia de barranco, cimento, terra, açúcar ou caldo de cana, cantoneiras, ferros de construção e um sistema de grelha refrigerada a água (Figura 213), e, para maior durabilidade, revestimento externo com chapas metálicas e, internamente, com tijolos refratários.

Para a construção da fornalha a carvão, o material usado consiste basicamente de tijolos, de um kit metálico a ser construído em serralheria, cimento, areia de barranco, terra, açúcar ou caldo de cana, melaço de cana, cantoneiras, ferros de construção e chapas metálicas nº 14. Apesar de esta fornalha poder ser construída quase toda em alvenaria, recomenda-se que o depósito para carvão e o revestimento externo sejam construídos em chapa metálica, como indicado na Figura 212.



Figura 212 - Fornalha a carvão vegetal com depósito de carvão em chapa metálica.

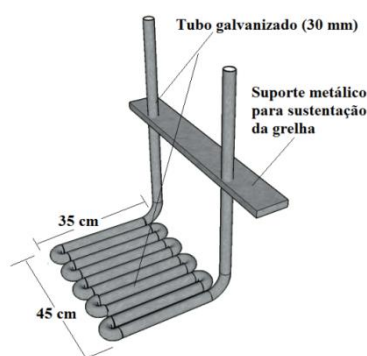


Figura 213 - Grelha tubular refrigerada a água.

Construção da fornalha com aquecimento direto

A construção da fornalha a lenha de combustão descendente, como mostrada na Figura 210 e que pode ser adaptada a qualquer secador com ventilador centrífugo, inicia-se com a marcação da projeção horizontal ou planta baixa da fornalha (Figura 214) no local onde será construída, devendo ser, preferencialmente, no ponto mais próximo à entrada de ar no ventilador do secador. Após a marcação da planta baixa,

inicia-se a montagem da fornalha pelo cinzeiro, que neste tipo de fornalha se confunde com a câmara de combustão (Figura 215). Caso a opção seja pelo revestimento interno em tijolos refratários, como mostrado na figura, deve-se ter o cuidado de ajustar bem os tijolos, para que não venha a se desmoronar com o uso da fornalha.

Assim que a altura do cinzeiro atingir 40 cm e as aberturas estiverem prontas e convenientemente acabadas, deve-se dar início ao assentamento dos tijolos comuns, para o perfeito isolamento da fornalha e início da construção do ciclone (Figura 216). Esses tijolos devem ser assentados com argamassa no traço 18:18:3, ou seja, 18 litros de areia, 18 litros de terra de formigueiro e 3 litros de açúcar. Para o revestimento final, deve-se adicionar 1 litro de cimento à argamassa de assentamento dos tijolos comuns. Deve-se lembrar de que o assentamento dos tijolos refratários exige argamassa apropriada e deve seguir as recomendações do fabricante.

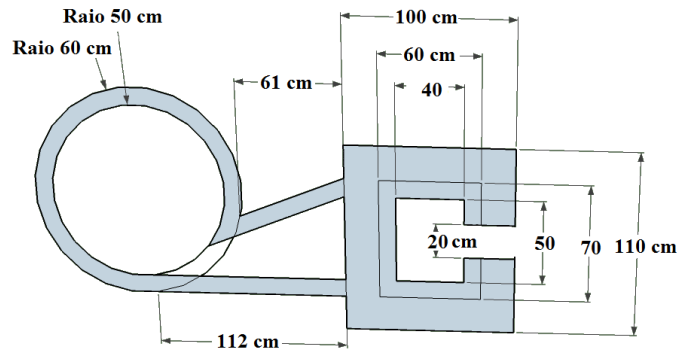


Figura 214 - Planta baixa da fornalha a lenha com combustão descendente.

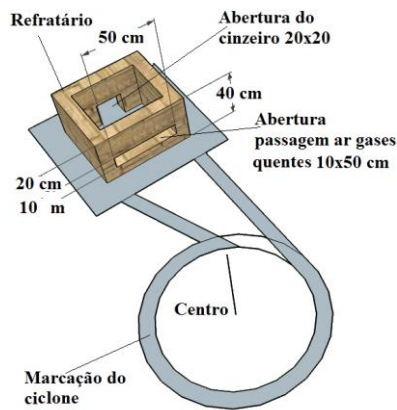
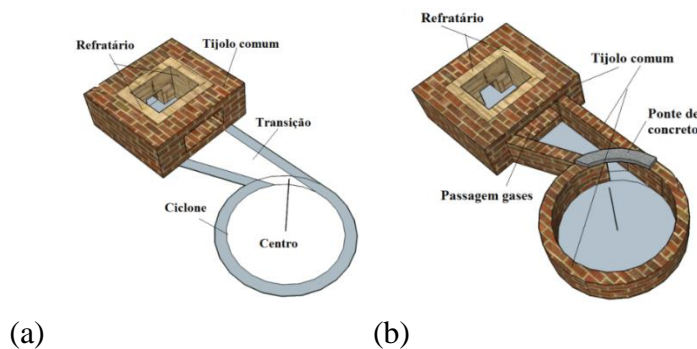


Figura 215 - Início da construção do cinzeiro, mostrando as aberturas de retirada das cinzas e saída dos gases quentes.



(a)

(b)

Figura 216 - Construção da base da fornalha, com detalhes do cinzeiro (a) e início do ciclone com elemento de transição ligando cinzeiro e ciclone (b).

A terceira fase da construção tem início com a construção da câmara de combustão e depósito do combustível, que também se confundem. Da mesma forma que o cinzeiro, a câmara de combustão deve ser construída com tijolos refratários (Figura 217) e revestida externamente com tijolos comuns. Após o respaldo da fornalha e do ciclone, deve-se providenciar o assentamento dos tijolos, para formação dos canais de entrada de ar frio. Deve-se ter o cuidado de assentar os tijolos tangencialmente, conforme mostrado na Figura 218a. É essa forma de assentamento tangencial que ajuda o ar frio a passar por uma fresta de aproximadamente 3 cm e formar o redemoinho, que evita que brasas ou fagulhas possam ser puxadas pelo ventilador.

Assim que forem assentados os tijolos, como na Figura 218a, deve-se adaptar uma laje circular com o mesmo diâmetro externo do ciclone e com um furo central de 30 cm de diâmetro (Figura 218b). A seguir, deve-se construir o canal que liga o ciclone ao ventilador, o que é feito com tijolos comuns, coberto com uma pequena laje retangular de 5 cm de espessura.

Como a fornalha pode fornecer gases com temperatura superior a 500 °C, devem-se providenciar registros no canal que liga o ciclone ao ventilador, para regular a temperatura do ar de secagem (Figura 219).

Finalmente, a Figura 220 mostra a estrutura completa da fornalha à lenha para aquecimento direto do ar com combustão descendente; devido a esse fato, a grelha fica localizada no ponto de temperatura mais elevada. Para evitar a fusão da grelha, ela foi confeccionada com tubos de aço e ligada a um tanque de água, para refrigeração por convecção natural.

A Figura 213 detalha o formato da grelha, que deve se encaixar, com pequena folga, dentro da câmara de combustão. Assim, a temperatura da tubulação fica relacionada à temperatura de ebulição da água.

Caso o cafeicultor opte pela produção de café cereja descascado, ele pode, com apenas uma fornalha, fornecer ar quente para dois secadores. O secador para o cereja descascado será por aquecimento indireto e, para o café natural, por aquecimento direto. Para isso, ele deve combinar a fornalha em estudo (Figura 220) com a fornalha representada na Figura 209. O resultado final será a fornalha mostrada na Figura 221.

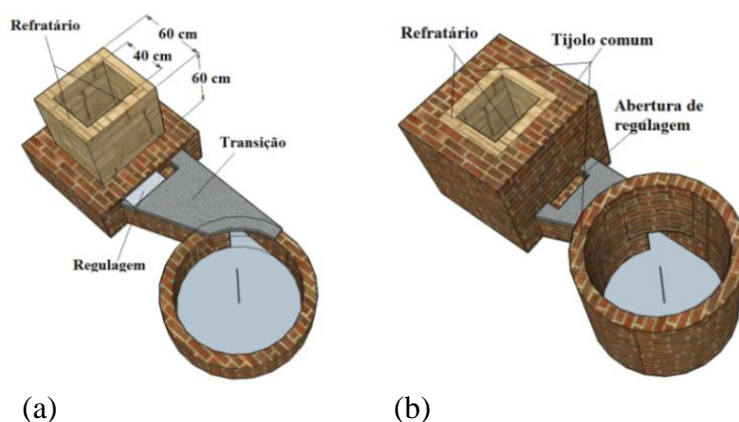


Figura 217 - Construção da câmara de combustão com refratário (a) e revestimento e construção do ciclone com tijolos comuns (b).

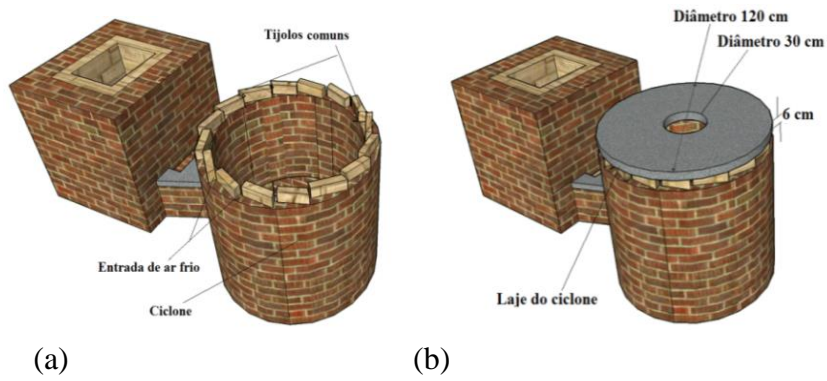


Figura 218 - Assentamento tangencial dos tijolos para entrada de ar frio (a) e montagem da laje para formar o ciclone (b).

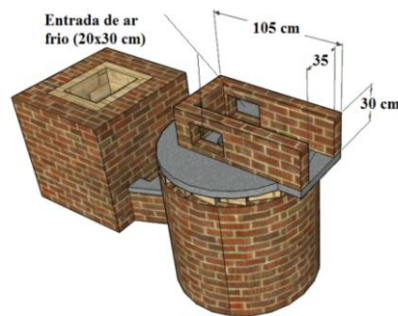


Figura 219 - Construção do canal que liga o ciclone ao ventilador.

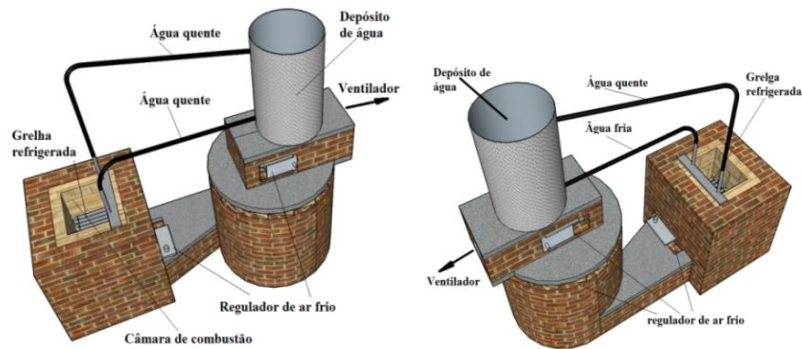


Figura 220 - Vista geral, por dois pontos de vista, da fornalha a lenha com aquecimento direto descendente.

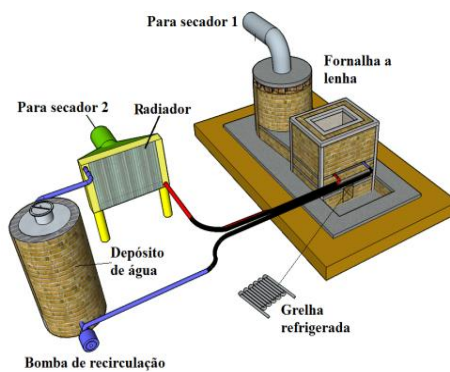


Figura 221 - Fornalha a lenha com aquecimento direto e indireto para secagem de café CD.

É muito importante a operação da fornalha para que se obtenham bons resultados. O operador deve, após a verificação de funcionamento e carregamento do secador, limpar a fornalha e verificar o sistema de refrigeração da grelha para dar início ao processo de ignição da lenha na câmara de combustão da fornalha. Essa operação deve ser iniciada pela colocação de uma fonte de ignição (estopa umedecida com gasolina ou álcool) sobre a grelha e, sobre a estopa acesa, alguns pedaços de graveto e lenha de menores dimensões. Assim que o fogo inicial estiver vigoroso, pode-se adicionar a lenha, que deve ser seca e ter o tamanho compatível com a boca da fornalha (entre 40 e 45 cm). Embora a fornalha possa queimar lenha úmida depois de iniciado o processo, a queima dessa lenha deve ser evitada por questão de rendimento térmico e contaminação do produto, com possível geração de cheiro de material estranho.

Desde a fase inicial e durante o processo de secagem, deve-se adicionar a lenha horizontalmente. Antes de ligar o sistema de ventilação do secador, recomenda-se esperar entre 10 e 15 minutos para que toda a primeira carga da fornalha esteja em combustão. Ao ligar o ventilador, a combustão deixa de ser ascendente e passa para o regime descendente ou de cima para baixo. Depois de regulada a temperatura de secagem, via registros de ar frio, deve-se manter a fornalha sempre carregada. O operador aprenderá, com a prática, o tempo necessário para adicionar um novo pedaço de lenha à fornalha para que não haja variação da temperatura.

Quanto ao funcionamento do ciclone e do processo de combustão, sugere-se ao leitor que verifique o item 6.7 (Funcionamento da fornalha a carvão vegetal); as duas fornalhas funcionam praticamente da mesma forma. A Figura 222 mostra dois tipos de secadores com aquecimento direto a lenha com a fornalha, anteriormente descrita.



Figura 222 - Secadores com adaptação da fornalha com lenha com combustão descendente.

Construção e operação da fornalha a carvão vegetal

Além do aquecimento do ar para a secagem de café e grãos em geral, outras atividades agrícolas também demandam energia térmica, como é o caso da avicultura, que não somente se destaca como grande consumidor de energia elétrica, por utilizar grande número de equipamentos eletromecânicos, mas também pelo elevado volume de gás liquefeito de petróleo (GLP) consumido no processo de calefação, sobretudo durante a fase inicial de produção, quando as aves necessitam de ambiente com temperatura próxima a 32 °C, em regime constante, que as fornalhas comuns não podem oferecer.

Assim, usar equipamentos para aquecimento do ar (Figura 211) que sejam eficientes, de baixo custo e que utilizem combustíveis alternativos com alimentação e

temperaturas constantes é importante para reduzir os custos em atividades produtivas no meio rural.

A fornalha para aquecimento de ar usando carvão vegetal ou briquetes de madeira foi projetada em módulos, para compor um kit de fácil transporte e montagem pelo usuário. Fazem parte do kit: base (módulo 1); cinzeiro (módulo 2); câmara de combustão (módulo 3); pré-aquecedor ou base da carvoeira (módulo 4); carvoeira (módulo 5); ciclone (módulo 6); e grelha (módulo 7). Fazem também parte do kit as formas para lajes e todas construídas em aço inox, preferencialmente, conforme detalhes mostrados, mais adiante, nas ilustrações que caracterizam a fornalha.

Como as outras fornalhas mostradas neste manual, a fornalha com aquecimento direto a carvão é ideal para um terreiro secador de 5 x 15 (Figura 79) ou para secadores de café comercialmente disponíveis no Brasil para até 18.000 litros de capacidade estática (Figura 222). Para aquecimento de aviários, sugere-se um redimensionamento da grelha e dimensionamento do sistema de ventilação.

Para a construção de um terreiro híbrido ou aquecedor de aviários, devem ser adquiridos também: ventilador, termômetros e calhas de distribuição de ar.

A montagem da fornalha consiste no revestimento interno de cada módulo com paredes de tijolos maciços (comuns) ou, preferencialmente, refratários (Figura 223). Caso queira evitar a compra do revestimento metálico, pode-se construir a fornalha apenas em alvenaria e seguindo as dimensões internas dos moldes metálicos. Nesse caso, a fornalha tomará a forma aproximada da Figura 212 e deve ser protegida por cantoneiras metálicas (5 x 5 x 0,3 cm), para maior durabilidade.



Figura 223 - Revestimento interno dos módulos que compõem a fornalha.

Os módulos, na sequência apresentada, deverão ser unidos por meio de parafusos (fornecidos com o kit) e separados, internamente, por meio das lajes de concreto, conforme Figuras 224, 225, 226, 227 e 228. A fornalha, propriamente dita, forma uma estrutura única com cinco módulos ou compartimentos (Figura 229). As lajes internas da fornalha, principalmente as da câmara de combustão e da base, devem ser confeccionadas em formas de aço inox 3 mm (pelo menos a laje da Figura 226), com armação de ferro de 3/16 polegadas, e concretadas no traço 1:3:3 (cimento, areia lavada e brita n°1).

Uma laje circular com uma abertura no centro, de 0,30 m de diâmetro, deve ser preparada à semelhança da Figura 218, para a construção do ciclone (Figura 228).

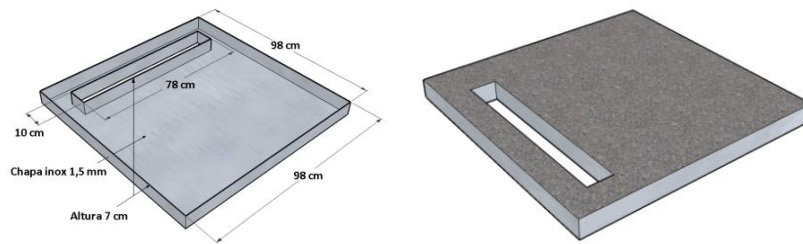


Figura 224 - Forma e laje concretada para separar a base e o cinzeiro da fornalha.

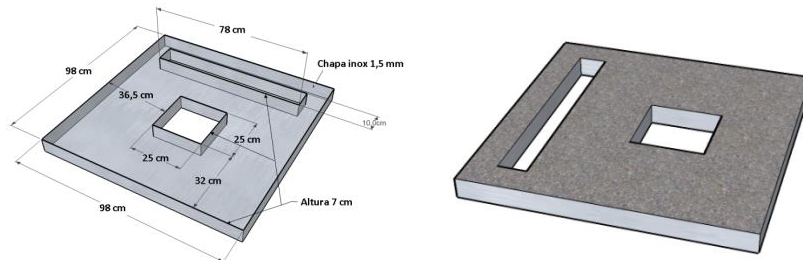


Figura 225 - Forma e laje concretada para separar o cinzeiro da câmara de combustão.

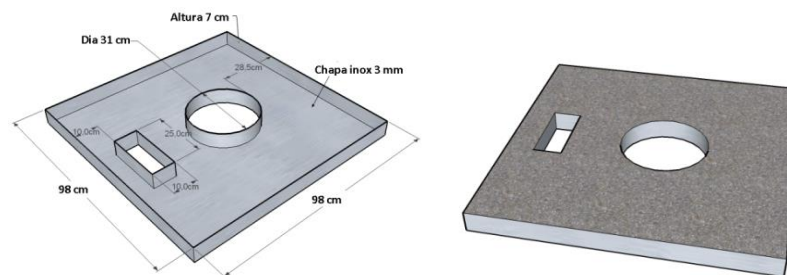


Figura 226 - Forma e laje concretada para separar a câmara do pré-aquecedor.

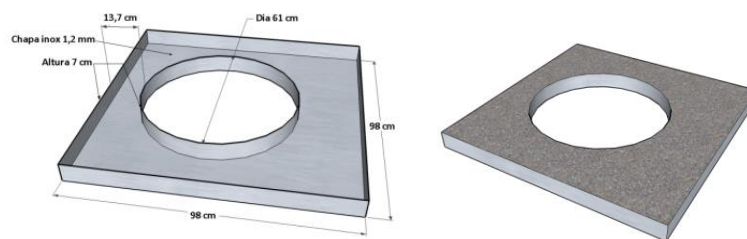


Figura 227 - Forma e laje concretada para fechar o pré-aquecedor.

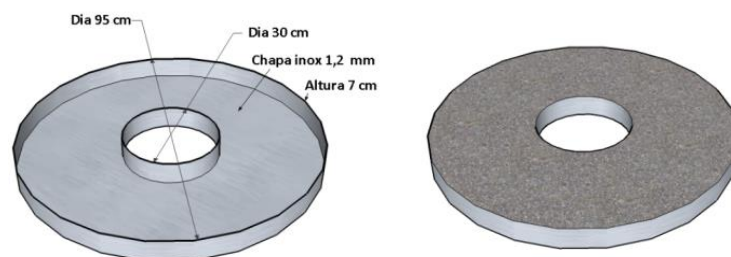


Figura 228 - Forma e laje concretada para construção do ciclone.

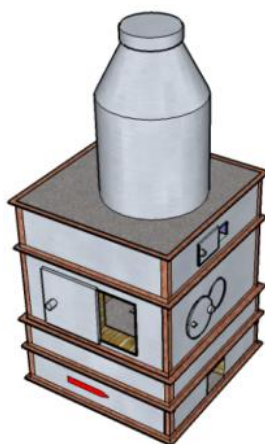


Figura 229 - Componentes básicos da fornalha a carvão vegetal ou briquetes.

A base da fornalha, com dimensões externas de 100 x 100 x 25 cm, é o primeiro compartimento a ser construído. Destina-se à complementação da combustão dos gases e à condução desses gases até a entrada do ciclone. A base da fornalha, denominada câmara inferior de combustão, possui dimensões suficientes para proporcionar a complementação da combustão dos gases. Nela foram colocadas duas aberturas: uma de 20 x 25 cm, para a saída dos gases da fornalha, e outra de 20 x 20 cm, oposta à primeira, para limpeza do compartimento (Figura 230). Após completar o revestimento interno (Figura 231), deve-se colocar a laje de separação e formar a base da fornalha (Figura 232).

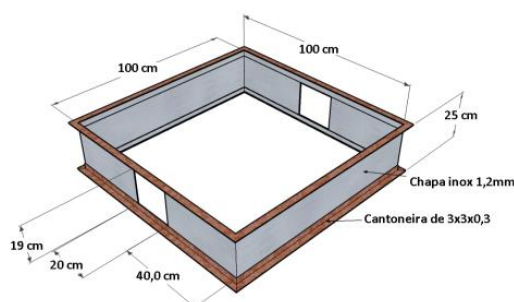


Figura 220 - Módulo 1 ou base metálica para a construção da câmara inferior da fornalha.

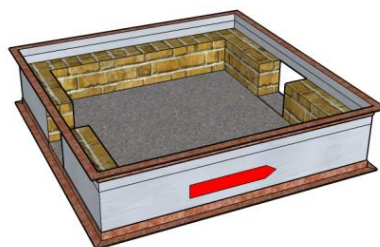


Figura 231 - Câmara inferior ou base da fornalha, mostrando o revestimento interno com tijolos comuns.

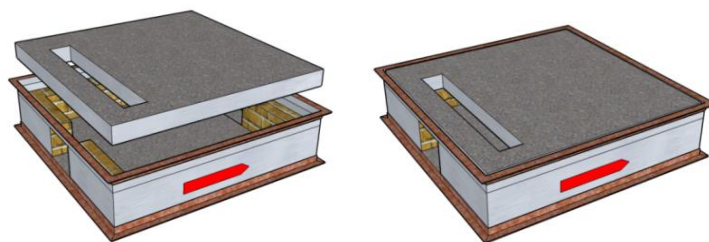


Figura 232 - Base da fornalha, recebendo a laje e pronta para receber o módulo cinzeiro.

O segundo compartimento (Figura 233), com dimensões externas de 100 x 100 x 20 cm, destina-se ao recolhimento das cinzas provenientes da combustão do carvão na célula de queima (grelha suspensa). As cinzas e pequenas brasas, ao deixarem a célula de queima, passam por uma abertura de 25 x 25 m, localizada na laje inferior da câmara de combustão (Figuras 233, 234 e 235), sendo depositadas no cinzeiro. Para retirada das cinzas, existe, em um dos lados desse compartimento, uma abertura de 14 x 20 cm. A Figura 236 mostra a colocação da laje superior do cinzeiro.



Figura 233 - Compartimento cinzeiro, onde é mostrada a abertura na laje da câmara de combustão por onde caem as cinzas.

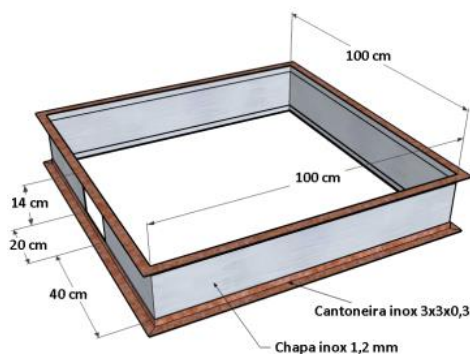


Figura 234 - Módulo 2 ou base metálica para a construção do cinzeiro (veja a abertura para retirada das cinzas).

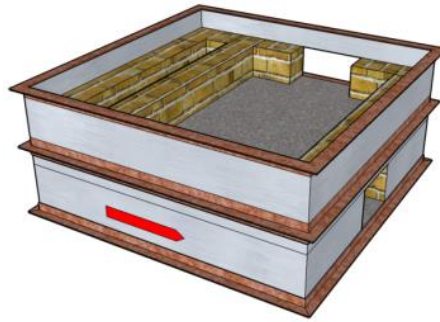


Figura 235 - Módulo 2 ou cinzeiro com detalhes do revestimento interno com tijolos e montado sobre o módulo 1 ou câmara inferior.

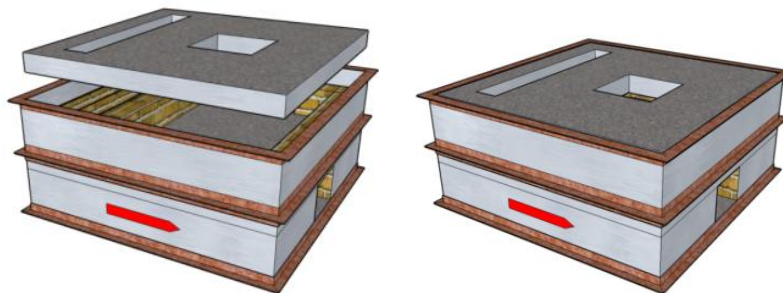


Figura 236 - Módulo 2 ou cinzeiro, recebendo a laje e pronto para receber o módulo 3 ou câmara de combustão primária.

O terceiro compartimento (Figura 237), com dimensões externas de 100 x 100 x 50 cm, é a câmara de combustão primária (Figuras 238 e 239). Nela é colocada a célula de queima, que recebe, por gravidade, o carvão contido no depósito situado acima da câmara de combustão. O depósito de carvão é encaixado na abertura da laje superior à câmara de combustão primária (Figura 237).

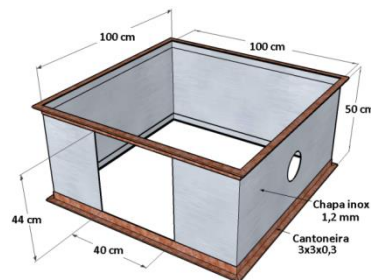


Figura 237 - Módulo 3 (veja a abertura para acesso à grelha e para acender a fornalha).

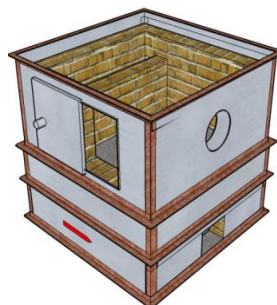


Figura 238 - Módulo 3 ou câmara de combustão, com detalhes do revestimento interno com tijolos e montado sobre o módulo 2 ou cinzeiro.

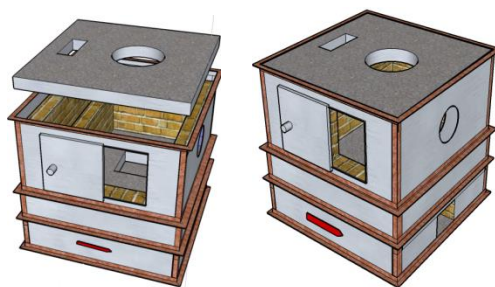


Figura 239 - Módulo 3 ou câmara de combustão, recebendo a laje e pronto para receber o módulo 4 ou câmara de resfriamento da base do depósito de carvão.

A câmara de combustão primária e a base da fornalha deveriam ser revestidas, internamente, com tijolos refratários.

Na câmara de combustão existem duas aberturas (Figura 237 – módulo 3): uma para acesso à grelha e outra destinada à entrada de ar primário ou comburente.

Para a regulação do ar primário na câmara de combustão, pode ser colocado, na abertura de saída dos gases da fornalha ou na entrada do ciclone, um registro. Com isso, evita-se alterar a área de entrada de ar comburente na câmara de combustão.

O quarto compartimento (Figura 240), com dimensões externas de 100 x 100 x 30 cm, é o módulo superior ou de resfriamento da base do depósito de combustível, é construído com os objetivos de reduzir as perdas de calor através da laje superior da câmara de combustão e resfriar a base do depósito de carvão, fazendo o pré-aquecimento de parte do ar primário (Figuras 241 e 242). Acoplado ao módulo de resfriamento encontra-se o depósito de carvão e a grelha suspensa para a queima do combustível (Figura 243). A parte inferior do depósito de carvão comunica-se com a câmara de combustão por meio de uma abertura com 30 cm de diâmetro, situada na laje superior da câmara de combustão. Depois de acoplado o depósito de carvão, a fornalha, propriamente dita, fica com a configuração mostrada na Figura 244.

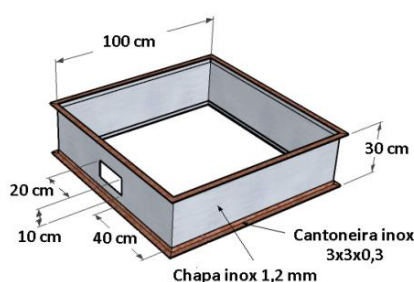


Figura 240 - Módulo 4 ou base metálica para a construção da câmara de resfriamento (veja a abertura para entrada de parte do ar primário).

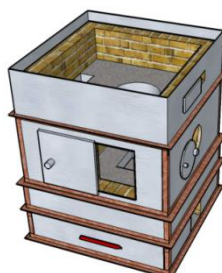


Figura 241 - Módulo 4 ou câmara de resfriamento, com detalhes do revestimento interno com tijolos e montado sobre o módulo 3.



Figura 242 - Módulo 3 ou câmara de combustão recebendo a laje e pronto para receber o módulo 4.

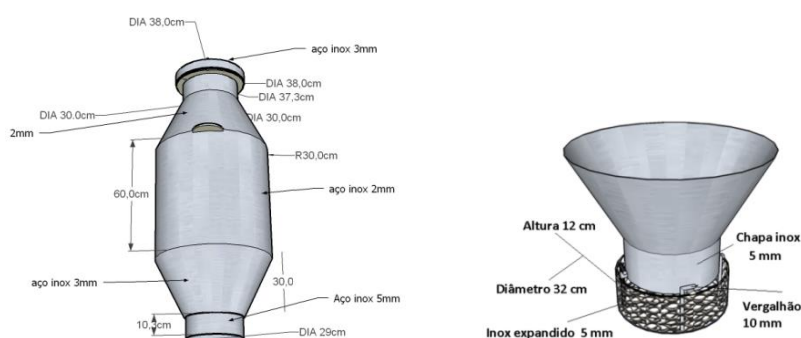


Figura 243 - Depósito de carvão ou briquete e detalhe da grelha suspensa e removível.



Figura 244 - Configuração da fornalha com os cinco módulos montados e parafusados e detalhes da câmara de combustão com a grelha acoplada à carvoeira.

Detalhes do ciclone

O ciclone ou decantador de fagulhas foi dimensionado segundo as recomendações de Lopes (2000) e, pelo fato de o ciclone trabalhar com pressão negativa, impôs-se que as entradas de gases e de ar ambiente seriam tangenciais à parede do ciclone em sua parte inferior e superior, respectivamente. Já a saída da mistura seria pela abertura central da laje do ciclone, via duto de conexão que liga ao ventilador (Figura 245).

Para facilitar a construção do ciclone, deve-se usar o componente interno fornecido em chapa metálica, como ilustrado na Figura 246. O componente interno do ciclone possui duas aberturas na base: uma para a entrada tangencial dos gases

provenientes da fornalha e outra para inspeção e limpeza. Um registro pode ser instalado para regular, caso necessário, a velocidade dos gases na entrada do ciclone (Figura 244). O ciclone pode, também, ser construído como o estabelecido para a fornalha a lenha (Figura 218).

Para evitar perdas de calor e acidentes devido às altas temperaturas no componente metálico do ciclone, ele deve ser revestido, externamente, com tijolos comuns, conforme mostrado nas Figuras 245 e 247.

Sobre as paredes do ciclone constroem-se 10 a 12 aberturas tangenciais, feitas com tijolos. Para facilitar o trabalho de montagem, esse componente (Figura 248) pode ser fornecido pelo fabricante e tem a finalidade de auxiliar na decantação das fagulhas e possibilitar a entrada de ar frio e sua mistura aos gases quentes.



Figura 245 - Detalhes da fornalha com ciclone e duto de ligação com o ventilador

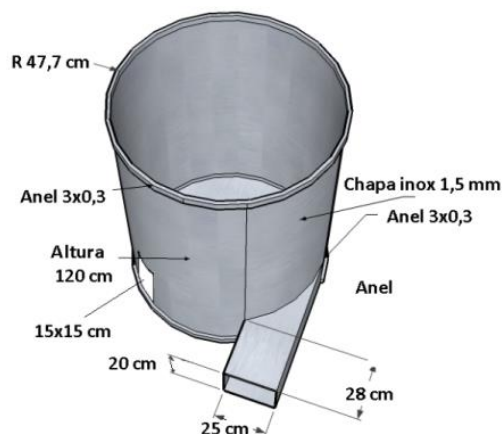


Figura 246 - Detalhes internos do ciclone com entrada tangencial inferior e porta de limpeza.



Figura 247 - Construção do ciclone, mostrando a forma metálica para facilitar o assentamento e alinhamento dos tijolos e a formação da coroa com aberturas tangenciais para entrada de ar.

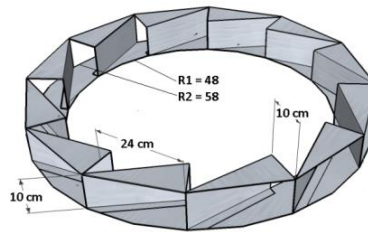


Figura 248 - Coroa metálica para auxiliar na montagem do ciclone (pode ser substituída por tijolos comuns).

Uma laje circular, com abertura central de 0,30 m de diâmetro (Figuras 228 e 245), deve ser colocada sobre o ciclone. Finalmente, um duto, com dimensões apropriadas, deve ligar o ciclone ao secador ou ao sistema de ventilação para aquecimento de ambientes (Figuras 243 e 247). Na transição entre o ciclone e o elemento a ser aquecido, deve-se adaptar um registro para controlar a entrada de ar frio e, conseqüentemente, a temperatura de trabalho (Figuras 245 e 249).

Para interligar o ciclone ao ventilador, pode-se, também, construir um duto de alvenaria com uma ou duas aberturas laterais para regular a entrada de ar frio (ambiente), como na Figura 249.



Figura 249 - Corte longitudinal da fornalha, mostrando a opção por construir um duto (30 x 30 cm) em alvenaria para ligar o ciclone ao ventilador.

Funcionamento da fornalha a carvão vegetal

O funcionamento da fornalha tem início com o escorvamento do carvão no interior da célula de queima ou grelha suspensa, após o abastecimento do depósito de combustível, cuja capacidade é de aproximadamente 75 kg de carvão e suficiente para trabalhar sem abastecimento por até dez horas.

A grande vantagem da fornalha reside no fato de fornecer o ar quente com pouca variação de temperatura. A elevação ou abaixamento de temperatura é função direta das variações ambientais. Portanto, quase não há necessidade de regulação de temperatura durante o decorrer do dia. Caso seja necessário um valor constante, durante todo o período, pode-se adaptar um sistema automático para regular a entrada de ar comburente.

O material sólido (carvão ou briquete) proveniente do depósito de combustível alimenta continuamente, por gravidade, a célula de queima situada na câmara de combustão. Um registro manual, localizado na saída dos gases da fornalha, controla a entrada de ar comburente na câmara de combustão, permitindo que quantidades maiores ou menores de ar sejam admitidas. À medida que o combustível vai se deslocando para a parte inferior do depósito, a temperatura na sua superfície vai se elevando até atingir, na célula de queima, a temperatura de ignição.

O oxigênio do ar, ao passar pela grelha suspensa (zona de reação), entra em contato com o combustível sólido, desencadeando as reações de oxidação do combustível, gerando maior ou menor quantidade de calor, de acordo com a quantidade de ar comburente admitida.

As cinzas resultantes da combustão descem continuamente, por gravidade, para o compartimento do cinzeiro, localizado abaixo da câmara de combustão. Pequenas brasas, que atravessam a malha da grelha, completam a combustão no cinzeiro (Figura 250).



Figura 250 - Detalhe do interior do cinzeiro, mostrando a complementação da combustão.

Os gases da combustão (Figura 251) são conduzidos até o ciclone pela diferença de pressão estabelecida pelo ventilador entre os pontos de entrada e de saída dos fluidos gasosos no interior da fornalha. Os gases, ao entrarem tangencialmente no ciclone, adquirem trajetória em espiral, fazendo com que as partículas, pela ação da força centrífuga, colidam contra a parede do cilindro, perdendo velocidade, decorrente do atrito, e favorecendo sua decantação. Simultaneamente, os gases, em movimento espiralado, são succionados para cima, pela parte central do ciclone (Figura 252).



Figura 251 - Detalhes da combustão na grelha e coloração das chamas.

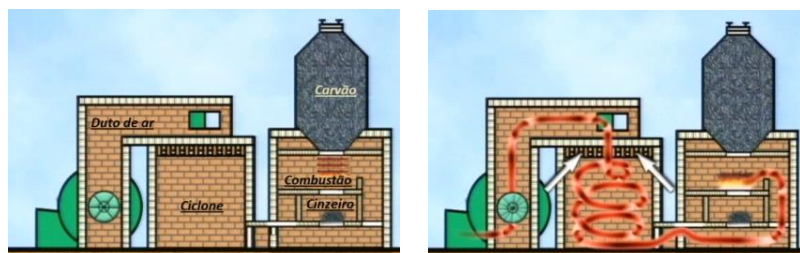


Figura 252 - Corte longitudinal da fornalha, mostrando seus componentes e trajetória dos gases de combustão.

Devido ao movimento em espiral, partículas incandescentes são apagadas durante sua trajetória no interior do ciclone (Figura 253). Aberturas laterais, situadas no duto de ligação entre o ciclone e o ventilador, permitem a mistura do ar ambiente com os gases quentes, provenientes da fornalha, cuja temperatura é indicada por um termômetro instalado na saída do ventilador. O ventilador, após succionar a mistura dos gases da combustão e do ar ambiente, fornece uma vazão de ar aquecido, propício à secagem de produtos agrícolas ou para aquecimento de ambiente. O fluxo de gases no interior da fornalha é ilustrado na Figura 252.



Figura 253 - Detalhe do ciclone, mostrando o movimento dos gases em seu interior.

6.7. Fornalha de Aquecimento Misto com Abastecimento Diário

A qualidade do ar de secagem influencia sobremaneira a qualidade do café descascado ou despulpado durante a secagem. O café, nessas condições, apresenta-se sensível a altas temperaturas e a contaminantes presentes no ar de secagem, razão pela qual comumente utilizam-se fornalhas com aquecimento indireto do ar de secagem. Tem-se observado, no geral, que as fornalhas a lenha utilizadas na secagem de café apresentam excessivas perdas de calor, consomem grande quantidade de combustível, não dispõem de mecanismo de controle do processo de combustão e, na maioria das vezes, são operadas inadequadamente.

Uma das maiores dificuldades de se trabalhar com as fornalhas tradicionais, para secagem do café, está relacionada ao sistema de alimentação (tipo de combustível e a forma de abastecimento). Muitos cafeicultores desistem de usar a lenha como combustível, alegando que o custo da mão de obra para preparar a lenha e alimentar a fornalha fica muito elevado. Para resolver esse problema, começaram a utilizar fornalhas com alimentação automática, tendo como combustível a palha do café. Infelizmente, essa prática vem sendo disseminada com grande intensidade nas cafeiculturas das Matas de Minas e Serra do Espírito Santo.

Além de estar queimando um produto de alto valor para a manutenção da qualidade do solo, são usadas fornalhas ineficientes e que causam grande poluição tanto no campo como nas comunidades próximas às fazendas de café (Figura 254). Além de prejudicar a relação campo e comunidades, há relatos de acidentes automobilísticos causados pelo excesso de fumaça gerada pela secagem do café; a atividade vem sendo proibida em determinados horários em alguns municípios, e algumas unidades foram lacradas por ordem do Ministério Público.

Além desses aspectos, a palha de café já deveria ter sido completamente banida dos sistemas de secagem. Uma tonelada de palha de café equivale, entre outros produtos, a 37 kg de cloreto de potássio.



Figura 254 - Vista da intensidade de poluição em uma fazenda que utiliza fornalhas alimentadas com palha de café.

Para mitigar esse problema, deveria ser obrigatória a utilização de uma fornalha a lenha (cultivada ou da recepa do café) de custo compatível, que não gere fumaça, que use o mínimo de mão de obra, tenha controle de temperatura e com opção para operação em aquecimento indireto e aquecimento misto. As duas modalidades de operação permitirão ao cafeicultor utilizar o mesmo sistema de secagem tanto para o café em casca, quando a fornalha for operada com aquecimento misto, quanto para o café descascado ou despulpado, quando for operada com aquecimento indireto.

Preocupados com os problemas citados, os autores estão disponibilizando tecnologia alternativa que possa minimizar todos os problemas apontados com o uso de fornalhas de alto custo, ineficientes e poluidoras. Para atender esses objetivos, testes preliminares, realizados no Sítio Santa Luzia (São Geraldo-MG), mostram que o modelo descrito a seguir tem facilidade de carga, facilidade do controle da combustão e da manutenção da temperatura do ar de secagem, podendo ser usado para aquecimento indireto e misto, com carga para até 10 horas de funcionamento, e durante a queima da lenha para secagem é possível, usando o núcleo de carbonização, produzir carvão vegetal para uso em fornalhas a carvão do tipo descrito no item 6.6.2 e mostrado na Figura 245. Apesar dessas vantagens, o uso do carvão produzido pela fornalha em pauta para a secagem de grãos pode ser menos vantajoso que a venda de carvão para churrascaria ou outros fins. Caso contrário, a própria fornalha permite a queima do carvão produzido com um simples manejo no processo de queima.

Em outras palavras, pode-se dizer que, quando for usado o núcleo de carbonização, o cafeicultor poderá produzir carvão vegetal durante o processo de secagem e obter rendimento financeiro, adicional, durante o processo. Tal procedimento permitirá o uso racional da energia na secagem e a garantia da qualidade do ar necessária para obtenção de um produto de qualidade e produção de carvão. Também, durante a entressafra a fornalha (Figura 255) poderá ser usada para produção de carvão vegetal de modo simples e ecologicamente correto.

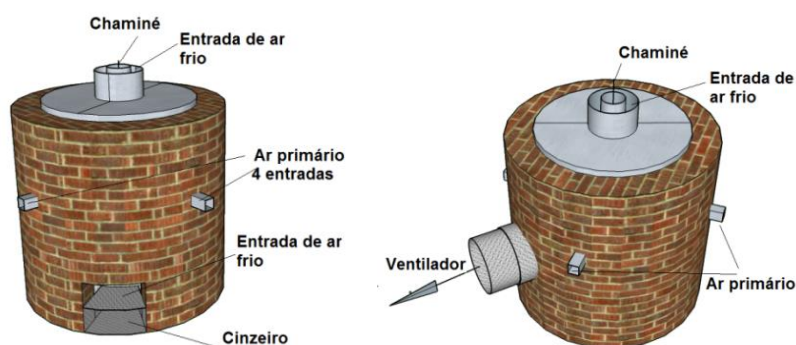


Figura 255 - Fornalha a lenha, sem fumaça, para secagem com aquecimento indireto e misto.

Descrição da Fornalha

O sistema (fornalha sem fumaça) com câmara de combustão contendo um núcleo de carbonização é acoplado a um trocador de calor isolado por um cilindro em alvenaria, e um trocador alternativo (via chaminé) deve ser ligado ao secador por intermédio do ventilador do secador. O sistema é (via dimensionamento) compatível com a capacidade de secagem dos secadores comumente utilizados na secagem do café. A fornalha em pautas, diferente das encontradas no mercado, é moderna, ecológica, prática, eficiente, com abastecimento para até 12 horas e rápida na produção de carvão com o núcleo de carbonização. O projeto, como os anteriores, pode ser construído em oficinas modestas e próximo aos cafeicultores, e o carvão produzido (opcional) pode ser vendido para aumentar a renda do cafeicultor. Como é um material de boa qualidade, reúne uma série de vantagens sobre a lenha no abastecimento de fornalhas especiais para esse combustível, o que o torna propício à utilização em fornalhas com aquecimento direto para a secagem de produtos agrícolas, uma vez que, por ser um combustível oriundo da pirólise da madeira, todos os compostos nocivos entraram em combustão, ao saírem do núcleo de carbonização. Na exaustão, pelo sistema de câmara de combustão descendente, eliminará somente vapor d'água, gás carbônico e calor, que poderão ser misturados ao ar ambiente e usados em aquecimento misto do ar de secagem (direto e indireto).

Os autores acreditam que uma das principais vantagens da fornalha em pautas é, por ocasião da entressafra, produzir carvão de maneira ecologicamente recomendável e eliminando o primitivo processo, via forno rabo quente, com demanda de tempo e mão de obra e contaminando o meio ambiente.

Assim, para obtenção de um produto de qualidade e sem poluição do meio ambiente, é necessário assegurar a qualidade do ar de secagem, o que requer uma fonte limpa de energia ou fornalhas dotadas de trocadores de calor com queimadores ou filtros de alto custo para evitar a poluição com fumaça. Alguns combustíveis, como o gás natural e o GLP, atendem a esse requisito. Entretanto, para a maioria das propriedades rurais, o custo com o transporte, a garantia de fornecimento e a incerteza sobre os preços requerem desta opção maiores estudos. A energia da biomassa, principalmente as provenientes da lenha e do carvão vegetal, originadas de reflorestamento ou da receita do café, e de resíduos agrícolas, constituem as opções energéticas mais indicadas para os pequenos e médios produtores de café, por se tratar de matérias-primas presentes nas propriedades.

A produção de carvão vegetal tem sido questionada por vários segmentos da sociedade, por promover o desmatamento, explorar mão de obra infantil, ser insalubre e poluir o meio ambiente. De fato, não podemos sugerir um combustível produzido nessas condições para a secagem de um produto como o café e de nenhum outro produto agrícola nacional. Entretanto, pretende-se mostrar que é possível obter carvão ecologicamente correto sem agressão ao meio ambiente e com resíduos agrícolas oriundos da própria lavoura de café.

O projeto em pauta é uma nova concepção de fôrnalha, a lenha, sem fumaça dotada de um núcleo de carbonização. A fôrnalha com opção para produção de carvão, também sem fumaça, pode ser construída e operada junto ao secador, para aproveitar o calor limpo gerado durante a carbonização. Caso o agricultor opte por produzir mais carvão durante a entressafra, outras fôrnalhas poderão ser construídas para esse fim. Uma fôrnalha para secadores comuns de 10.000 a 15.000 litros de capacidade estática pode, com carga única, gerar calor para o secador durante 10 a 12 horas continuamente e, ao final, produzir carvão de excelente qualidade, sem os graves inconvenientes ocasionados pelos sistemas convencionais, como subutilização da biomassa lenhosa, contaminação do operador e do meio ambiente por elementos altamente prejudiciais à saúde presentes na fumaça, esforços físicos desnecessários, carbonização incompleta pela ausência de controle do processo, baixo rendimento gravimétrico, etc.

Como é um projeto simples, de fácil construção, as indústrias de pequeno porte teriam melhores condições de atender ao segmento da pequena e média cafeicultura, por não requererem equipamentos sofisticados para a produção de qualquer das fôrnalhas aqui apresentadas. Assim, necessário se faz o estudo da viabilidade técnica e econômica do sistema de aquecimento proposto, que pode atender a uma faixa maior de produtores e sua difusão junto aos fabricantes de equipamentos para melhoria da qualidade do café.

Como já existe um modelo de fôrnalha eficiente, com autocontrole de temperatura, não poluidor e que usa carvão vegetal como combustível, a nova fôrnalha a lenha poderia atender a um secador e fornecer carvão vegetal (ecologicamente produzido), que pode, também, ser usado para aquecer outros secadores; o sistema passaria a ser, também, usado pela grande cafeicultura.

Componentes da Fôrnalha

A fôrnalha para aquecimento de ar usando lenha e sem produção de fumaça, como a fôrnalha a carvão vegetal, foi também projetada em módulos para compor um kit de fácil transporte e montagem pelo usuário. Fazem parte do kit: núcleo de carbonização opcional (módulo 1); câmara de combustão com cinzeiro e grelha (módulo 2); coifa e tampa coifa com entrada de ar frio (módulo 3); chaminé removível (módulo 4); entrada de ar frio (módulo 5); e saída para o ventilador (módulo 6). Os outros componentes, como base e isolamento em alvenaria, completam a fôrnalha e devem ser construídos durante a montagem dela.

Como não é função deste manual fazer o dimensionamento de fôrnalhas, serão mostradas de agora em diante as dimensões de uma fôrnalha que se adapta ao terreiro híbrido (Figura 62) ou ao secador de camada fixa (Figura 85).

Módulo 1 – Núcleo de carbonização: é um módulo opcional, ou seja, só será utilizado se for desejo do cafeicultor produzir um pouco de carvão vegetal. Consta de um cilindro metálico (chapa de 2 mm) com 60 cm de diâmetro e 80 cm de altura; o fundo deve ter uns cinco a seis furos, feitos com broca de 10 mm, para a saída dos gases de

carbonização, e deve ficar apoiado sobre a base de alvenaria. O fundo pode, também, ser substituído por um fundo removível e com travas e saída para os gases; a parte superior pode ser fechada e dotada de gancho, para facilitar a remoção do núcleo da câmara de combustão (Figura 256). Caso se queira fazer carvão eventualmente, o núcleo pode ser substituído por um tambor metálico de 200 litros, com tampa apresilhada, muito usado para sucos de laranja.

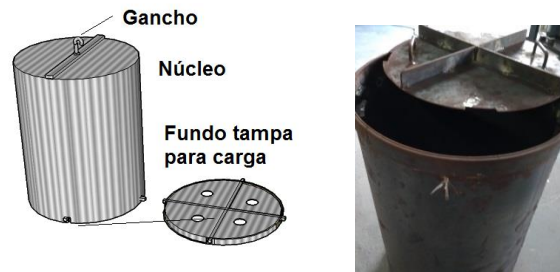


Figura 256 - Módulo 1 ou núcleo de carbonização.

Módulo 2 – Câmara de combustão com cinzeiro e grelha: a câmara de combustão consta de um cilindro metálico em chapa de 3 mm, com 1,0 m de altura, 0,80 m de diâmetro e reforçado, nas extremidades, por cantoneiras de 30 x 30 x 3 mm, possuindo quatro entradas (7 x 7 cm), reguláveis, para o ar primário. Caso não se queira o núcleo de carbonização, a câmara de combustão deve ser simplesmente apoiada no cinzeiro com grelha (Figura 257). A câmara de combustão deve ser alimentada, preferencialmente, com lenha de diâmetro máximo de 10 cm e altura de 1,0 m quando trabalhar com o núcleo de carbonização, que, por sua vez, deve ser carregado com lenha de, no máximo, 20 cm de comprimento, para facilitar a carbonização. Na Figura 258 é visto o núcleo de carbonização aberto e carregado com pequenas toras de eucalipto, fechado, após carbonização e mostrando a produção em carvão. Deve-se lembrar que os gases saídos do núcleo de carbonização são queimados na câmara de combustão e usados no aquecimento do conjunto e que, devido à elevada temperatura da câmara de combustão, o tambor tem duração limitada a dez carregamentos. Portanto, o uso do tambor deve ser baseado em uma análise dos custos de um tambor comum e de um núcleo fabricado com material apropriado ou, preferencialmente, em chapa inox de 2 mm.

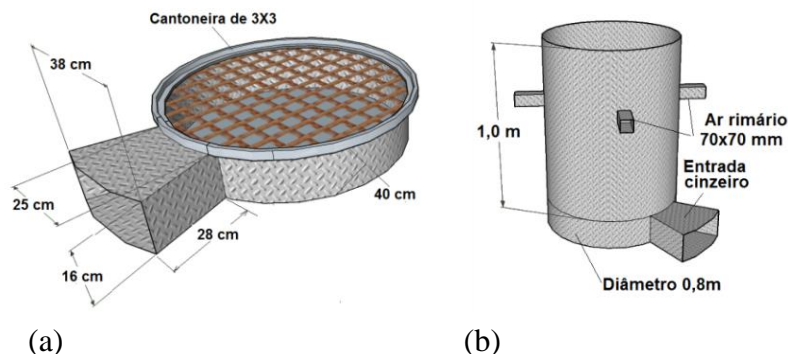


Figura 257 - Cinzeiro com grelha (a) e câmara de combustão sobre o cinzeiro (b).



Figura 258 - Detalhes do carregamento até a produção do núcleo de carbonização.

Módulo 3 – Coifa e tampa com entrada de ar frio: a coifa (Figura 259a) tem a finalidade de fechar a câmara de combustão e dirigir os gases quentes, originados da combustão da lenha e do núcleo de carbonização (opcional), para a chaminé móvel, no caso de aquecimento indireto, ou para ser misturado com o ar ambiente para aquecimento misto, o que dá, ao conjunto, maior rendimento térmico. Já a tampa com entrada de ar frio (Figura 259b,c) tem a função de dirigir o ar ambiente para ser aquecido com o calor transferido pela coifa (aquecimento indireto) e com os gases da combustão (aquecimento misto).

Módulo 4 – Chaminé removível: a chaminé removível (Figura 259d) tem a função de acelerar o início da combustão e permitir que a fornalha trabalhe em regime de aquecimento indireto. Depois de 30 a 60 minutos de funcionamento, a chaminé pode ser removida para trabalhar em regime de aquecimento misto. Neste caso, o ventilador vai puxar o ar ambiente e os gases que saem pelo pescoço da coifa, onde é acoplada a chaminé.

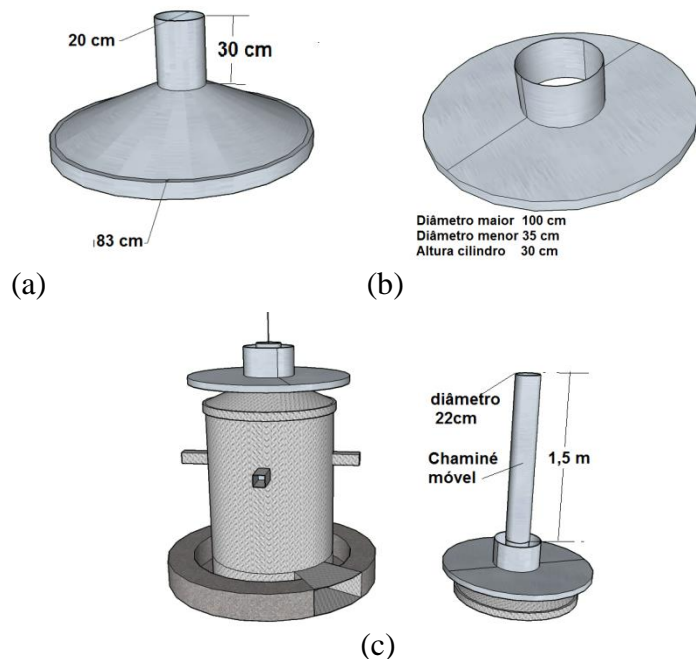


Figura 259 - Coifa (a), tampa com entrada de ar frio (b) e detalhe do conjunto metálico (c).

Módulo 5 – Entrada de ar frio inferior: a entrada de ar frio inferior deve possuir uma porta regulável para entrada e aquecimento do ar ambiente e tem a mesma finalidade do “módulo 3”. Essa entrada deve ser aberta depois que a fornalha já tiver trabalhado por algumas horas. A entrada de ar frio deve ser regulada de tal forma que não permita que a temperatura de combustão abaixe dos 350 °C. As dimensões da entrada de ar frio

inferior são as mesmas da entrada do cinzeiro (Figura 257a), tendo a profundidade igual à parede externa da fornalha (Figura 255).

Módulo 6 – Saída para o ventilador: este módulo deve ser adaptado no meio da parede da fornalha e em posição oposta ao cinzeiro e entrada de ar frio inferior. Com esse procedimento, pode-se equilibrar os fluxos de ar frio inferior (módulo 5) e superior (módulo 3).

Finalmente, a fornalha deve ser montada sobre uma base (Figura 260) de concreto ou em alvenaria, de modo a facilitar a montagem dos módulos, carregamento, retirada do núcleo de carbonização (opcional) e limpeza da fornalha. Como mencionado, a câmara de combustão deve ser alimentada, preferencialmente, com lenha de diâmetro aproximado de 10 cm e altura de 1,0 m quando trabalhar com o núcleo de carbonização, que, por sua vez, deve ser carregado com lenha de, no máximo, 20 cm de comprimento, para facilitar a carbonização (Figura 258).

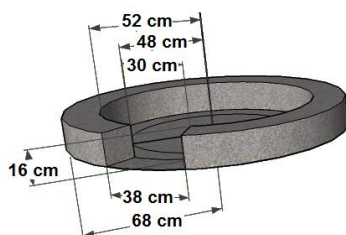


Figura 260 - Base da fornalha com abertura para o cinzeiro.

Sistema (fornalha e núcleo de carbonização)

Tanto a câmara de combustão, trocador de calor, chaminé, coletores de ar quanto o núcleo de carbonização deverão ser construídos, preferencialmente, em aço inox 310, e cada componente, segundo a probabilidade de desgaste, em chapa com 3, 2 e 1 mm de espessura. O sistema metálico, para favorecer o aproveitamento do calor liberado, deverá ser acondicionado em uma estrutura cilíndrica construída em alvenaria, com tijolos cerâmicos comuns e sobre uma base de concreto, onde existe também uma entrada para o ar primário e acesso ao cinzeiro. Como não existirá material incombusto ao final do processo (exceto o carvão contido no núcleo de carbonização), o sistema fornalha/tomada de ar não necessitará de ciclone, como nas fornalhas comuns com aquecimento direto. O depósito de lenha para uma carga de 8 a 10 horas e o núcleo de carbonização, se for usado, farão parte da câmara de combustão, que permitirá, também, a queima dos gases gerados no núcleo de carbonização.

Para recuperar parte da energia perdida pela chaminé, esta poderá ser revestida por uma camisa metálica, por dentro da qual se fará a entrada de parte do ar de secagem. No caso de se aproveitarem os gases da chaminé (vapor superaquecido e CO₂) para aquecimento misto, uma tampa com um duto, como mostrado na Figura 259, permitirá uma mistura dos gases que saem da coifa com o ar ambiente antes de entrar no ventilador. Opcionalmente, na operação da fornalha com aquecimento indireto, a entalpia dos gases provenientes da chaminé pode ser usada para aquecimento de água, secagem de lenha ou em um trocador de calor adicional, para melhorar, ainda mais, o rendimento térmico do sistema.

Possibilidades de Controle do Sistema

Um termostato poderá ser instalado para indicação da temperatura dos gases na câmara de combustão. Uma temperatura acima da programada indicaria riscos para a operação do sistema¹. Por outro lado, uma temperatura aquém da desejada indicaria combustão incompleta e insuficiência de energia para atendimento da demanda e dificuldades de atender à temperatura necessária ao núcleo de carbonização, quando for o caso.

O sinal gerado pelo elemento sensor poderá ser amplificado e enviado para o sistema de distribuição de ar ou para um pequeno ventilador extra, a fim de regular a chaminé (quando necessário) que regularizará o fluxo de ar comburente na câmara de combustão até esta alcançar a temperatura e o excesso de ar adequado à combustão. Para a operação da fornalha com aquecimento misto, outro sensor pode ser instalado na saída da chaminé, para indicação da temperatura dos gases de exaustão. Um sinal seria enviado para um motor de passo, acoplado a um registro instalado na entrada de ar secundário da fornalha, que poderia controlar a abertura de passagem do ar comburente até que a câmara de combustão atinja a temperatura necessária à queima completa dos voláteis. Um termostato pode ser instalado no plenum do secador, para controle da abertura de ar frio para mistura com ar quente. Também, um sensor instalado na entrada do ventilador pode acionar um alarme, indicando que a carga de lenha e os gases do núcleo de carbonização foram queimados, que o sistema de ventilação deve ser desligado e que o produto (café) dentro do secador deve descansar por, pelo menos, seis horas (secagem parcelada). Segundo Silva et al. (2008), esse é um dos processos mais eficientes para a secagem do café e arroz. Depois desse tempo, a fornalha deve ser recarregada e iniciada um novo período de secagem.

Carga e Funcionamento da Fornalha

A carga da fornalha em questão é uma operação de suma importância. É com a carga perfeita e usando lenha, devidamente preparada, e controlando todas as entradas de ar que se consegue uma combustão perfeita e com ausência de fumaça. O trabalho tem início com a carga do núcleo de carbonização, que, mesmo sendo opcional, deve seguir as recomendações sobre os módulos 1 e 2 e as ilustrações mostradas na Figura 258. Caso a construção atinja uma altura que dificulte a carga do núcleo, ela deve ser feita fora da câmara de combustão e adicionada à câmara por intermédio de um sistema de carretilha e roldana (não apresentado) com esse lado vedado. Os foros ou abertura para escape dos gases de carbonização devem ficar voltados para o cinzeiro, como mostra a Figura 256.

Com o núcleo carregado e devidamente posicionado dentro da câmara de combustão, deve-se iniciar a adição de lenha de combustão (diâmetro inferior a 10 cm e comprimento igual à altura do núcleo ou 80 cm), que deve preencher todo o espaço entre o núcleo e a parede da câmara de combustão. O restante da câmara de combustão, até o nível superior, deve ser preenchido com o mesmo tipo de lenha e com pedaços menores que 25 cm de comprimento, ou o mesmo material usado para carregar o núcleo (Figura 258).

Para acender a fornalha, basta colocar sobre a lenha três pequenas buchas de estopa embebidas com combustível e, sobre elas, uma pequena quantidade de madeira ou gravetos de fácil combustão e iniciar o fogo. Quando a chama estiver firme, colocar

¹ Temperaturas elevadas poderão acarretar diminuição da vida útil do equipamento, fusão das cinzas e do material da célula de queima.

a coifa e em seguida a chaminé móvel, para facilitar a combustão (veja a sequência na Figura 261, que mostra uma fornalha sem a proteção de alvenaria e sistema de ventilação). Passados 10 minutos, pode-se operar a fornalha e fazer controles das aberturas de ar (ar primário ou de comburente e ar de secagem). Lembre-se de que a fornalha só deverá ser iniciada se todas as condições de secagem e secadores estiverem dentro da normalidade.



Figura 261 - Sequência operacional para o processo de combustão com a fornalha sem fumaça.

Para finalizar o assunto referente a fornalhas e com o objetivo de facilitar a opção por diferentes tipos de fornalhas e fontes de energia para a secagem de café, é apresentada nas Tabelas 6, 7 e 8 (LOPES et al., 2001) uma aproximação do consumo de diferentes tipos de combustíveis para várias vazões e temperaturas do ar de secagem. Assim, de posse das características comerciais de cada opção, da disponibilidade de determinado tipo de combustível e do tempo de secagem, pode-se estimar a influência do equipamento e consumo de combustível no processo de secagem do café.

O consumo de combustível para o aquecimento do ar de secagem pode ser estimado pela seguinte equação:

$$M_c = 60 \cdot \frac{\rho \cdot Q \cdot c_p \cdot (T_s - T_a)}{\eta \cdot PCI}$$

em que:

M_c – consumo de combustível, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$;

ρ – massa específica do ar de secagem, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

Q – vazão de ar, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$;

c_p – calor específico do ar de secagem, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

T_s – temperatura do ar de secagem, $^\circ\text{C}$;

T_a – temperatura do ar ambiente, $^\circ\text{C}$;

η – rendimento da fornalha, decimal; e

PCI – poder calorífico inferior do combustível, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela 6 - Consumo horário² ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de 50°C

Combustível						
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
Vazão	direto	indireto	direto	direto	indireto	direto
m^3/min	$\eta = 0,97$	$\eta = 0,3$	$\eta = 0,85$	$\eta = 0,88$	$\eta = 0,4$	$\eta = 0,85$

² Os consumos apresentados variam de acordo com o equipamento, o seu estado de conservação, o teor de umidade do combustível e as condições do ambiente.

60	2,72	31,07	10,96	4,73	19,51	9,18
70	3,17	36,25	12,79	5,51	22,76	10,71
80	3,69	41,43	14,62	6,30	26,02	12,24
90	4,08	46,61	16,45	7,09	29,27	13,77
100	4,53	51,79	18,28	7,88	32,52	15,30
110	4,99	56,97	20,11	8,67	35,77	16,83
120	5,44	62,15	21,93	9,46	39,03	18,36
130	5,89	67,33	23,76	10,25	42,28	19,89
140	6,35	72,51	25,59	11,03	45,53	21,42
150	6,80	77,69	27,42	11,82	48,79	22,96
160	7,25	82,87	29,25	12,61	52,04	24,49
170	7,71	88,05	31,07	13,40	55,29	26,02
180	8,16	93,23	32,90	14,19	58,54	27,55
190	8,61	98,41	34,73	14,98	61,80	29,08
200	9,07	103,59	36,56	15,77	65,05	30,61
210	9,52	108,77	38,39	16,55	68,30	32,14
220	9,98	113,95	40,22	17,34	71,55	33,67

Tabela 7 - Consumo horário ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Combustível						
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
Vazão	direto	indireto	direto	direto	indireto	direto
m^3/min	$\eta = 0,97$	$\eta = 0,3$	$\eta = 0,85$	$\eta = 0,88$	$\eta = 0,4$	$\eta = 0,85$
60	3,42	39,09	13,79	5,95	24,55	11,54
70	3,99	45,61	16,09	6,94	28,64	13,46
80	4,56	52,13	18,39	7,93	32,73	15,38
90	5,13	58,64	20,69	8,92	36,82	17,31
100	5,70	65,16	22,99	9,92	40,92	19,23
110	6,27	71,68	25,29	10,91	45,01	21,16
120	6,84	78,19	27,59	11,90	49,10	23,08
130	7,41	84,71	29,89	12,89	53,19	25,00
140	7,99	91,23	32,19	13,88	57,28	26,93
150	8,56	97,74	34,49	14,88	61,38	28,85
160	9,13	104,26	36,79	15,87	65,47	30,77
170	9,70	110,78	39,09	16,86	69,56	32,70
180	10,27	117,3	41,39	17,85	73,65	34,62
190	10,84	123,81	43,69	18,84	77,74	36,55
200	11,41	130,33	45,99	19,84	81,84	38,47
210	11,98	136,84	48,29	20,83	85,93	40,39

220	12,55	143,36	50,59	21,82	90,02	42,32
230	13,12	149,88	52,89	22,81	94,11	44,24
240	13,69	156,39	55,19	23,80	98,21	46,16
250	14,26	162,91	57,49	24,80	102,30	48,09
260	14,83	169,43	59,79	25,79	106,39	50,01
270	15,41	175,94	62,09	26,7	110,48	51,93

Tabela 8 - Consumo horário ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Combustível						
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
Vazão	direto	indireto	direto	direto	indireto	direto
m^3/min	$\eta = 0,97$	$\eta = 0,3$	$\eta = 0,85$	$\eta = 0,88$	$\eta = 0,4$	$\eta = 0,85$
60	4,09	46,71	16,48	7,11	29,33	13,80
70	4,77	54,50	19,23	8,29	34,22	16,10
80	5,45	62,23	21,98	9,48	39,11	18,40
90	6,13	70,07	24,73	10,66	44,00	20,70
100	6,81	77,86	27,48	11,85	48,89	23,00
110	7,50	85,65	30,23	13,03	53,78	25,31
120	8,18	93,43	32,97	14,22	58,67	27,61
130	8,86	101,22	35,72	15,41	63,56	29,91
140	9,54	109,01	38,47	16,59	68,45	32,21
150	10,22	116,79	41,22	17,78	73,34	34,51
160	10,91	124,58	43,97	18,96	78,23	36,81
170	11,59	132,37	46,71	20,15	83,12	39,11
180	12,27	140,15	49,46	21,33	88,01	41,41
190	12,95	147,94	52,21	22,52	92,90	43,71
200	13,63	155,73	54,96	23,70	97,79	46,01
210	14,32	163,51	57,71	24,89	102,68	48,32
220	15,00	171,30	60,46	26,07	107,57	50,62
230	15,68	179,09	63,20	27,26	112,46	52,92
240	16,36	186,87	65,95	28,44	117,34	55,22
250	17,04	194,66	68,70	29,63	122,23	57,52
260	17,73	202,45	71,45	30,82	127,12	59,82
270	18,41	210,23	74,20	32,00	132,01	62,12

[VOLTAR](#)