



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

PROTÓTIPO DE SECADOR EXPERIMENTAL PARA A SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS EM CAMADA DELGADA

**Renato Tertuliano Garcia¹; André Luís Duarte Goneli ²; Rodrigo aparecido Jordan³;
Luciano Oliveira Geisenhoff³; Elton Aparecido Siqueira Martins⁴; Cesar Pedro
Hartmann Filho⁴**

UFGD-FCA, C. Postal 533, 79804-970 Dourados-MS, E-mail: renatoeng03@gmail.com

¹Bolsista de Iniciação Científica da UFGD. ² Professor FCA, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

³Professor FCA. ⁴Aluno de Pós Graduação.

RESUMO

O presente trabalho consistiu em projetar e construir um secador experimental, com controle de temperatura e fluxo de ar de secagem, visando estudos de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, e secundariamente a secagem em camada espessa de produtos agrícolas. A fonte de aquecimento foi constituída por um conjunto de seis resistências elétricas com potência total de 12 kW, dimensionada para fornecer energia ao ar de entrada para que o ar de secagem atinja a temperatura de até 90 °C, com velocidade de saída, em cada bandeja de secagem em camada delgada, de até 2 m s⁻¹. A câmara de secagem em camada espessa foi constituída por duas bandejas de fundo telado de 0,2 m de diâmetro cada. O dimensionamento geométrico das expansões, câmara de secagem em camada delgada e espessa e plenum do secador experimental foram feitos com base em recomendações encontradas na literatura. Para insuflação de ar de secagem foi selecionado um ventilador centrífugo de 1 cv de potência. A geometria do secador experimental projetado, para secagem em camada delgada e espessa, apresentou resultados satisfatórios. O conjunto de resistências elétricas dimensionado e o ventilador selecionado para aquecer e insuflar, respectivamente, o ar de secagem atenderam as expectativas do projeto.

Palavras-chave: Velocidade do ar de secagem, controle de temperatura do ar de secagem, resistências elétricas.

INTRODUÇÃO

A secagem é uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas que tem por finalidade retirar o excesso de água contido no grão por meio de evaporação. A remoção de água dos produtos agrícolas consiste em um complexo processo, envolvendo a transferência simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, na qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução no teor de água do mesmo (Goneli et al., 2014).

Os equipamentos desenvolvidos para a secagem de produtos agrícolas, denominados secadores, são construídos sob diversas formas geométricas internas e externas, para que obtenham diferentes formas de escoamento de ar e produto durante a secagem, e diferentes formas de operação, visando a eficiência da secagem e a manutenção da qualidade do produto após a secagem.

Os secadores denominados estacionários ou em camada fixa, ou ainda denominados de leito fixo, são caracterizados por assemelharem-se a silos cilíndricos, não necessariamente possuindo a mesma altura de um silo cilíndrico convencional. As câmaras de secagem destes secadores possuem fundo composto por chapas perfuradas, por onde se insufla o ar de secagem, sendo que o produto fica em repouso sobre as chapas perfuradas do fundo do secador (Milman, 2002; Garcia et al., 2004; Silva et al., 2008a).

A secagem em camada delgada ou fina é definida como aquela com a espessura de apenas uma unidade do produto e considera-se que uma camada espessa seja constituída de sucessão de camadas delgadas superpostas (Brooker, 1992; Berbert et al., 1995).

Para a secagem de grãos em camada espessa, em altas temperaturas, em secador de camada fixa recomenda-se que a espessura da camada seja igual ou inferior a 0,6 m, sendo necessário ainda o revolvimento manual ou mecânico do produto, em intervalos de tempo regulares, para evitar que ocorra a supersecagem do produto próximo a entrada de ar, gerando assim um gradiente de teor de água no produto (Dalpasquale et al., 2002; Silva et al., 2008a). Camadas mais espessas que 0,6 m, na maioria dos produtos agrícolas, podem gerar um gradiente de teor de água de até 5% entre as camadas inferiores e superiores do produto e o fluxo de ar normalmente empregado na secagem de produtos agrícolas em camada fixa varia de $0,12$ a $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (Dalpasquale et al., 2002).

O sistema de secagem em camada fixa é muito utilizado por pesquisadores para estudar a cinética de secagem de produtos agrícolas e fazer simulações do processo de secagem, por meio de modelos matemáticos. Para o estudo da cinética de secagem de

produtos agrícolas os pesquisadores, geralmente, submetem uma camada delgada de produto agrícola a secagem, a qual permanece estática até o fim do processo de secagem.

Devido a necessidade de estudar o processo de secagem de produtos agrícolas com condições controladas de temperatura e fluxo de ar de secagem e até mesmo a interação entre essas duas variáveis, muitos pesquisadores, para avaliar a cinética de secagem de produtos agrícolas, em camada delgada, têm feito uso de secadores experimentais de leito fixo, em nível de laboratório, conseguindo controlar temperatura e fluxo de ar de secagem (Carlesso et al., 2005; Reis et al., 2011; Faria et al., 2012; Prates et al., 2012; Moraes et al., 2013; Oliveira et al., 2013).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi projetar um secador experimental, visando estudos de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, e secundariamente a secagem em camada espessa.

MATERIAL E MÉTODOS

O dimensionamento e construção do secador experimental basearam-se no esquema apresentado na Figura 1.

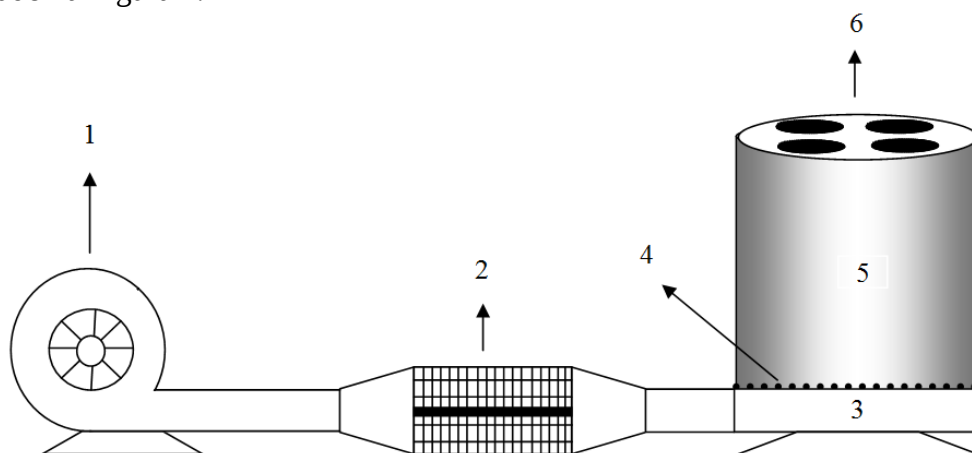


Figura 1. Proposta inicial para desenvolver o secador experimental.

Sendo o secador idealizado composto pelas seguintes partes:

- 1 - Ventilador centrífugo para insuflação de ar;
- 2 - Conjunto de resistências elétricas para aquecimento do ar;
- 3 - Câmara de distribuição de ar ou plenum;
- 4 - Chapa perfurada da câmara de secagem em camada espessa;
- 5 - Câmara de secagem em camada espessa;
- 6 - Conjunto de bandejas com malha de ferro para secagem do produto em camada delgada.

O dimensionamento e projeto da estrutura do secador experimental foram divididos em cinco partes:

➤ **Fonte de aquecimento**

Como fonte de aquecimento do ar de secagem, optou-se por resistências elétricas de troca de calor com o ar, por serem de simples operação permitindo automatizar o controle de temperatura por diversas lógicas de controle eletrônico. A fonte de aquecimento foi dimensionada para fornecer energia ao ar de secagem para que o mesmo atinja a temperatura de até 90 °C, com velocidade do ar de secagem, em cada bandeja de secagem em camada delgada, de até 2 m s⁻¹. O dimensionamento da potência elétrica necessária para alimentar a(s) resistência(s) elétrica(s) para gerar calor suficiente para aquecer o ar de secagem influenciou em alguns aspectos geométricos do secador experimental, como no:

- número de bandejas para secagem em camada delgada;
- no diâmetro das bandejas para secagem em camada delgada;
- nas dimensões do duto em que ficará fixada a(s) resistência(s) elétrica(s) para o aquecimento do ar de secagem;

Para calcular a potência elétrica necessária para o aquecimento do ar de secagem, conforme Park et al. (2007), faz-se uso da Equação 1.

$$P = \dot{m} * \Delta h \quad (1)$$

em que,

P: potência elétrica, kW;

$\dot{m}$: vazão mássica, kg_{ar seco} s⁻¹; e

Δh : variação da entalpia do ar, kJ kg_{ar seco}⁻¹.

A vazão mássica é obtida por meio da Equação 2.

$$\dot{m} = \frac{Q}{V_e} \quad (2)$$

em que,

Q: vazão de ar, m³ s⁻¹; e

V_e: volume específico do ar úmido, m³ kg_{ar seco}⁻¹.

➤ **Expansões e plenum**

As expansões ou elementos de transição entre o ventilador e a câmara de distribuição de ar foram dimensionados com o ângulo de abertura do elemento de transição, com relação ao eixo de simetria do secador, entre 15 e 45°, para que a perda de carga seja desprezível (Dalpasquale et al., 2002.).

Dalpasquale et al. (2002) recomendam para a construção de secadores de leito fixo, que a câmara de distribuição de ar ou plenum possuam 0,5 m de altura, visando facilitar a manutenção do piso da câmara de secagem e do plenum evitando altas perdas de carga. Com isso o plenum do secador experimental foi projetado com 0,5 m de altura.

➤ **Homogeneizador de ar**

Para homogeneizar o fluxo de ar no duto do secador, entre o ventilador e o plenum, foi implementado no secador um homogeneizador de fluxo antes da(s) resistência(s) elétrica(s) e outro após. Lacerda Filho e Melo (2008), apresentando metodologias para determinar as características de um ventilador, utilizando tubo de Pitot, explicam que um homogeneizador deve ser construído em alvéolos de seção quadrada, em que os lados podem variar de 7,5 a 15% do diâmetro do duto de ar, e a espessura do homogeneizador deve corresponder a três vezes a dimensão da aresta de um alvéolo do homogeneizador.

O duto de ar do secador possui seção de forma retangular, sendo o dimensionamento dos homogeneizadores dependentes do diâmetro do duto de condução de ar, sendo assim foi determinado o diâmetro equivalente de dutos retangulares, Equação 3, conforme Stoecker e Jones (1985).

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad (3)$$

em que,

D_{eq} : diâmetro equivalente de um duto retangular, m;

a: altura do duto retangular, m;

b: largura do duto retangular, m.

➤ **Ventilador**

O ventilador do secador experimental foi selecionado em função da máxima vazão e pressão estática demandada para a secagem em camada delgada e espessa.

A máxima vazão de ar demandada para a secagem em camada delgada e espessa, é determinada pela Equação 4 e 5, respectivamente.

$$Q_{CD} = n_b * v * A_b \quad (4)$$

$$Q_{CE} = A_c * DFA \quad (5)$$

em que,

Q_{CE} : vazão de ar demandada na secagem em camada espessa, $m^3 s^{-1}$;

Q_{CD} : vazão de ar demandada na secagem em camada delgada, $m^3 s^{-1}$;

A_c : área da câmara de secagem em camada espessa, m^2 ;

A_b : área de cada bandeja de secagem em camada delgada, m^2 ;

DFA : densidade de fluxo de ar, $m^3 s^{-1} m^{-2}$.

n_b : número de bandejas;

v : velocidade do ar de secagem em camada delgada, $m s^{-1}$;

A queda de pressão ou pressão estática imposta pelas estruturas do secador (expansões, plenum, e etc) são desconsideradas, sendo que em um secador de leito fixo, espera-se que a maior queda de pressão, com exceção da imposta pelo próprio produto a ser seco, seja ocasionada pela chapa perfurada. Segundo Silva et al. (2008 b) se a chapa perfurada apresentar pelo menos 10% de área perfurada é desconsiderada a queda de pressão imposta por essa estrutura. Assim foi selecionada uma chapa perfurada de no mínimo 10% de área perfurada, para compor a câmara de secagem em camada espessa e delgada. A queda de pressão imposta pela massa de produto a ser seco em camada delgada foi calculada pela Equação 6:

$$\Delta P_g = \frac{a * DFA^2 * h_g}{\ln(1 + b * DFA)} * FC \quad (6)$$

em que,

ΔP_g : queda de pressão devido a resistência do produto, mm.c.a.;

DFA : densidade de fluxo de ar, $m^3 min^{-1} m^2$;

h_g : altura da massa de produto, m;

a, b : constantes dependente dos diversos produtos agrícolas;

FC : fator de correção (25% para perdas não calculadas e 25% para fator de compactação do produto).

➤ Isolamento Térmico

O secador experimental foi projetado para aquecer o ar até 90 °C, sabendo que é possível que o secador atinja temperaturas superiores a 90 °C, devido as possibilidades de regulação do mesmo para operar com baixa vazão (no caso de secagem em camada delgada para trabalhar com a velocidade do ar de secagem inferior a 1 m s^{-1}), com isso foi selecionado um isolante térmico que suporte temperatura da ordem de 200 °C, por medidas de segurança.

Após a construção da “carcaça” do secador experimental, o mesmo foi revestido com material isolante térmico, visando a otimização do calor conduzido, segurança para quem estiver fazendo uso do secador, e até mesmo o conforto térmico do ambiente onde o secador for alocado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta uma vista tridimensional, desenhado em um software CAD, do secador experimental projetado.

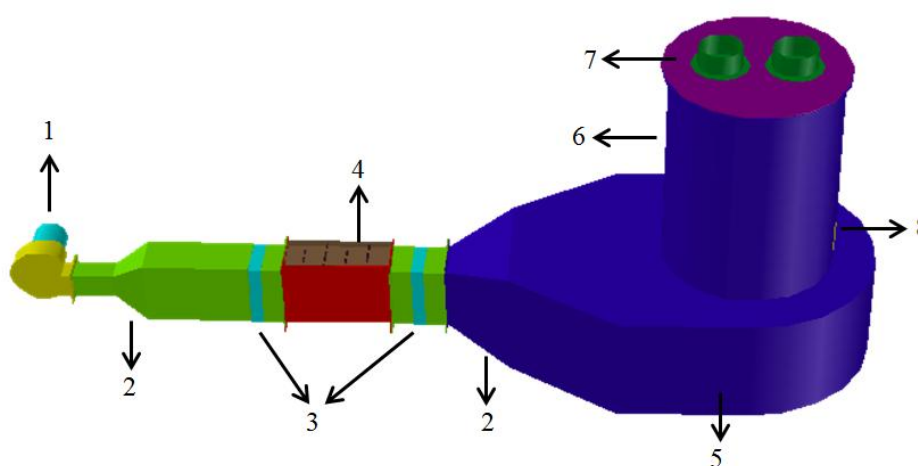


Figura 2. Representação tridimensional do secador experimental projetado.

O secador experimental projetado é composto pelas seguintes partes:

- 1 - Ventilador centrífugo para insuflação de ar;
- 2 - Expansões ou elementos de transição;
- 3 - Homogeneizadores de fluxo de ar;
- 4 - Conjunto de resistências elétricas;
- 5 - Câmara de distribuição de ar ou plenum;
- 6 - Câmara de secagem em camada espessa;
- 7 - Conjunto de bandejas com malha de ferro para secagem do produto em camada delgada;

8 - Porta para descarga de produto da câmara de secagem em camada espessa.

➤ **Fonte de aquecimento**

Para calcular a potência elétrica necessária para o aquecimento foi necessário conhecer a variação de entalpia (Equação 1), a qual é dependente das condições do ar ambiente e do ar aquecido. Segundo Schneider e Silva (2012), estudando a dinâmica climática de Dourados/MS, pode-se adotar como valores médios de temperatura e umidade relativa 20°C e 70%, respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades psicrométricas do ar de entrada (ar ambiente) e de secagem envolvidos no cálculo da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar.

Tabela 1. Propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar de secagem, para a cidade de Dourados/MS, considerando altitude local de 463 m.

	Ar de entrada (1)	Ar de saída (2)
T (°C)	20	90
UR (%)	70	2,34
h (kJ kg _{ar seco} ⁻¹)	47,52	119,28
Ve (m ³ kg _{ar seco} ⁻¹)	0,89	1,10

Observando a Tabela 1, nota-se que a variação de entalpia para aquecer o ar de entrada à 90 °C é de 71,76 kJ kg_{ar seco}⁻¹.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de potência elétrica para diferentes configurações da câmara de secagem em camada delgada, considerando a temperatura final de 90°C e velocidade de saída do ar de secagem de 2 m s⁻¹, em cada bandeja, sendo analisadas duas combinações de diâmetro de bandejas com quatro quantidades diferentes de bandejas.

Tabela 2. Simulação da potência elétrica demandada em função da velocidade do ar de secagem, número e diâmetro de bandejas.

Velocidade (m/s)	Diâmetro (m)	Número de bandejas	Vazão de ar (m ³ /s)	Vazão Mássica (Kg _{ar seco} s ⁻¹)	Potência (kW)
2,0	0,25	4	0,39	0,44	31,66
2,0	0,25	3	0,29	0,33	23,75
2,0	0,25	2	0,20	0,22	15,83
2,0	0,25	1	0,10	0,11	7,92
2,0	0,20	4	0,25	0,28	20,26
2,0	0,20	3	0,19	0,21	15,20
2,0	0,20	2	0,13	0,14	10,13
2,0	0,20	1	0,06	0,07	5,07

Analisando a Tabela 2, pode-se observar como a variação do número e diâmetro de bandejas tem forte influência na potência elétrica demandada para aquecer o ar de secagem.

O secador experimental foi projetado para ser alocado em um laboratório de pesquisas de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, sabendo-se que nesse tipo de laboratório há vários equipamentos (estufas de circulação de ar, B.O.D, câmaras climáticas, condicionadores de ar, e etc) com diferentes demandas de potências elétricas. Sendo assim houve a necessidade de observar a potência elétrica que não ocasiona-se riscos de sobrecarga das instalações do laboratório.

Levando em consideração as ponderações feitas anteriormente optou-se por uma câmara de secagem em camada delgada que apresente um conjunto de duas bandejas com 0,2 m de diâmetro cada, o que corresponde a uma potência elétrica demandada de pelo menos 10,13 kW.

Realizada a seleção da configuração da câmara de secagem em camada delgada, foi montado um conjunto de seis resistências elétricas aletadas de troca de calor com ar, de 2000 W cada, em que cada componente apresenta comprimento de 300 mm e tensão de alimentação de 220 V (Figura 3).



Figura 3. Resistência elétrica aletada de troca de calor com o ar.

As dimensões (largura e altura) do duto de ligação entre o ventilador e o plenum do secador experimental foram as mesmas do compartimento utilizado para alocar as resistências elétricas, ou seja, 300 mm de altura e 200 mm de largura (Figura 4).



Figura 4. Conjuntos de resistências elétricas para aquecimento do ar de secagem.

O conjunto de resistências elétricas montado apresenta uma potência total de 12 kW (seis resistências elétricas de 2000 W cada), ou seja, 18,5 % de potência a mais do que o dimensionado, oferecendo ao sistema de aquecimento uma margem de segurança quanto a disponibilidade de potência elétrica necessária para o aquecimento.

A câmara de secagem em camada delgada, projetada de acordo com o cálculo da potência elétrica necessária, é composta de duas bandejas de 0,2 m de diâmetro cada (Figura 5), contudo optou-se por construir dois conjuntos de câmara de secagem em camada delgada, um com duas bandejas e outro com quatro. Sendo o conjunto com quatro bandejas utilizado para obter um maior número de repetições quando proceder-se a secagem com uma combinação de temperatura e vazão do ar de secagem que não extrapole a exigência de 12 kW de potência fornecida pelo conjunto de resistências elétricas.



Figura 5. Câmara de secagem em camada delgada com 2 bandejas (à esquerda) e com quatro bandejas (à direita).

➤ Expansões e plenum

A câmara de distribuição de ar ou plenum foi construída com 0,5 m de altura (Figura 6 e 7) conforme o recomendado por Dalpasquale et al. (2002). O secador experimental, possui uma expansão logo após o ventilador (Figura 8) e outra imediatamente antes do plenum (Figura 6 e 7), sendo estas expansões projetadas com ângulos entre 15 e 45° conforme recomendado por Dalpasquale et al. (2002).

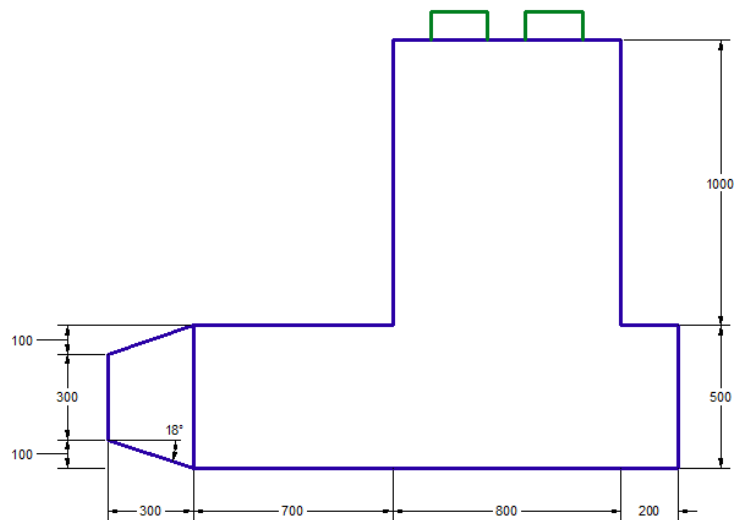


Figura 6. Vista frontal das câmaras de secagem em camada delgada e espessa e expansão imediatamente antes do plenum.

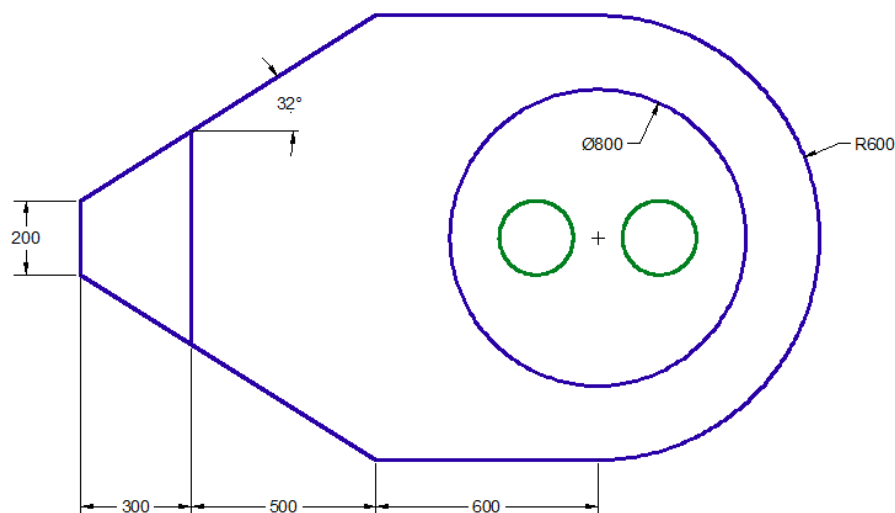


Figura 7. Vista superior das câmaras de secagem em camada delgada e espessa e expansão imediatamente antes do plenum.

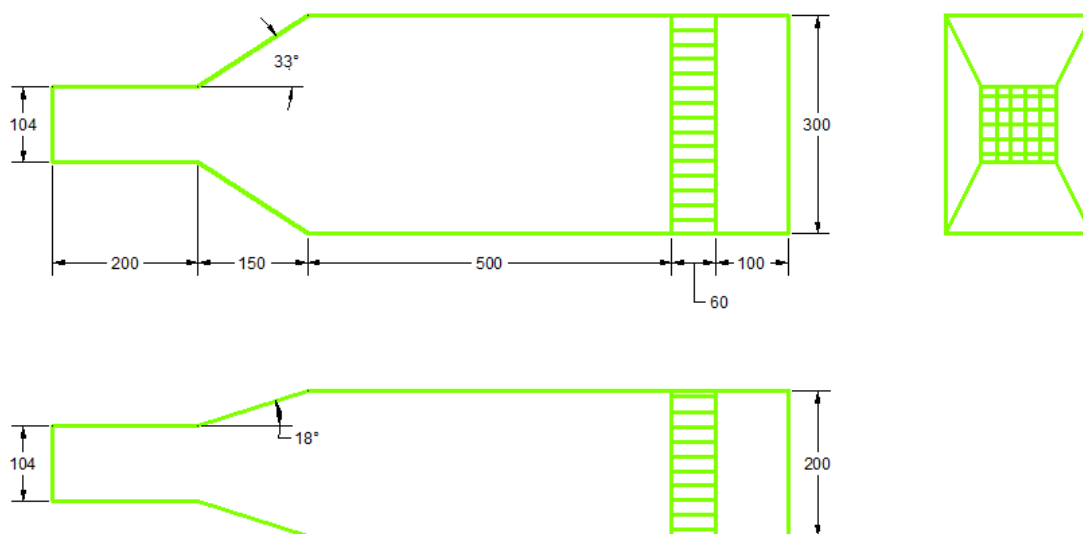


Figura 8. Expansão e homogeneizador de ar logo após o ventilador.

Nas Figuras 6 e 7 pode ser observado que a câmara de secagem em camada espessa encontra-se imediatamente abaixo da câmara de secagem em camada delgada. Quando necessário realizar estudos de secagem em camada espessa remove-se a o conjunto de bandejas para secagem em camada delgada, deixando livre a câmara de secagem em camada espessa. Observado as Figuras 6 e 7 nota-se que a câmara de secagem em camada espessa possui 0,8 m de diâmetro e 1,0 m de altura.

➤ Homogeneizador de ar

Os homogeneizadores de fluxo de ar, tanto antes como após o conjunto de resistências elétricas, estão instalados no mesmo duto, o qual possui 300 mm de altura e 200 mm de largura. Aplicando a Equação 2, obteve-se um diâmetro equivalente de 0,24 m.

Seguindo as recomendações de Lacerda Filho e Melo (2008) os alvéolos do homogeneizador poderiam possuir arestas de 1,8 a 3,6 cm (7,5 a 15% do diâmetro do duto). Por praticidade de construção, adotaram-se as arestas dos alvéolos de 2,0 cm, conseqüentemente a espessura desses homogeneizadores foi de 6,0 cm (três vezes o comprimento da aresta do homogeneizador).

As vistas dos homogeneizadores de ar localizado antes e após o conjunto de resistências elétricas estão ilustrados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

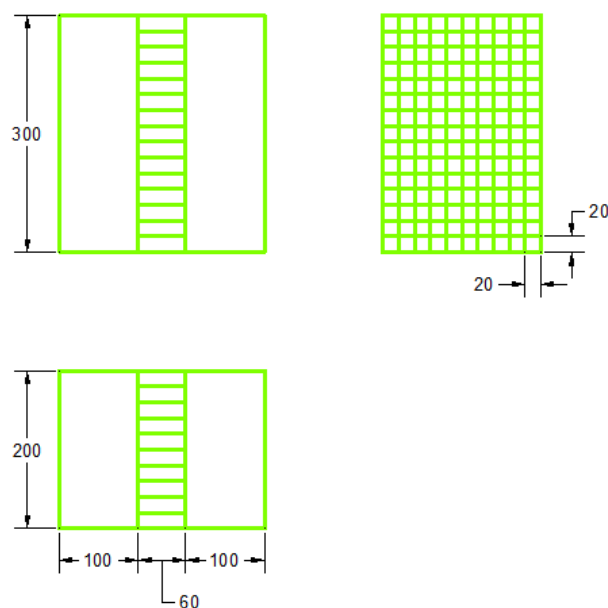


Figura 9. Vistas do homogeneizador de ar após o conjunto de resistências elétricas.

➤ Ventilador

Para selecionar o ventilador para o secador experimental foi determinado a máxima vazão de ar demandada no processo de secagem em camada delgada e espessa, pelas Equações 4 e 5 respectivamente. Na Tabela 3 são apresentados os valores máximos de vazão demandada no processo de secagem em camada espessa e delgada.

Tabela 3. Vazão máxima demandada para secagem em camada delgada e espessa.

Vazão de ar demandada ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)		
Camada delgada		Camada espessa
Conjunto de 2 bandejas	Conjunto de 4 bandejas	
7,54	15,08	7,54

Analisando a secagem em camada delgada, pensando na situação em que se exige maior vazão de ar para secagem, obtém-se a vazão de $15,08 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$, sendo que para a secagem em camada delgada são desprezíveis as quedas de pressão impostas pelas estruturas do secador e pela camada de produto, devido a espessura dessa camada ser a mais fina possível. Com isso deverá ser selecionado um motor que possa fornecer a vazão de ar de até $15,08 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$.

Já para a secagem em camada espessa, Tabela 3, nota-se que a vazão máxima de ar demandada é de $7,54 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$, mas tratando-se de camada espessa deve ser considerada a resistência a passagem do ar imposta pela massa de produto. Logo o cálculo para a queda de

pressão foi realizado para o trigo devido ao mesmo ser a situação extrema com relação à queda de pressão.

A queda de pressão imposta pelo trigo foi calculada de acordo com a Equação 6, sendo os valores do coeficientes “a” e “b” iguais a 0,825 e 0,164, respectivamente. A Tabela 4 apresenta o valor da queda de pressão imposta pelo trigo para alguns valores de espessura de camada e densidade de fluxo de ar recomendado para secagem de produtos agrícolas em secadores estacionários (Dalpasquale et al., 2002).

Tabela 4. Queda de pressão devido a diferentes densidades de fluxo de ar e espessuras de camada de trigo.

DFA ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$)	DFA ($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$)	Vazão ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	Espessura da camada (m)	ΔP (mm.c.a)
0,12	7,20	3,62	0,40	34,23
			0,50	42,78
			0,60	51,34
0,15	9,00	4,52	0,40	45,99
			0,50	57,49
			0,60	68,99
0,20	12,00	6,03	0,40	68,14
			0,50	85,18
			0,60	102,21
0,25	15,00	7,54	0,40	93,32
			0,50	116,64
			0,60	139,97

De posse dos valores de máxima vazão demandada nos processos de secagem em camada delgada e espessa, e da queda de pressão imposta pela massa de produto, selecionou-se um ventilador que atendeu as necessidades do processo de secagem. O ventilador comercial foi selecionado com base no catálogo de Ventiladores Sirocos VSI, do fabricante Ibram (Ibram, 2013), apresentado na Figura 10.

MODELO <i>MODEL</i>	60 Hz			
	VAZÃO MAX. <i>MAX. FLOWRATE</i> (m³/min)	PRESSÃO MAX. <i>MAX. PRESSURE</i> mm H ₂ O	RUÍDO <i>NOISE</i> dB*	**CV
VSI-80	1,9	26	70	1/20
VSI-90	3,6	46	77	1/6
VSI-100	6,6	39	79	1/6
VSI-130	12,3	80	81	1/2
VSI-150	18,4	71,4	78	1
VSI-160	24,6	99	89	1
VSI-190	36	151	84	2
VSI-195	42,9	171,6	90	2
VSI-200	40,2	108	95	2
VSI-210	55	171	95	4
VSI-350	65	260	98	5
VSI-360	73	261	98	6

Figura 10. Modelos de ventiladores do fabricante Ibram.

Observando a Figura 10 nota-se que o ventilador de menor potência que atende as necessidades de demanda de vazão requerida pelos processos de secagem em camada delgada e espessa é o VSI-150 e o VSI-160. Devido a questões comerciais para aquisição e a diferença de pressão estática capaz de romper, foi selecionado o modelo VSI-160.

A Figura 11 apresenta a curva do ventilador siroco VSI-160 do fabricante Ibram.

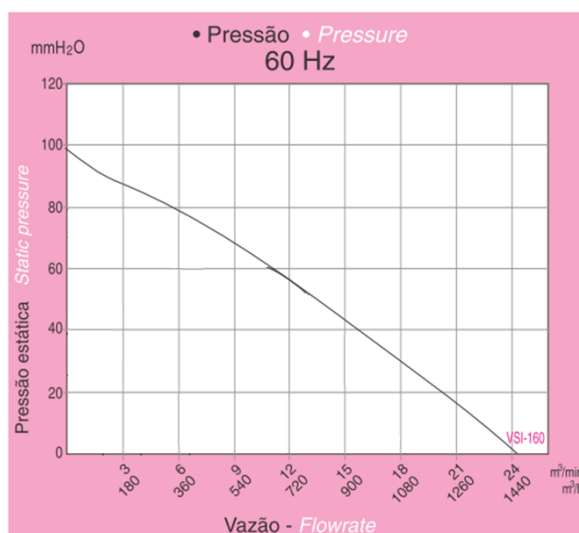


Figura 11. Curva do Ventilador Siroco VSI-160.

Como pode ser observado na Tabela 4 e Figura 11, apenas para a densidade de fluxo de ar de $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, no caso de secagem de trigo, deverá utilizar uma camada de trigo de aproximadamente 31 cm, para que o ventilador consiga romper a queda de pressão imposta pela massa de produto. Já para as demais densidades de fluxo de ar, mostrado na Tabela 5, é

possível secar trigo com as espessuras recomendadas na tabela, sendo que para o fluxo de ar de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ deve-se secar camadas inferiores a 0,5 m, devido a queda de pressão imposta pelo produto neste fluxo de ar.

A Figura 12 apresenta o ventilador Siroco do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui motor de 1 cv, com 3425 r.p.m de rotação, com vazão máxima de $24,6 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, e pressão estática máxima de 99 mm.c.a.



Figura 12. Ventilador Siroco, fabricante Ibram, modelo VSI-160.

➤ Isolamento Térmico

Isolantes térmicos que suportam temperaturas da ordem de 200°C são fáceis de se encontrar no comércio, sendo os mais populares a lã de vidro e lã de rocha. No presente trabalho, foi utilizado o isolante térmico de fibra de cerâmica (Dickson Refratários e Isolamentos Ltda, 2013), o qual suporta temperaturas de até 1260°C , com espessura de 51 mm e densidade de 128 kg m^{-3} . Este isolante térmico foi utilizado devido ao mesmo atender com folga a necessidade de isolamento térmico e a facilidade comercial local para aquisição. O secador experimental foi revestido com isolante térmico e após foi realizado um acabamento com outra chapa metálica contornando todo o secador, matendo o isolante térmico como um “recheio” entre duas chapas, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13. Processo de revestimento da estrutura do secador com isolante térmico.

A Figura 14 mostra o secador experimental concluído e alocado no laboratório de pesquisas de pós-colheita da Universidade Federal da Grande Dourados.



Figura 14. Secador experimental para secagem em camada delgada e espessa de produtos agrícolas.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que:

- a geometria do secador experimental permitiu a distribuição uniforme do ar de secagem nas bandejas para secagem em camada delgada;
- o secador experimental mostrou-se satisfatório para a secagem de produtos agrícolas em camada espessa e delgada.

- O conjunto de resistências elétricas de troca de com o ar dimensionado atendeu as expectativas para o aquecimento do ar de secagem.
- O ventilador selecionado apresentou-se o suficiente para as necessidade de uso do secador experimental.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa concedida e à FUNDECT-MS, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BERBERT, P.A. et al. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, n.3, p.167-73,1995.

BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book Publisher, 1992. 450p.

CARLESSO, V. DE O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F. DA; VIANNA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.

DALPASQUALE, V. A.; QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; SINÍCIO, R. Secagem de grãos em altas temperaturas. Viçosa-MG, 2002.

FARIA, R. Q. de; TEIXEIRA, I. R.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. DE. Secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p.603-608, 2004.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. DO C.; VILHASANTI, H. DA C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

Ibram, **Catálogo Ventilador Siroco VSI**. Disponível em <http://www.ibram.ind.br/downloads/ventilador_siroco_vsi_p.pdf>. Acesso em julho de 2013.

LACERDA FILHO, A. F. DE; MELO, E. DE C. **Medição de vazão de ar (Notas de aula)**. Viçosa-MG, 2008.

MILMAN, MÁRIO JOSÉ. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Universitária, 2002, 206 p.

MORAIS, S. J. DA S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

OLIVEIRA, M. T. R.; BERBERT, P. A.; MARTINAZZO, A. P. Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2013.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas-SP, 2007.

PRATES, M. F. O.; REIS, R. C.; DEVILLA, I. A.; FARIA, R. Q.; LIMA JUNIOR, A. F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 514-521, 2012.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. DE L.; REIS, J. DE S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 347-353, 2011.

SCHNEIDER, H.; SILVA, C. A. Características da dinâmica climática de Dourados/MS. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V. 2, N. 4, p.782 –791, 2012.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.; NOGUEIRA, R. M.. Secagem e Secadores. In: JUAREZ DE SOUZA E SILVA (Ed.) *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008a. 109-146 p.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F. DE; DEVILLA, I. A.; LOPES, D. DE C. **Aeração de grãos armazenados**. In: JUAREZ DE SOUZA E SILVA (Ed.) *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008b. 269-295p.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Dutos e ventiladores**. In: *Refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.