

## PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE FLUXOS (CONCORRENTES/CONTRACORRENTES) PARA SECAGEM DE CAFÉ

SILVA, J.S.<sup>1</sup>; PINTO, F.A.C.<sup>2</sup>; MACHADO, M.C.<sup>3</sup> E MELO, E.C.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup>-Agrônomo, Ph.D., CBP&D – Viçosa-MG, <desousae@mail.ufv.br>; Eng<sup>o</sup> Agrícola, DS, DEA/UFV- Viçosa-MG, <facpinto@mail.ufv.br>; <sup>3</sup> Eng<sup>a</sup> Agrícola, MS.,CBP&D – Viçosa-MG, <marise@mail.ufv.br>; <sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, DS, DEA/UFV- Viçosa-MG, <ecmelo@mail.ufv.br>

**RESUMO:** Com a finalidade de introduzir a utilização de dois sistemas de secagem em um único secador e reduzir o uso de energia na secagem de café, foram projetados, construídos e avaliados dois protótipos de secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes, destinados à secagem de café. A fim de auxiliar na avaliação do sistema, foi implementado um programa computacional para simular o processo de secagem, com base no modelo proposto por THOMPSON et al. (1968). Para o protótipo 1 (instalado em Araponga – MG), o café cereja foi previamente seco até o estágio de meia seca (30% b.u.) em terreiro; para o protótipo 2 (protótipo 1 modificado e instalado em Ponte-Nova – MG) utilizou-se café despulpado, também com pré-secagem em terreiro. A complementação da secagem foi executada com o protótipo 1, utilizando-se temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C, vazão de ar de, aproximadamente, 46 m.<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> e velocidade do produto de 0,024 m.min<sup>-1</sup>. Para o protótipo 2, com café despulpado, a temperatura de secagem foi de 75 °C. As diferenças entre os resultados experimentais (protótipo 1) e os simulados pelo programa foram consideradas dentro dos limites aceitáveis e o programa foi validado, o que permitiu a obtenção dos seguintes resultados (simulados) para redução do teor de umidade de 30 para 12% b.u.: consumo específico de energia de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ, por kg de água evaporada; capacidade de secagem de 200, 287 e 358 kg de café úmido por hora; e tempos de secagem de 22,5, 15,7 e 12,6 h, para as temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C, respectivamente. Considerando a pequena diferença entre os consumos específicos de energia para as temperaturas estudadas com protótipo 1 e que o café a ser secado no protótipo 2 estava na forma despulpado, utilizou-se da temperatura de secagem de 75 °C, sendo ar aquecido por fôrnelha com aquecimento indireto. Os resultados experimentais para os teores de umidade inicial e final do produto com o protótipo 2 foram: 32 e 13 % b.u. (10,3 MJ.kg<sup>-1</sup>) para o teste 1; 42 e 14 % b.u. (5,8 MJ.kg<sup>-1</sup>) para o teste 2 e 24; e 14% b.u. (11,2 MJ.kg<sup>-1</sup>) para o teste 3. Apesar de não ter sido feita uma análise completa do café secado no protótipo 1, o produto, para todos os testes, apresentou bebida dura. Já para o protótipo 2, cuja secagem complementar ocorreu em silos, com ar natural, o café apresentou bebida dura e tipos 4/5, 5 e 4/5 para os testes 1, 2 e 3, respectivamente.

**Palavras-chave:** café, secagem, secador de fluxos, consumo específico de energia

## PROJECT, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A (CONCURRENT FLOWS/COUNTERFLOWS) COFFEE DRYER

**ABSTRACT:** In order to introduce the use of two drying systems in a unique dryer and to reduce the use of energy in coffee drying, it was projected, built and evaluated two prototypes of an intermittent counterflows/concurrentflows dryer, designed for coffee drying. To aid the in system evaluation, a computational program based in the model proposed by THOMPSON et (1968) was implemented to simulate the drying process. For the prototype 1 (installed in Araponga - MG), the coffee cherries was partially dried to 30% bu, in a terrace type dryer. For the prototype 2 (prototype 1 modified) and installed in Ponte Nova - MG), partially dried pulped coffee was used. The complementation of the drying in the prototype 1 was accomplished with drying temperatures of 80, 100 and 120 °C, air flow of 46 m.<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> and product flow of 0,024m.min<sup>-1</sup>. For the prototype 2, with pulped coffee, the drying temperature was of 75 °C. The differences among experimental and simulated results for (prototype 1) were considered acceptable and the program was validated; what allowed to obtain the following simulate results: moisture reduction from 30 to 12% bu: specific energy consumption of 6,068, 5,657 and 5,685 kJ.kg<sup>-1</sup> of water removed; drying capacity of 200, 287 and 358 kg of humid coffee per hour and drying times of 22,5, 15,7 and 12,6 h, for the drying temperatures of 80, 100 and 120 °C, respectively. Considering the small difference among the specific energy consumptions for the temperatures studied with prototype 1 and the fact of the coffee to be dried in the prototype 2 in the pulped form, it was used of the drying temperature of 75 °C with air heated by an indirect fired furnace. The experimental results for the initial and final product moisture content for the prototype 2 was: 32 and 13% b.u. (10.3MJ.kg<sup>-1</sup>) for test 1, 42 and 14% b.u. (5.8MJ.kg<sup>-1</sup>) for test 2 and 24 and 14% b.u. (11.2MJ.kg<sup>-1</sup>) for the test 3. In spite of not having a complete analysis of the dried coffee the prototype 1, the product presented, for all the tests, good commercial quality. For the prototype 2, whose complementary drying happened in silos with natural air, the coffee presented good drink quality and types 4/5, 5 and 4/5 for the tests 1, 2 and 3, respectively.

**Key words:** coffee, drying process, counterflows/concurrentflows dryer, specific energy consumptions

## INTRODUÇÃO

Da colheita ao armazenamento, o café é submetido a uma série de operações que, se bem executadas, fornecerão um produto que apresenta as características de tipo e bebida exigidas pelos consumidores.

Considerando 12% b.u. o teor de umidade ideal para o armazenamento do café e sendo o fruto colhido no estágio de cereja (60% b.u.), este deve perder grande quantidade de água, acarretando grande consumo de energia, de tempo e mão-de-obra. A utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens em relação ao terreiro, porém a construção de secadores energeticamente mais eficientes, que forneçam produto final de boa qualidade, deve ser vista como grande esforço tecnológico reduzir os custos de secagem e aumentar a competitividade do café do Brasil no mercado internacional.

O café na forma de cereja ou descascado apresenta dificuldade de escoamento no interior da maioria dos secadores mecânicos, principalmente, quando se encontra muito úmido, em virtude da presença da mucilagem. Essa característica limita a utilização de altas temperaturas na secagem na fase inicial do processo, principalmente em secadores de fluxos do tipo torre.

Nos secadores de fluxos concorrentes, as taxas de evaporação de água do produto próxima à região de entrada do ar de secagem, quando o ar quente encontra o produto frio e úmido, são muito altas (SILVA et al., 1992). Entretanto, esses secadores apresentam altas eficiências térmicas, por utilizarem altas temperaturas. Em vista disso, supõe-se que a entrada na câmara de secagem de um produto menos úmido e mais quente minimizaria a dificuldade de escoamento, permitindo a utilização de temperaturas mais elevadas. Com isso, pensou-se na utilização de uma câmara de secagem de fluxos contracorrentes antes da câmara de fluxos concorrentes. Em virtude dos problemas enumerados, esse trabalho teve como objetivos projetar e construir um secador de fluxos contracorrentes/concorrentes e avaliar seu desempenho na secagem de café.

## REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Secagem

A secagem de produtos agrícolas consiste em se diminuir o teor de umidade a um nível que propicie condições adequadas para armazenagem, beneficiamento e comercialização.

SILVA et al. (2000) descrevem cinco tipos básicos de secadores, que são classificados quanto aos sentidos de movimentação do ar e dos grãos: secadores de fluxos cruzados, secadores de fluxos concorrentes, secadores de fluxos contracorrentes, secadores de fluxos mistos (tipo cascata) e secadores de camada fixa.

Segundo BROOKER et al. (1992), os sistemas de secagem de grãos utilizados desde 1950 são mais evolutivos que revolucionários. Nesse sentido, esforços têm sido feitos para adaptar esses tipos de secadores à realidade socioeconômica dos produtores de café do Brasil (CORDEIRO, 1982; OSORIO, 1982; SILVA e LACERDA FILHO, 1984; SABIONI, 1986; SILVA, 1991; SILVA, 2000).

## 2.2. Secadores de Fluxos Contracorrentes

Nos secadores de fluxos contracorrentes, o fluxo de ar atravessa a camada de grãos em sentido contrário ao de fluxo de grãos.

Nos Estados Unidos, a secagem em fluxos contracorrentes é realizada em silos secadores. Neste sistema, a medida que ocorre a secagem, o produto seco é conduzido para o centro do silo por um transportador helicoidal, que varre toda sua seção transversal (SILVA et al., 2000).

De acordo com BAKKER-ARKEMA et al. (1980), nos silos secadores de fluxos contracorrentes, à medida que a massa de grãos vai descendo, a sua temperatura é aumentada, atingindo valores muito próximos aos da temperatura do ar de secagem. Por isso, as temperaturas de secagem, nesse tipo de secador, normalmente, não devem ultrapassar 70 °C.

Segundo Evans, citado por SILVA (1980), os secadores de fluxos contracorrentes são os menos eficientes no uso da energia do ar de secagem, pois parte da energia é utilizada no aquecimento dos grãos, reduzindo-se a disponibilidade de energia para a realização da secagem. Entretanto, conforme BROOKER et al. (1978), se a espessura da camada de grãos for suficiente para absorver o potencial de secagem do ar, o consumo de energia, nesses secadores, torna-se relativamente baixo, podendo apresentar consumo específico de energia entre 3.500 e 4.600 kJ por kg de água evaporada.

SILVA (1991), com o objetivo de promover a adaptação da tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes à realidade brasileira, propôs um modelo de secador para a secagem de café. Na avaliação do modelo, o autor utilizou temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C, tendo obtido consumo específico de energia de 8.300, 7.547 e 6.442 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. Nesse trabalho, verificou-se que não houve efeito da temperatura sobre a qualidade da bebida do produto.

## 2.3. Secadores de Fluxos Concorrentes

Nos secadores de fluxos concorrentes, o ar aquecido encontra o grão frio e úmido e fluem ambos na mesma direção e sentido, através da câmara de secagem. Segundo HAWK et al. (1978), todos os grãos são submetidos ao mesmo tipo de tratamento nesse tipo de secador.

As trocas intensas e simultâneas de energia e massa, na entrada do secador entre o ar e o produto, causam rápida redução da temperatura inicial do ar, assim como no teor de umidade do produto. Em razão disso, a temperatura do produto permanece consideravelmente abaixo da temperatura do ar (SILVA et al., 2000).

BAKKER-ARKEMA et al. (1981), comparando a eficiência energética de secadores de fluxos cruzados e de fluxos concorrentes (de três estádios), na secagem de milho, concluíram que os secadores de

fluxos concorrentes apresentavam eficiência energética 25% superior à dos fluxos cruzados, para as mesmas condições de secagem.

Hall e Anderson, citados por BAKKER-ARKEMA et al (1981), secaram milho em secadores de fluxos concorrentes de estádio simples a 370 °C, sem comprometer a qualidade final do produto.

A temperatura máxima do ar quente, em secadores de fluxos concorrentes, depende, em primeiro lugar, do fluxo de grãos através do secador e, em menor grau, do tipo de grão e do teor de umidade inicial (BAKKER-ARKEMA et al., 1981).

Com o objetivo de adaptar a tecnologia para a secagem de café, OSÓRIO (1982) desenvolveu e analisou um secador intermitente de fluxos concorrentes, utilizando temperaturas de secagem a 80, 100 e 120 °C, tendo obtido valores de consumo específico médio de energia de aproximadamente 5.700, 4.870 e 4.760 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. Não foi observada influência da temperatura na qualidade da bebida do produto.

#### 2.4. Avaliação de Secadores

O desempenho de secadores varia de acordo com uma série de fatores como: teor de umidade inicial e final do produto, propriedades físicas do produto, temperatura de secagem, resistência oferecida ao fluxo de ar, condições ambientais (temperatura e umidade relativa), tipo de fonte de energia, sistema de carga e tipo de ventilador (SILVA et al., 2000).

BAKKER-ARKEMA et al. (1978) propuseram uma metodologia para avaliação do desempenho de secadores com base em um número reduzido de testes de campo, sob determinadas condições padronizadas, acompanhadas pela simulação do processo de secagem, com o objetivo de reduzir o tempo e os custos com os testes experimentais. Recomendaram uma avaliação rigorosa da qualidade dos grãos secos para complementar os testes de campo.

OSÓRIO (1982) e SILVA (1991) adaptaram a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et al. (1978) para a avaliação do desempenho de secadores de café. No entanto, tiveram dificuldades em fixar alguns parâmetros para a padronização dos testes, principalmente os que dizem respeito ao produto, como teor de umidade inicial e homogeneização de maturação.

#### 2.5. Simulação de Secagem

A utilização de modelos matemáticos para a simulação de secagem tem auxiliado muito no projeto, no desenvolvimento, na avaliação e na otimização de secadores. O modelo proposto por THOMPSON et al. (1968), usado neste trabalho, é considerado semi-empírico e simula o processo de secagem por meio de um conjunto de equações, baseadas nas leis de transferência de energia e massa, e de uma equação empírica de secagem. Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em SILVA et al. (2000).

## MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Fazenda Santo Antônio, situada no município de Araponga, Minas Gerais, e na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), situada no município de Ponte Nova, Minas Gerais.

Na primeira fazenda (protótipo 1), o produto utilizado foi o café (*Coffea arabica* L.) da variedade Catuaí, colhido por derriça no chão, que, depois de lavado, foi seco até o estágio de meia-seca, em terreiro de cimento.

Para a avaliação do protótipo 2, foi utilizada a mesma variedade de café, colhido por derriça no pano, despulpado por fermentação e parcialmente secado em terreiro de cimento.

### 3.1. Protótipos

O primeiro secador projetado (protótipo 1) foi construído com uma seção transversal constante de  $2,25 \text{ m}^2$ , possuindo uma capacidade estática de, aproximadamente,  $11 \text{ m}^3$ . Já o segundo secador (protótipo 1 modificado) foi construído com uma seção transversal média de  $2,0 \text{ m}^2$  e uma capacidade estática de  $7,3 \text{ m}^3$  (Figura 1). A modificação, em relação ao protótipo 1, consistiu na inclinação das paredes, ou seja, foram construídas com um ângulo de  $2,86$  graus em relação à vertical, para facilitar o escoamento de produto no interior do secador, problema freqüente no primeiro protótipo, quando da secagem de café muito úmido.

Nos secadores estudados, o produto entra, primeiramente, em uma câmara de secagem de fluxos contracorrentes e, logo após, em uma câmara de secagem de fluxos concorrentes.

Basicamente, o secador é composto das seguintes partes (Figura 1):

- a) Câmara de descanso superior(6): tem a finalidade de homogeneizar o teor de umidade da massa de grãos e fornecer resistência ao fluxo de ar para que este tenha distribuição homogênea na câmara de secagem contracorrentes.
- b) Câmara de descanso inferior: é constituída de quatro pequenas moegas que descarregam o produto em uma moega central, que o encaminha para o sistema de movimentação de produto, carga e descarga do secador, e tem os objetivos de obstruir o fluxo de ar e favorecer a movimentação homogênea da massa de grãos (3).
- c) Câmara de secagem superior, de fluxos contracorrentes (5).
- d) Câmara de secagem inferior, de fluxos concorrentes (4).
- e) Moega de recepção (1): tem a finalidade de receber o produto, por ocasião da sua recirculação e carga do secador.

- f) Sistema de movimentação de grãos (2): constituído do elevador de caneca e máquina de pré-limpeza, tem como finalidade de promover a limpeza, a carga, descarga e a recirculação do produto.
- g) Difusor de ar (10): tem o objetivo de reduzir perda de pressão do fluxo de ar.
- h) Ventilador (9): do tipo centrífugo e de pás retas, acionado por motor elétrico de 3 CV a 1.750 rpm, succiona o ar aquecido e promove a sua injeção na câmara de secagem.
- i) Fornalhas (8): dos tipos aquecimento direto (protótipo 1) e aquecimento indireto (protótipo 2).

Com exceção da fornalha, todas as partes do secador foram construídas com chapas e perfis metálicos.

### 3.2. Avaliação de Desempenho do Secador

Foram realizados quatro testes para o protótipo 1, sendo três utilizando temperatura de secagem de 120 °C e um de 100 °C. Para o protótipo 2, foram realizados três testes com temperatura de secagem ao redor de 75°C.

A temperatura do ar de secagem foi obtida por meio de potenciômetro digital (precisão de  $\pm 0,1$  °C), conectado a uma sonda termoelétrica em vários pontos de medições, conforme ilustra a Figura 2.

As condições do ar ambiente e de exaustão foram determinadas com auxílio de termoigrógrafo e psicrômetro, respectivamente.

As massas específicas do produto foram determinadas com o uso de uma balança de peso hectolítrico.

Os teores de umidade do produto foram obtidos pelo método de estufa, a  $103 \pm 1$  °C por 72 horas.

As amostras iniciais para determinação do teor de umidade e massa específica do produto foram coletadas na saída da máquina de pré-limpeza, após a homogeneização do produto no interior do secador. As amostras finais foram coletadas de forma aleatória na descarga do secador.

O combustível utilizado nos três testes a 120 °C (protótipo 1) foi madeira proveniente da receita de café Mundo novo. Para os outros testes, foi utilizada lenha de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).

A quantidade de energia consumida foi determinada a partir da massa do combustível gasto, após as fornalhas entrarem em regime permanente de operação.

O teor de umidade do combustível foi determinado em estufa, a  $103 \pm 1$  °C por 72 horas, enquanto o poder calorífico superior (Pcs) foi determinado através da Bomba Calorimétrica de Malher e o poder calorífico inferior (Pci), pela equação proposta por Tiliman.

$$P_{ci} = P_{cs} (1 - 0,0114.U)$$

eq. 01

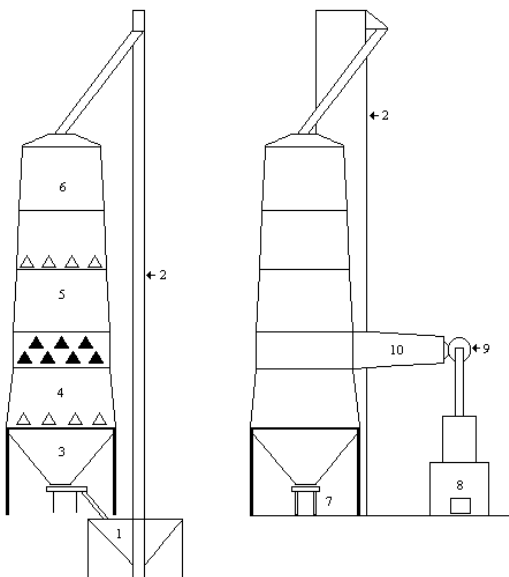
... ..  
em que

$P_{ci}$  = poder calorífico inferior,  $\text{kJ.kg}^{-1}$

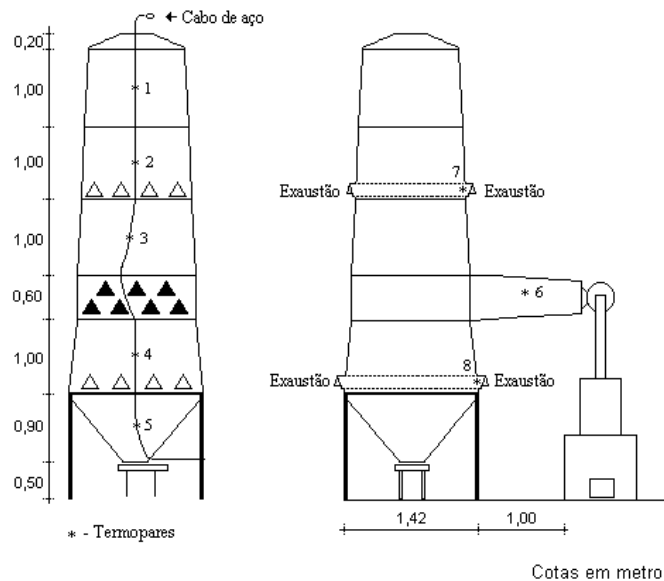
$P_{cs}$  = poder calorífico superior,  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ; e

$U$  = teor de umidade da madeira, percentagem b.u.

A vazão mássica do produto no interior do secador foi medida diretamente no ponto de descarga da peneira transportadora.



**Figura 1** - Vistas lateral e frontal do secador



**Figura 2** - Esquema da localização dos termopares.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os valores dos resultados obtidos na avaliação de desempenho do secador.

A vazão de ar, determinada nos pontos de exaustão, foi de  $46 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ .

A velocidade do produto no interior do secador foi de  $0,24 \text{ m.min}^{-1}$ .

### 4.1. Temperaturas e Umidades Relativas

Os valores médios das temperaturas ambientes, do ar de secagem, de exaustão e nos pontos 3 e 4 (Figura 2), e das umidades relativas ambiente e de exaustão, encontram-se na Tabela 2.



A representação gráfica das temperaturas em função do tempo secagem para dois testes característicos (teste 2 - protótipo 1 e teste 3 – protótipo 2) encontram-se nas Figuras 3 e 4.

#### 4.1.1. Temperatura do Ar de Secagem

Observa-se, na Tabela 2, que não foi possível fixar as temperaturas do ar de secagem em 120 e 100 °C, sendo obtidos valores médios de 122, 119, 121 e 101 °C para os testes de 1 a 4, respectivamente, em consequência das características operacionais da fornalha.

Na representação gráfica (Figuras 5 a 6), nota-se que, logo no início de cada teste, a temperatura de secagem atingiu um valor próximo ao da temperatura préfixada.

#### 4.1.2. Temperatura do Ar nos Pontos A e B

As Figuras de 6 a 9 mostram que o ar, na câmara de secagem de fluxos contracorrentes (ponto 3) , atingiu uma temperatura bastante inferior à temperatura do ar de secagem, atingindo valores máximos de 42, 42, 44 e 40 °C, para os testes de 1 a 4, respectivamente.

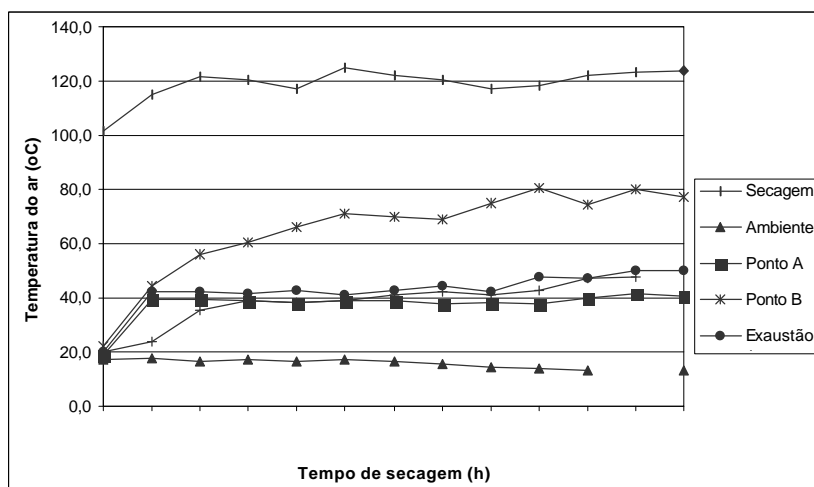
O ar, na câmara de secagem de fluxos concorrentes (ponto 4), apresentou-se com temperatura superior ao da câmara e secagem de fluxos contracorrentes, atingindo os valores máximos de 63, 80, 92 e 63 °C para os testes de 1 a 4, respectivamente. Isso se deve ao aquecimento e à secagem que o produto experimentou na câmara de fluxos contracorrentes, chegando na de fluxos concorrentes com menor quantidade de água superficial, diminuindo, assim, a taxa de resfriamento evaporativo.

**Tabela 1** - Parâmetros relativos às temperaturas do ar de secagem fixadas, massa dos lotes, massa específica, teor de umidade e tempo de secagem

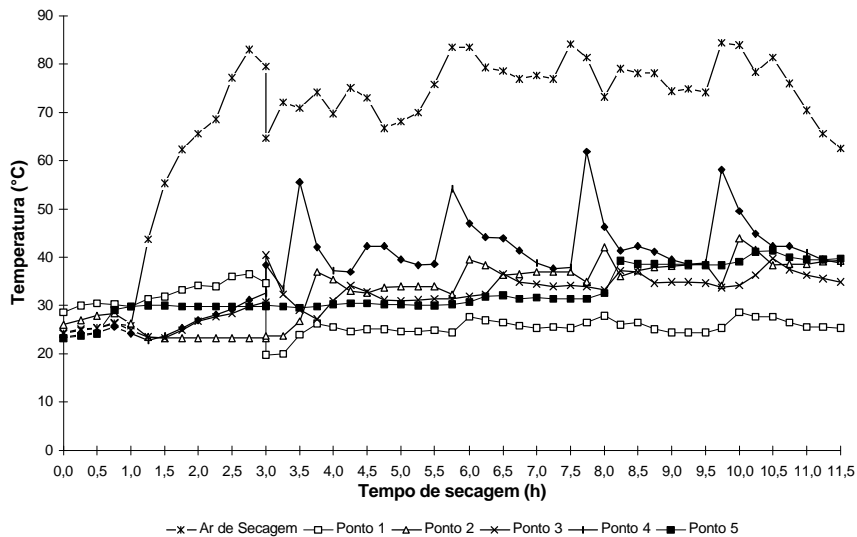
	Temp. do ar de secagem (°C)	Massa do lote		Massa Específica		Teor de Umidade		Tempo de secagem (horas)
		Inicial (kg)	Final (kg)	Inicial (kg/m <sup>-3</sup> )	Final (kg/m <sup>-3</sup> )	Inicial (% b.u.)	Final (% b.u.)	
Protótipo 1								
Teste 1	122	5286	4459	458	436	39,6	28,4	9,5
Teste 2	119	4459	3695	416	392	28,4	13,6	12,0
Teste 3	121	4697	3390	460	398	37,2	13,0	17,5
Teste 4	101	4965	4137	446	434	33,5	20,2	15,0
Protótipo 2								
Teste 1	76,9	3250	2949	-	-	32,4	25,5	9,3
Teste 2	74,6	3550	2968	-	-	42,3	31,0	10,2
Teste 3	74,5	2830	2500	-	-	24,0	14,0	12,0

**Tabela 2** - Parâmetros relativos às temperaturas médias do ar de secagem, de exaustão e ambiente, umidades relativas médias (ambiente e exaustão) e temperaturas médias do ar na massa de grãos nos pontos 3 e 4

	Temperatura do ar			Umidade Relativa média do ar		Temp. médias do ar na massa dos grãos			
	Secagem (°C)	Exaustão		Ambiente (°C)	Ambiente (°C)	Exaustão		Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)
		Conc. (°C)	Cont. (°C)			Conc. (°C)	Cont. (°C)		
Protótipo 1									
Teste 1	122	41	35	23	63	91	84	38	52
Teste 2	119	43	38	16	80	73	68	38	65
Teste 3	121	44	42	22	73	75	76	38	64
Teste 4	101	39	38	24	63	75	72	36	48
Protótipo 2									
Teste 1	76,9	31,0		16,6	73,5	91,1		29,6	36,3
Teste 2	74,6	31,9		20,7	77,8	88,6		31,05	34,5
Teste 3	74,5	32,3		20	83,0	80,1		31,2	38,0



**Figura 3** - Variação das temperaturas ambiente, secagem, exaustão 1, exaustão 2, ponto A e ponto B, em função do tempo de secagem (Teste 2 – protótipo 1).

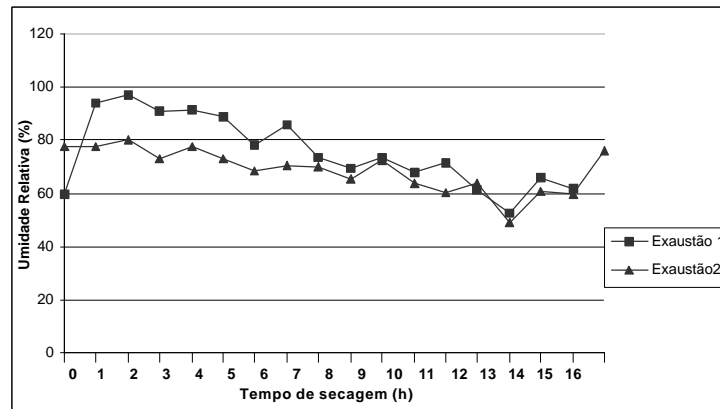


**Figura 4** - Variação das temperaturas ambiente, secagem, exaustão 1, ponto A e ponto B, em função do tempo de secagem (Teste 3 – protótipo 2).

#### 4.1.3. Temperaturas e Umidades Relativas do Ar de Exaustão

A Figura 3 mostra que o ar de exaustão da câmara de fluxos concorrentes (exaustão 1) apresentou-se com uma temperatura ligeiramente superior à da exaustão da câmara de fluxos contracorrentes (exaustão 2). Pode-se observar também, na Figura 3, que o ar, na câmara de fluxos contracorrentes (ponto A), já está com uma temperatura próxima à de exaustão dessa câmara (exaustão 2). Isso, provavelmente, se deve ao fato de que nesse ponto já tenha ocorrido equilíbrio entre o ar e o grão. Fato semelhante pode ser visto na Figura 4, que mostra, ainda, grande variação de temperatura, em todos os pontos, devido à instabilidade da fornalha com aquecimento indireto.

Como pode ser visto na Tabela 2, a umidade relativa média do ar de exaustão, em função do tempo de secagem, para os dois protótipos está bem acima da dos valores encontrados para outros tipos de secadores. Foi observado, em todos os testes, que o ar de exaustão apresentou-se bem próximo da saturação, durante grande parte do tempo de secagem, perdendo essa condição no final do processo, quando o produto encontrava-se com baixo teor de umidade. A Figura 5 mostra o comportamento da umidade relativa do ar de exaustão do tipo de secador em estudo.



**Figura 5** - Variação das umidades relativas do ar de exaustão nos pontos 1 e 2, em função do tempo de secagem (Teste 3 – protótipo 1).

## 2. Teor de Umidade e Massa Específica do Produto

Em virtude da dificuldade de se conseguir quantidade suficiente de café para a carga do secador e se determinar com exatidão o teor de umidade do produto em campo, inviabilizou-se a padronização dos teores de umidade inicial e final do produto (Tabela 1). Na Tabela 1, observa-se que os testes 1 e 4 foram interrompidos com teores de umidade do produto ainda elevados - 28,4 e 20,2% b.u., respectivamente. Isso se deveu ao período chuvoso e ao fato de o secador não se encontrar devidamente protegido por uma cobertura.

Como não foi possível padronizar o produto utilizado para determinação do peso hectolítrico, optou-se por estudar a variação da massa específica, expressa em matéria seca, em função do teor de umidade do produto.

## 4.3. Energia

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de teores de umidade, poder calorífico inferior e consumo horário de lenha, consumo específico de energia, teórico e real, e eficiência da fornalha. Apesar do uso de fornalha com aquecimento indireto, a elevada eficiência apresentada no teste 2 (protótipo 2) se deve ao fato de o secador ter trabalhado na faixa de altos teores de umidade inicial e final.

**Tabela 3** - Valores do poder calorífico inferior (PCI), teor de umidade e consumo de combustível, consumo específico de energia do secador e eficiência da fornalha

Teste	Lenha	PCI	Umidade	Consumo de lenha	Consumo de energia		Eficiência da fornalha
					Teórico	Real	
		$\text{kJ.kg}^{-1}$	(% bu.)	$\text{kg.h}^{-1}$	$\text{kJ.kg}^{-1}$	$\text{kJ.kg}^{-1}$	%
<b>Protótipo 1 – Aquecimento direto</b>							
<b>1</b>	<b>C</b>	<b>15.269</b>	<b>17,7</b>	<b>30</b>	<b>3.758</b>	<b>5.144</b>	<b>73</b>
<b>2</b>	<b>C</b>	<b>15.269</b>	<b>17,7</b>	<b>27</b>	<b>5.371</b>	<b>6.573</b>	<b>82</b>
<b>3</b>	<b>C</b>	<b>14.924</b>	<b>19,7</b>	<b>27</b>	<b>4.372</b>	<b>5.457</b>	<b>80</b>
<b>4</b>	<b>E</b>	<b>11.405</b>	<b>24,0</b>	<b>25</b>	<b>4.508</b>	<b>5.161</b>	<b>87</b>
<b>Protótipo 2 – Aquecimento indireto</b>							
<b>1</b>	<b>E</b>	<b>12.044</b>	<b>30</b>	<b>26,8</b>	<b>7.700</b>	<b>10.003</b>	<b>77</b>
<b>2</b>	<b>E</b>	<b>12.044</b>	<b>30</b>	<b>26,9</b>	<b>3.839</b>	<b>5.697</b>	<b>67</b>
<b>3</b>	<b>E</b>	<b>12.044</b>	<b>30</b>	<b>25,0</b>	<b>8.081</b>	<b>10.980</b>	<b>73</b>
<b>C = Lenha de café Mundo novo E = Lenha de Eucalipto</b>							

#### 4.4. Simulação de Secagem

Para a validação do programa implementado, foi simulado cada um dos testes realizados, sendo usados como parâmetros de entrada os seguintes dados:

- Valores médios de temperatura de secagem, temperatura ambiente, temperatura inicial do grão e umidade relativa (Tabela 2).

- Valores iniciais da massa específica e teor de umidade do produto (Tabela 1).

**Tabela 4** - Comparação entre os valores médios da massa de grãos dos teores de umidade final experimentais e simulados e os respectivos desvios absolutos

Teste	Teor de umidade		Desvio Absoluto (% b.u.)
	Experimental (% b.u.)	Simulado (% b.u.)	
1	28,4	28,5	0,1
2	13,6	11,5	2,1
3	13,0	12,3	0,7
4	20,2	17,1	3,1
Desvio Absoluto			1,5

#### 4.5. Análise do Secador

Em razão da dificuldade de se padronizar as propriedades físicas do produto utilizado, a avaliação do desempenho do protótipo 1 foi realizada usando-se o programa de simulação implementado. Os valores empregados nessa avaliação foram:

- a) Produto – umidade inicial de 30% b.u.), umidade final de 12% b.u. e massa específica de  $415 \text{ kg.m}^{-3}$ .
- b) ar ambiente – temperatura de  $21^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 70%.
- c) ar de secagem – vazão de  $46 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$  e temperaturas de 80, 100 e  $120^\circ\text{C}$ .
- d) secador – capacidade de 4.500kg e fornalha com 70% de rendimento.

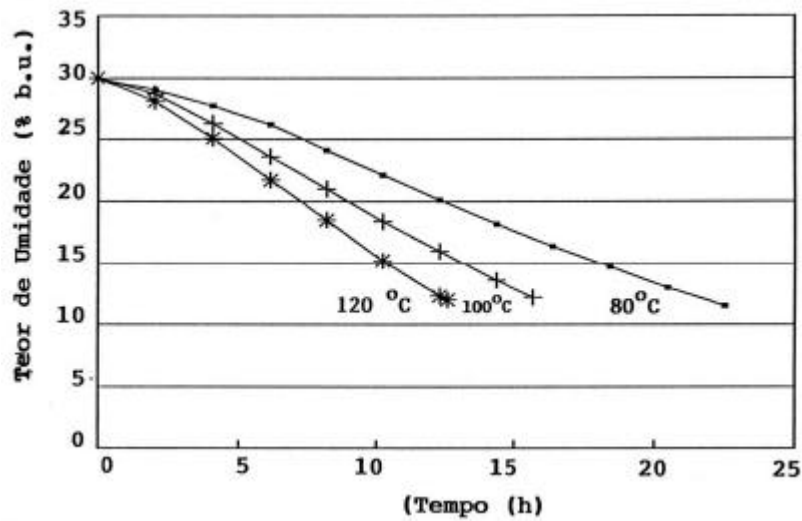
Na Figura 6, têm-se as curvas de secagem para as temperaturas do ar de 80, 100 e  $120^\circ\text{C}$ , simuladas segundo as condições anteriormente estabelecidas.

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros relativos ao desempenho do secador. Observa-se que a elevação da temperatura de secagem de 80 para  $120^\circ\text{C}$  reduz o tempo de secagem e o consumo específico de energia em 44,2% e 6,3%, respectivamente, enquanto a capacidade de secagem aumenta 79,3%. A baixa diferença no consumo específico de energia, é, provavelmente, em consequência de a umidade relativa do ar de secagem estar tendendo a zero com o aumento da temperatura. Essa hipótese é reforçada ao se comparar o valor do consumo específico de energia, quando se eleva a temperatura de secagem de 100 para  $120^\circ\text{C}$ . Observa-se que houve aumento nesse parâmetro, quando o esperado era o inverso.

Apesar de não ter sido feito teste de qualidade, todos os lotes de café utilizados no experimento foram comercializados como de boa qualidade de bebida. No entanto, o produto referente à temperatura de secagem de  $120^\circ\text{C}$  apresentou-se, visualmente, como um tipo inferior.

Considerando a pequena diferença entre os consumos específicos de energia e a qualidade do produto para as temperaturas estudadas, recomenda-se a utilização da temperatura de secagem de  $80^\circ\text{C}$  para a operação do secador.

Comparando esses resultados com os encontrados por SILVA (1992), pode-se concluir que, com a temperatura de secagem de  $80^\circ\text{C}$ , o consumo específico de energia do secador proposto é 27% inferior ( $8.300 \text{ kJ.kg}^{-1}$  de água evaporada).



**Figura 6** - Variações dos teores médios de umidade simulados, em função do tempo, para as temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C.

**Tabela 5** - Avaliação de desempenho do secador, por meio de simulação, para três temperaturas de secagem, considerando-se as condições estabelecidas

Temperatura de secagem (°C)	Tempo de secagem (h)	Consumo de energia (kg.kg <sup>-1</sup> de água)	Capacidade de secagem (kg.h <sup>-1</sup> )
80	22,5	6.068	200
100	15,7	5.657	287
120	12,6	5.684	358

## CONCLUSÕES

Para avaliação do secador, foram realizados quatro testes, sendo três para a temperatura de secagem de 120 °C e um para a de 100 °C. A fim de auxiliar a avaliação do secador, foi implementado um programa computacional para simulação de secagem no secador proposto, com base no modelo de THOMPSON et al. (1968).

Com base nos resultados obtidos nos testes experimentais e nos simulados pelo programa, pode-se concluir que:

- A temperatura final do produto é inversamente proporcional à sua velocidade no interior do secador.

- Para a redução do teor de umidade de 30 para 12%, utilizando-se temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C, os consumos específicos de energia foram de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ por kg de água evaporada, respectivamente.
- Tendo em vista a pequena diferença entre os consumos específicos de energia para as temperaturas de secagem de 80 e 120 °C e a qualidade final do produto, recomenda-se, para a secagem de café no secador estudado, a utilização da temperatura de 80 °C;
- A qualidade do produto não foi afetada pelo sistema nem pelas altas temperaturas de secagem.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKKER-ARKEMA, F.W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.30, n.1, p.1-22, July, 1984.
- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Publishing, 1992. 450 p.
- CORDEIRO, J.A.B. **Influência da temperatura e do tempo de repouso na secagem de café (*Coffea arabica*, L.) em camadas fixas**. Viçosa: UFV, 1982. 60p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1982.
- HAWK, A. L.; NOYES, R.T.; WESTLAKEN, C. M.; POSTER, C. H.; BAKKER-ARKEMA, F. W. **The Present Status of commercial grain drying**. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 30 p. (paper 78 – 3008)
- OSÓRIO, A.G.S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa: UFV, 1982. 57p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1982.
- SABIONE, P.M. **Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão de ar na secagem de milho (*Zea mays* L.)**. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: UFV, 1986. 106 p.
- SILVA, L.C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes**. Viçosa: UFV, 1991. 74p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- SILVA, J.S.; SABIONE, P.M.; AFONSO, A.D.L; PINTO, F.A.C. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**. Série Armazenamento, v.2, n.2, p.1-17, 1992.
- SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Editora Aprenda Fácil, Viçosa – MG. 502 p. 1992.



SILVA, J.S. **An engineering economic comparison of five drying techniques for shelled corn of Michigan Farms.** East Lansing, Michigan State University. 1980. 200 p.

SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F. **Construção de secadores para produtos agrícolas.** Viçosa – MG. Universidade Federal de Viçosa, 1984. 17 p. (Informe Técnico, 41).

THOMPSON T. L.; FOSTER, G.H.; PEART, R.M. Mathematical simulation of corn drying – a new model. **Transaction of the ASAE.** St. Joseph Michigan , 11(4) : 582-586. 1992.