

FERNANDA AUGUSTA DE OLIVEIRA MELO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE FLUXOS
CONCORRENTES, COM CARGA, REVOLVIMENTO E DESCARGA
PNEUMÁTICOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFRV**

T

M528d
2008

Melo, Fernanda Augusta de Oliveira, 1975-
Desenvolvimento e avaliação de um secador de fluxos
concorrentes, com carga, revolvimento e descarga
pneumáticos / Fernanda Augusta de Oliveira Melo.
– Viçosa, MG, 2008.
xi, 122f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Juarez Sousa e Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 95-101.

1. Café - secagem. 2. Equipamento de secagem - projetos
e construção. 3. Café - Processamento. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

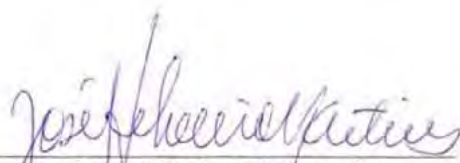
CDD 22.ed. 633.73

FERNANDA AUGUSTA DE OLIVEIRA MELO

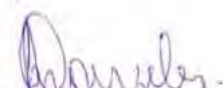
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR DE FLUXOS
CONCORRENTES, COM CARGA, REVOLVIMENTO E DESCARGA
PNEUMÁTICOS


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

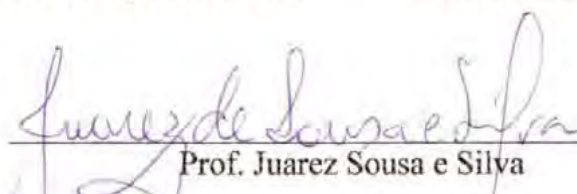
APROVADA: 23 de junho de 2008.


Prof. José Helvécio Martins
(Co-orientador)


Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro


Dr. Sérgio Maurício Lopes Donzeles


Prof. Evandro de Castro Melo


Prof. Juarez Sousa e Silva

A Deus

Aos meus pais,

Às minhas queridas irmã e sobrinha.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter estado sempre presente ao meu lado.

Aos meus pais, Vicente e Zélia, pelo apoio e carinho.

À minha irmã Grace por ter sempre dado-me forças para concluir este curso.

À minha sobrinha Marina pelo superação.

À Universidade Federal de Viçosa, pela possibilidade de realização do curso.

Ao Conselho nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico–CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao site Pós-colheita pelo financiamento da pesquisa.

Ao professor Juarez Sousa e Silva, pela orientação, pela confiança e pela dedicação, na qual possibilitou a realização deste trabalho.

Ao co-orientador Jose Helvécio Martins, pelo apoio e pelas sugestões.

Ao co-orientador Roberto Precci Lopes, pela atenção e pelas sugestões.

Aos meus colegas da Pós-graduação Reginaldo, Carlão, Daniela, Ediney, Robertinha, Cris e Consuelo pela ajuda, pelas idéias e pelo incentivo.

Aos funcionários do Setor de Armazenamento e Pré-processamento de Produtos Agrícolas, “Geraldinho”, Evandro, Hamilton, “Inhame”, “Carlos Pintinho” e “Zé Baixinho” pela amizade e colaboração na montagem do experimento.

A minha sempre amiga Denise de Freitas Silva.

BIOGRAFIA

FERNANDA AUGUSTA DE OLIVEIRA MELO, filha de Vicente Augusto de Mello e Zélia Maria Oliveira Melo, nasceu em Volta Redonda, estado do Rio de Janeiro, em 8 de novembro de 1975.

Em 2001, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

Em 2002, trabalhou como professora substituta no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em 2003, concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura.

Em 2004, concluiu o curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho na Universidade Federal de Juiz de Fora.

Em março de 2005, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura, concluindo o curso em junho de 2008.

SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Agronegócio café.....	5
2.2. Qualidade comercial do café.....	7
2.3. Etapas pré e pós-colheita do café.....	8
2.4. Preparo e pré-processamento do café.....	9
2.4.1. Processamento por “via seca”.....	10
2.4.2. Processamento por “via úmida”.....	11
2.5. Pré-secagem.....	12
2.6. Secagem.....	13
2.6.1. Secagem artificial em secadores mecânicos.....	14
2.6.1.1. Secadores de fluxo concorrente.....	16
2.6.2. Secagem contínua e intermitente.....	17
2.6.3. Secagem a baixas temperaturas.....	18
2.6.4. Secagem combinada.....	19
2.7. Parâmetros da secagem.....	22
2.7.1. Temperatura do ar de secagem.....	22
2.7.2. Temperatura da massa de grãos.....	23
2.7.3. Fluxo de ar.....	23

2.7.4.	Teor de água dos grãos.....	24
2.8.	Transporte pneumático.....	25
2.9.	Geradores de calor para o ar de secagem.....	28
2.10.	Avaliação do desempenho do sistema de secagem.....	28
2.10.1.	Avaliação energética dos sistemas de secagem.....	29
2.10.2.	Avaliação do sistema de secagem.....	31
2.11.	Análise de custos dos sistemas de secagem.....	33
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1.	Local.....	34
3.2.	Construção do sistema de secagem e armazenagem de café.....	34
3.2.1.	Construção do secador pneumático de fluxos concorrentes.....	34
3.2.2.	Construção do pré-secador.....	43
3.2.3.	Construção do silo secador-armazenador.....	44
3.2.4.	Vista do sistema de secagem e armazenagem de café.....	47
3.3.	Sistema de aquecimento indireto do ar de secagem.....	48
3.4.	Matéria-prima.....	48
3.5.	Funcionamento do sistema de secagem e armazenagem de café.....	49
3.5.1.	Pré-secagem em terreiro secador.....	49
3.5.2.	Funcionamento do secador pneumático de fluxos concorrentes.....	50
3.5.3.	Silo secador-armazenador.....	53
3.6.	Planejamento dos testes.....	54
3.6.1.	Secador pneumático de fluxo concorrente.....	54
3.6.2.	Sistema de secagem e armazenamento.....	55
3.7.	Instrumentação do secador pneumático e pré-secador.....	56
3.7.1.	Temperaturas.....	56
3.7.2.	Medição da velocidade do ar de secagem e do ar de exaustão no secador e pré-secador.....	59
3.7.3.	Determinação da massa inicial e final do café.....	60
3.7.4.	Consumo de energia.....	61
...3.7.5.	Qualidade final do produto.....	63
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1.	Avaliação dos processos de secagem.....	64
4.1.1.	Secador pneumático.....	65
4.1.1.1.	Características dos grãos e do ar no processo de secagem.....	65

4.1.1.2. Curvas de secagem.....	70
4.1.1.3. Consumo de energia.....	72
4.1.1.4. Qualidade final do café.....	74
4.1.2. Secador pneumático em combinação com pré-secado.....	75
4.1.2.1. Características dos grãos e do ar no processo experimental	75
4.1.2.2. Curvas de secagem.....	77
4.1.2.3. Consumo de energia.....	80
4.1.2.4. Qualidade final do café.....	81
4.1.3. Secador pneumático com secagem complementar em silo secador.....	82
4.1.3.1. Características dos grãos no silo.....	86
4.1.3.2. Consumo de energia.....	82
4.1.4. Secador pneumático em combinação com pré-secador com secagem complementar em silo secador.....	83
4.1.4.1. Características dos grãos no silo.....	83
4.1.4.2. Consumo de energia.....	83
4.1.4.3. Qualidade final do café.....	85
4.2. Avaliação de custos dos sistemas de secagem.....	87
4.2.1. Custos de implantação dos sistemas de secagem.....	87
4.2.2. Custos operacional do sistemas de secagem.....	90
5. RESUMOS E CONCLUSÕES.....	93
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	103

RESUMO

MELO, Fernanda Augusta de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2008. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de fluxos concorrentes, com carga, revolvimento e descarga pneumáticos.** Orientador: Juarez Sousa e Silva. Co-orientadores: Roberto Precci Lopes e José Helvecio Martins.

Um secador de fluxos concorrentes com carga, revolvimento e descarga pneumáticos, compatível com a produção e a capacidade de investimento do pequeno produtor para a secagem de café pergaminho foi projetado, construído e avaliado. Visto que o sistema pneumático ficaria superdimensionado quando não estiver movimentando o produto durante a fase de secagem, o ventilador foi usado também, por meio de uma bifurcação, para insuflar ar quente em um pré-secador construído segundo Silva et al. (2001). Portanto, o novo secador foi avaliado separadamente e em um sistema combinado contendo um pré-secador e silo secador. Para avaliação do secador pneumático de fluxos concorrentes, foram realizados quatro testes, três testes foram com carga completa e um teste com meia carga, sendo que a vazão de ar utilizada foi igual a $23,15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e $33,41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, respectivamente. Para a avaliação do sistema de secagem combinada, composto por pré-secador, secador pneumático de fluxos concorrentes e silo secador-armazenador, foram realizados quatro testes, sendo três deles com carga completa e um com meia carga. A vazão de ar utilizada foi igual a $58,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e $64,3 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, respectivamente. O protótipo apresentou, operando sozinho,

consumo específico de energia igual a 3.022 e 3.886 kJ kg⁻¹ de água evaporada, testes FT1 e FT2, respectivamente. Estes valores estão abaixo dos limites de consumo previstos na literatura para este tipo de secador e, no teste FT3, o consumo específico médio de energia (4.856 kJ kg⁻¹ de água evaporada) esteve dentro dos limites de consumo previstos na literatura, mostrando-se eficiente energeticamente. No teste em que o secador pneumático operou com meia carga, FTM4, o consumo específico de energia (7.041 kJ kg⁻¹ de água evaporada) foi superior aos demais testes, mostrando ser operável com carga inferiores para a qual foi dimensionado. No sistema de secagem combinada composto por pré-secador, secador pneumático de fluxos concorrentes e silo secador-armazenador nos testes FD5, FD6 e FD7 o sistema apresentou consumo específico total de energia de 4.250; 5.712 e 4.690 kJ kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente. Cujos valores são menores do que alguns processos tradicionais de secagem. No teste em que o pré-secador e o secador pneumático operaram com meia carga, FTM4, o consumo específico total de energia (6.954 kJ kg⁻¹ de água evaporada) foi compatível com os demais testes, sendo eficiente energeticamente. O secador desenvolvido é de fácil operação durante o carregamento, secagem e descarga e exige pouca manutenção e mão-de-obra, funciona eficientemente com a quantidade de café disponível. O café processado no novo secador foi de boa qualidade quanto ao tipo e bebida. O sistema de secagem combinada (secador híbrido, secador pneumático de fluxos concorrentes e silo secador armazenador) é uma técnica com a qual foi obtido um produto de ótima qualidade, além de ser economicamente viável.

ABSTRACT

MELO, Fernanda Augusta de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2008. **Development and evaluation of a concurrent flow dryer, with pneumatics load, revolving and discharge.** Adviser: Juarez Sousa e Silva. Co-advisers: Roberto Precci Lopes and José Helvécio Martins.

A concurrent flow dryer with pneumatic load, revolving and discharge, that was compatible with either production and the investment capacity of the small enterprise for drying the pulped coffee was projected, built and evaluated. Because the pneumatic system would be overdimensioned when it would not be moving the product during the drying phase, the fan was also used through a bifurcation to insufflate the hot air in a pre-dryer constructed according to SILVA et al. (2001). Thus, the new dryer was separately evaluated and in a combined system containing both pre-dryer and drying bin. For evaluating the concurrent flow dryer, four tests were accomplished. as being three tests with complete load and one with half load, whereas the air flow was $23.15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ and $33.41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, respectively. For evaluation of the combined drying system composed by the pre-dryer, concurrent flow dryer and storer-dryer bin, four tests were accomplished, from which three were with complete load and one with half load, whereas the air flows of $58.5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ and $64.3 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ were respectively used. When operating separately, the prototype showed the values 3,022 and 3,886 kJ kg^{-1} of evaporated water for specific energy consumption in the tests FT1 and FT2, respectively. Those values are below the consumption limits foreseen in the available

literature for this dryer type. In test FT3, however, the average specific energy consumption was 3,856 kJ kg⁻¹ of evaporated water, which was within the consumption limits foreseen in the literature, therefore energetically efficient. When the pneumatic dryer operated with half load (FTM4), the specific energy consumption was 7,041 kJ kg⁻¹ evaporated water, therefore superior to the other tests, as showing to be operable with lower load for which it was dimensioned. In the combined drying system composed by pre-dryer, concurrent flow dryer and storer-dryer bin, the system showed a total specific energy consumption of 4,250; 5,712 and 4,690 kJ kg⁻¹ evaporated water in the tests FD5, FD6 and FD7 respectively, which are below in comparison with some traditional drying processes. When the pre-dryer and the pneumatic dryer operated with half load (FTM4), the total specific energy consumption (6,954 kJ kg⁻¹ evaporated water) was compatible to the other tests, as being energetically efficient. The developed dryer is easily operated during loading, drying and discharge, as well as requires little maintenance and labor, and works efficiently with the coffee amount available. The coffee processed in the new dryer showed good quality concerning to the type and beverage. The combined drying system (hybrid dryer, concurrent pneumatic flow dryer and storer-dryer bin) is a technique that provided a high-qualified product that was also economically viable

1. INTRODUÇÃO

Mudanças significativas ocorreram no mercado mundial de café, principalmente a partir da década de 90. Atualmente, essas mudanças se expressam pelo aumento dos movimentos especulativos em torno dos preços e intensificação da competitividade pela incorporação no mercado de países com potencial produtivo a custos muito reduzidos. A globalização da economia, que também atinge a atividade cafeeira, pressupõe a oferta de produtos com qualidade e em quantidade, no sentido de garantir uma oferta continuada com bom preço, aliado, preferencialmente, às questões sociais e ecológicas (BARRIOS, 2001).

Neste contexto, apresenta-se um impasse: não é possível ignorar o enorme potencial agrícola brasileiro, mas também não é possível desconsiderar as dificuldades envolvidas. Portanto, se por um lado há um setor modernizado que tem reagido rapidamente aos incentivos tecnológicos, por outro sabe-se que seu crescimento se baseia num pacote intensivo de capital e energia, precisamente os fatores que agora se tornaram escassos (PALACIN, 2007).

Segundo Silva & Lucena (2000), para adoção de uma unidade de secagem apropriada, técnica e economicamente viável, é indispensável conhecer alguns aspectos como: gerenciamento do sistema, capacidade de secagem, eficiência energética, tipo de energia, bem como a influência que estes parâmetros exercem sobre a qualidade final do produto. Portanto, considerando-se os altos custos energéticos e os baixos preços dos produtos agrícolas, torna-se indispensável conhecer, pelo menos, o consumo específico de energia e a qualidade do produto após a secagem. Segundo os autores, o custo inicial

e a capacidade dinâmica não são conhecimentos suficientes para se decidir quanto à aquisição de um sistema de secagem.

No Brasil, o processo de secagem artificial, em secadores compatíveis com a capacidade de investimento da agricultura familiar, foi iniciado recentemente, com a criação do CBP&D-Café aliado à alta potencialidade que a cafeicultura familiar vem apresentando com o objetivo de produzir cafés de qualidade. Apesar da disponibilidade de tecnologias (algumas desenvolvidas no DEA/UFV), a maioria dos pequenos e médios produtores ainda usa processos primitivos para a secagem deste produto (SILVA et al., 2005).

A secagem artificial do café, em secadores mecânicos, é considerada muito importante, pois, agiliza a colheita e, principalmente, por não depender das condições climáticas. Apesar de ser, economicamente, mais viável que o método de terreiros, que muitos a consideram, erroneamente, como tecnologia de baixo custo. O custo inicial para a instalação de um secador mecânico, aliado à exigência de algum conhecimento técnico, dificulta a adoção do sistema pelos pequenos produtores, que são responsáveis por grande parte da produção nacional (MACHADO et al., 2003).

No processo de secagem artificial de café, um dos problemas refere-se ao fato de a operação ser realizada em secadores projetados para outros grãos e adaptados para a secagem de café, resultando alto custo operacional e baixa eficiência energética (PINTO FILHO, 1994; SAMPAIO, 2004). Além disso, o tamanho dos secadores não é compatível com a quantidade produzida pelo pequeno cafeicultor. No caso de desenvolvimento ou adaptação de secadores para atender às necessidades de secagem do pequeno cafeicultor, deve-se levar em conta não somente o tamanho, mas também a capacidade de funcionar com regularidade para outros tipos de produtos. Segundo Silva et al. (2005), a pequena cafeicultura é também conhecida por produzir quantidades variáveis de tipos de grãos tais como arroz, feijão e milho.

Outro problema que aparece no processo de secagem do café é a dificuldade de escoamento dos grãos durante o início da secagem, muitas vezes inviabilizando a utilização de secadores dotados de dispositivos convencionais de movimentação dos grãos (helicóides e elevadores de canecas). Os secadores equipados com mecanismos convencionais para o transporte de grãos, não são recomendados para secagem de café natural e descascado, quando estes apresentam teor de água acima de 40 % b.u.. Nestes casos, recomenda-se a pré-secagem em terreiros ou em pré-secadores com ar aquecido (PINTO FILHO, 1994). Portanto, um secador com sistema de carga e revolvimento

(helicóides, elevadores de canecas e pneumáticos) poderá produzir um café de boa qualidade se a matéria-prima, saída da pré-secagem (natural ou artificial), apresentar boa qualidade. Em outras palavras, não se pode melhorar a qualidade de um produto no secador, mas pode-se mantê-la ou reduzir a intensidade de degradação.

Os transportadores pneumáticos usados em unidades armazenadoras tiveram origem nos equipamentos de pressão, usados para carga e descarga de grãos em navios. Os transportadores pneumáticos movem os grãos, mediante a utilização de uma corrente de ar em alta velocidade, através de um sistema de tubulação hermético. São versáteis e, com condutores flexíveis, podem ser usados para conduzir grãos em áreas de difícil alcance para outros transportadores convencionais. A aplicação de pneumáticos envolve desde a movimentação de grãos em uma colhedora combinada, carga e descarga de navios, até o transporte de materiais sólidos na industrialização de cimento.

O ganho tecnológico, na área de pós-colheita do café, advindo das pesquisas, aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos mais eficientes e de simples utilização, juntamente com sistemas de menor custo e maior eficiência de secagem e armazenagem, têm permitido um salto de qualidade do produto, o que tem valorizado o café no concorrido mercado nacional e internacional. As racionalizações do uso da energia e dos impactos ambientais das práticas e tecnologias geradas, também, são desafios a ser vencidos, para alcançar a qualidade desejada, a sustentabilidade e a competitividade do café brasileiro.

Diante do exposto, foi objetivo neste trabalho projetar, construir e avaliar um secador de fluxos concorrentes com carga, revolvimento e descarga pneumáticos, compatível com a produção e a capacidade de investimento da pequena produção para a secagem de café pergaminho.

Visto que o sistema pneumático ficará superdimensionado quando não estiver movimentando o produto durante a fase de secagem, o ventilador será usado também, por meio de uma bifurcação, para insuflar ar quente em um pré-secador construído segundo SILVA (2001). Portanto, o novo secador foi avaliado em sistema combinado, contendo um pré-secador e um silo secador. Especificamente, foram objetivos deste trabalho:

a) Desenvolver um protótipo que tenha baixo custo inicial e que funcione adequadamente, com quantidades variáveis de produto (carga total e pequenas quantidades de café), que seja acessível ao pequeno produtor, mas não altere, significativamente, a qualidade inicial do produto (café descascado);

- b) Avaliar o desempenho do secador segundo a metodologia proposta de Bakker-Arkema et al. (1978) com os padrões propostos por Silva (2001);
- c) Analisar a viabilidade técnica do sistema; e
- d) Avaliar a qualidade final do produto, após ser submetido à secagem no sistema proposto.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Agronegócio café

No Brasil, nos últimos quinze anos, a produção média, de café foi de 37 milhões de sacas, com cerca de 60% do montante destinado ao mercado externo. No período de novembro/2006 a outubro/2007, o consumo interno foi de 17,1 milhões de sacas, com crescimento de 4,74% em relação ao período anterior (CAFÉ POINT, 2007).

As espécies mais cultivadas no país são a *Coffea arabica* e *Coffea canephora*. Do ponto de vista econômico, o café Arábico (*Coffea arabica* L.) é o mais importante e o mais consumido, pois, proporciona uma bebida de qualidade superior, com maior aroma e sabor.

Atualmente, o Brasil mantém a liderança no mercado mundial de café arábica, sendo que, no período de setembro de 2006 a agosto de 2007, exportou 24 milhões de sacas, participando com uma fatia de 37,9% do mercado mundial deste tipo de café (ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ-OIC, 2007a e 2007b).

Pesquisas têm demonstrado que, além de maior produtor mundial, o Brasil tem grande potencial para produzir cafés de qualidade diferenciada, com características peculiares de sabor e aroma da bebida, em função de diversos fatores como diversidade de cultivares, tipos de processamento e região de origem. Entretanto, observa-se uma real necessidade de melhorar a imagem do café brasileiro no mercado externo, enfatizada nos últimos anos, em virtude da segmentação de mercado e do marketing promovido por outros países (BARRIOS, 2001).

Em 1960, o Brasil foi responsável por 37% das exportações mundiais de café, aproximadamente. Como o café brasileiro perdeu espaço e se desvalorizou no mercado mundial, o Brasil é responsável, apenas, por cerca de 20% das exportações (VIDAL, 2001). Segundo esse autor, um dos fatores determinantes do declínio do café brasileiro no mercado internacional foi a falta de um padrão de qualidade do produto nacional. O País se preocupava em exportar grandes quantidades, mas não acompanhava a crescente exigência dos mercados consumidores. Os exportadores concorrentes perceberam primeiro a importância de oferecer um produto de qualidade e, assim, saíram na frente em busca dos novos e exigentes consumidores.

Mudanças significativas no mercado mundial de café ocorreram, principalmente a partir da década de 90. Atualmente, expressam-se pelo aumento dos movimentos especulativos em torno dos preços e intensificação da competitividade pela incorporação no mercado de países com potencial produtivo a custos muito reduzidos. A globalização da economia, que também atinge a atividade cafeeira, pressupõe a oferta de produtos com qualidade e quantidade para garantirem uma oferta continuada com bom preço aliado, preferencialmente, às questões sociais e ecológicas (BARRIOS, 2001).

Segundo Clécia (2004), atualmente, o agronegócio café depara-se com o seguinte cenário:

- Um novo país exportador de café, o Vietnã, amplia substancialmente a oferta mundial de café robusta e muda as relações de mercado e negociação;
- A indústria ajusta seu processo produtivo e eleva, substancialmente, a participação dos robustas em seus blends, tendo um produto final mais barato. Isto se constitui uma ameaça à procura de café arábico, cujo principal produtor mundial é o Brasil;
- Caem os preços do café e a procura por café arábico;
- O Brasil aumenta sua presença no volume de café exportado à custa do lucro do cafeicultor e de penalização da balança comercial brasileira;
- A sociedade internacional movimenta-se em torno do estabelecimento de referências de sustentabilidade, como parâmetros de comercialização e valorização do café, com influência nos sistemas de produção e comercialização.

Assim, com base nos componentes da sustentabilidade, estão sendo estabelecidos impedimentos à comercialização do café segundo os critérios a seguir.

- Segurança alimentar: produto contendo contaminantes, resíduos de defensivos ou agentes nocivos à saúde;
- Segurança ambiental: degradação e contaminação do ambiente (solo, água, ar);
- Segurança ao homem e animais: produtos e processos que levem perigo à saúde dos trabalhadores e à sobrevivência da fauna;
- Responsabilidade social e comercial: trabalho infantil, escravo ou remuneração indevida aos agentes produtivos ao longo da cadeia agroindustrial; e
- Novos organismos internacionais: ONGs voltadas para a valorização de fatores ambientais e humanísticos pressionam a adoção de novos valores e procedimentos para a cadeia agroindustrial do café, tornando mais complexa a sua administração.

Desse modo, segundo Coelho (2005), o país deixou de se conformar apenas com o fato de ser o maior parque cafeeiro do mundo e procurou adicionar, a esta vantagem, tecnologias como a irrigação (atualmente, existem cerca de 220 mil hectares de café irrigado), investiu na correção do solo, no desenvolvimento de sementes mais produtivas e resistentes, e no exaustivo trabalho de pesquisar métodos químicos e sensoriais, que auxiliem na avaliação da qualidade do café.

Enfim, há um novo desafio: mostrar aos consumidores, em todo o mundo, que o café brasileiro possui características qualitativas. Como exemplo, cita-se a criação do Consórcio Brasileiro de Pesquisas e Desenvolvimento do Café–CBP&D, que tem financiado inúmeras pesquisas na área de pós-colheita do café.

2.2. Qualidade comercial do café

A cadeia produtiva do café no Brasil vem passando por profundas transformações desde a década de 70. A grande oferta do produto nos mercados nacional e internacional está fazendo com que o setor brasileiro se profissionalize, cada vez mais, com eficácia e qualidade, como vêm demonstrando os produtores da Zona da Mata de Minas Gerais, que estão mudando, radicalmente, a maneira de produzir café no Brasil. Assim, cafés de melhor qualidade passam a ter preços mais atraentes no mercado nacional e internacional. A distinção entre os produtos baseia-se em suas características de pureza, sabor e corpo, demandando matérias-primas diferenciadas para a fabricação de expresso, cafés especiais e gourme, conforme, vem demonstrando a torrefadora italiana Illycaffé. Assim, as vantagens naturais do Brasil para o cultivo do café, como solo e

clima, além de tecnologia, colocam o país como o mais capaz de fornecer ao mundo todos os tipos de cafés demandados pelos mais diversos e exigentes mercados.

Com o desafio da competitividade na agricultura mundial, o fator de seleção para elevar a rentabilidade do setor vem se deslocando da preocupação com o aumento da produção para a melhoria da qualidade. Isso implica, necessariamente, no aprimoramento do produto final comercializado. No caso da cafeicultura, a busca da qualidade começa na etapa de produção, por meio da integração entre novas tecnologias, insumos, tratamentos culturais e manejo da lavoura, culminando na utilização de processos adequados nas etapas seguintes à colheita.

Qualidade é um assunto complexo. No entanto, em uma cafeicultura moderna, é indispensável conhecer os critérios que caracterizam o café quanto a este parâmetro. Para isto, existem normas e padrões para a classificação do café, conforme um conjunto de características que variam desde o aspecto físico até a análise sensorial da bebida proporcionada pelo produto.

Segundo Rigueira (2005), os fatores que contribuem para melhoria da qualidade do café brasileiro têm sido importante objeto de estudo, tanto no que se refere ao tipo e à bebida quanto à sua coloração e infecção por microrganismos, contribuindo como atributos na conquista de mercados internacionais, além da valorização da cotação do produto nacional em comparação com o de outros países.

2.3. Etapas pré e pós-colheita do café

Sabe-se que as características físicas, químicas e a qualidade dos grãos de café são influenciadas por diversos fatores, que atuam nas fases pré e pós-colheita. Na etapa pré-colheita, os principais fatores que influenciam a composição e a qualidade do café são: espécie e variedade do produto, local de cultivo, maturação dos frutos, incidência de microrganismos e os níveis de adubação. Entre os fatores pós-colheita, são tidos como mais relevantes os cuidados na colheita, as fermentações enzimáticas e microbianas, o preparo do café, a secagem, as misturas de café, o armazenamento, a moagem e a torração do produto (CHALFOUN & CARVALHO, 1997; AFONSO JÚNIOR, 2001).

2.4. Preparo e processamento do café

O preparo do café consiste de operações, que se iniciam com a chegada do produto no terreiro, o mais simples, estendendo-se até o armazenamento. Depois da colheita, o café deve passar por uma limpeza feita em peneiras manuais ou em máquinas com ar e peneiras e em lavadores. Esta é uma das operações mais importantes na fase de preparo do café, pois, proporciona a remoção de impurezas e de matérias estranhas, a separação dos frutos “cerejas”, “verdes” e dos frutos “bóias” (secos) e a obtenção de teor inicial de água mais uniforme durante a secagem.

As operações unitárias, realizadas durante o preparo dos frutos do cafeeiro, podem ser feitas por via seca ou por via úmida.

A operação de lavagem e separação dos frutos do cafeeiro, denominada pré-processamento, deve ser realizada a fim de obter lotes uniformes, cuja principal finalidade é melhorar a eficiência da secagem e a qualidade do produto. É realizada em lavadores providos de dispositivos, que separam os frutos pesados, denominados “cereja”, verdoengo e verde, dos leves ou “bóias” constituídos por frutos defeituosos e, ou com menor teor de água. Além de manter o potencial de qualidade do café recém-colhido, a lavagem ou separação aumenta a vida útil dos secadores e máquinas de beneficiamento, devido à diminuição do processo de abrasão nos mesmos.

Após separação, os cafés bóia e cereja são secos separadamente, pois, apresentam umidades diferentes. Esta operação pode ser feita em terreiros ou, quando realizada parcialmente, poderá ser completada em secadores mecânicos para obtenção de um produto final uniforme e de melhor qualidade (BÁRTHOLO et al., 1989; DONZELES, 2002).

A Figura 2.1 representa o fluxograma do pré-processamento do café.

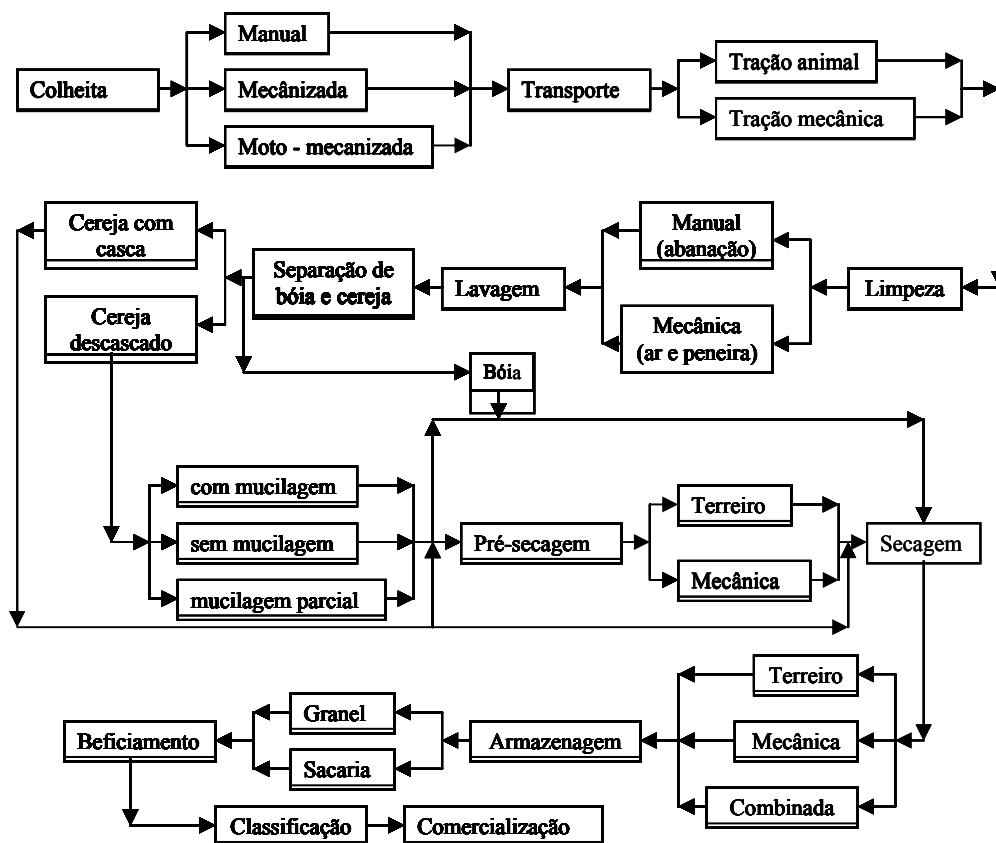


Figura 2.1 - Fluxograma do pré-processamento do café.

2.4.1. Processamento por “via seca”

No processamento por via seca mais comumente utilizada no Brasil, obtém-se o café coco ou natural. Neste processo os frutos verdes e cerejas (mais pesados) são separados dos frutos-bóias (menor densidade). Por apresentarem tempo de secagem diferente, essas duas frações devem ser secadas separadamente, a fim de obter, um produto final mais uniforme e de melhor qualidade. Após a separação e lavagem, os cafés são secados na forma natural/integral (com casca), em terreiros ou em pré-secadores/secadores mecânicos.

Segundo Nogueira et al. (2008), o fato de o Brasil ser conhecido como produtor de café por via-seca se deve, principalmente, à pequena capacidade de investimento da maioria dos produtores que, em geral, são pequenos cafeicultores. Neste contexto, outro, fator importante refere-se ao nível tecnológico oferecido a esses cafeicultores, o qual muitas das vezes, não passa de precários sistemas para a secagem e o armazenamento do produto.

2.4.2. Processamento por “via úmida”

No pré-processamento por via úmida, os cafés são descascados/ lavados e despulpados. Os cafés cerejas passam primeiramente pelo descascador, para retirada do pericarpo ou casca externa, podendo passar pelo desmucilador para remoção parcial ou total da mucilagem, sendo então submetidos a uma lavagem e, finalmente, seguem para a secagem, obtendo-se cafés descascados com ou sem mucilagem.

Na América Central, México, Colômbia e Quênia, conhecidos produtores de café despulpado, o produto tem alcançado boas cotações no mercado, pois, geralmente proporciona bebida suave. O processamento por via úmida é indicado para regiões, que apresentam problemas quanto à qualidade do café (BÁRTHOLO & GUIMARÃES, 1997; SAMPAIO, 2004).

Segundo Silva et al. (2005), embora requerendo maiores investimentos iniciais e tratamento compulsório das águas residuárias para evitar a contaminação de cursos d'água, o processamento do café por via úmida, a médio prazo, é mais econômico e pode ser facilmente utilizado com grande sucesso pelo pequeno produtor.

Apesar de não muito disseminadas no Brasil, existem no mercado pequenas máquinas apropriadas para a cafeicultura familiar. A produção de café cereja descascado tem, como vantagem, requerer menor área de terreiros, menores secadores e menor tempo de secagem, bem como os volumes de silos ou tulhas necessárias ao armazenamento podem ser reduzidos em até 50%. Estas vantagens devem-se à remoção da casca, à uniformidade e ao baixo teor de umidade inicial, em comparação com a secagem do fruto integral (SILVA et al., 2005).

O processo é indicado para regiões de inverno úmido, devido às dificuldades de manipulação dos grãos no terreiro, e recomenda que o mesmo seja realizado dentro de, no máximo, 24 horas após a colheita.

Por serem fontes de fermentação e retardarem a secagem, a casca e a mucilagem devem ser eliminadas rapidamente para a obtenção de cafés de qualidade e, quando bem preparados, são sempre classificados como de bebida de alto valor comercial, independente da região de produção.

O despulpamento do café cereja, em regiões tradicionalmente produtoras de café de bebida rio, melhora a qualidade da bebida devido à utilização de apenas frutos maduros, não sendo utilizados os cafés infectados do chão, ou cafés muito maduros ainda moles ou secos na árvore, cuja senescência pode ter propiciado a infecção

microbiana e também pela rapidez e cuidados no processamento (CARVALHO & CHALFOUN, 1985; DE GRANDI, 1999).

Nogueira et al. (2008) analisando a viabilidade da produção de café cereja descascado concluíram que a produção de café cereja descascado não significa, simplesmente, produzir café de qualidade, mas produzir um café de qualidade com menor custo. De acordo com os autores, o café cereja descascado apresentou o menor custo, quando comparado aos demais métodos, principalmente, devido ao menor volume ocupado no secador por unidade de saca beneficiada, uma vez que, após a secagem, os volumes necessários de café natural e de cereja descascado necessários para gerar um saco de café beneficiado são, respectivamente, 296 e 180 litros.

Entre as tendências futuras nos sistemas de produção de café, a utilização de métodos de preparo que dêem mais segurança para obtenção de alta qualidade, como o cereja descascado, apesar de exigir um controle de qualidade mais aperfeiçoado, é o mais recomendado (VIEIRA & CARVALHO, 2000; OCTAVIANI, 2005).

2.5. Pré-secagem

Se o café cereja em processamento não for do tipo despulpado (com fermentação prévia da mucilagem) ou desmucilado (com retirada mecânica), obrigatoriamente terá de passar um período no terreiro ou pré-secador, a fim de reduzir sua umidade, antes de ser submetido à secagem mecânica. A desmucilagem mecânica permite o encaminhamento do café, após a simples drenagem da água utilizada nos processos de lavagem, despulpamento e desmucilagem, o que pode ocorrer em períodos inferiores a 12 horas.

CHALFOUN & CARVALHO (1997) indicou um período de pré-secagem em terreiro, para cafés despulpados, em torno de 2 a 3 dias. A não realização desta etapa implica na formação de aglomerados de grãos, pela presença de mucilagem, ao longo da secagem mecânica, dificultando a homogeneização do produto.

Para cafés preparados por via seca, ou seja, sem a retirada da casca, o período de pré-secagem em terreiro pode levar, no mínimo, seis dias (MENDES et al., 1995; OCTAVIANI, 2005).

2.6. Secagem

A secagem consiste na remoção parcial da água livre, contida nos grãos, após o amadurecimento desses grãos, até que os mesmos atinjam um valor máximo de umidade, possibilitando seu armazenamento sob temperatura e umidade ambiente, durante longo tempo, sem que ocorra sua deterioração, preservando a aparência e a qualidade nutritiva dos grãos, como alimento, e sua viabilidade como sementes. Segundo Silva (2001) em relação ao total de energia despendida durante a fase de pós-colheita do café, admite-se que mais de 60% esteja embutida na operação de secagem.

Na seqüência de colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte durante o processamento de grãos, a secagem é uma operação crítica, conforme afirmam BROOKER et al. (1978). Quando inadequada, a secagem constitui a principal causa de perda de qualidade dos grãos e, portanto, a secagem correta é fator importante na obtenção de um produto de boa qualidade. A qualidade da bebida do café pode ser afetada pelo grau de maturação, variedade, tempo decorrido entre a colheita e o início da secagem, influência do primeiro tratamento térmico, temperatura e velocidade de secagem. O fruto maduro do café é altamente perecível, devido ao elevado teor de umidade com que é colhido (cerca de 60 a 70% b.u.), propiciando o desenvolvimento de fungos em sua superfície, ocasionando aumento na taxa de respiração e elevando a temperatura da massa, com posterior fermentação, que provoca o aparecimento de grãos beneficiados ardidos e pretos. Por esta razão, deve-se iniciar o processo de secagem logo após a colheita (CORRÊA, 1982; BARTHOLÓ & GUIMARÃES, 1997; DE GRANDI, 1999).

De acordo com os aspectos tecnológicos envolvidos, a secagem pode ser realizada em dois processos básicos: natural e artificial. O processo natural é caracterizado pela secagem do produto no campo, sem a interferência do homem, enquanto o processo artificial envolve técnicas que, pela interferência do homem, possibilitam reduzir o tempo de operação. Como exemplo de secagem artificial, com ventilação natural, tem-se a secagem em terreiros e em secadores solares rotativos. A secagem com ventilação forçada, entretanto, é classificada, de acordo com o aquecimento ou não do ar de secagem em: secagem com ar à temperatura ambiente e secagem em baixa temperatura, em que o ar é aquecido até 10°C acima da temperatura ambiente; secagem em alta temperatura, em que o ar é aquecido, no mínimo, 10°C acima da temperatura ambiente; sistemas combinados, em que se utilizam os dois métodos, ou seja, altas e baixas

temperaturas; e ainda, seca-aeração (SILVA et al.,1995; SAMPAIO, 2004; RIGUEIRA, 2005).

Diante do exposto, a secagem é uma das etapas mais importante durante o processamento pós-colheita e, acima de tudo, é responsável por grande parte do custo de produção. No Brasil, o processo de secagem artificial em secadores teve maior impulso, somente, a partir da década de 70. Antes dessa época, a maioria dos produtos era secada no próprio campo ou em terreiros (SILVA & LUCENA, 2000; MACHADO, 2005). Ainda assim, a secagem em terreiros é muito utilizada, principalmente por pequenos e médios produtores.

A escolha de um método de secagem depende do nível tecnológico do produtor, da possibilidade de investimento, do volume de produção, das condições climáticas da região e da disponibilidade de áreas livres quando da construção de terreiros (VILELA, 1997; DE GRANDI, 1999).

A racionalização do uso da energia necessária à operação de secagem de café poderá ser obtida por meio da utilização de equipamentos eficientes e, tecnicamente, apropriados ao sistema, empregando-se mão-de-obra especializada e conduzindo a operação de forma correta para a obtenção de um produto final de qualidade (LOPES et al., 2000; SAMPAIO, 2004).

2.6.1. Secagem artificial em secadores mecânicos

Os secadores mecânicos são equipamentos nos quais o ar aquecido, ou à temperatura ambiente, é forçado a passar através da massa de grãos, com ou sem intermitência no processo, até que o café tenha um teor de água entre 11 e 12% b.u.. Podem ser sistemas de leito fixo, quando o produto não é movimentado, ou sistemas de lotes com a movimentação dos grãos. Na secagem mecânica, deve-se estar atento à temperatura e ao tempo de secagem. As temperaturas mais elevadas tornam a operação mais rápida e, portanto, mais econômica (GUIMARÃES, 1995; PALACIN, 2007). Apesar dos prejuízos decorrentes desta prática não serem totalmente conhecidos, diversos autores recomendam valores máximos de 60°C para a temperatura do ar de secagem, sendo que há riscos de redução na qualidade, caso esses valores sejam ultrapassados.

Segundo Silva (2001), a utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens em relação ao terreiro. No entanto, a construção de secadores energeticamente mais eficientes, que forneçam produto final de boa qualidade, deve ser considerada como grande esforço tecnológico para reduzir os custos de secagem e aumentar a competitividade do café do Brasil no mercado internacional.

A utilização de secadores que possuem equipamentos tradicionais de transporte de grãos e que necessitam de certa fluidez do produto não é recomendada para o café, quando este apresenta teor de umidade acima de 40% b.u.. Portanto, no sistema de secagem combinada de café, anterior à etapa de secagem a altas temperaturas, deve ser realizada uma pré-secagem em terreiros, em secadores de leito fixo ou rotativo (LACERDA FILHO, 1986).

A secagem mecânica do café pode ser realizada em altas temperaturas, baixas temperaturas ou de forma combinada. Silva (2001) afirma que, em qualquer das opções, a secagem mecânica é reconhecidamente mais viável para a obtenção de cafés de boa qualidade. Entretanto, restringe-se às regiões de maior desenvolvimento agrícola ou ao cafeicultor que possui as condições financeiras necessárias. De modo geral, o investimento inicial para aquisição de um sistema mecânico adequado pode inviabilizar o uso da tecnologia para a classe de pequenos cafeicultores.

A secagem a altas temperaturas baseia-se na propriedade pela qual aumentando-se a temperatura do ar úmido, a sua umidade relativa diminui e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta. Geralmente, o ar é forçado a circular através do secador por meio de um ventilador. Após permanecer em contato com o produto, o ar sai do secador com uma temperatura menor e uma umidade relativa mais elevada (FREIRE, 1998; SAMPAIO, 2004).

Segundo Brooker et al. (1992), os sistemas de secagem de grãos utilizados desde 1950 são mais evolutivos que revolucionários. Esforços têm sido feitos para adaptar esses tipos de secadores à realidade socioeconômica dos produtores de café do Brasil (SAMPALIO, 2004; MACHADO, 2005). Entretanto, embora o uso de tecnologias apropriadas para a construção de secadores simples, alguns projetos permanecem, ainda, longe das possibilidades de uso pelo pequeno cafeicultor.

2.6.1.1. Secadores de fluxo concorrente

Nos secadores de fluxo concorrente, o ar aquecido encontra o grão frio e úmido e fluem ambos na mesma direção e sentido, através da câmara de secagem. Neste tipo de secador, todos os grãos componentes da massa a ser secada são submetidos ao mesmo tratamento. Um secador de fluxos concorrentes é caracterizado pelo alto fluxo de ar com pressão estática relativamente baixa. Devido à ausência de paredes perfuradas e ser construído com poucas partes móveis, o secador exige, apenas, limpezas periódicas e reparos eventuais (OSÓRIO, 1982).

As trocas intensas e simultâneas de calor e massa entre o ar de secagem e o produto, na entrada de ar quente do secador, causam rápida redução na temperatura inicial do ar, assim como no teor de umidade do produto. No final da câmara de secagem, onde ocorre a exaustão do ar, o produto está mais seco e a uma temperatura inferior à temperatura inicial do ar de secagem. Por esta razão, é possível usar o ar de secagem com temperaturas relativamente altas sem causar danos ao produto como acontece com outros tipos de secadores (SAMPAIO, 2004). O fato de a secagem ocorrer em um ambiente com umidade relativa moderada, favorece a redução da quantidade de produto com endosperma trincado, pois, ao ser manuseado, pode produzir um grande número de quebrados (OSÓRIO, 1982).

A temperatura máxima do ar quente em secadores de fluxo concorrente depende, em primeiro lugar, do fluxo de grãos através do secador e, em menor intensidade, do tipo de grãos e do teor de água inicial (BAKKER-ARKEMA, 1984).

Se o fluxo de massa aumenta em um secador, o produto final terá, em geral, melhor qualidade. Por outro lado, haverá aumento no consumo específico de energia e diminuição da eficiência de secagem, porque os grãos que passam pelo secador, com maior velocidade, perdem menor quantidade de água por unidade de tempo (DALPASQUALE et al., 1991).

A redução gradual da temperatura do grão devido ao fluxo de ar úmido contribui para a excelente qualidade dos grãos, obtidos em secadores de fluxo concorrente (OSÓRIO, 1982). Observa-se, assim, elevada eficiência térmica de secagem e maior uniformidade da qualidade final do produto neste tipo de secador, em comparação com os secadores convencionais de fluxo cruzado, tornando crescente o interesse por secadores de fluxos concorrentes, principalmente nos Estados Unidos da América.

A Figura 2.2 apresenta as características do processo de secagem em fluxo concorrente, sendo que a temperatura do grão e a temperatura do ar de secagem são demonstrados em função da profundidade da camada de grãos no estágio de secagem (SILVA et al., 1992).



Figura 2.2 - Curvas das temperaturas do ar de secagem e do produto, em função da profundidade, em secador de fluxos concorrentes.

Segundo FAO (1996), secadores de fluxos concorrentes apresentam a possibilidade de se utilizar altas temperaturas do ar de secagem, que originam altas velocidades de secagem sem aquecer excessivamente os grãos. Neste tipo de secagem, o consumo específico de energia pode atingir 3.500 kJ kg^{-1} de água evaporada.

2.6.2. Secagem contínua e intermitente

A secagem nos secadores pode ser feita até o final da seca de forma contínua ou por etapas, de forma intermitente, intercalando períodos de exposição dos grãos ao ar quente com outros de descanso, quando a umidade do café é homogeneizada, o que torna mais uniforme a umidade entre os grãos. Alguns tipos de secadores possuem câmara de repouso, proporcionando intermitência no processo, o que garante o descanso do café e uma secagem uniforme (CARDOSO SOBRINHO, 2001; PALACIN, 2007).

O rendimento do secador aumenta devido à maior migração de água do centro para a periferia dos grãos, decorrente do período de descanso entre uma passagem e outra dentro do secador. No entanto, na secagem contínua, os secadores podem ter câmaras de repouso que, quando bem dimensionadas, também proporcionarão uma

melhoria na eficiência de secagem. Com esta redistribuição de umidade nos grãos, a secagem é facilitada e a possibilidade de ocorrência de trincas diminui devido à diminuição das tensões internas nos grãos (SILVA & LUCENA, 2000; TEIXEIRA, 2006).

2.6.3. Secagem a baixas temperaturas

A secagem a baixas temperaturas é um processo, energeticamente, eficiente e o produto final é de boa qualidade. Pode ser empregado para pequenas ou grandes produções e tem, como pontos limitantes, as condições ambientais e a velocidade de colheita do produto (DALPASQUALE et al., 1991).

Segundo Meyer et al. (1978), a secagem com ar natural ou levemente aquecido é um dos sistemas mais atraentes, devido ao baixo custo de investimento e operação e à ótima qualidade dos produtos secados.

Bakker-Arkema (1984) relata que o processo de secagem em baixa temperatura é, normalmente, realizado em silo com fundo perfurado, em que o produto é seco e armazenado ao mesmo tempo. O fluxo de ar mínimo e a profundidade máxima da camada de grãos no silo dependem do teor de umidade inicial do produto e das condições ambientais.

A secagem artificial de grãos com ar natural é um processo lento, podendo ocorrer a possibilidade de desenvolvimento de fungos, antes de o produto atingir o teor de umidade desejado. Entretanto, quando bem operado, este sistema de secagem possibilita a manutenção da qualidade do produto, devido ao pequeno incremento na temperatura do ar pelo ventilador (DALPASQUALE, 1983).

A principal vantagem da secagem com ar natural ou em baixa temperatura é que, além da economia substancial de energia e do aumento no rendimento dos secadores, o café, após a secagem, apresenta coloração e umidade bastante uniformes, propiciando boa torração (SILVA et al., 2005).

2.6.4. Secagem combinada

Esta técnica consiste em utilizar altas temperaturas de secagem, enquanto o produto apresenta teor de água mais elevado e, a partir desse ponto, o produto é transferido para um sistema a baixa temperatura, em que a secagem será completada.

Para utilização deste método, a umidade inicial do produto não deve ser muito elevada, sendo recomendada a faixa de 18 a 20% b.u., dependendo das condições ambientais. Caso não se consiga colher o produto com um teor de água adequado, é preciso que se faça uma secagem parcial rápida para, então, utilizar a secagem com ar natural. O agrupamento de dois métodos de secagem, em único processo, é conhecido como secagem em combinação (DALPASQUALE, 1983; FREIRE, 1998).

Muito utilizada para milho e arroz, a secagem combinada vem sendo aplicada com sucesso na secagem de café. Devido à instabilidade da pré-secagem do café em terreiro, foram realizados vários estudos, utilizando a técnica da secagem em combinação (alta temperatura na primeira fase e baixa temperatura ou ar natural na segunda fase) para a secagem do café. Esta técnica foi desenvolvida para evitar possível deterioração da qualidade e solucionar problemas em decorrência de condições climáticas desfavoráveis e de teor de água, inicial, elevado para a secagem em silo.

Após separar adequadamente o café tipo cereja, por densidade, procede-se ao descascamento e à lavagem para retirar parte da mucilagem. Em seguida, uma pré-secagem é realizada em terreiro híbrido ou em secador de camada fixa, com revolvimento da camada de café a cada três horas, pelo menos.

Na fase de secagem em alta temperatura, o café deve ser secado até que o teor de umidade atinja valores próximos a 25% b.u. (dependendo das condições climáticas), sendo, em seguida, submetido à secagem complementar, em silos com ar natural ou levemente aquecido (deve-se aquecer o ar a uma temperatura tal que a umidade relativa atinja valores próximos a 65%).

Além de evitar a deterioração do produto, a secagem em combinação possibilita reduzir o tempo de secagem em alta temperatura, aumentar a capacidade dinâmica dos secadores, além de reduzir o consumo específico de energia em até 50%, em comparação com alguns processos tradicionais de secagem.

Independentemente do tipo de pré-secagem, é importante ressaltar que, em todas as fases de processamento do café, deve-se evitar qualquer tipo de fermentação, a fim de obter alta qualidade e sabor natural. Para isso, o operador do sistema de secagem em

combinação deverá estar familiarizado com o processo e atento à operação do sistema de ventilação durante a segunda etapa de secagem.

Segundo Silva et al (2008), a secagem combinada do café deve ser processada conforme apresentada a seguir.

- O café descascado e lavado deve ser transferido para o sistema de pré-secagem o mais rápido possível e ter o teor de umidade reduzido a um valor preestabelecido, segundo as condições ambientais da fazenda (médias de temperatura e umidade relativa durante a colheita).

- Além dos secadores em leito fixo e rotativo, qualquer tipo de terreiro, de qualidade comprovada, pode ser indicado para esta operação, quando as condições climáticas forem favoráveis. Na pré-secagem, quando se utilizam secadores em alta temperatura, é aconselhável utilizar fornalha que não contamine o produto e não permita que a temperatura da massa de grãos ultrapasse 40°C, para não afetar a qualidade do café.

- Logo após a transferência da primeira carga do produto para o silo secador, deve-se acionar o sistema de ventilação e mantê-lo ligado até que o produto da última subcamada, colocada no silo, atinja um teor de umidade em torno de 16% b.u. Abaixo deste valor, o ventilador permanecerá ligado, somente, durante os períodos em que a umidade relativa do ar estiver abaixo de 70%, o que normalmente ocorre durante o dia. O ideal é acoplar um controlador automático ao sistema de ventilação, para que este seja acionado automaticamente para a faixa de umidade relativa estabelecida. Mesmo no caso de acoplamento deste dispositivo automático, o operador deve estar sempre atento e inspecionar diariamente o sistema de secagem, verificando se o funcionamento está correto, a fim de evitar o crescimento de fungos na camada que ainda está secando. Uma nova camada só deve ser adicionada ao silo, quando a anterior já estiver seca ou em equilíbrio com o ambiente.

- Deve-se desligar o sistema de ventilação, quando a umidade do produto, na última subcamada, atingir o teor de umidade de equilíbrio (próximo a 12% b.u.). O tempo para que isso ocorra dependerá da altura total da camada de grãos no silo, da quantidade adicionada, dos fluxos de ar no início e no final do carregamento do silo, das condições climáticas e do teor de umidade inicial do produto. Na maioria das regiões produtoras e dependendo do produto, a umidade de equilíbrio, está próxima a 12,5% b.u.. Ao desligar o sistema de ventilação, durante a fase de armazenagem propriamente dita, o operador deve ter o cuidado de fechar a entrada de ar do ventilador, a fim de

evitar correntes de ar indesejáveis, que possam possibilitar a reumidificação e possível deterioração do produto.

- Após a secagem do produto, o monitoramento do sistema consiste na inspeção periódica (diária ou semanal) da temperatura e do teor de umidade da massa de grãos. Caso ocorra aquecimento ou aumento no teor de umidade, deve-se verificar a causa e manter o ventilador ligado até que toda a massa de grãos volte às condições normais.

Apesar de ser uma técnica consagrada para outros tipos de grãos, antes de adotar a tecnologia de secagem em combinação para café, sugere-se ao cafeicultor que, ao decidir pela aquisição deste sistema, consulte um especialista em secagem de café. Apesar de aparentemente simples e de fácil adaptação a sistemas já existentes em fazendas, o sistema de secagem em combinação é altamente dependente das condições climáticas locais, das tecnologias utilizadas antes da operação de secagem em silos e do nível de treinamento do cafeicultor. Portanto, um sistema indicado para uma propriedade nem sempre será adequado para a propriedade vizinha.

Segundo Silva et al. (2005), o especialista deve prestar seus serviços de maneira individual, ou seja, deve conhecer as condições da propriedade e do cafeicultor, a fim de orientá-lo de modo a obter o melhor resultado do sistema. De acordo com o autor, apesar de o pequeno cafeicultor poder realizar a secagem combinada com um número reduzido de silos, o que resulta em menor custo de instalação, uma recomendação importante é a adoção de um sistema composto por sete silos, principalmente quando se trata de um produtor médio ou uma unidade comunitária.

Neste sistema de secagem, há uma redução substancial de energia requerida para secagem, aumentando a eficiência térmica de secagem e a capacidade dinâmica dos secadores. As principais razões deste aumento de eficiência são: (i) nesta situação, os secadores operam com produtos numa faixa de umidade em que a retirada de água dos grãos é mais fácil; (ii) a coluna de resfriamento é convertida em câmara de secagem, aumentando a capacidade de secagem dos secadores em altas temperaturas. Com a adoção da secagem combinada, o processo de secagem em altas temperaturas pode reduzir em até 50% a energia total requerida e dobrar a capacidade de secagem do secador (SILVA & LUCENA, 2000; TEIXEIRA, 2006).

2.7. Parâmetros da secagem

De acordo com Silva et al.(2001), os seguintes parâmetros afetam a taxa de secagem e o desempenho de secadores: a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem; a temperatura e a vazão do ar de secagem; as propriedades físicas do produto; os teores de água inicial e final do produto; o tipo e a fonte de energia; a velocidade dos grãos no secador; os sistemas de carga e o tipo de ventilador.

2.7.1. Temperatura do ar de secagem

A temperatura do ar de secagem exerce influência direta na qualidade do produto, no tempo total do processo, no consumo de combustível e energia elétrica.

A temperatura máxima do ar que o café pode suportar, em um secador convencional, é de 60°C. As temperaturas mais elevadas são prejudiciais ao produto, uma vez que muitos grãos que não fluem, adequadamente, dentro do secador ficam supersecos, enquanto outra parte não atinge o teor de umidade ideal (11–12% b.u.), transformando a torrefação em um processo de difícil controle (SILVA, 2001).

Osório (1982) estudando secador intermitente de fluxos concorrentes para café, com temperaturas do ar de secagem de 80, 100 e 120°C, observou que os fatores que mais exerceram influência no tempo de secagem foram: temperatura de secagem, teor de água inicial e final e vazão do ar, sendo mais pronunciado o efeito da temperatura.

Silva (2001) desenvolveu e analisou um secador intermitente de fluxo contracorrente para café, utilizando temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100°C. O autor recomendou a temperatura de 100°C, em razão do menor tempo de secagem, consumo de combustível e da não constatação dos efeitos da temperatura sobre a qualidade final do café.

Pinto (1993) relata que o café apresenta dificuldade de escoamento no interior dos secadores, principalmente quando se encontra muito úmido, em virtude do escoamento da mucilagem existente entre os grãos e a casca durante o processo de secagem. O autor ressalta ainda que esta característica limita a utilização de altas temperaturas na secagem de café em secadores de fluxos concorrentes, devido à alta taxa de evaporação.

2.7.2. Temperatura da massa de grãos

Para obtenção de um café de boa qualidade, é necessário cuidado especial no controle da temperatura da massa, principalmente a partir do momento em que o café passa a apresentar teor de umidade inferior a 33% b.u., uma vez que a temperatura da massa de grãos tende a se igualar à temperatura do ar de secagem. Esta tendência ocorre, em razão da dificuldade de migração da umidade das camadas mais internas para a periferia dos grãos.

Segundo prática usual, o café deve ser, continuamente, revolvido ou recirculado dentro do secador para que se consiga uma secagem homogênea. É recomendado o revolvimento da massa de grãos no secador de camada fixa, em intervalos regulares de tempo, a fim de evitar os problemas que esses secadores apresentam quanto à formação de gradientes de temperatura e de teor de umidade do produto ao longo da camada de grãos, na direção do fluxo do ar de secagem. Nos secadores de camada fixa, quando a operação é realizada mecanicamente, o custo inicial eleva-se, quando feita de forma manual, requer grande esforço físico por parte do operador, principalmente no início da secagem, quando o produto encontra-se ainda com alto teor de água.

2.7.3. Fluxo de ar

Em algumas operações, como secagem e aeração, os aspectos de engenharia relacionados ao fluxo de ar são fundamentais para a seleção de equipamentos e dimensionamento de sistemas de ventilação (ATHIÉ et al., 1998).

Segundo Silva & Berbert (1999), nos secadores em que a secagem é realizada por meio de fluxo de ar, a característica do conjunto de ventilação é de suma importância, pois, deve fornecer pressão suficiente ao ar, para vencer a resistência oferecida pelo produto, a um determinado fluxo de ar.

Analisando a influência do fluxo de ar na secagem de café despulpado em secador experimental de camada fixa, Guida (1994) concluiu que o fluxo de ar influenciou o tempo total de secagem e o tempo de secagem no secador, sendo que este tempo no menor fluxo de ar foi sempre maior que o dobro para o fluxo de ar maior, em todos os períodos de descanso, porém, prejudicou o aspecto do café.

Ribeiro et al. (2003) determinaram a taxa de redução de água em secagens de café cereja descascado, em função da temperatura da massa de grão, do fluxo de ar e do período de pré-secagem em terreiro. Os autores concluíram que a maior taxa de redução ocorreu com a aplicação de maiores temperaturas do ar de secagem e fluxos do ar.

Pinto (1993) visando avaliar a utilização de dois sistemas de secagem em um único secador e reduzir o uso de energia na secagem de café, projetou, construiu e avaliou o protótipo de um secador intermitente de fluxos contracorrente/concorrente. O café natural utilizado foi previamente seco até o estágio de meia-seca em leito fixo. A complementação da secagem foi executada com o protótipo desenvolvido. Utilizou-se uma vazão de ar de $46 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, enquanto a velocidade de deslocamento do produto, no interior do secador, foi de $0,024 \text{ m min}^{-1}$. Com base nos resultados obtidos nos testes experimentais e os simulados pelo programa desenvolvido, o autor concluiu que, para redução da umidade de 30 para 12 % b.u., utilizando-se temperatura do ar de secagem de 80, 100 e 120 °C, os consumos específicos de energia foram de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ kg^{-1} de água evaporada, respectivamente.

Sampaio (2004) avaliou um protótipo de secador, com sistema pneumático, para café natural e café cereja descascado. Ao utilizar um fluxo de ar de $13,82 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ na câmara de secagem, concluiu que, para o secador testado, o conjunto motor-ventilador (2 cv) ficou superdimensionado, devido ao sistema de transporte pneumático ter sido dimensionado para transportar os grãos, sendo necessário maior fluxo de ar do que na secagem.

2.7.4. Teor de água dos grãos

Devido ao alto teor de água no momento da colheita (acima de 60% b.u.), os frutos de café apresentam condições favoráveis às alterações de suas características. Segundo Brooker et al. (1974), quando qualquer produto é armazenado úmido, sua qualidade é demasiadamente alterada, devido à oxidação dos glicídios, às fermentações intracelulares e ao desenvolvimento de bactérias e fungos, geralmente acompanhados de aquecimento dos grãos. A secagem artificial possibilita que o produto seja armazenado por período maior, preservando sua qualidade.

O teor de água dos grãos é, sem dúvida, o mais importante fator que contribui para o crescimento de fungos, causa principal da redução na qualidade dos produtos

agrícolas. Juntamente com o crescimento de fungos, os altos teores de umidade promovem aquecimento acentuado na massa de grãos, causando perda de viabilidade das sementes, descoloração, aumento de ácidos graxos e redução das qualidades nutritivas (SILVA et al., 1990; CAMPOS, 1998).

Em regiões muito úmidas, o café aumenta sua umidade, quando armazenado e sofre branqueamento e aumento do volume dos grãos, chegando a estourar a sacaria, de acordo com IBC-GERCA (1985). No caso específico do café, a desuniformidade no teor de água faz com que os grãos sejam submetidos a diferentes graus de torração, o que é indesejável à obtenção de um produto que proporcione boa qualidade de bebida. Os grãos com maior teor de água torram mais lentamente que os mais secos, produzindo uma torração excessiva dos mais secos, antes do pleno desenvolvimento de sabor dos mais úmidos (CARVALHO & CHALFOUN, 1985; CAMPOS, 1998).

Os teores de água inferiores ao adequado também são prejudiciais, pois, uma quantidade de água deixa de ser comercializada, diminuindo o rendimento do produto e o lucro do produtor, além de, por ocasião do beneficiamento, aumentar sensivelmente o número de grãos quebrados e aumentando o número de defeitos, influenciando na classificação do café. Segundo Matiello (1991), no ponto final de seca, os grãos beneficiados devem ter 12% de umidade, o que se verifica, na prática, pela facilidade com que os frutos se descascam e a película prateada se solta.

2.8. Transporte pneumático

Os transportadores pneumáticos, usados em unidades armazenadores, tiveram origem nos equipamentos de pressão usados para carga e descarga de navios graneleiros. Estes transportadores movem os grãos, empregando-se uma corrente de ar em alta velocidade, através de um sistema de tubulação hermético. São flexíveis, podendo ser usados para conduzir grãos em áreas de difícil alcance para outros transportadores mecânicos. Suas aplicações abrangem desde a movimentação de grãos em uma colhedora combinada, na carga e descarga de navios, até o transporte de materiais sólidos na industrialização de cimento.

Os sistemas de transporte pneumático podem ser divididos em: sistema de transporte com pressão negativa (sistema de sucção); sistema com pressão positiva; e sistema combinado de pressões negativa e positiva. No sistema combinado, a pressão

negativa é usada para succionar o material, enquanto a pressão positiva é usada para transportar o material até seu destino. Entretanto, os projetos para este tipo de equipamento ainda não progrediram suficientemente, para permitir a análise dos mecanismos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa envolvidos no processo de secagem (NARIMATSU, 2004).

O transporte pneumático é utilizado para transportar diferentes tipos de materiais em dutos fechados, através de energia cinética do ar em alta velocidade e pressão. Por permitir um excelente contato fluido/partícula, este transporte pode ser utilizado em uma grande variedade de processos, incluindo a secagem de sólidos, como grãos alimentícios, bem como a secagem de suspensões (BLASCO et al., 2000; NARIMATSU, 2004).

Em comparação com outras modalidades de transporte, observam-se vantagens e desvantagens neste sistema. Durante o transporte de grãos, observa-se a capacidade do sistema em transportar o produto na direção vertical e horizontal, incluindo trajetos curvos, além da portabilidade e flexibilidade operacionais. Segundo Sampaio (2004), outro aspecto interessante é seu uso como instalação fixa, a qual pode ser construída sem a necessidade de significativas mudanças estruturais, o que facilita sua aplicação na construção de secadores.

A secagem com transportador pneumático apresenta grande flexibilidade em termos operacionais, uma vez que podem ocorrer, simultaneamente, o transporte, o aquecimento e a secagem de material particulado. Neste processo, o material úmido a ser seco é transportado ao longo de um tubo, usando-se ar quente, vapor saturado, vapor superaquecido ou gases de combustão (BLASCO et al., 2000). Entre as vantagens deste tipo de secagem, destacam-se: a alta capacidade calorífica do leito, facilidade na manipulação e transporte dos sólidos, maior área superficial de contato com o material a ser seco, altos coeficientes efetivos de transferência de massa e calor e secagem de materiais sensíveis ao calor, explosivos e degradáveis, diminuindo a possibilidade de deterioração térmica do produto, inclusive em altas temperaturas, e devido aos baixos custos de investimento e manutenção (BAEYENS et al., 1995; ALVAREZ e BLASCO, 1999; KORN & NOWAK, 2000; NARIMATSU, 2004).

Segundo Silva et al. (2005) para que a eficiência do sistema pneumático não fique comprometida, o conhecimento sobre as características do ventilador, como eficiência, pressão total, potência requerida e rotação são de suma importância para a correta escolha do mesmo.

Trabalhos utilizando o transporte pneumático requererem o conhecimento sobre a pressão, velocidade e quantidade de fluxo de ar necessário para o arraste dos grãos, da potência exigida e as características físicas do material transportado. Estes fatores, incluindo o tipo de alimentação, tipo de descarga e mudança de direção, influenciarão o desempenho do equipamento (SILVA & LUCENA, 2000; MAGALHÃES, 2003; SAMPAIO, 2004).

No sistema pneumático, uma importante característica a ser considerada é a perda de carga, que ocorre ao longo da tubulação do sistema. A movimentação forçada de ar através de uma tubulação ocasiona uma queda de pressão, devido à demanda de energia ocasionada pela fricção do ar entre as paredes da tubulação e suas próprias moléculas. Quando alimentados na linha de transporte, os grãos têm pequena ou nenhuma velocidade na direção do fluxo de ar. Além disso, a mudança de direção da tubulação requerer cuidado especial quanto ao raio de suas curvaturas. A perda de carga causada pela mudança de direção é, aproximadamente, a metade daquela causada pela aceleração dos grãos após o alimentador.

Estudos comprovam que grande fluxo de grãos requer maior velocidade do ar de secagem e maior potência do motor do sistema de ventilação. A quantidade transportada é, basicamente, função do tipo de alimentação que, por sua vez, determina a perda de carga. Em geral, a potência necessária ao transporte de grãos aumenta de acordo com o diâmetro dos grãos, com a velocidade do ar, com o comprimento e altura da linha de transporte e com o fluxo de grãos (SEGLER, 1951; SAMPAIO, 2004).

No transporte pneumático, além necessitar de alta potência, a velocidade pode promover danos mecânicos caso cuidados especiais não sejam tomados. Por outro lado, baixas velocidades podem levar ao bloqueio da linha de transporte, causando sérios problemas com a obstrução da linha. Salman et al. (2002), estudando as características da fragmentação de partículas no transporte pneumático, mostram que quando a velocidade de transporte do fluxo de massa é mínima, ou seja, o suficiente para transportar a massa, não há fragmentação mecânica das partículas em movimento. Segundo Hubner (1986), a velocidade do ar é função do fluxo de grãos e da susceptibilidade dos grãos aos danos mecânicos, sugerindo que a velocidade do ar esteja entre 21 e 25 m s⁻¹.

2.9. Geradores de calor para o ar de secagem

A complementação da energia necessária para aumentar a temperatura do ar, nos sistemas de secagem em alta temperatura, é feita por fornalhas, projetadas para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, em condições que permitam o aproveitamento da energia térmica liberada da combustão e com maior rendimento térmico possível.

Quanto à forma de aproveitamento dos gases de combustão, as fornalhas podem ser classificadas como fornalhas de aquecimento direto ou indireto. Nas fornalhas com aquecimento direto, os gases resultantes da combustão são misturados com o ar ambiente e insuflados, por um ventilador, diretamente na massa de grãos. Nas fornalhas para aquecimento indireto, entretanto, os gases provenientes da combustão são introduzidos em um trocador de calor que, em contato com o ar de secagem, o aquecerá.

Apesar dos altos rendimentos apresentados por fornalhas com aquecimento direto, o uso de trocador de calor como componente de fornalha é imprescindível para a secagem de alguns produtos, como o café e o cacau e altamente desejável para produtos como cereais, leguminosas e oleaginosas. Desta forma, evita-se a contaminação dos produtos com os gases resultantes de uma combustão inadequada.

As caldeiras a vapor têm sido introduzidas com sucesso na secagem de café (NOGUEIRA & FIORAVANTE, 1987; NOGUEIRA & MATA, 1985; CARDOSO SOBRINHO, 2001; LOPES, 2002). Neste sistema, uma linha de vapor alimenta vários trocadores de calor compactos que fornecem ar quente para os secadores. Apresenta, como vantagens, ar de qualidade para a secagem, economia de combustível e mão-de-obra, menor risco de incêndio, redução nos níveis de poluição do ambiente e uniformidade da temperatura do ar de secagem. A principal desvantagem refere-se ao elevado custo inicial. Portanto, são recomendadas para vários tipos de secadores.

2.10. Avaliação do desempenho do sistema de secagem

Quanto mais tecnificada for a agricultura, a subsistência torna-se passado e a agricultura empresarial toma força, dando novos rumos a este segmento econômico. A globalização da economia e a atual política de preços, imposta aos produtos agrícolas, levaram os produtores a análises mais detalhadas do sistema produtivo. Em um contexto

de alto custo energético e baixo preço dos produtos agrícolas, torna-se indispensável considerar as relações entre o consumo de energia e as qualidades inerentes ao produto, antes e após o processamento (LACERDA FILHO, 1998; CARDOSO SOBRINHO, 2001; SANTOS, 2002).

2.10.1. Avaliação energética dos sistemas de secagem

Segundo Silva (2001), a eficiência energética de um secador de grãos ou de um processo de secagem deve ser expressa em termos de energia requerida para remover uma unidade de massa de água do produto, em kJ kg^{-1} de água evaporada.

Osório (1982) estudou a secagem de café em secadores de fluxos concorrentes, utilizando temperaturas do ar de secagem de 80, 100 e 120°C. Concluiu que o secador é, energeticamente, mais eficiente quando se utilizam temperaturas mais altas (100 e 120°C). Os respectivos valores médios foram de 4.869 e 4.759 kJ por kg de água evaporada, para café em coco com teor de água inicial de $24,7 \pm 6,9$ b.u. e final de $10,7 \pm 1,6\%$ b.u. Nenhuma das temperaturas, utilizadas neste tipo de secador, prejudicou a qualidade final da bebida.

Lacerda Filho (1986), avaliando diferentes tipos de secadores e métodos de secagem para café cereja lavado, observou que o consumo específico médio de energia foi igual a $24.139 \text{ kJ kg}^{-1}$ de água evaporada, durante a secagem em terreiro. A secagem realizada em secadores de leito fixo consumiu $10.404,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ de água evaporada e $0,085 \text{ kWh kg}^{-1}$ de água evaporada para movimentar o ar através dos grãos. Em um sistema de secagem em lotes, intermitente, em fluxos concorrentes, o consumo específico de energia foi igual a $8.120,8 \text{ kJ kg}^{-1}$ de água evaporada e $0,006 \text{ kWh kg}^{-1}$ de água evaporada para movimentar o ar e os grãos. A umidade dos grãos foi reduzida de 45,5 para 12,8% b.u.

Silva (1991), objetivando 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 e obteve 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.

Pinto (1993) projetou e avaliou o desempenho de um secador em lotes, intermitente, de fluxos contracorrentes/concorrentes na secagem de café cereja, utilizando temperaturas do ar de secagem de 80, 100 e 120°C. Os valores de consumo específico de energia por redução no teor de água de 30% b.u. para 12% b.u. 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, o autor recomenda a utilização da temperatura de 80°C por evitar qualquer dano térmico.

Pinto Filho (1994) desenvolveu e avaliou o protótipo de um secador de fluxos cruzados, com reversão no fluxo de ar e, também, avaliou o protótipo de um secador de fluxo cruzados, com reversão no fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para a secagem de café em coco, com umidade inicial igual a 26,2 e final igual a 14,7 % b.u. O consumo de energia foi igual a 17.171, 10.656 e 9.197 kJ por kg de água evaporada, em temperaturas do ar de secagem iguais a 60, 70 e 90 °C, respectivamente.

Campos (1998) desenvolveu e analisou um protótipo de secador de leito fixo, composto de quatro câmaras com sistema de revolvimento mecânico, para secagem de café despulpado com teor de umidade inicial igual a 43,1% b.u. e final de 11,7 ± 1,1%, 13,0 ± 3,6%, 14,9 ± 8,4% e 11,4 ± 3,1% b.u. para as câmaras de 1 a 4 respectivamente. Obteve um consumo específico de energia médio igual a 12.752 kJ por Kg de água evaporada, excluindo-se a energia utilizada em forma de eletricidade, mas 16.784 kJ por kg de água evaporada quando se leva em conta a energia utilizada com eletricidade para a temperatura do ar de secagem de 43°C.

De Grandi (1999) avaliou um protótipo de secador de camada fixa para café despulpado, utilizando um sistema de revolvimento mecânico, sob diferentes intervalos de revolvimento e condições de secagem. Nos testes realizados em intervalos de revolvimento de 2, 3, 4, 5 e 6 h, o secador apresentou consumo específico de energia de 27.645; 30.864; 29.510; 29.300 e 31.373 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. Para todos os testes, a temperatura do ar de secagem na massa de café foi mantida próxima a 40°C.

Silva (2001) estudaram o consumo específico de energia e a eficiência energética em secagem de café em secadores verticais e horizontais rotativos. Concluíram que a secagem em secador horizontal, seguida pelo seu uso do secador vertical apresentou menor consumo específico de energia, sendo mais eficiente, energeticamente, que a secagem realizada integralmente em secador horizontal.

Cardoso Sobrinho (2001), utilizando secador rotativo com capacidade de 15 m³ e temperatura do ar de secagem igual a 60°C, utilizando café em coco, obteve valores para o consumo específico médio de energia correspondentes a 14.817; 16.211 e 19.946 kJ kg⁻¹ de água evaporada para a redução no teor de água de 39% para 11%, de 41% para 11%, de 34% para 12% b.u., respectivamente.

2.10.2. Avaliação do sistema de secagem

Conforme dito anteriormente, o desempenho de um sistema de secagem de café varia de acordo com uma série de fatores, tais como a umidade inicial e final, temperatura e propriedades físicas do produto, resistência oferecida ao fluxo de ar, condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar ambiente), tipo de fornalha, sistema de carga e descarga e tipo de ventilador.

Na escolha de uma unidade de secagem apropriada, técnica e economicamente viável, é indispensável conhecer certas características como: sistema operacional, capacidade de secagem, eficiência energética, tipo de energia e a influência que estes parâmetros exercem sobre a qualidade final do produto (SILVA & LUCENA, 2000).

As principais razões para se testar secadores de grãos são: a) auxiliar no desenvolvimento de protótipos; b) confirmar as especificações de desempenho; e c) prover informações para a comercialização e para a orientação de operadores (NELLIST & BRUCE, 1992). Segundo esses autores, na última década, têm ocorrido significativos avanços na prática e na tecnologia de secagem, particularmente no uso de computadores para instrumentação e para simulação do desempenho de secadores. Quando se pretende mensurar o desempenho de secadores com uma precisão aceitável, deve-se trabalhar com condições estáveis (ou quase estáveis) de secagem.

Bakker-Arkema et al. (1978) ressaltam que a avaliação experimental de secadores requer medidas precisas das variáveis relacionadas aos grãos, ao ar e aos demais parâmetros de secagem, bem como às fontes de energia, incluindo a energia usada nos ventiladores, nos sistemas de movimentação de grãos e no aquecimento de ar.

Quando se necessita de mais informações, além daquelas básicas para avaliação do desempenho de um secador, torna-se necessária a instalação de sensores adicionais para medir o fluxo de ar, temperatura e umidade do ar de exaustão e pressão estática. Pode ser necessária também a obtenção de amostras de grãos em pontos da camada de

secagem, para avaliar sua uniformidade. Os autores propuseram uma metodologia para avaliação do desempenho de secadores, baseada em um número reduzido de testes de campo, sob determinadas condições padronizadas, acompanhados pela simulação do processo de secagem, com o objetivo de reduzir o tempo e os custos com os testes experimentais e que a avaliação da qualidade dos grãos secos complementa os testes de campo. Entretanto, Sabioni (1986) verificou que as condições padronizadas, na metodologia proposta por Bakker-Arkema et al. (1978), não representam a realidade brasileira. Para facilitar, a metodologia proposta será denominada ASBA (Avaliação de secadores segundo Bakker-Arkema et al.). Com relação à duração dos testes, a ASBA estabelece, para o caso do milho, a necessidade de três testes para secadores em lotes/batelada ou o equivalente a 24 horas de secagem. No caso de secadores de fluxo contínuo, estes devem ser operados durante um período de 24 horas, após de estabelecido o regime de trabalho do secador.

Parâmetros como condições ambientais e temperatura do ar de secagem podem ser obtidos a intervalos regulares, dependendo da capacidade do sistema de secagem, com posterior cálculo de valores médios. Se possível, o sistema deve ser também caracterizado pelos níveis de poluição sonora e de emissão de partículas no ambiente. Tabelas geradas por simulação em computadores podem ser utilizadas, para avaliar o sistema de secagem sob condições não-padronizadas.

Devido à falta de padrões estabelecidos por um organismo oficial, o Quadro 2.1 pode ser utilizado como padrão para avaliação de sistema de secagem para café.

Quadro 2.1–Sugestão de padrões para avaliação do desempenho de secadores na secagem de café, durante um período de secagem completa

Parâmetro	Cereja	Café coco (meia-seca)	Descascado
	Valores		
Umidade inicial média (%b.u.)	60 ± 5	35 ± 5	50 ± 5
Umidade final média (%b.u.)	12 ± 1	12 ± 1	12 ± 1
Temperatura média ambiente, (°C)	20 ± 5	20 ± 5	20 ± 5
Umidade relativa média (%)	65 ± 10	65 ± 10	65 ± 10
Temperatura inicial dos grãos (°C)	25 ± 5	20 ± 5	20 ± 5
Impurezas (%)	5,0	3,0	1,0
Temperatura final dos grãos (°C)	10	10	10

Fonte: SILVA et al., 2001.

2.11. Análise de custos dos sistemas de secagem

Segundo Woiler e Mathias (1994), os custos medem o uso de recursos. O conhecimento sobre o comportamento dos custos é fundamental para o efetivo controle da empresa rural e para o processo da tomada de decisão, além de servir para análise de rentabilidade dos recursos empregados na atividade produtiva. Em projetos, o custo de produção dependerá dos custos dos insumos que serão utilizados. Existem inúmeras maneiras de classificar os custos, sendo que cada tipo sua utilidade.

A diferenciação entre custos fixos e variáveis é determinada na classificação pela variabilidade e está relacionada com o volume de produção. Os custos fixos independem do volume produzido em determinado período, ou seja, produzindo-se muito ou pouco eles estarão presentes. Entretanto, os custos variáveis têm relação direta com o volume produzido, pois, quanto maior a produção, maior será o custo.

Vários parâmetros estão envolvidos no custo de secagem, como a energia para aquecer o ar, a energia para acionar os ventiladores, a energia para transportar o produto, a mão-de-obra, a manutenção, a depreciação, os juros e os custos de quebra técnica. Admitindo o custo como uma função do tempo requerido para a secagem, pode-se utilizar um modelo para a simulação de secadores, para prever o tempo de secagem e, assim, avaliar o custo de combustível, o custo de operação do ventilador, os custos fixos e o custo total de secagem.

Reinato et al. (2002) avaliaram o custo de secagem de café, usando GLP e lenha como combustível. Os resultados foram favoráveis ao uso da lenha, pois, esta apresentou um custo 2 a 4 vezes menor que os custos com GLP. Entretanto, nesse trabalho, não foram computados os custos relacionados à mão-de-obra, depreciação e energia elétrica, que são parâmetros indispensáveis à análise de custo.

Octaviani e Biagi (2004), estudando os custos da secagem de café em secadores rotativos, compararam os custos de secagem por meio de dois sistemas de secagem: um utilizando lenha e o outro GLP, como combustível. Eles concluíram que o sistema com GLP obteve um resultado 111% maior que o sistema com lenha e que ambos os combustíveis têm maior participação na composição dos custos de secagem, pois, a lenha representou aproximadamente 41% do custo total, enquanto o GLP representou 68%, aproximadamente. Nesse trabalho, todos os parâmetros relacionados à composição dos custos de secagem foram levados em consideração, como a mão-de-obra, depreciação, juros, energia elétrica, manutenção, seguro e consumo de combustível.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na área experimental de Energia na Agricultura e de Pré-processamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa.

3.1. Construção do sistema de secagem e armazenagem de café

O sistema foi composto por um secador pneumático de fluxos concorrentes, um pré-secador (tipo terreiro secador) e um silo secador-armazenador.

3.1.1. Construção do secador pneumático de fluxos concorrentes

O secador pneumático, com capacidade para 2.500 L de café cereja descascado, foi construído em módulos, para compor um “kit” de fácil transporte e montagem pelo usuário. Fazem parte do “kit”: moega de homogeneização ou principal (módulo 1), conjunto de moegas (módulo 2), câmara de descanso/secagem (módulo 3a) e câmara de secagem (módulo 3b), coifa (módulo 4), duto de transporte pneumático (módulo 5), moega de recepção de grãos (módulo 6) e ventilador (Figura 3.1).

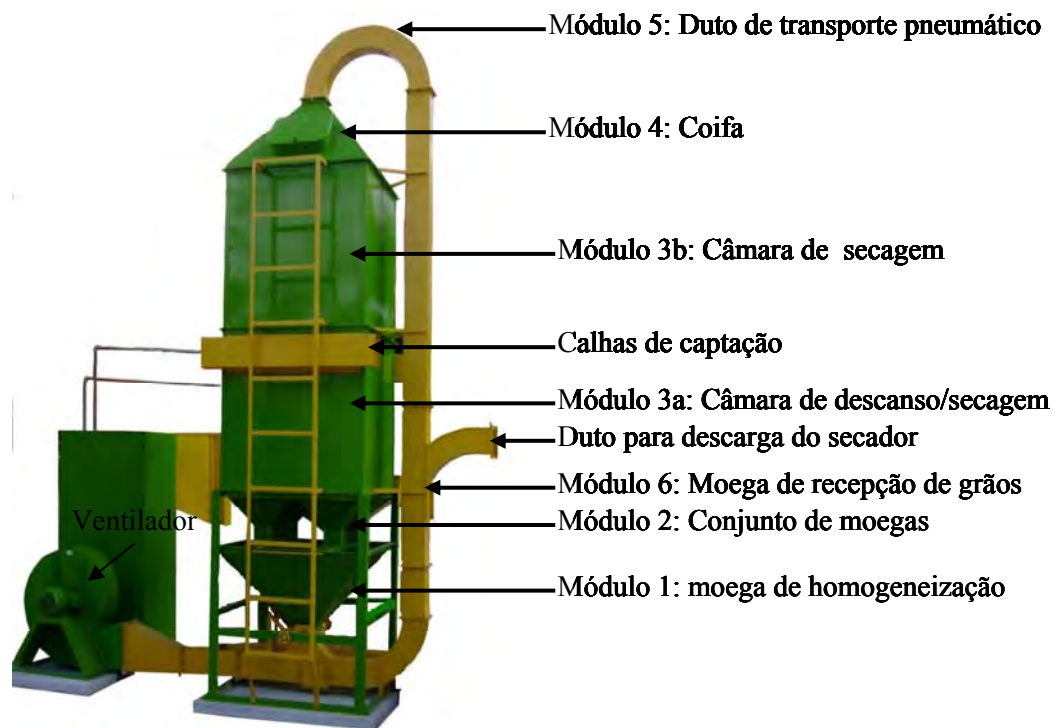


Figura 3.1 - Secador pneumático de fluxo concorrente.

O secador pneumático foi construído com chapas metálicas nº18, sendo os módulos unidos entre si com parafusos, formando uma estrutura compacta. Para redução de custos, todas as operações como carga, descarga e revolvimento foram realizadas pneumáticamente e com o mesmo ventilador utilizado para injetar o ar quente na câmara de secagem. Da mesma forma, os controles de abertura e fechamento da passagem do fluxo de ar e do produto utilizado para carregamento, revolvimento e descarga do secador, foram realizados por meio de registros, adequadamente posicionados e operados manualmente, de modo que, em um projeto futuro, os registros e válvulas possam ser automatizados.

Além da função de homogeneização/descanso, a moega principal (módulo 1) tem, também, a função de receber o produto durante o revolvimento, distribuindo-o uniformemente no duto de escoamento de ar/grãos. Com o corpo em formato piramidal, a moega foi construída com $1,0 \text{ m}^2$ de base maior, $0,024 \text{ m}^2$ de base menor, altura de $0,65 \text{ m}$ e inclinação das paredes de 50° em relação à vertical (Figura 3.2).

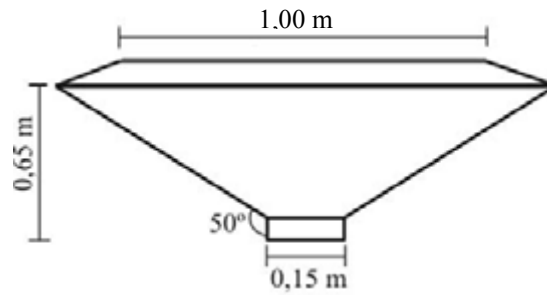


Figura 3.2 - Módulo 1: Dimensões da moega de homogeneização.

Para melhor fluidez dos grãos na moega de homogeneização, em sua parte inferior, foi colocada uma cruzeta para evitar uma possível interrupção no escoamento dos grãos no duto de transporte principal de ar/grãos (Figura 3.3).

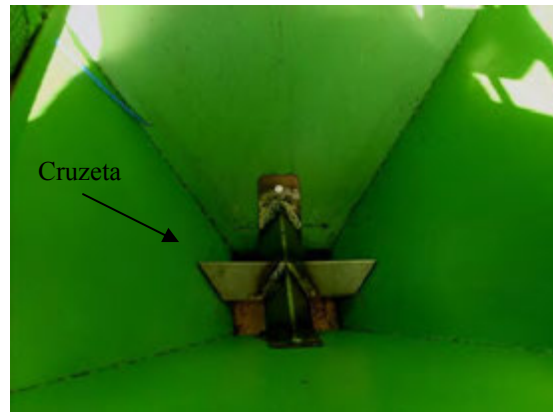


Figura 3.3 - Detalhe do posicionamento da cruzeta na moega de homogeneização.

Na parte inferior da moega de homogeneização, foi colocado um registro (R1) com a finalidade de controlar o fluxo de grãos no duto de transporte ar/grãos, evitando o acúmulo de grãos no duto de transporte (Figura 3.4a). Um pouco abaixo do registro R1, acoplou-se um segundo registro (R2), que opera como um *venturi*, criando vácuo para os grãos serem succionados da moega de homogeneização e injetados no duto principal de transporte de ar/grãos (Figura 3.4b).



(a)



(b)

Figura 3.4 - Detalhes dos registros R1 e R2 entre a moega de homogeneização e o duto de transporte ar-grãos: (a) R1; (b) R2.

O sistema de distribuição, formado por quatro moegas (módulo 2), tem a função de favorecer a movimentação homogênea do produto e permitir a saída do ar de secagem, quando o secador estiver operando com meia carga (Figura 3.5). O sistema foi confeccionado em chapas metálicas nº 18 com 23% de perfuração.

Cada moega de distribuição foi construída com 0,24 m² de base maior, 0,014 m² de base menor, altura de 0,23 m e paredes com inclinação igual a 50° em relação à vertical, para facilitar o escoamento do produto no interior do secador. Os bocais de saída foram construídos com dimensões de 0,12 x 0,12 x 0,12 m. Ao conjunto de quatro moegas foi acoplado o registro (R5), para fazer o controle do fluxo de grãos no secador (Figura 3.5). Na Figura 3.6, é apresentada a fixação do módulo 2 ao módulo 1.



Figura 3.5 - Módulo 2: detalhe do registro R5.

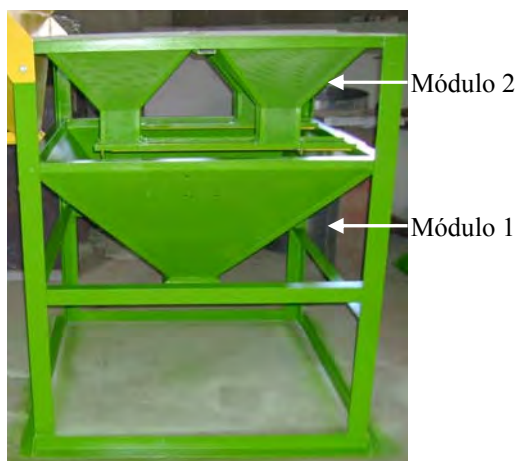


Figura 3.6 - Fixação do módulo 2 ao módulo 1.

A câmara de secagem é composta por dois módulos com dimensões de 1,0x1,0x1,0 m. Na parte superior do módulo 3a (Figura 3.7), foram adaptadas quatro calhas triangulares confeccionadas em chapa perfurada. A função das calhas é permitir uma melhor homogeneização dos grãos para o módulo 3a e, simultaneamente, permitir a exaustão do ar de secagem quando o secador estiver operando com carga total. O módulo 3b, por sua vez, é completamente vazio, quando operando com carga reduzida, com capacidade estática de 1,0 m³ e fixado ao módulo 3a (Figura 3.8).



Figura 3.7 - Fixação das calhas triangulares no interior do módulo 3a.



Figura 3.8 - Montagem dos módulos 3a e 3b.

Às saídas das calhas de exaustão foram acoplados, externamente, dutos para que o ar de exaustão pudesse ser canalizado. O duto de exaustão possibilita o aproveitamento do ar de exaustão, por recirculação parcial, quando este ainda possuir potencial para secagem. No caso em que o secador deve operar com meia carga ou menos, deve-se fechar o duto de exaustão. Neste caso, a exaustão será feita por meio das moegas de homogeneização. Para limpeza do secador, foi construída uma porta de 0,40 x 0,40 m no módulo 3a (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Módulo 3a: dutos de captação do ar de exaustão e localização da porta de limpeza do secador.

Em uma das laterais do secador, foi acoplada a moega de recepção de grãos (módulo 6), ligada por uma tubulação de diâmetro igual a 0,10 m ao duto de transporte pneumático para o carregamento do secador (Figura 3.10).



Figura 3.10 - (a) Fixação dos módulos, 1, 2 e 6; (b) ligação da moega de recepção ao duto de transporte pneumático (ar/grãos).

Acima do módulo 3a, foi fixado o módulo 3b e, acima deste, uma coifa (módulo 4) com as mesmas dimensões do módulo 1, para permitir a ligação do secador com o duto de transporte ar/grãos. Em um dos lados da coifa, foi construída uma saída de ar com seção retangular de 0,50 x 0,30 m, para reduzir a pressão do ar no topo do secador durante o carregamento, revolvimento e descarga do produto (Figura 3.11).

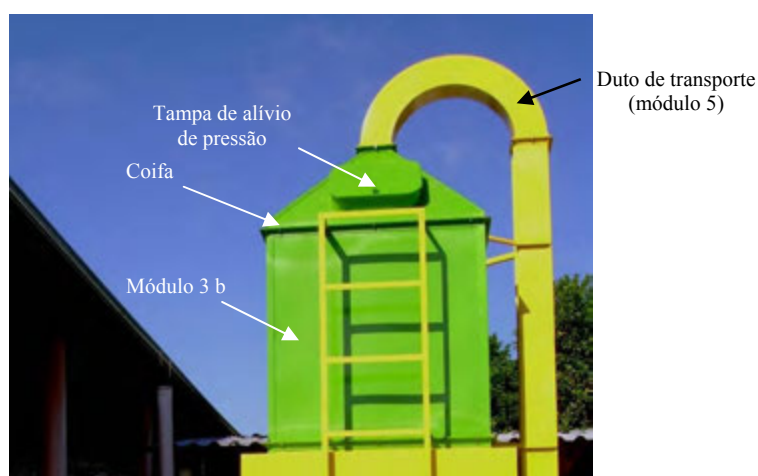


Figura 3.11 - Módulo 4: coifa.

O duto de transporte de ar/grãos, transportador pneumático (módulo 5), foi constituído por tubulação metálica, que faz as conexões da moega de recepção de grãos, da moega de homogeneização, do duto de descarga e da coifa com o secador (Figura3.12). Por facilidade de construção, o duto foi construído em seção quadrada, com comprimento de 4,50 m, área da seção transversal igual a 0,024 m².

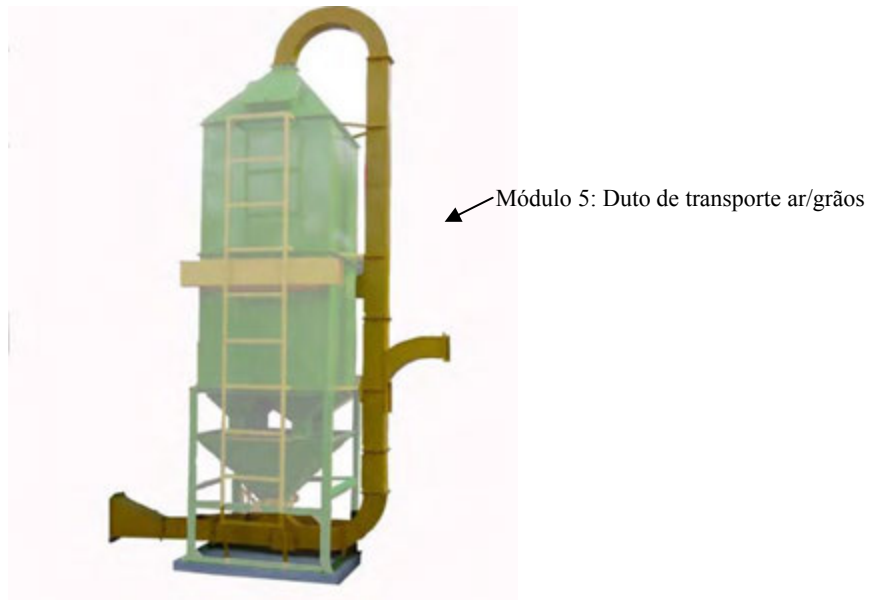


Figura 3.12 - Vista geral do secador com destaque para o Módulo 5 (duto de transporte ar/grãos).

Para as operações de carga, revolvimento e de descarga do secador com o mesmo sistema de ventilação, os registros foram conectados à parte vertical da tubulação de transporte principal de ar/grãos (R3 e R4). Esses registros devem ser posicionados de acordo com a operação que está sendo realizada (carregamento, transporte e, ou descarga), conforme mostrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Detalhe da ligação do duto de transporte principal com o duto de descarga do secador.

O duto de descarga, com diâmetro de 0,15 m e comprimento de 2,25 m, é confeccionado em chapas metálicas nº 18 com 23% de perfuração, a fim de reduzir a velocidade de descarga dos grãos, evitando, assim, que eles sofram danos mecânicos (Figura 3.14 a). Para o caso em que haja acúmulo de grãos no duto de descarga, foi feita uma porta de 0,40 x 0,40 m no final do duto de transporte (Figura 3.14 b).



(a)

(b)

Figura 3.14 - Duto de descarga do café: (a) duto perfurado; (b) detalhe da porta de limpeza.

Para possibilitar o escoamento contínuo do produto seco, foram acoplados ao duto de descarga dois bocais, com diâmetro de 0,10 m (Figura 3.15).



(a)

(b)

Figura 3.15 - Descarga: (a) bocais; (b) ensacamento.

O sistema de ventilação do protótipo, constituído por um ventilador centrífugo de alta pressão, acionado por um motor elétrico de 5 cv a 1.750 rpm, foi posicionado entre o aquecedor e o secador (Figura 3.16 a). Como o sistema de ventilação foi calculado para transporte do produto, a quantidade de ar foi muito superior à necessária para a secagem. Assim, para evitar perdas de calor, a potência do ventilador foi maximizada, acrescentando-se um pré-secador ao sistema. Para o fornecimento de ar aquecido ao mesmo tempo para o secador pneumático e para o pré-secador, foi colocado um registro (R6) para divisão do ar aquecido (Figura 3.16 b).



Figura 3.16 - Sistema de ventilação: (a) conjunto motor-ventilador; (b) registro de divisão do ar aquecido para o pré-secador e secador pneumático.

3.2.2. Construção do pré-secador

Baseando-se nas recomendações de Silva et al. (2005), construiu-se um módulo do secador do tipo terreiro-secador com dimensões de 5 x 3 m, com capacidade para 2.500L de café cereja descascado, exatamente com a mesma capacidade do secador pneumático para fornecer produto pré-seco para o mesmo (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Vista do pré-secador e secador pneumático de fluxos concorrentes.

3.2.3. Construção do silo secador-armazenador

Com a finalidade de se usar o sistema de secagem combinada, foi providenciada a construção de um silo secador-armazenador, projetado e construído segundo as recomendações de Silva et al. (2005). O silo secador-armazenador apresenta algumas características especiais que não são exigidas para os silos empregados apenas para a armazenagem, conforme descrito a seguir.

Para o presente estudo, a base do silo-secador, câmara *plênum*, foi construída em alvenaria com diâmetro interno de 2,0 m e altura de 1,80 m. A esta base foi colocado um piso, confeccionado em chapas metálicas nº 16 com, aproximadamente, 20% de área perfurada, visando à distribuição uniforme do ar de secagem. Para a sustentação do piso, foram fixadas hastes de ferro CA50 de ½”, a partir da altura da câmara *plênum*, que foram apoiadas sobre o piso (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Detalhes da base do silo secador-armazenador: (a) base-câmara *plênum*; (b) piso em chapa perfurada e fixação das hastes de sustentação do piso.

Na Figura 3.19 é apresentada a colocação do piso de chapa perfurada sobre a base de alvenaria, formando a câmara *plênum* e a base do silo depois de pronto.



Figura 3.19 - Montagem da base do silo: (a) colocação do piso perfurado; (b) piso fixado, formando a câmara *plênum*.

Para redução de custos e maior facilidade de construção, a estrutura da parede do silo foi construída com uma armação de tela de arame nº14, a qual foi envolvida por uma tela do tipo viveiro. A primeira tela deve ser de malha menor ou igual a 50 mm (Figura 3.20). Essa tela de aço foi amarrada com arame no piso perfurado e as extremidades unidas com arame. Envolvendo a tela de aço tipo cerca, foi usada a tela de viveiro para facilitar a aplicação da argamassa, conforme detalhado mais adiante.



Figura 3.20 - Vista total da estrutura cilíndrica feita de tela de arame.

Na parte interior da armação de telas, foi fixada uma lona de plástico comum para evitar o contato do produto com a argamassa, usada para construção da parede do silo secador-armazenador (Figura 3.21 a). Para evitar a saída de grãos por baixo da lona de plástico, na armação telada foi fixada, na parte exterior, uma cinta de contenção, confeccionada em chapa galvanizada nº 21 com 0,10 m de largura, na base da armação (Figura 3.21 b).

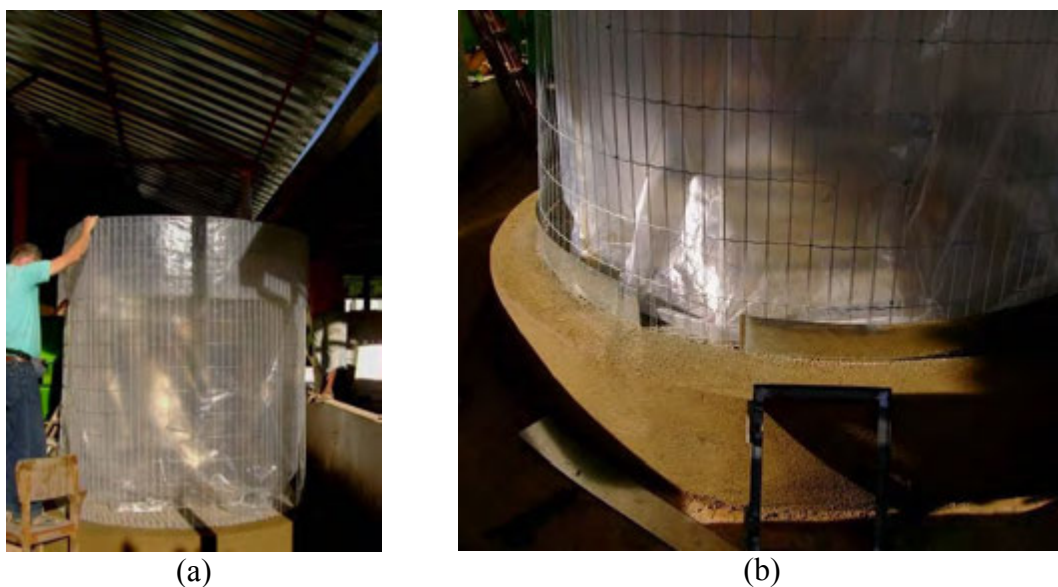


Figura 3.21 - Revestimento do silo secador-armazenador: (a) internamente com lona de plástico; (b) colocação da cinta de contenção.

Na base do silo secador, depois da colocação da cinta de contenção, foi fixada a porta de descarga (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Detalhes do silo secador-armazenador: (a) colocação da porta para descarga; (b) enchimento.

À medida que o silo secador–armazenador era carregado com café, fazia-se o revestimento exterior (Figura 3.23) com argamassa, segundo as recomendações de Silva et al. (2005). Depois de construído, o silo apresentou altura útil de 1,80 m.



Figura 3.23 - Revestimento externo do silo secador–armazenador com argamassa.

Quando estava totalmente cheio, o silo secador-armazenador foi coberto com o excedente da lona de plástico que revestia o seu interior, para facilitar o acabamento da parede, sem contaminar o café.

Depois da adição da primeira camada de café dentro do silo, o ar ambiente era insuflado por um ventilador centrífugo de pás retas, acionado por um motor elétrico de 1 cv a 1.730 rpm.

3.2.4. Vista do sistema de secagem e armazenagem de café

O tamanho e o número de silos para o sistema de secagem combinada dependem da produção total da propriedade. No presente caso, foi construído um galpão com dimensões de 10,0 x 6,5 x 5,0 m, para proteger os componentes do sistema de secagem e armazenagem de café com apenas um silo. A Figura 3.24 mostra o sistema de secagem e armazenagem, construído para o presente trabalho.



Figura 3.24 - Unidade de secagem e armazenamento de café.

3.3. Sistema de aquecimento indireto do ar de secagem

Utilizou-se um sistema de aquecimento indireto, à lenha, estudado por Lopes (2002). O sistema é composto por uma caldeira compacta, flamotubular, dimensionada para produzir 100 kg h^{-1} de vapor d'água saturado úmido. A esta caldeira, foi acoplado um trocador de calor compacto, dimensionado para fornecer $100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ de ar, à temperatura de 75°C , podendo trabalhar com água quente ou vapor saturado úmido como fluido quente.

3.4. Matéria-prima

Foi utilizado o café cereja descascado da espécie *Coffea arabica* L., variedade Catuaí Vermelho, procedente da fazenda Araúna, situada no município de Viçosa, Zona da Mata de Minas Gerais.

A colheita do produto foi realizada durante o período de maio a agosto de 2007, pelo sistema de derriça sobre pano, quando o teor de água dos grãos era 60% b.u.,

aproximadamente. Ainda na lavoura, o café foi submetido ao processo de separação de impurezas, utilizando-se o peneiramento manual.

Depois da retirada das impurezas no campo, o café passou por separador hidráulico, para separação, de acordo com o estágio de maturação dos frutos, ou seja, separando os cafés bóias dos frutos perfeitos ou cerejas e os verdes.

Depois da separação de impurezas e lavagem, o café foi encaminhado para o despulpador/descascador para retirada da casca e de parte da mucilagem, para posterior secagem. Em seguida, o café era encaminhado para um terreiro, permanecendo por um período de dois dias para perder água superficial.

Para alguns testes, foi feita uma pré-secagem do produto em terreiro secador. Esta prática foi necessária porque, ao sair do lavador, o café apresenta elevado teor de água, o que dificulta o escoamento do produto dentro do secador (SILVA, 2001).

3.5. Funcionamento do sistema de secagem e armazenagem de café

Para avaliação do sistema de secagem, a pré-secagem e a secagem foram realizadas intermitentemente, ou seja, depois de sofrerem ação do ar aquecido, os grãos passavam por um período de descanso, durante intervalos de tempo preestabelecido. Esse processo foi realizado no decorrer da secagem até os grãos atingirem o teor de água de $15 \pm 2\%$ b.u., para que a secagem fosse completada com ar natural no silo secador-armazenador.

3.5.1. Pré-secagem em terreiro secador

Devido ao elevado teor de água dos frutos de café na época da colheita, a pré-secagem do café cereja descascado foi realizada em terreiro-secador. Esta tecnologia, viabilizada pelo CBP&D-Café e desenvolvido por Donzeles (2002), distribui ar quente na massa de café enleirada sobre o duto de saída de ar do sistema.

Como o pré-secador e secador funcionavam simultaneamente, com um único ventilador, por meio do registro R6, o pré-secador foi utilizado na avaliação do sistema de secagem combinada (pré-secador, secador pneumático e silo ventilado).

A pré-secagem do café em terreiro-secador iniciava-se logo que os grãos saíam do terreiro convencional, com teor de água entre 35 e 40% b.u. Quando utilizado, a temperatura do ar de secagem no pré-secador não ultrapassou 60°C , temperatura

recomendada para que a massa de café, neste sistema de secagem, não ultrapasse 40°C. A Figura 3.25 apresenta o café no pré-secador.

Para obter uma pré-secagem homogênea, o café era revolvido manualmente no pré-secador, no mesmo intervalo de tempo utilizado no revolvimento do secador pneumático (a cada duas horas). Para revolvimento do café no secador pneumático, todo o fluxo de ar, gerado pelo ventilador, era utilizado nessa função.



Figura 3.25 - Pré-secagem do café cereja descascado em terreiro-secador.

3.5.2. Funcionamento do secador pneumático de fluxos concorrentes

A seguir, é descrito o procedimento adotado na avaliação do secador, quando o fluxo de ar foi todo direcionado para ele e repetido para as avaliações do sistema de secagem combinada, em que se dividia o fluxo de ar aquecido para o pré-secador e o secador pneumático, quando ambos operavam com carga total ou meia carga.

Para facilitar a compreensão, a localização e os códigos dos registros de controle são apresentados na Figura 3.26.

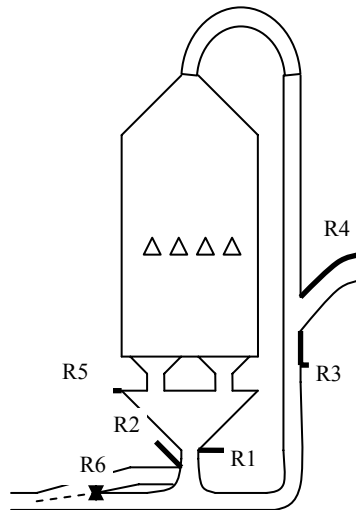


Figura 3.26 - Detalhes do posicionamento dos registros de controle no secador pneumático.

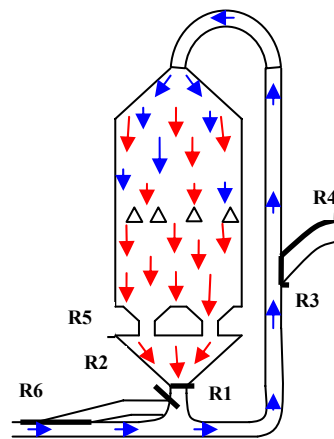
Para carregamento do secador pneumático, fecham-se os registros R1, R3 e posicionava R6 direcionando todo o fluxo de ar para o secador pneumático. Ao abrir R2, o sistema de ventilação suga os grãos da moega de recepção, transportando-os até à parte superior do secador pneumático. Para evitar danos mecânicos aos grãos, na coifa superior do secador, foram fixados anteparos de borracha para amortecer o impacto dos grãos durante o carregamento e o revolvimento do produto no secador pneumático. A distribuição do produto na câmara de secagem é feita por gravidade, que propicia distribuição homogênea e forma uma camada de mesma espessura, facilitando a passagem do ar aquecido pela camada de produto.

A cada 2 horas de secagem com o produto parado no secador pneumático, abre-se o registro R5 até que a moega de descanso/homogeneização seja completada; em seguida, fecha-se R5 e abre-se R1, transportando parte dos grãos, que não sofreram ação do ar aquecido, pois se encontravam na câmara de repouso, para a câmara de secagem; repete-se o processo por mais uma vez. Em seguida, completa-se a moega de descanso/homogeneização e fecha-se R1. Durante este procedimento, a camada de grãos que ficou sob a ação do ar aquecido na câmara de secagem, nas duas primeiras horas, desce para a câmara de descanso e fica em contato com o ar ambiente, mais frio e úmido. Este procedimento é repetido a cada duas horas, até o café atingir o teor de água desejado.

Devido a problemas de ordem prática, a secagem só foi realizada no período diurno. Assim, ao fim da tarde, interrompia-se a injeção de ar aquecido, armazenando

todo o café dentro do secador pneumático e dando continuidade à secagem no dia seguinte.

Na Figura 3.27 é apresentado o procedimento para o carregamento do secador pneumático.



Legenda

Fluxo de ar

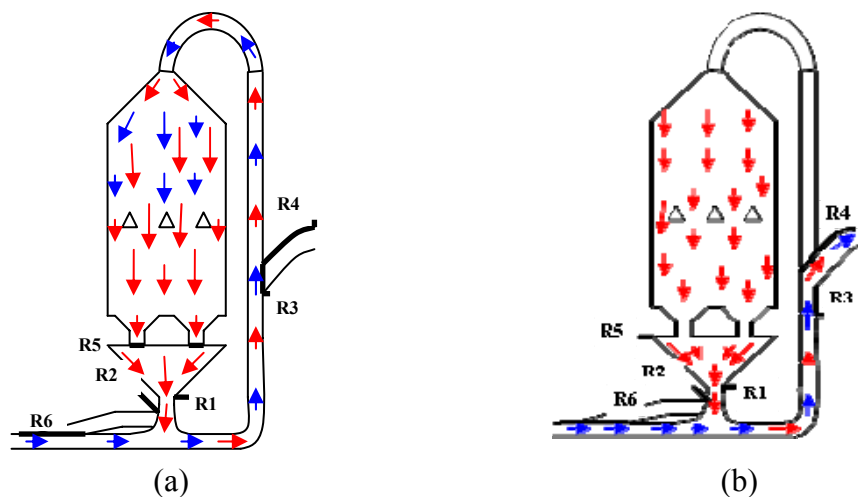


Fluxo de grãos



Figura 3.27 - Esquemas dos fluxos de ar/grãos no carregamento do secador pneumático.

A descarga do secador pneumático é feita pelo bloqueio do fluxo de grãos para o interior do secador, abrindo-se R3 e fechando-se R4. Posteriormente, abre-se R5 e R1 (Figura 3.28).



Legenda

Fluxo de ar



Fluxo de grãos



Figura 3.28 - Esquemas do fluxo de ar-grãos no secador: (a) revolvimento; (b) descarga.

Para funcionamento do secador pneumático em fluxo contínuo, deve-se manter R1, R2 e R5 sempre abertos; fechando-se R3. Este procedimento só é recomendado para café natural. Segundo Silva & Lucena (2000), a secagem do café, com descansos alternados, é melhor que a secagem contínua.

Para meia carga, deve-se usar o mesmo procedimento, ou seja, mantendo-se fechadas as saídas de exaustão superior. Neste caso, a exaustão passa a ser feita por meio das moegas de distribuição, construídas em chapas perfuradas.

3.5.3. Silo secador-armazenador

Embora o sistema pneumático possa ser usado para encher o silo secador-armazenador, para a etapa final da secagem do café, neste trabalho, o produto foi ensacado, pesado (avaliação real da perda de massa) e transportado para o silo secador-armazenador, onde foi completada a secagem com ar natural.

Para demonstrar que na secagem combinada não é necessário um controle rigoroso do teor de água do produto que sai do secador, o silo secador-armazenador foi carregado, ao término de cada batelada de secagem à alta temperatura, com camadas a diferentes teores de água.

Na fase de secagem em silo, o café foi ventilado durante o período de 9 às 16 horas, para aproveitar os períodos em que o ar ambiente apresentava maior potencial de secagem, até que os grãos atingissem o teor de água de 11% b.u., valor este adequado para o armazenamento seguro do produto. Para o controle da secagem, amostras dos grãos da camada superior do silo secador-armazenador eram retiradas semanalmente.

3.6. Planejamento dos testes

3.6.1. Secador pneumático de fluxos concorrentes

Para realização dos testes, em que somente o secador pneumático foi avaliado, o teor médio inicial de água dos grãos foi de 33,5% b.u. para café cereja descascado. Foram realizados três testes de secagem no secador com carga completa e um teste com meia carga (apenas para verificar o comportamento do secador).

Os testes nos quais o secador foi operado individualmente, ou seja, quando todo o ar insuflado pelo ventilador foi utilizado para a secagem no secador, foram codificados como FT (fluxo total para carga completa do secador) e FTM (fluxo total para meia carga do secador). Os números 1, 2, 3 e 4 foram usados, para designar a ordem dos testes.

O procedimento de operação de secagem foi o mesmo descrito no item 3.5.1, alternando-se secagem e repouso. O produto permanecia no sistema até atingir teor de água próximo a 15% b.u., sendo o processo caracterizado como intermitente.

Ao se aproximar do teor de água préestabelecido para que o produto fosse transferido para o silo secador-armazenador, o produto era misturado em fluxo contínuo. O produto então, era ensacado para a pesagem, e transferido para secagem complementar no silo secador-armazenador, onde permanecia até atingir o teor de água para comercialização.

No silo secador-armazenador, acompanhou-se o teor de água da camada superior de grãos, semanalmente e, quando estes atingiam o teor de água igual a, aproximadamente, 11% b.u., indicava o final do processo.

Durante os testes de secagem, as determinações do teor de água dos grãos foram realizadas no momento do carregamento do secador, depois do revolvimento dos grãos, ou seja, de duas em duas horas e ao descarregar o secador. Para isto, foi utilizado o método EDABO (Evaporação Direta da Água em Banho de Óleo), uma variação do método de destilação, com precisão semelhante ao método oficial da estufa (SAMPAIO, 2004).

Como a estufa é o método oficial, retiraram-se, também, amostras para a determinação do teor de água por este método, utilizando-se a temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, com três repetições e com, aproximadamente, 30 gramas por amostra (BRASIL, 1992).

3.6.2. Sistema de secagem e armazenamento

O pré-secador, o secador pneumático e o silo secador-armazenador foram operados, conforme descrito nos itens 3.5.1, 3.5.2 e 3.5.3. Entretanto, o fluxo de ar fornecido foi dividido, ou seja, uma parte direcionada para o secador e outra para o pré-secador, fazendo a pré-secagem e secagem ao mesmo tempo e com um único ventilador.

Os testes nos quais o secador foi operado em conjunto com o pré-secador, ou seja, quando o ar insuflado pelo ventilador foi utilizado para a secagem no secador pneumático e no pré-secador, foram codificados como FD (fluxo dividido para carga completa do secador pneumático e pré-secador) e FDM (fluxo dividido para meia carga do secador pneumático). Os números 1, 2, 3 e 4 foram usados, para designar a ordem dos testes.

Para a realização dos testes de avaliação do pré-secador e do secador pneumático, os cafés que chegavam com teor médio de água acima de 37,5% b.u. iam para o pré-secador, enquanto os cafés que chegavam com teor médio de água inferior a 33% b.u. iam para o secador. Foram feitos três testes de secagem com carga completa no secador e no pré-secador e, conforme mencionado anteriormente, apenas um teste de secagem com meia carga.

Dessa forma, alternando secagem e repouso, o produto permanecia no pré-secador até atingir teor de água igual a, aproximadamente, 30% b.u. Em seguida, o produto era ensacado, pesado e transferido para o secador pneumático, onde permanecia até atingir teor de água em torno de 15% b.u., mínimo estabelecido para completar a secagem em silo secador-armazenador.

Após atingir o teor de água desejado os cafés eram misturados em fluxo contínuo e, depois, ensacados para serem pesados e transferidos para o silo secador-armazenador, permanecendo neste até que os grãos atingissem o teor de água adequado para um armazenamento seguro (11% b.u.).

Durante as secagens, as determinações do teor de água dos grãos foram realizadas conforme descrito na avaliação do secador.

3.7. Instrumentação do secador pneumático e pré-secador

Para avaliação do secador pneumático, uma série de variáveis foi monitorada por meio da instrumentação do secador. Estas informações incluem a medição das seguintes variáveis, imprescindíveis à avaliação do sistema: temperatura da massa de grãos, do ar de secagem, do ar de exaustão e do ar ambiente; da vazão do ar aquecido e do ar de exaustão; massa inicial e final dos grãos; teor de água inicial e final dos grãos; e temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

A seguir, é apresentada a metodologia utilizada para a medição das variáveis envolvidas no processo de secagem.

3.7.1. Temperatura

Foram monitoradas as temperaturas do ar ambiente, de secagem e de exaustão. As temperaturas da massa de grãos foram determinadas por meio de sondas termoeletricas, tipo K, nas posições indicadas no Quadro 3.1, cujos pontos podem ser vistos na Figura 3.29.

Quadro 3.1 - Descrição dos locais de medição com sondas termoeletrica no secador e no pré-secador

Sondas termoeletricas	Descrição da medida
T_{aa}	Temperatura do ar ambiente
T_{dv}	Temperatura do ar aquecido depois do ventilador
T_0	Temperatura do ar aquecido no topo do secador
$T_{0,40}$	Temperatura da massa de grãos a 0,40 m do topo do secador
$T_{0,80}$	Temperatura da massa de grãos a 0,80 m do topo do secador
$T_{1,20}$	Temperatura da massa de grãos a 1,20 m do topo do secador
$T_{1,60}$	Temperatura da massa de grãos a 1,60 m do topo do secador
$T_{2,00}$	Temperatura da massa de grãos a 2,00 m do topo do secador
T_{ae}	Temperatura do ar de exaustão e calhas de captação
T_{MD}	Temperatura da massa de grãos na moega de descanso
T_{ps}	Temperatura do ar aquecido no pré – secador

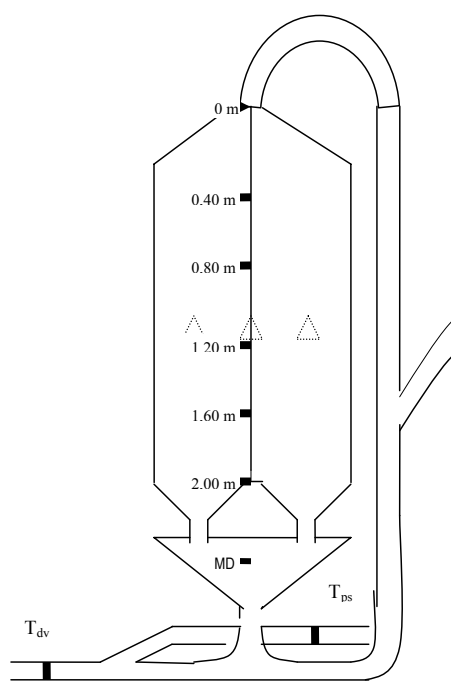


Figura 3.29 - Detalhes do posicionamento dos sensores de temperatura no secador.

Para determinação da temperatura da massa de grãos, um cabo de aço foi posicionado verticalmente passando pelo centro, no interior do secador. Nesse cabo, foram fixados cinco termopares a intervalos de 0,40 m, originando os pontos de

medição $T_{0,40}$, $T_{0,80}$, $T_{1,20}$, $T_{1,60}$ e $T_{2,0}$ (Figura 3.30 a). Foi registrada, também, a temperatura da massa de grãos na moega de descanso/ homogeneização (Figura 3.30 b).



Figura 3.30 - Detalhes do posicionamento dos termopares: (a) posicionamento do cabo de aço dentro do secador; (b) sensor de temperatura posicionado na moega de descanso/homogeneização.

Para o monitoramento das temperaturas, por meio das sondas termométricas, foi utilizada uma unidade de aquisição de dados, marca Fluke, modelo Hydra 2625A. A umidade relativa do ar ambiente foi determinada, utilizando-se um sensor integrado de leitura de temperatura e umidade relativa com precisão de 1°C e 3%, respectivamente. Os dados foram determinados e registrados a intervalos regulares de dez minutos (Figura 3.31).



Figura 3.31 - Unidade de aquisição de dados e sensor integrado de leitura de temperatura e umidade relativa.

A temperatura do ar de exaustão e a umidade relativa do ar de secagem e exaustão do pré-secador, assim como a umidade relativa do ar de secagem e de exaustão do secador pneumático foram calculadas por intermédio do programa computacional GRAPSI® (MELO et al.,2004), tendo como dados de entrada as temperaturas do ar ambiente e do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente.

3.7.2. Medição da velocidade do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático e no pré-secador

Para avaliar a vazão do ar de secagem foi utilizada a velocidade média do ar aquecido, cuja determinação baseou-se nas medidas das velocidades em 5 pontos da seção do duto de ventilação. A velocidade do ar de secagem foi medida nos pontos preestabelecidos, ou seja: na saída do ventilador (antes da bifurcação e do registro R6), no duto de fornecimento de ar para o pré-secador, no duto vertical após a bifurcação para descarga do secador e no topo do secador, utilizando-se um tubo de Pittot com saída digitalizada e função velocidade (Figura 3.32 e 3.33).



Figura 3.32 - Detalhes dos pontos de medição da velocidade do ar aquecido: (a) após ventilador; (b) duto vertical após a bifurcação para descarga do secador.



Figura 3.33 - Detalhes dos pontos de medição da velocidade do ar aquecido:(a) topo do secador; (b) duto do pré-secador.

Como a velocidade do ar de exaustão era baixa nas calhas de captação, a vazão foi determinada com um anemômetro digital de pás rotativas, modelo LCA600 da marca Airflow, (Figura 3.34) com precisão de $0,1 \text{ m s}^{-1}$. Pela área do duto de transporte, determinou-se a vazão do ar de secagem, empregando-se a Equação 1.

$$Q_{aa} = V_{as} A_{dt} \quad (1)$$

em que

Q_{aa} = vazão do ar aquecido, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$.

V_{as} = velocidade do ar aquecido, m s^{-1} .

A_{dt} = área da seção transversal do duto de transporte, m^2 .



(a)



(b)

Figura 3.34 - Detalhes do aparelho usado para as medições de velocidade do ar de exaustão: (a) anemômetro digital de pás; (b) medição da velocidade do ar de exaustão na calha de captação.

4.7.3. Determinação da massa inicial e final do café

As massas inicial e final do café, para cada teste, antes de ir para o secador e, ou, pré-secador, foram obtidas mediante pesagem em balança rodoviária da marca Filizola, com sensibilidade de leitura de 2 kg. Para acompanhamento, as massas inicial e final dos lotes de café foram também obtidas indiretamente, utilizando-se a relação entre a massa inicial e os teores de água final e inicial dos lotes de café, pela equação 2.

$$M_f = \frac{(100 - U_i) M_i}{(100 - U_f)} \quad (2)$$

em que

M_f = massa final do café, kg.

M_i = massa inicial do café, kg.

U_f = teor de água final do café, % b.u..

U_i = teor de água inicial do café, % b.u..

3.7.4. Consumo de energia

A determinação da massa de lenha, consumida durante os testes de secagem, foi realizada por meio de pesagem direta.

Para a pesagem direta, utilizou-se uma balança de plataforma, da marca Filizola, com sensibilidade de leitura igual a 0,1 kg.

O consumo específico de energia foi determinado pelo balanço energético do ar, empregando-se a Equação 3.

$$E_E = \frac{Q_{aa} \text{ cp}_{aa} (T_s - T_{ar \text{ amb}}) t (100 - U_f) 60}{M \eta V_e (U_i - U_f)} \quad (3)$$

em que

E_E = consumo específico teórico de energia, kJ kg^{-1} de água evaporada.

Q_{aa} = vazão do ar de secagem, $\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$.

cp_{aa} = calor específico do ar ambiente, $1,0048 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

T_s = temperatura do ar de secagem, $^\circ\text{C}$.

$T_{ar \text{ amb}}$ = temperatura do ar ambiente, $^\circ\text{C}$.

M = massa inicial de combustível, kg.

η = rendimento da fornalha, decimal.

V_e = volume específico do ar ambiente, $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$.

O consumo total de energia térmica, proveniente da queima do combustível, foi determinado para cada teste, por meio da equação 4.

$$E_{1T} = \frac{E_R M_i (U_i - U_f)}{(100 - U_f)} \quad (4)$$

em que

E_{1T} = consumo total de energia térmica, kJ.

Os consumos de energia eléctrica para o pré-secador/secador e para o silo secador foram determinados a partir da potência nominal dos motores. Foram consideradas as perdas nos rolamentos e outras, para o cálculo da potência real consumida na rede, conforme Equação 5 (CAILLE, 1980; LACERDA FILHO e MELO, 2001).

$$Pot = \frac{Pot_{nominal}}{\varepsilon} 736 \quad (5)$$

em que

Pot = potência eléctrica fornecida ao motor, W.
 Pot_{nominal} = potência nominal do motor, cv.
 ε = rendimento do motor eléctrico, decimal.

Assim, para calcular o consumo total de energia eléctrica, empregou-se a Equação 6. Para a uniformização dos dados, utilizou-se a relação 1 kWh = 3600 kJ

$$Ce = 3600 Pot t \quad (6)$$

em que

Ce = consumo total de energia eléctrica, kJ.

O consumo específico total de energia, que é a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água presente no produto durante o processo de secagem, foi obtido por:

$$ET = \frac{EC (100 - U_f)}{M_i (U_i - U_f)} \quad (7)$$

em que

ET = consumo específico total de energia, kJ Kg⁻¹ de água evaporada;
 EC = energia consumida na secagem (térmica+eléctrica), kJ.

A quantidade de energia consumida na secagem foi obtida por meio da equação 8.

$$EC = E_{IT} + Ce \quad (8)$$

3.7.5. Qualidade final do produto

Para análise do tipo do café e da qualidade de bebida, foram enviadas amostras de 300 g de café beneficiado, secas ao sol (testemunhas), secas no secador pneumático e provenientes do esvaziamento do silo secador–armazenador. No silo-secador, foram retiradas amostras a cada 0,20 m, sendo a mistura das amostras simples (amostras compostas) enviadas para a Corretora de Café Três Irmãos Ltda., localizada em Viçosa, MG, onde foram realizadas análise sensorial e classificação do café.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação dos processos de secagem

As avaliações dos processos de secagem, com sistema de aquecimento indireto do ar, foram feitas segundo a metodologia proposta por Bakker-Arkema (1978), e modificada por Silva & Lucena (2000).

Os parâmetros para avaliação foram determinados com o secador trabalhando com carga total e com meia carga e, em ambos os casos, recebendo todo o fluxo de ar gerado pelo sistema de ventilação. De modo similar, porém com carga total, o secador foi avaliado em associação com um pré-secador (terreiro secador), trabalhando com o ventilador fornecendo o ar de secagem aos dois sistemas, simultaneamente.

O terceiro processo consistiu em associar o secador trabalhando em combinação com a secagem complementar em silos secadores, ou seja, o café foi retirado do secador com teor de água superior a $15 \pm 2\%$ b.u. e a secagem complementar realizada, durante o armazenamento, em silo com ventilação, até atingir 11% b.u.

Com os dados obtidos, foi possível avaliar, em condições experimentais, as variações de temperatura e umidade relativa em função do tempo de secagem, a quantidade de água removida em função da quantidade da energia fornecida ao sistema, as curvas e a eficiência de secagem, os custos envolvidos e a qualidade final do produto.

4.1.1. Secador pneumático

4.1.1.1 Características dos grãos e do ar no processo experimental

Em razão da dinâmica da colheita, não foi possível padronizar o teor de água e a massa inicial do produto nos testes.

Os resultados experimentais das condições iniciais e finais do produto, quantidade de água removida, tempo de secagem, capacidade de secagem e taxa de secagem, utilizados nos testes são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Parâmetros relativos aos grãos

Teste	Massa de grãos (kg)		Teor de água dos grãos (%)		Quantidade de água removida (kg)	Tempo de secagem (h)	Capacidade de secagem (kg h ⁻¹)	Taxa de secagem (kg h ⁻¹)
	Inicial	Final	Inicial	Final				
FT1	1.320	950	37,5	13	370	23	57,4	16,1
FT2	1.130	936	30	15	194	16	70,6	12,1
FT3	938	723	30	13	215	16	58,6	13,4
FTM4	620	523	31	17	97	11	56,4	8,8

O teste FT1 apresentou maior taxa de secagem, o que pode ser explicado pelo fato de o teor de água dos grãos ser maior que os apresentados nos outros testes, o que garante, no início do processo, maior retirada de água.

Dentre os testes com carga total, em que somente o secador estava operando (FT1, FT2 e FT3), o teste FT1 apresentou maior tempo de secagem (23 horas). Isso se deve ao fato de a massa inicial (1.320 kg) e o teor de água (37,5% b.u.) serem maiores em comparação com os outros testes (FT2 e FT3). Entretanto, no teste em que o secador operou com meia carga (FTM4) a duração foi de 11 horas, em virtude de a massa inicial de grãos ter sido menor, em comparação aos testes com carga total.

Os resultados experimentais das condições do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão, assim como a umidade relativa e a vazão do ar de secagem, para cada teste são apresentados no Quadro 4.2. As condições experimentais observadas referem-se a valores médios oriundos de registros, realizados a intervalos regulares de 10 minutos.

Quadro 4.2 – Valores médios relativos ao ar ambiente, ao ar de secagem e ao ar de exaustão

Teste	Vazão do ar (m ³ min ⁻¹)	Temperatura média do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)		
		Ambiente	Secagem	Exaustão	Ambiente	Secagem	Exaustão
FT1		24±1,6	59±5,1	28±6,0	61±7,4	10±0,8	78±18,9
FT2	23,2±0,6	24±1,2	55±4,0	35±4,9	59±6,5	11±0,8	56±19,9
FT3		23±1,8	61±2,4	33±5,6	61±8,2	8±0,3	67±21,1
FTM4	33,4±0,8	24±2,2	52±7,2	29±3,3	58±5,3	13±4,7	44±10,5

As curvas de temperatura e de umidade relativa do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão, ao longo do tempo de secagem, no teste FT1 estão apresentadas na Figura 4.1.

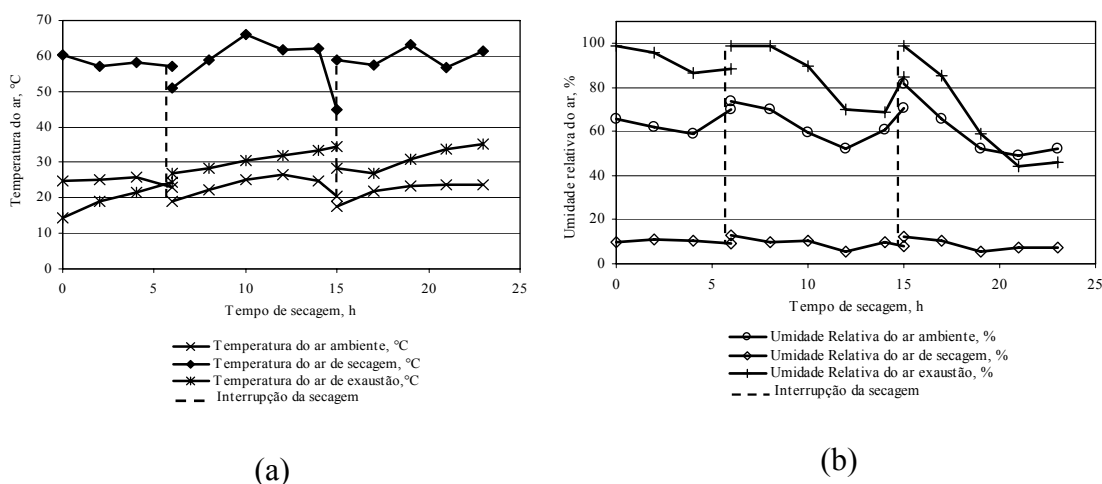


Figura 4.1 - (a) Variação nas temperaturas do ar ambiente, de secagem e de exaustão; (b) Variação da umidade relativa do ambiente e de exaustão, em função do tempo de secagem, no teste FT1.

Na Figura 4.1 observa-se uma grande oscilação na temperatura do ar de secagem durante a realização dos testes, apresentando picos nos períodos subsequentes à colocação de lenha na fôrnalha e água na caldeira, respectivamente. Esta oscilação na temperatura do ar de secagem é característica da utilização de fôrnalhas, a lenha, com aquecimento indireto em sistemas de secagem.

Somente no teste FT1, a temperatura do ar de exaustão ficou próxima à temperatura do ar ambiente, pois o lote de café desse teste foi o que apresentou maior teor inicial de água. Este fato ocorre devido à transferência de massa ter sido muito intensa no início do processo de secagem.

Os altos valores encontrados para a umidade relativa do ar de exaustão, em todos os testes, comparados com a umidade relativa do ar de secagem mostram um grande aproveitamento do potencial de secagem do ar. Este aumento na umidade relativa do ar, ao passar pela camada de grãos, pode ser explicado pelo fenômeno de transferência de calor e massa, que ocorre no processo de secagem. No início da secagem, o processo de transferência de calor e massa é facilitado devido aos elevados teores de água do produto, e depois dos períodos de descanso, pelo processo de migração de água de dentro para fora do grão. As temperaturas do ar de exaustão apresentaram, para todos os testes, valores superiores ao da temperatura do ar ambiente.

As curvas de temperatura e de umidade relativa do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão, ao longo do tempo de secagem, dos testes FT2, FT3 e FTM4 são apresentados no Anexo B.

Os valores experimentais médios da temperatura do ar de secagem e temperatura da massa de grãos nos pontos de medição, nas câmaras de secagem e de descanso e na moega de descanso, podem ser observados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Valores médios da temperatura do ar de secagem e da massa de grãos nas câmaras de secagem, descanso e moega de descanso, valores médios

Teste	Temperatura média do ar de secagem (°C)	Temperatura média da massa de café (°C)					
		Câmara de secagem		Câmara de descanso		Moega de descanso	
		0,40 m	0,80 m	1,20 m	1,60 m		2,00 m
FT1	59±5,1	44±11,5*	33±7,9	29±6,4	28±6,1	26±6,1	26±5,7
FT2	55±4,0	33±7,0	33±5,2	34±5,3	28±3,1	27±2,5	26±3,5
FT3	61±2,4	57±4,9*	36±7,6	33±7,3	30±3,0	28±3,6	28±2,0
				Câmara de secagem			
FTM4	52±7,2	-	-	33±9,8	34±8,3	27±5,8	26±6,2

*Camada de grãos abaixo da posição do sensor de temperatura.

No Quadro 4.3, observa-se que a temperatura média da massa de grãos não ultrapassou a 45°C. Observa-se, ainda, que a temperatura média da massa de grãos situada a 0,40 m da entrada do ar de secagem, na maioria dos testes, foi superior às temperaturas nas demais camadas. Esse comportamento ocorre em razão da troca de calor entre o ar de secagem e a massa de grãos, à medida que o ar atravessa esta camada.

A temperatura média da massa de grãos na câmara de descanso sempre foi inferior aos valores atingidos pela massa de grãos na camada de secagem. Observou-se um

decréscimo na temperatura da massa de grãos, em relação à proximidade com o conjunto de quatro moegas, possibilitando maior redução na temperatura dos grãos. Em relação à temperatura da massa de grãos, contida na moega de descanso, observaram-se valores próximos à temperatura do ar ambiente.

As variações médias da temperatura do ar de secagem e da massa de grãos, ao longo do tempo de secagem, para os testes FT1, FT2, FT3 e FT4, são apresentadas nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente.

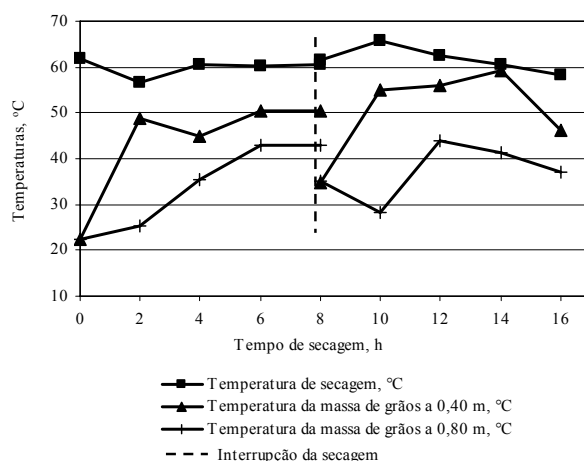


Figura 4.5 - Variação nas temperaturas do ar de secagem e da massa de grãos, à distância de 0,40 e 0,80 m do duto de entrada de ar aquecido, em função do tempo de secagem, no teste FT1.

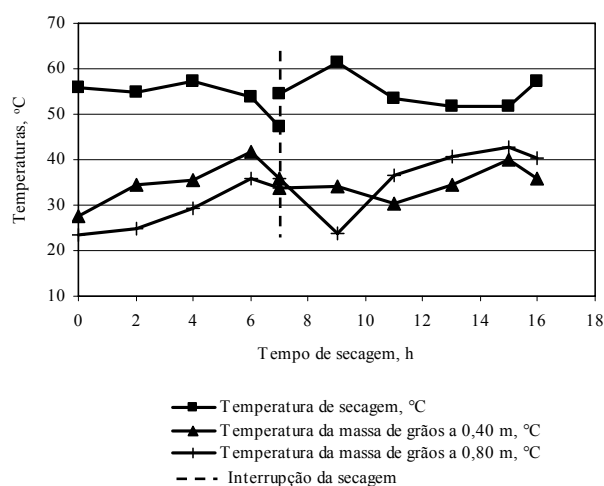


Figura 4.6 - Variação nas temperaturas do ar de secagem e da massa de grãos, à distância de 0,40 e 0,80 m do duto de entrada de ar aquecido, em função do tempo de secagem, no teste FT2.

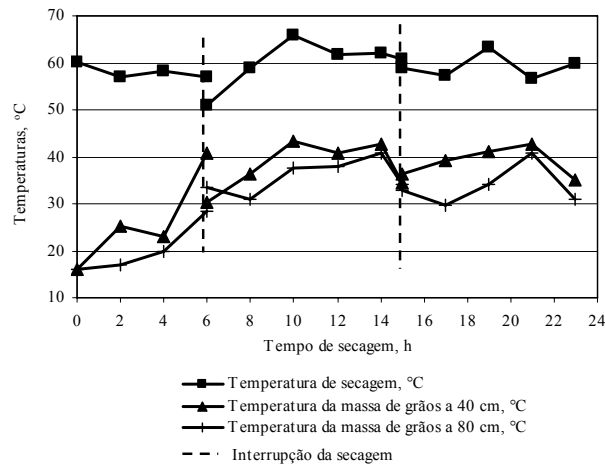


Figura 4.7 - Variação das temperaturas do ar de secagem e da massa de grãos, à distância de 0,40 e 0,80 m do duto de entrada de ar aquecido, em função do tempo de secagem, no teste FT3.

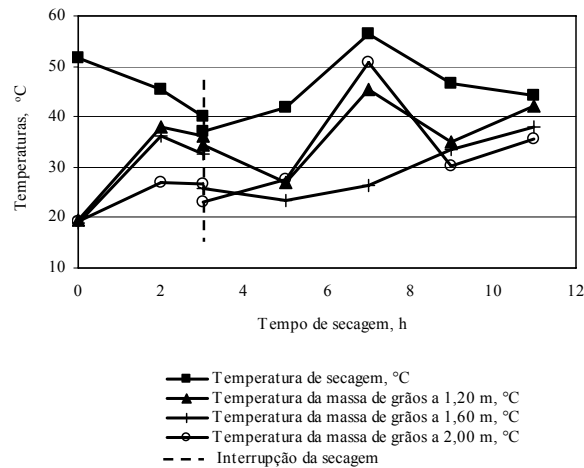


Figura 4.8 - Variação nas temperaturas do ar de secagem e da massa de grãos, à distância de 1,20, 1,60 e 2,00 m do duto de entrada de ar aquecido, em função do tempo de secagem, no teste FTM4.

Analisando o comportamento da temperatura da massa de grãos, observa-se que na maioria dos testes, houve um aumento gradual na temperatura da massa de grãos ao longo da secagem, enquanto durante o período da noite, a massa de grãos sofreu um resfriamento devido ao desligamento da fornalha. De qualquer modo, em nenhum momento, a temperatura média da massa de café em todos os testes esteve acima de 45°C.

4.1.1.2. Curvas de secagem

A secagem do café foi realizada de forma intermitente, de maneira que, durante um período de 2 horas, parte do café ficava secando na câmara de secagem e outras duas partes ficavam uma na câmara de descanso e outra na moega de descanso.

As curvas de secagem do café cereja descascado, durante os testes FT1, FT2, FT3 e FTM4, são apresentadas nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente.

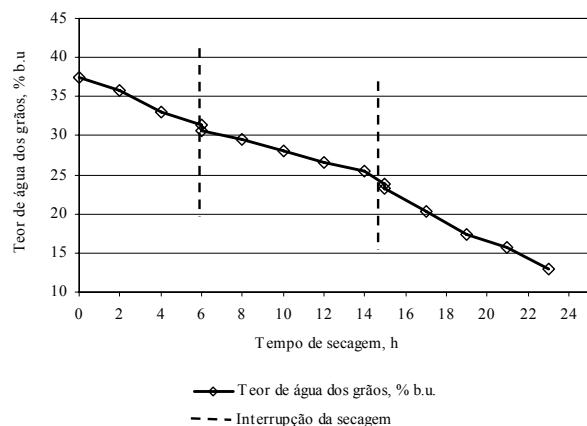


Figura 4.9 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FT1.

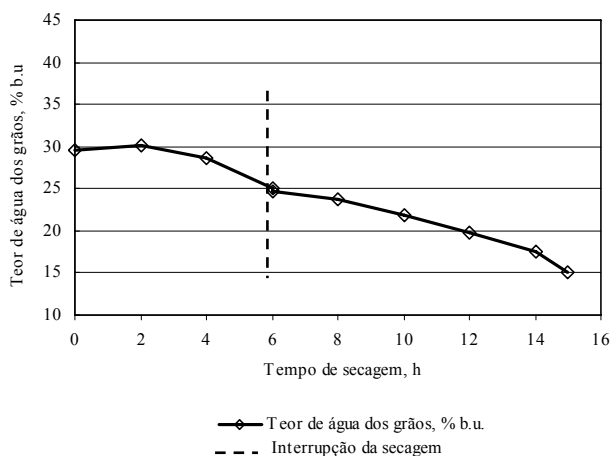


Figura 4.10 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FT2.

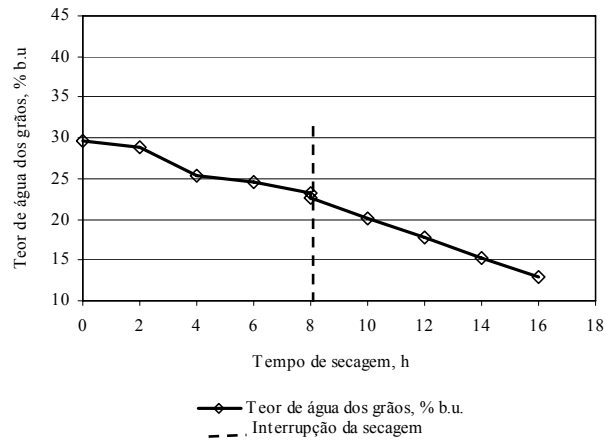


Figura 4.11 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FT3.

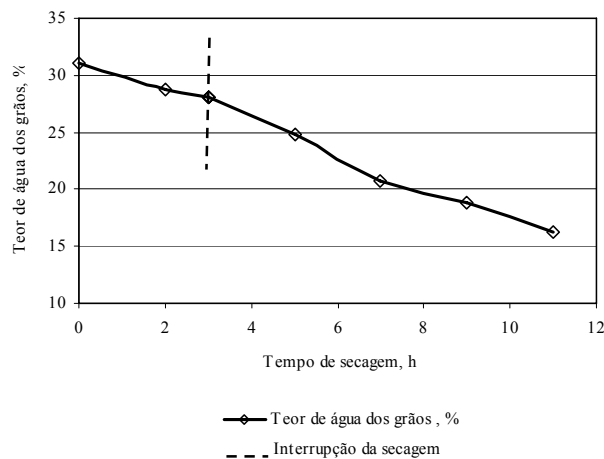


Figura 4.12 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FTM4.

Na Figura 4.9, teste FT1, em que o teor inicial de água dos grãos era igual a 37%b.u., observa-se que a taxa de secagem para o período analisado foi de 1,1 pontos percentuais por hora. Nesta figura, observa-se ainda uma redução em torno de 3 pontos percentuais no teor de água, nas duas primeiras horas de secagem e ao reiniciar a secagem depois da interrupção, devido à maior facilidade para remoção de água do produto.

Na Figura 4.10, teste FT2, em que o teor de água inicial era igual a 30% b.u., observou-se uma taxa de secagem igual a 0,9 ponto percentual, por hora, para o período analisado. Nesta faixa de teor de água, a quantidade de água livre nos grãos é menor, dificultando a remoção. Nas duas primeiras horas de secagem e ao reiniciar a secagem

depois da interrupção, observou-se a remoção de 1 ponto percentual no teor de água dos grãos.

No teste FT3, em que o teor de água inicial era igual a 30% b.u., observou-se uma taxa de secagem igual a 1,1 pontos percentuais por hora para o período analisado. Nas duas primeiras horas de secagem, observou-se a remoção de 1 ponto percentual de água nos grãos. Nesta faixa de teor de água, embora a quantidade de água livre dos grãos seja menor, depois da interrupção da secagem, houve remoção de 2 pontos percentuais de água nos grãos, devido às condições ambientais durante o período de interrupção (Figura 4.11).

Na Figura 4.12, teste FTM4, em que o teor de água inicial era igual a 31% b.u., observou-se uma taxa de secagem igual a 1,4 pontos percentuais por hora, para o período analisado. Nas duas primeiras horas de secagem e ao reiniciar a secagem após interrupção, observou-se uma remoção de 3 pontos percentuais no teor de água dos grãos. Embora o teor de água dos grãos estivesse próximo a 30% b.u., a taxa de secagem foi maior do que os demais, pois o secador operava com menor massa de grãos e maior fluxo de ar.

4.1.1.3. Consumo de energia

Os valores do consumo teórico de energia são apresentados no Quadro 4.4. No cálculo do consumo específico de energia térmica, não foi considerada a energia elétrica consumida pelo motor do ventilador.

Quadro 4.4 – Consumo teórico de energia térmica e o consumo específico de energia do sistema de secagem

Teste	Energia térmica (MJ)	Massa de água evaporada (kg)	Consumo específico de energia térmica (kJ kg ⁻¹)
FT1	1.118	370	3.022
FT2	754	194	3.886
FT3	829	215	4.856
FTM4	683	97	7.041

No Quadro 4.4, observa-se que o valor de consumo específico de energia térmica, para o teste com o secador operando com meia carga, foi muito superior aos obtidos nos demais testes.

Quanto ao consumo específico de energia para este tipo de secador, segundo Thompson (Osório, 1982), deve estar na faixa de 4.185 a 5.120 kJ kg⁻¹ de água evaporada. Como pode-se observar, o consumo específico médio de energia foi inferior aos valores citados por Thompson, para os testes FT1, FT2 e FT3, sendo considerado ótimos. Vale ressaltar que, nos cálculos, não foi computada a eficiência térmica do sistema de aquecimento do ar, que varia conforme o tipo de sistema empregado, nem a energia consumida pelo motor do ventilador.

Como o sistema de aquecimento do ar de secagem (caldeira) não foi objeto de estudo, foi realizada apenas a adaptação de um sistema já construído e estudado por Lopes (2002). O sistema utilizado para o aquecimento do ar de secagem está superdimensionado para o secador desenvolvido, razão pela qual apenas os valores teóricos foram considerados para os cálculos de consumo de energia.

Na Quadro 4.5, são apresentados os valores experimentais do consumo de energia teórico total, ou seja, energia térmica e elétrica e o consumo específico total de energia no secador pneumático.

Quadro 4.5 – Resultado do consumo total de energia (térmica e elétrica) no secador pneumático.

Teste	Consumo total de energia		Massa de água evaporada (kg)	Consumo específico total de energia (kJ kg ⁻¹)
	(MJ)			
	Térmica	Elétrica		
FT1	1.118	216	370	3.605
FT2	754	150	194	4.660
FT3	829	150	215	4.553
FTM4	683	103	97	8.103

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 4.5, cerca de 15% da energia utilizada foram provenientes da energia elétrica e o restante proveniente da energia térmica. Este resultado pode ser explicado pelo fato de o fluxo de ar utilizado ter sido dimensionado para transportar os grãos e não para a operação de secagem, observando-se desperdício de ar aquecido durante esta fase. Este problema pode ser facilmente resolvido por meio de um sistema de polias, para adequar o fluxo de ar à fase de secagem. Neste estudo, o problema foi solucionado, por meio da construção de um pré-secador tipo terreiro-secador (Donzeles, 2002), com a mesma capacidade do secador pneumático e dividindo, por meio de um registro, o fluxo de ar para atender os dois secadores.

4.1.1.4. Qualidade final do café

As amostras de café cereja descascado foram enviadas à Três Irmãos Corretora de Café em Viçosa, onde foram feitas as análises sensorial e de classificação do café, para avaliação da qualidade da bebida e das características dos grãos. Os resultados são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Resultados da classificação do café

Testes	Bebida	Tipo	Aroma	Aspecto	Defeitos	Renda
FT1	Apenas mole	5/15	Bom	Bom	42	300x243 (81%)
Testemunha 3	Mole	5/15	Bom	Bom	57	300x242(81%)
FT2	Apenas mole	5/15	Bom	Bom	57	300x240(80%)
Testemunha 5	Apenas mole	5/20	Bom	Bom	60	300x237(79%)
FT3	Apenas mole	4/45	Bom	Bom	45	300x232(77%)
Testemunha 8	Mole	5/5	Bom	Bom	48	300x243(81%)
FTM4	Apenas mole	5/15	Bom	Bom	57	300x230(77%)
Testemunha 6	Apenas mole	5/10	Bom	Bom	54	300x228(76%)

Por meio dos resultados obtidos na classificação, que podem ser observados no Quadro 4.6, os lotes de café utilizados no novo sistema de secagem foram considerados de ótima qualidade, para as condições de produção na região da Zona da Mata Mineira, sendo classificados como de bebida mole e apenas mole.

No Quadro 4.6, observa-se que a qualidade da bebida dos cafés não foi influenciada pelo combustível utilizado (lenha), principalmente em função do uso do sistema de aquecimento indireto do ar de secagem, sem qualquer contato com fagulhas ou fumaça com as massas de grãos submetidas ao processo de secagem. Outro fator que colaborou para a qualidade obtida foi a temperatura da massa de grãos, que não ultrapassou a 45°C em nenhum teste.

Considerando que o tipo “4” e “6” é tido como padrão para exportação, pode-se dizer que, neste estudo, o produto apresentou resultados satisfatórios com tipo “5” na maioria dos testes realizados (Quadro 4.6).

Em relação ao aroma e aspecto, os resultados obtidos nos testes foram os mesmos obtidos nas testemunhas. Os itens aroma e aspecto apresentaram-se bom com bebida apenas mole e mole, difícil de obter na secagem em altas temperaturas, em razão da desuniformidade na secagem.

No item número de defeitos, os resultados obtidos nos testes foram próximos aos da testemunha, que foram secadas ao sol. Este resultado indica que o processo de secagem não interferiu no número de defeitos.

A variável renda estabelece a relação entre a massa de frutos secos e a massa de grãos beneficiados. Observou-se que os valores obtidos nos testes foram bem próximos aos obtidos com as testemunhas, indicando que o novo processo de secagem não influenciou o rendimento.

4.1.2. Secador pneumático em combinação com pré-secador

4.1.2.1. Características dos grãos e do ar no processo experimental

Em razão de os lotes de cafés recebidos sofrerem grandes variações (massa e teor de água iniciais), em virtude da colheita diária na propriedade, não foi possível padronizar o teor de água e a massa inicial do produto.

Os resultados experimentais das condições iniciais e finais do produto, quantidade de água removida, tempo de secagem, capacidade de secagem e taxa de secagem, utilizadas nos testes, são apresentados nos quadros 4.7 e 4.8.

Quadro 4.7 – Parâmetros relativos aos grãos

Testes	Massas (kg)				Teor de água (% b.u.)			
	*PS		*S		*PS		*S	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
FD5	1.380	901	1.040	832	45,3	16,5	33,4	17
FD6	1.080	774	1.100	788	39,1	15	39,1	15
FD7	1.200	862	1.010	726	37,6	17	27	13
FDM8	720	603	600	501	30,5	17	26,5	17

*PS-Pré-secador; e *S-Secador Pneumático de Fluxos Concorrente.

Quadro 4.8 – Parâmetros relativos à secagem

Testes	Tempo de secagem (horas)		Massa de Água removida (kg)		Capacidade de secagem (kg h ⁻¹)		Taxa de secagem (kg h ⁻¹)	
	*PS	*S	*PS	*S	*PS	*S	*PS	*S
FD5	24	24	479	208	57,5	43	20	9
FD6	27	27	306	312	40	41	11	12
FD7	16	16	296	168	75	63	19	11
FDM8	9	9	119	99	80	67	13	11

*PS - Pré-secador; e S - secador Pneumático de Fluxos Concorrente.

No Quadro 4.8, observa-se que, em todos os testes, tanto o café que estava no pré-secador quanto o que estava no secador levaram o mesmo tempo (24, 27, 16 e 9 h, respectivamente) para atingir o teor de água preestabelecido (15 a 17% b.u.) para, posteriormente, serem transferidos para o silo secador-armazenador.

Em relação à massa de água removida, o teste FD5 apresentou maior valor, cerca de 2,3 vezes mais no pré-secador que no secador, devido à maior massa e teor de água inicial do café contido no pré-secador (1.380 kg e 45,3% b.u., respectivamente). No teste FD6, a massa de água removida no pré-secador (306 kg) e no secador (312 kg) foi praticamente a mesma, o que pode ser explicado pelo fato de a massa de café e o teor de água, tanto no pré-secador quanto no secador, terem sido, aproximadamente, iguais. Nos demais testes, FD7 e FDM8, a quantidade de água removida foi 1,2 vezes maior no pré-secador do que no secador pneumático, devido à maior massa e teor de água inicial do café contido no pré-secador.

Nos testes FD5, FD7 e FDM8, a capacidade de secagem no pré-secador (57,5; 75 e 80, respectivamente) foi maior do que no secador (43; 63 e 67, respectivamente), em razão da massa inicial de café no pré-secador (1.380, 1.200 e 720 kg, respectivamente) ter sido maior do que a massa inicial de café contida no secador (1.040, 1010 e 600 kg, respectivamente). No teste FD6, os valores da capacidade de secagem do pré-secador e secador (40 e 41 kg h⁻¹, respectivamente) foram praticamente iguais pelo fato da massa inicial do pré-secador (1.080 kg) ter sido, aproximadamente, igual à massa inicial de café contida no secador pneumático (1.100 kg).

Nos testes FD5, FD7 e FDM8, a taxa de secagem foi maior no pré-secador (20; 19 e 13 kg h⁻¹, respectivamente) devido à maior quantidade de água removida durante a secagem. No teste FD6, a taxa de secagem do pré-secador (11 kg h⁻¹) esteve próxima à do secador pneumático (12 kg h⁻¹). Este fato é explicado em razão da quantidade de água removida ao longo da secagem ter sido bem próxima (306 e 312 kg, respectivamente) nos dois casos.

Os maiores valores para capacidade de secagem e taxa de secagem no pré-secador ocorreram devido ao comprimento do duto de secagem no pré-secador. Além disso, ao se dividir o fluxo de ar para o secador e o pré-secador, como a altura da camada de grãos do pré-secador era menor, a perda de carga era menor, sendo maior o fluxo de ar no pré-secador.

Os resultados experimentais médios relativos ao ar, obtidos nos quatro testes de secagem, são apresentados no Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Parâmetros médios relativos ao ar

Testes	Vazão de ar aquecido (m ³ min ⁻¹)	Temperatura (°C)				Umidade relativa (%)			
		*aa	*PS	*S		*aa	*PS	*S	
			*as	*as	*ae		*as	*as	*ae
FD5		23±1,9	54±8,1	55±8,3	24±5,0	63±8,7	12±5,5	11±4,6	61±18,2
FD6	58,5±0,6	23±2,7	54±6,7	56±6,6	24±6,3	65±11,3	12±4,0	11±3,8	60±18,5
FD7		25±1,8	56±5,4	59±5,4	30±7,2	61±7,9	11±3,1	10±2,8	42±25,2
FDM8	64,3±0,7	20±2,7	55±6,0	59±6,0	28±7,8	61±9,3	9±2,8	7,7±2,4	37±18,5

*PS - Pré-secador; e *S – Secador Pneumático de Fluxo Concorrente.

*aa - ar ambiente; *as - ar de secagem; e *ae – ar de exaustão.

No Quadro 4.9, no teste FD7, observa-se que a umidade relativa média do ar de exaustão no secador foi a menor observada entre os testes FD5 e FD6, podendo ser explicado pelo menor teor de água do café contido no secador, sendo mais difícil a retirada de água. Em relação ao teste FDM8, devido à menor massa em ambos, pré-secador e secador, o período de permanência do ar aquecido com a massa de grão não é suficiente para que o potencial de secagem do ar seja totalmente aproveitado.

4.1.2.2. Curvas de secagem

As curvas de secagem dos testes FD5, FD6, FD7 e FDM8 são apresentadas nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, respectivamente. Nestas figuras, observa-se o período de secagem do café descascado, no período diurno, observado nas linhas contínuas (cor verde) referentes à secagem no secador pneumático e nas linhas (cor azul) referentes à secagem no pré-secador. O período noturno, quando a secagem era interrompida, pode ser observado nas linhas descontínuas verticais.

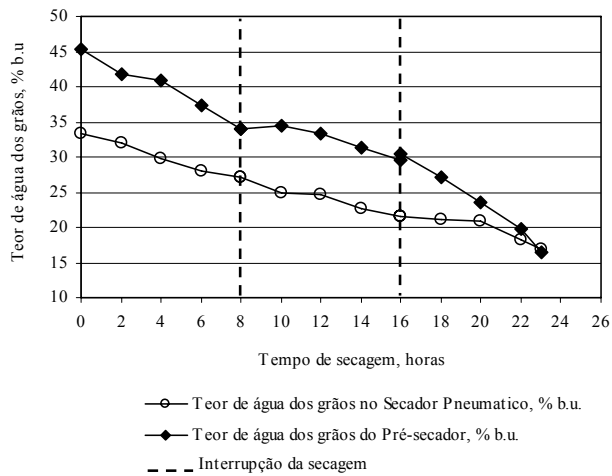


Figura 4.14 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FD5, no secador pneumático de fluxo concorrente e no pré-secador.

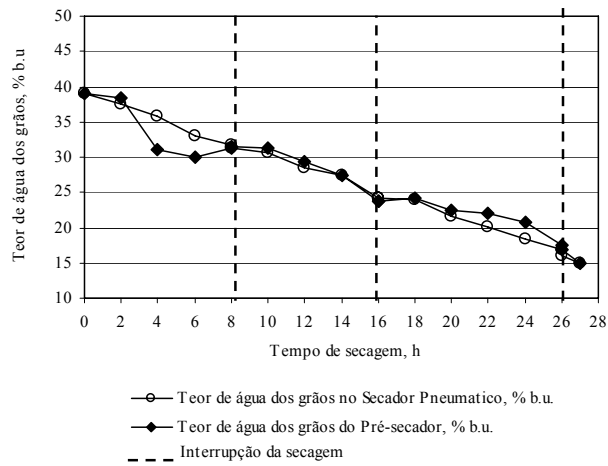


Figura 4.15 - Variação do teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FD6, no secador pneumático de fluxos concorrente e no pré-secador.

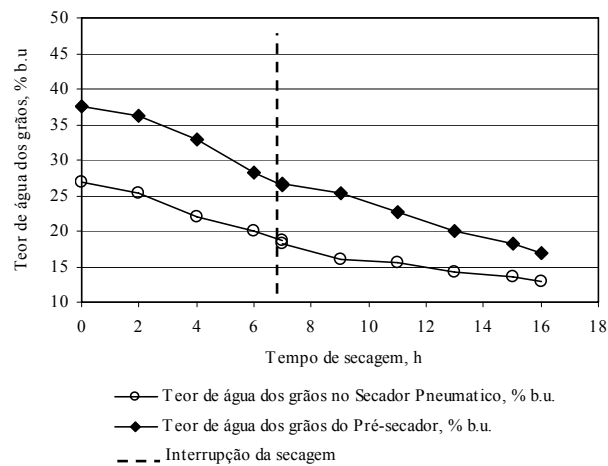


Figura 4.16 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FD7, no secador pneumático de fluxo concorrente e no pré-secador.

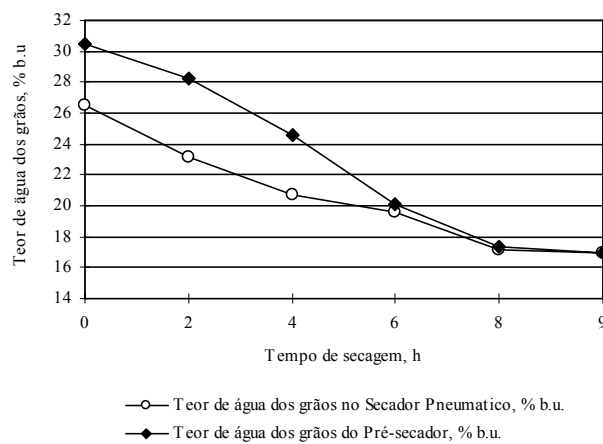


Figura 4.17 - Variação no teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, no teste FDM8, no secador pneumático de fluxos concorrente e no pré-secador.

Nestas figuras, observa-se que as curvas de secagem em ambos, pré-secador e secador pneumático, tiveram, praticamente, o mesmo comportamento durante as secagens, sendo que a redução no teor de água no secador pneumático foi mais uniforme do que a observada no pré-secador.

Ao reiniciar a secagem, no dia seguinte, observou-se no teste FD5 (Figura 4.14), um pequeno aumento no teor de água inicial do café do pré-secador, devido ao processo de migração de água nos grãos, no período em que cessava a injeção de ar aquecido.

No teste FDM8 (Figura 4.17), observa-se que as curvas de secagem em ambos, pré-secador e secador, tiveram praticamente o mesmo comportamento, sendo que o coeficiente angular da curva de secagem do café ($\Delta U/\Delta T$) no pré-secador (1,8) foi

maior do que no secador (1,2), em razão dos maiores teores de água inicial do café, proporcionando maior remoção de água.

4.1.2.3. Consumo de energia

Os valores apresentados no Quadro 4.10 são relativos à energia, que foi disponibilizada aos sistemas de secagem (secador pneumático em combinação com o pré-secador), massa de água evaporada, tempo de secagem e ao consumo específico teórico de energia, desconsiderando a energia elétrica consumida pelo motor do ventilador.

Quadro 4.10 – Consumo teórico de energia térmica, massa de água evaporada, tempo de secagem e consumo específico teórico de energia

Teste	Consumo de energia térmica (MJ)	Massa de água evaporada (kg)	Tempo de secagem (h)	Consumo específico de energia térmica (kJ kg^{-1})
FD5	2.920	687	24	4.250
FD6	3.530	618	27	5.712
FD7	2.134	455	16	4.690
FDM8	1.509	217	9	6.954

No Quadro 4.10, observa-se que os testes FD5 e FD7 apresentaram valores do consumo específico de energia menores e próximos (4.250 e 4.684 kJ kg^{-1} de água evaporada, respectivamente) em relação ao teste FD6 (5.711 kJ kg^{-1} de água evaporada). No teste FD5, o consumo específico pode ser explicado em razão da maior quantidade de água evaporada e, no teste FD7, pelo fato de a secagem ter sido realizada em menor tempo (16 horas). Em relação ao teste FD6, entretanto, o consumo específico foi superior pelo fato de a secagem ter sido realizada em maior tempo.

No teste FDM8, o consumo específico de energia foi de 6.953 kJ kg^{-1} de água evaporada, valor este superior aos demais testes, haja vista que o secador e pré-secador operaram com carga reduzida e com fluxo de ar maior. Observou-se que o ar, ao passar pela camada de grãos, possuía ainda potencial para secagem, sendo desperdiçado para o ambiente.

Na Quadro 4.11, são apresentados os valores experimentais do consumo de energia teórico total, ou seja, energia térmica e elétrica, assim como o consumo específico total de energia no sistema de secagem (secador pneumático e pré-secador).

Quadro 4.11 – Resultado do consumo total de energia (térmica e elétrica), massa de água evaporada e o consumo específico total no sistema de secagem

Teste	Consumo total de energia (MJ)		Massa de água evaporada (kg)	Consumo específico total de energia (kJ kg ⁻¹)
	Térmica	Elétrica		
FD5	2.920	226	687	4.579
FD6	3.530	254	618	6.123
FD7	2.134	150	455	5.013
FDM8	1.509	85	217	7.346

Dessa forma, a combinação do secador pneumático com o pré-secador foi uma maneira prática para resolver parte do problema do superdimensionamento do sistema de aquecimento indireto do ar de secagem.

4.1.2.4. Qualidade final do café

Por meio dos resultados obtidos na classificação do café, que podem ser observados no Quadro 4.12, os lotes de café utilizados no novo sistema de secagem foram considerados de ótima qualidade, para as condições de produção na região da Zona da Mata Mineira, sendo classificados como de bebida mole e apenas mole.

Quadro 4.12 – Resultados da classificação do café

Testes	Bebida	Renda	Tipo	Aroma	Aspecto
FD6	Mole	300x247(82%)	5/30	Bom	Bom
Testemunha	Mole	300x230(77%)	5	Bom	Bom
FD7	Mole	300x237(79%)	4/35	Bom	Bom
Testemunha	Apenas mole	300x240(80%)	5	Bom	Bom
FDM8	Mole	300x230(77%)	5/25	Bom	Bom
Testemunha	Apenas mole	300x229(76%)	5/45	Bom	Bom

No Quadro 4.12, observa-se que a qualidade da bebida dos cafés não foi influenciada pelo combustível utilizado (lenha), principalmente em função do uso do sistema de aquecimento indireto do ar de secagem, sem qualquer contato com fagulhas ou fumaça com as massas de grãos submetidas ao processo de secagem. Outro fator que

colaborou para essa qualidade foi a temperatura da massa de grãos, que não ultrapassou a 45°C em nenhum teste.

Observou-se que os valores de renda, obtidos nos testes, estiveram bem próximos aos obtidos nas testemunhas, indicando que o novo processo de secagem não afetou esta variável.

Em relação ao aroma e aspecto, os resultados obtidos nos testes foram os mesmos obtidos nas testemunhas.

4.1.3. Secador pneumático com secagem complementar em silo secador

4.1.3.1. Características dos grãos no silo

Os resultados experimentais das condições iniciais e finais do produto e quantidade de água removida na segunda etapa da secagem, em baixas temperaturas, são apresentados no Quadro 4.13.

Quadro 4.13 – Parâmetros relativos aos grãos

Testes	Massas de grãos (kg)		Teor de água (% b.u.)		Massa de água evaporada (kg)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
FT1	950,0	918,3	13	11	31,7
FT2	936,0	884,0	15	11	52,0
FT3	723,0	698,9	13	11	24,1
FTM4	523,0	488,9	17	11	34,1

4.1.3.2. Consumo de energia

Os valores de massa de água evaporada no secador pneumático com secagem complementar no silo secador, assim como os valores médios de consumo específico total de energia para o café atingir o teor de água ideal para a sua comercialização (11% b.u.) são apresentados no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 – Resultados do consumo específico total de energia (secador pneumático de fluxo concorrente + silo secador-armazenador)

Teste		Consumo de energia		Consumo total de energia (MJ)	Massa total de água evaporada (kg)	Consumo específico total de energia (kJ kg ⁻¹)
		(MJ)				
		Térmica	Elétrica			
FT1	Secador	1.118	216	1.334	370	3.605
	Silo	-	13	13	31,7	410
	Total	-	-	-	-	4.015
FT2	Secador	754	150	904	194	4.660
	Silo	-	34	34	52	654
	Total	-	-	-	-	5.314
FT3	Secador	829	150	979	215	4.553
	Silo	-	13	13	24,1	540
	Total	-	-	-	-	5.093
FTM4	Secador	683	103	786	97	8.103
	Silo	-	26	26	34,1	763
	Total	-	-	-	-	8.866

No Quadro 4.14, observa-se elevado consumo de energia elétrica na primeira etapa da secagem (altas temperaturas) em relação à secagem complementar a baixas temperaturas, no silo secador. Este resultado pode ser explicado pelo fato do sistema de ventilação, do sistema de secagem em altas temperaturas, ter sido dimensionado para transportar grãos, exigindo maior potência do sistema de ventilação do que para secagem de grãos.

4.1.4. Secador pneumático em combinação com pré-secador com secagem complementar em silo secador

4.1.4.1. Características dos grãos no silo

Os resultados experimentais das condições iniciais e finais do produto e quantidade de água removida na segunda etapa da secagem, em baixas temperaturas, são apresentados no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 – Parâmetros relativos aos grãos

Testes	Massa de grãos (kg)		Teor de água (% b.u.)		Massa de água evaporada (kg)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
FD5	1.733	1.616	17	11	111,3
FD6	1.526	1.457	15	11	86,8
FD7	1.588	1.552	13	11	52,9
FDM8	1.104	1.030	17	11	85,9

4.1.4.2. Consumo de energia

Os valores médios para consumo específico total de energia no pré-secador e secador pneumático com secagem complementar no silo secador, para o café atingir o teor de água ideal à sua comercialização (11% b.u.) são apresentados no Quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Resultado do consumo específico total de energia (pré-secador, secador pneumático, silo secador)

Teste		Consumo específico total de energia (kJ kg ⁻¹)		
		Térmica	Elétrica	Total
FD5	Pré-secador	4.250	328	4.579
	Secador Silo	-	1.379	1.379
Total		4.250	1.707	5.957
FD6	Pré-secador	5.711	410	6.121
	Secador Silo	-	1.075	1.075
Total		5.711	1.485	7.196
FD7	Pré-secador	4.684	330	5.013
	Secador Silo	-	656	656
Total		4.684	986	5.670
FDM8	Pré-secador	6.953	393	7.346
	Secador Silo	-	1.881	1.881
Total		6.953	2.270	9.227

De acordo com os dados apresentados no Quadro 4.16 e no Quadro 4.15, observa-se que ao dividir o fluxo de ar aquecido, para o pré-secador e o secador, houve um melhor aproveitamento térmico do sistema de aquecimento de ar, bem como do sistema de ventilação. Nos testes em que o secador operou sozinho, com carga total, o consumo específico médio de energia na secagem foi igual a 5.802 ± 1.626 kJ kg⁻¹ de água

evaporada. No entanto, nos testes em que se dividiu o fluxo de ar aquecido, para o pré-secador e o secador com carga total, o consumo específico médio de energia foi de $7.013 \pm 1.618 \text{ kJ kg}^{-1}$ de água evaporada.

No Quadro 4.16, verifica-se que o consumo específico de energia elétrica, no secador, foi bem inferior ao verificado, na segunda etapa da secagem, em silo a baixas temperaturas, pelo fato de, na segunda etapa da secagem, necessitar de ventilação contínua durante o processo de secagem e não requerer energia térmica.

4.1.4.3. Qualidade final do café

Para a análise de qualidade do café depois da secagem complementar no silo, foram coletadas amostras, na descarga do silo, da camada superior de grãos (0,00 m) e depois a cada 0,20 m, totalizando nove amostras. Destas amostras fez-se uma amostra composta.

As camadas 1, 2, 3 e 4 são provenientes do mesmo lote de café (teste FTM4), assim como as camadas 5, 6 e 7 (teste FT3) e as camadas 8 e 9 (teste FDM8).

No Quadro 4.17 são apresentados os parâmetros qualitativos dos cafés, depois da secagem complementar em silo secador.

Quadro 4.17 – Resultado da classificação do café, depois da secagem complementar no silo secador-armazenador

Camada	Teor de água %b.u**	Peneira %	Catação %	Tipo	Renda %	Bebida
1 (superior)	11,8	67*	8	5	71	Mole
2	11,8	62	8	5	73	Mole
3	12,0	60	11	5	73	Mole
4	11,8	68	10	5	68	Mole
5	11,6	64	12	5	73	Mole
6	11,5	64	10	5	72	Apenas mole
7	11,2	63	16	5	73	Apenas mole
8	11,7	79	10	5	73	Mole
9(inferior)	11,4	59	12	5	70	Apenas mole
10***	11,5	67	12	5	71	Mole

* Peneira 17 acima.

** Determinador de umidade comercial.

*** Amostra composta, com parcelas extraídas de cada saca, após descarga do silo.

De acordo com os dados apresentados no Quadro 4.17, a secagem no silo foi uniforme, uma vez que os valores dos teores de água das amostras foram bem próximos,

atingindo o equilíbrio com o ar de secagem, o que constitui uma característica do método de secagem a baixas temperaturas.

No Quadro 4.18 são apresentados os valores médios dos fatores analisados para a classificação do café, depois da secagem complementar em silo secador.

Quadro 4.18 – Qualidade sensorial dos cafés depois da secagem complementar no silo secador-armazenador

Camada	Tratamento	Teor de água %b.u.**	Peneira %	Catação %	Renda %	Bebida
1(0,00 m)	1	11,85A	64,25A	9,25A	71,25A	82,25A
2(0,20 m)						
3(0,40 m)						
4(0,60 m)						
5(0,80 m)	2	11,43 B	63,67A	12,67A	72,67A	78,00A
6(1,00 m)						
7(1,20 m)						
8(1,40 m)	3	11,55AB	69,00A	11,00A	71,25A	80,00A
9(1,60 m)						

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, para cada amostra, não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Apesar da estatística, tecnicamente ou para fins de comercialização, se aceita $\pm 0,5$.

De acordo com o Quadro 4.18, para o parâmetro teor de água, houve diferença significativa entre as amostras analisadas; a análise de variância apresentou um coeficiente de variação igual a 1,41%. Quanto à peneira, as amostras não apresentaram diferença significativa, sendo que a análise de variância apresentou um coeficiente de variação igual a 9,83%. Quanto ao parâmetro catação, as amostras não apresentaram diferença significativa e a análise de variância apresentou um coeficiente de variação igual a 19,83%. Para o parâmetro renda, não houve diferença significativa entre as amostras analisadas; a análise de variância apresentou um coeficiente de variação igual a 2,66%. Com relação à bebida, não houve diferença significativa entre as amostras analisadas; a análise de variância apresentou um coeficiente de variação igual a 3,62%.

De acordo com os resultados, para as condições em que foi realizado este trabalho, da qualidade final do produto depois do término da secagem complementar em silo secador, em que não foi feito controle rigoroso da temperatura e do teor de água dos grãos, não houve interferência na qualidade final do café. Isso prova que, na secagem combinada, não é necessário um controle rigoroso da temperatura e do teor de água dos grãos.

4.2. Avaliação de custos dos sistemas de secagem

4.2.1. Custo de implantação dos sistemas de secagem

Nos quadros 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, verifica-se a relação dos materiais gastos na construção da estrutura de secagem (secador pneumático e pré-secador tipo terreiro secador, ambos com capacidade para 2.500 L de café cereja descascado e silo secador-armazenador).

Quadro 4.19 – Custo estimado para a construção do secador pneumático

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$)	Custo total (R\$)
A – Material			
Chapa preta n° 16 (peça de 2 x 1 m)	8 pç	75,00	600,00
Chapa preta n° 18 com 13% de área perfurada (peça de 2 x 1 m)	2 pç	152,00	304,00
Cantoneiras de ferro, com abas iguais, de 1 ^{1/2} ” x 1/8” (peça de 6cm)	3 pç	32,00	96,00
Cantoneira de ferro, com abas iguais, de 1” x 1/8” (peça de 6cm)	2 pç	21,00	42,00
Cantoneira de ferro, com abas iguais, de 5/8” x 1/8” (peça de 6cm)	1 pc	13,00	13,00
Cantoneira de ferro, com abas iguais, de 2 ^{1/2} ” x 3/16” (peça de 6 m)	2 pç	89,00	188,00
Parafusos de 16” x 1” com rosca	100 ud	2,60 + 0,40	300,00
Parafusos de 1/2” x 1” com rosca	20 ud	0,65 + 0,35	20,00
Ferro redondo 5/8 (peç de 6 m)	1 pç	25,00	25,00
Eletrodo de 2,5 mm	7 kg	7,15	50,00
Joelho de PVC de 150 mm	2 ud	26,00	52,00
Tinta	5 ud	25,00	125,00
Thinner	6 ud	17,60	105,60
Subtotal			1.920,60
B – Mão-de-obra			
Serralheiro	30 dia	60,00	1.800,00
Ajudante	30 dia	25,00	750,00
Subtotal			2.550,00
Subtotal			4.470,00
Eventuais (10%)			459,00
Total			4.917,66

*Valores cotados em março de 2008.

Quadro 4.20 – Custo estimado para a construção do pré-secador.

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$)	Custo total (R\$)
A – Material			
Chapa preta n° 18 com 13% de área perfurada (peça com 2 x 1 m)	3 ud	152,00	456,00
Cantoneiras de ferro, com abas iguais, de 3/4” pesado (peça com 6 m)	1 pç	15,00	15,00
Lajotas	500 ud.	0,30	150,00
Areia	3 m ³	90,00	90,00
Cimento	10 sc.	12,00	120,00
Brita	1 m ³	70,00	70,00
Subtotal			901,00
B – Mão-de-obra			
Pedreiro	5 dia	35,00	175,00
Ajudante	5 dia	20,00	100,00
Subtotal			275,00
Subtotal			1.176,00
Eventuais (10%)			120,00
Total			1.300,00

*Valores cotados em março de 2008.

Quadro 4.21 – Custo estimado para a construção do silo-secador.

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$)	Custo total (R\$)
A - Material			
Chapa preta n° 18 com 20% de área perfurada (peça com 2 x 1 m)	3 ud	152,00	456,00
Vergalhão de ferro CA50 de ½”	5 dia	20,00	100,00
Alambrado de fio galvanizado	1 pç	180,00	180,00
Tela de viveiro	3 m	2,50	7,50
Lona de plástico	10 m	6,20	62,00
Chapa de aço galvanizado n° 20 (2 x 1 m)	1 pç	65,00	65,00
Lajotas	500 ud	0,30	150,00
Areia	3 m ³	90,00	90,00
Cimento	10 sc.	12,00	120,00
Brita	1 m ³	70,00	70,00
Subtotal			1.300,00
B – Mão-de-obra			
Pedreiro	5 dia	35,00	175,00
Ajudante	5 dia	20,00	100,00
Subtotal			275,00
Subtotal			1.575,50
Eventuais (10%)			157,55
Total			1.733,05

*Valores cotados em março de 2008.

Quadro 4.22 – Custo estimado para a construção dos sistemas de ventilação.

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$)	Custo total (R\$)
A - Material			
Chapa preta nº 16 (peça com 2 x 1 m)	3 ud	75,00	225,00
Chapa preta nº 1/8 (peça com 2 x 1 m)	2 ud	145,00	290,00
Chapa preta nº 14 (peça com 2 x 1 m)	1 ud	100,00	100,00
Cantoneiras de ferro, com abas iguais, 1" de espessura de 1/8", para construção do suporte do motor e voluta. (peça com 6 m)	1 pç	21,00	21,00
Parafuso com porcas de 5/16"	20 ud	0,51 + 0,20	14,20
Parafuso com porcas de 2"x_", para fixação do eixo	1 pç	180,00	180,00
Eletrodo de 2,5 mm	2 kg	7,15	14,30
Tinta para superfície metálica	4 L	35,00	140,00
Solvente Thinner	2 L	17,60	35,20
Motor 5 cv	2 ud	1.356,00	2.712,00
Subtotal			4.148,33
B – Mão-de-obra			
Serralheiro	5 dia	60,00	300,00
Ajudante	5 dia	20,00	100,00
Subtotal			400,00
Subtotal			4.548,33
Eventuais (10%)			454,83
Total			5.003,6

*Valores cotados em março de 2008.

Quadro 4.23 – Custo estimado para aquisição do sistema de aquecimento de ar.

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$/m ²)	Custo total (R\$)
Sistema de aquecimento de ar	1	2.000,00	2.000,00
Eventuais (10%)			200,00
Total			2.200,00

*Valor cobrado pelo fabricante (03/2008).

Quadro 4.24 – Custo estimado para a construção do galpão.

Itens	Quantidade	Valor unitário* (R\$/m ²)	Custo total (R\$)
A - Material			
Telhado + mão de obra	65 m ²	45,00	2.925,00
Eventuais (10%)			292,50
Total			3.220,00

*Valor cotados em março de 2008.

No Quadro 4.25, apresenta-se o custo total de implantação do sistema de secagem.

Quadro 4.25 – Custo estimado para a implantação do sistema de secagem estudado

Itens	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Custo total (R\$)
1 – Secador Pneumático	1	4.917,60	4.917,60
2 – Pré-secador	1	1.300,00	1.300,00
3 - Silo-secador	3	1.751,05	5.253,15
4 - Sistemas de ventilação	2	3.511,56	3.511,56
5 - Galpão	1	3.320,00	3.320,00
6 – Sistema de aquecimento de ar	1	2.200,00	2.200,00
Total			20.502,31

4.2.2. Custo operacional dos sistemas de secagem

Foi considerada uma lavoura com 30.000 plantas, produção de 10 L por planta e a participação de 65% de café cereja, 22% de cafés bóias e 8% de cafés verdes. Para fins de padronização, considerou-se o pagamento de R\$ 3,00 por volume (60L) colhido, em um período de colheita de 48 dias. Com base nos resultados obtidos nos testes, realizou-se a análise de custo da secagem.

O preço da energia elétrica foi obtido na Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, de acordo com o preço da energia fornecida ao meio rural para sistema convencional com consumo liberado, sendo este igual a R\$ 0,337962 por kWh, incluindo ICMS.

Para efeito de cálculo, foi considerado o sistema de aquecimento indireto de ar estudado por Melo (2003), cuja eficiência média foi igual a 67% utilizando lenha como combustível.

O custo do combustível foi obtido na região de Viçosa – MG. O preço cotado da lenha foi de R\$ 40,00 o metro cúbico, fornecido pelo GRUPO ALEMAR PALLET LTDA.

Considerando-se o investimento inicial dos sistemas de secagem (Quadro 4.25), são encontrados os custos fixos e variáveis. Os custos fixos foram considerados iguais para todos os testes, pois levou-se em consideração os investimentos iniciais do sistema de secagem. Os custos variáveis anuais dependem do número de horas trabalhadas durante o ano. Este fato é muito incerto, pois depende da atividade exercida com o

sistema de secagem. Dessa forma, optou-se por determinar o custo variável por saca de café beneficiado, para cada teste realizado.

Os resultados relativos ao custo de implantação, custo fixo total, custos com combustível para aquecimento do ar, com energia elétrica para a alimentação dos ventiladores e mão-de-obra, bem como o consumo desses insumos por ambos os métodos de secagem, são apresentados nos quadros 4.27 e 4.28.

Quadro 4.27 – Custos fixos e variáveis do sistema de secagem

Parâmetros	Testes							
	Secagem a altas temperaturas				Secagem a baixas temperaturas			
	FT1	FT2	FT3	FTM4	FT1	FT2	FT3	FTM4
Custo de implantação, R\$	19.202,31							
Custo fixos total, R\$ ano ⁻¹	3.014,77							
Consumo de energia								
Lenha, m ³	0,31	0,21	0,23	0,19	-	-	-	-
Eletricidade, kWh	60	41,7	41,7	28,6	3,6	9,4	3,6	7,2
Custos variáveis (R\$)								
1. Lenha	12,26	8,27	9,09	7,49	-	-	-	-
2. Energia elétrica	20,28	14,08	14,08	9,67	1,22	3,19	1,22	2,44
4. Mão de obra	56,35	39,20	39,20	26,	-	-	-	-
Custo variável total da secagem, R\$					90,11	64,74	63,59	46,55
Números de sacas de 60 kg de café beneficiado, sacas					11	11	9	6
Custo variável total, R\$/saca					8,20	5,89	7,07	7,76

Quadro 4.28 – Custos fixos e variáveis do sistema de secagem

Parâmetros	Testes							
	Secagem a altas temperaturas				Secagem a baixas temperaturas			
	FD5	FD6	FD7	FDM8	FD5	FD6	FD7	FDM8
Custo de implantação, R\$	20.502,31							
Custos fixos, R\$ ano ⁻¹	3.214,87							
Consumo de energia								
Lenha, m ³	0,80	0,97	0,59	0,41	-	-	-	-
Eletricidade, kWh	62,64	70,47	41,76	23,49	42,63	25,91	9,65	44,87
Custos (R\$)								
1. Lenha	32,03	38,72	23,41	16,55	-	-	-	-
2. Energia elétrica	21,15	23,79	14,37	7,95	14,41	8,76	3,26	15,16
3. Mão de obra	58,80	66,15	39,20	22,05				
Custo variável total da secagem, R\$					126,39	137,42	76,98	61,71
Números de sacas de 60 kg de café beneficiado, sacas					21	19	19	13
Custo por saca de 60 kg de café beneficiado, R\$					6,02	7,23	4,05	4,75

O custo de implantação do sistema de secagem sem a construção da pré-secador foi de R\$ 19.202,31, mas, ao construir o pré-secador para melhor aproveitamento do ar de secagem, esse custo foi de R\$ 20.502,31, uma diferença de R\$ 1.300,00.

Os custos fixos foram considerados iguais para todos os testes, pois foram considerados os investimentos iniciais dos sistemas de secagem. Observa-se que, ao construir o pré-secador para dividir o fluxo de ar, ocorreu um aumento de 7% nos custos fixos. O sistema sem o pré-secador custa R\$ 3.014,77 por ano e com o pré-secador R\$ 3.214,87 por ano.

Considerando os custos fixos e variáveis, o custo total da secagem do café com o secador trabalhando com carga total foi igual a R\$ 8,20; R\$ 5,89 e R\$ 7,07, por saca de café beneficiado, mas R\$ 7,76 por saca de café beneficiado, quando o secador trabalhou com meia carga, nos testes FT1, FT2, FT3 e FTM4, respectivamente.

Com a associação do secador ao pré-secador, ambos operando com carga total, o custo total da secagem do café foi de R\$ 6,02; R\$ 7,23 e R\$ 4,05 por saca de café beneficiado, mas R\$ 4,75 por saca de café beneficiado, quando ambos (secador e pré-secador) trabalharam com meia carga, nos testes FD5, FD6, FD7 e FDM8, respectivamente.

Nos quadros 4.27 e 4.28, observa-se que, com a divisão do ar aquecido, o custo com energia aumentou. Entretanto, ao dividir o ar aquecido, aumentou a capacidade de secagem do sistema, reduzindo o custo por saca de café beneficiado.

5. RESUMOS E CONCLUSÕES

Com a finalidade de introduzir a tecnologia da secagem combinada para café cereja descascado, compatível com a produção e a capacidade de investimento da pequena produção da agricultura familiar, foi projetado, construído e analisado um modelo de secador pneumático de fluxos concorrentes para secagem de café cereja descascado, juntamente com um pré-secador e silo secador como opção para a secagem combinada.

O protótipo do secador foi construído e analisado na área experimental de Energia na Agricultura e Pré-processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O secador pneumático com capacidade estática para 2,5 m³ apresentou, como principais características, baixo consumo específico de energia, possibilidade de operação com carga total ou parcial, variação da quantidade de produto a ser seco, simplicidade de fabricação e facilidade de operação e manutenção.

Para avaliação do secador pneumático de fluxos concorrentes, foram realizados quatro testes, sendo três testes com carga completa e um teste com meia carga, sendo utilizada uma vazão de ar igual a 23,15 m³ min⁻¹ e 33,41 m³ min⁻¹, respectivamente.

Para avaliação do sistema de secagem combinada, composto por pré-secador, secador pneumático de fluxos concorrentes e silo secador-armazenador, foram realizados quatro testes, sendo três testes com carga completa e um teste com meia carga, enquanto a vazão de ar foi igual a 58,5 m³ min⁻¹ e 64,3 m³ min⁻¹, respectivamente.

Os resultados obtidos no trabalho, considerando-se as temperaturas e fluxos de ar empregados, as condições ambientais e os teores de água iniciais e finais utilizados nos testes de secagem do café cereja descascado, assim como a qualidade final do produto, permitiram concluir que:

a) Secador pneumático de fluxos concorrentes

- o conjunto motor-ventilador apresentou-se superdimensionado para a secagem do café uma vez que este foi projetado também para o transporte dos grãos;
- devido ao ângulo de inclinação adotado nas paredes (50°) e a cruzeta fixada na moega de homogeneização/descanso, não houve problemas no escoamento do produto no secador pneumático de fluxos concorrentes, quando se fazia a movimentação do produto no secador, apresentando-se, portanto, adequado para a secagem de café descascado com teor de água inicial igual a 35% b.u.;
- o protótipo apresentou, no teste FT1, consumo específico total de energia (3.605 kJ kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente) abaixo dos limites de consumo previstos na literatura para este tipo de secador;
- nos testes FT2 e FT3, o consumo específico total de energia (4.660 e 4.553 kJ kg⁻¹ de água evaporada) esteve dentro dos limites de consumo previstos na literatura;
- no teste em que o secador pneumático operou com meia carga, FTM4, o consumo específico médio de energia (8.103 kJ kg⁻¹ de água evaporada) foi superior aos demais testes, mostrando-se ser operável com carga inferior para a qual foi dimensionado;
- quanto às características relacionadas aos danos mecânicos, que podem ser causados pelo impacto promovido pelo sistema pneumático, foi observado que não ocorreram danificações nem injúrias ao produto;
- devido à pequena variabilidade nos teores de água durante a descarga do sistema, pode-se considerar que a secagem foi uniforme;
- o café, processado no novo secador, apresentou boa qualidade quanto ao tipo e bebida;
- o secador é facilmente operado durante o carregamento, secagem e descarga, além de requerer pouca manutenção e mão-de-obra; e
- é flexível, funciona eficientemente com a quantidade de café disponível.

b) Sistema de secagem combinada (secador híbrido, secador pneumático de fluxos concorrentes e silo secador-armazenador).

- nos testes FD5, FD6 e FD7, o sistema apresentou menor consumo específico total de energia (4.579; 6.122 e 5.013 kJ kg⁻¹ de água evaporada) em comparação com alguns processos tradicionais de secagem;

- no teste em que o pré-secador e o secador pneumático operaram com meia carga, FTM4, o consumo específico total de energia (7.346 kJ kg⁻¹ de água evaporada) foi compatível com os demais testes, sendo eficiente energeticamente;

- a secagem de café descascado em sistema combinado é uma técnica que proporciona um produto de ótima qualidade, além de ser economicamente viável;

- o tempo e o custo de secagem do café cereja descascado foram menores que para o café em coco, em razão do menor consumo de energia e menos mão-de-obra;

- a combinação da pré-secagem em terreiro híbrido e secador, o repouso noturno de 12h, aproximadamente, assim como a complementação da secagem a granel, proporcionaram melhor desempenho do sistema, aumentando a capacidade de secagem e reduzindo o tempo de secagem;

- a técnica da secagem combinada não requer rigoroso controle do teor de água com que os grãos saem do secador e vão para o silo, para as condições experimentais;

- a técnica de construção do silo secador-armazenador funcionou adequadamente; e

- a construção do silo secador-armazenador é fácil e de baixo custo, em comparação com outros métodos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C. **Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento.** Viçosa – MG: UFV, 2001. 384p.: il. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- ALVAREZ, P.I.; BLASCO, R. **Pneumatic drying of meal: application of the variable diffusivity model.** Drying Technology. vol. 17, n° 4e5, p. 791 – 808, 1999.
- ATHIÉ, I.; CASTRO, M.F.P.M. de.; GOMES, R.A.R.; VALENTINI, S.R.T. Conservação de grãos. Campinas, fundação Cargill, 1998.236p.
- BAEYENS, J.; GAUWBERGEN, D.V.; VINCKIER, I. **Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in design gammametry.** Powder Technology. Vol. 83, p. 139 – 148, 1995.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. Energy and capacity performance avaluation of grain dryer. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 1978. 13 p.
- BAKKER-ARKEMA, F.W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Jornal of Agricultural Engeneering research**, v.30, n.1, p.1-22, July, 1984.
- BARRIOS BARRIOS, B.E. Caracterização física, química, microbiológica e sensorial de café (*Coffea arabica L.*) da região Alto Rio Grande – Sul de Minas Gerais. Lavras–MG, 2001. 72p.:il.Dissertação (Mestrado) – Universidade federal de Lavras.
- BÁRTHOLO, G.F.; GUIMARÃES, P.T.G. Cuidados na colheita e preparo do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.33-42, 1997.
- BÁRTHOLO, G.F.; MAGALHÃES Filho, A. A. R. de; GUIMARÃES, P.T.G; CHALFOUN, S. M. **Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café.** Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.14, n.162, p.33-44, 1989.

- BLASCO, R.; VEGA, R.; ALVAREZ, P.I. **Pneumatic drying with superheated steam; bi-dimensional model for high solid concentration.** CD-ROM. International Drying Symposium, Holanda, 2000.
- BRASIL, Ministério da agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes (RSA).** Brasília, 1992. 365 p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains.** Westport: The AVI Publishing Company, 1974. 265 p.
- BROOKER, D.B.; MCKENZIE, B.A., JOHNSON, H.K. **The present status of on-farm grain drying.** St. Joseph, Michigan, ASAE TECHNICAL, 1978. 22P. (Paper 78-3007).
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CAFÉ POINT. Disponível em: <http://www.cafepoint.com.br>. Acesso em: dezembro de 2007.
- CAILLE, R. E. Aparelhos elétricos: potências, demandas consumos, produções. São Paulo: CESP. 1980. 64p.
- CAMPOS, A.T. **Desenvolvimento e análise de um protótipo de secador de camada fixa para café (*Coffea arabica L.*), com sistema de revolvimento mecânico.** Viçosa-MG: UFV, 1998. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- CARDOSO SOBRINHO, J. **Simulação e avaliação de um sistema de secagem de café.** Viçosa-MG: UFV, 2001. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001
- CARVALHO, V.L. CHALFOUN, S.M. Aspectos qualitativos do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.11, n.126, p.79-92, 1985.
- CLÉCIA, M. Café no Brasil. **Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento.** Brasília – DF, 2004. 148p.
- CHALFOUN, S.M.; CARVALHO, V.L. de. **Colheita e preparo do café.** Lavras-MG, UFLA/FAEPE, 1997. 49p.
- CLOUD, H.A., MOREY, R.V. **Dryaeration and in-storage cooling for corn drying.** S.1.: Agricultural extension Service-University of Minnesota, 1980. M.162.
- CORDEIRO, J.A.B. **Influência da temperatura e do tempo de repouso na secagem de café (*coffea arábica L.*) em camadas fixas.** Viçosa: UFV, 1982, 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.

- DALPASQUALE, V.A. Secagem de grãos com ar natural: uma opção pouco utilizada no Brasil. **Jornal da Armazenagem**, n.5, v.18. p. 5-6, 1983. de granos a altas temperaturas.
- DALPASQUALE, V.A., PEREIRA, D.A.M; SINICIO, R.; OLIVEIRA FILHO, D. **Secado de granos a altas temperaturas**. Oficina Regional de la Fao para America Latina y el caribe, Santiago-Chile. 1991. P.77.
- DE GRANDI, A.M. **Avaliação da eficiência de secagem de café (*coffea arábica L.*), em secador de camada fixa vertical com revolvimento mecânico**. Viçosa:UFV, 1999, 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- DONZELES, S.M.L. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema híbrido, solar e biomassa, para a secagem de café (*coffea arábica L.*)**. Viçosa-MG: UFV, 2002, 122p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- FAO. **Secado de granos y secadores**. Oficina regional para a América Latina y el Caribe, Santiago, Chile 1996. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x5028s/x5028s00.htm>>. Acesso em 21/09/2007.
- FREIRE, A.T. **Projeto e avaliação de um sistema de secagem combinado de café (*coffea arábica L.*) despulpado**. Viçosa-MG: UFV, 1998, 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- GUIDA, V.F.A.A. **Influência da temperatura, fluxo de ar e altura da camada de grãos na secagem de café (*Coffea arabica L.*) despulpado em secador experimental de camada fixa**. Lavras-MG: ESAL, 1994. 57p. Dissertação (Mestrado),1994. 57p.
- GUIMARÃES, A.C. **Secagem de café (*coffea arábica L.*) combinando sistemas de altas e baixas temperaturas**. Viçosa-MG: UFV, 1995, 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- HUBNER, N. **Simulação de Características de Transporte Pneumático para soja e Milho**. Universidade Federal de Viçosa, 24p. 1986. (Seminário).
- IBC-GERCA. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. Instituto Brasileiro do Café/ Grupo executivo de Racionalização da Cafeicultura. Rio de Janeiro, 1985. 580p.
- KORN, O.; NOWAK, H. Cyclone dryer: industrial applicatons. CD-ROM. International Drying Symposium, Holanda, 2000.
- LACERDA FILHO, A.F. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (*Caffea arabica, L.*)**. Viçosa-MG: UFV, Viçosa, MG. 136 p. 1986 (Tese de Mestrado).

- LACERDA FILHO, A.F. **Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho (*Zea mays, L.*)**. Botucatu-SP: UNESP, 1998. 198p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Estadual Paulista, 1998.
- LACERDA FILHO, A.F.; MELO, E. C. **Tecnologias de Produção de Café com Qualidade**. Viçosa, Laércio Zambolil, p.527-564, 2001.
- LEITE, C.A.M.; SILVA, O.M. da. **Café: Produtividade, Qualidade e Sustentabilidade – A Demanda de Cafés Especiais**. Viçosa, Laércio Zambolil, p.51-74, 2000.
- LOPES, R.P.; AFONSO, A.D.L.; SILVA, J. S e; **Secagem e Armazenagem de Produtos agrícolas: Energia no Pré-processamento de Produtos Agrícolas**. Viçosa, Juarez Sousa e Silva, p.191-219, 2000.
- LOPES, R.P.; **Desenvolvimento de um sistema um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar**. Viçosa – MG: UFV, 2002, 1 220p.: il. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- MAGALHÃES, A.C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina recolhadora de café em terreiro utilizando transporte pneumático**. Viçosa: UFV, 2003. 110p. Dissertação (Doutrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- MATIELLO, J.B. **Quentes como café**. Rio de Janeiro, MAA/PROCAFÊ, 1991. 185p.
- MACHADO, M.C. **Viabilidade da técnica de imersão para armazenamento temporária de frutos de café**. Viçosa – MG: uFV, xi; 90f.:il; 2005.Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa.
- MACHADO, M. C.; SAMPAIO, C. P., SILVA, J. S. **Avaliação técnico-econômica do processamento de café: secagem completa em terreiros**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL E WORKSHOP INTERNACIONAL DE CAFÉ & SAÚDE, (3.:2003, Porto Seguro). Anais.... Brasília, DF: Embrapa Café, 2003b. (447 p.).
- MELO, E.C.; LOPES, D.C.; CORRÊA, P.C. Grapsi – Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. Viçosa-MG: **Revista Engenharia na Agricultura**, v.12, n.2, p.154-162, abr.-jun. 2004.
- MELO, F.A.O. **Projeto, construção e avaliação de uma fornalha para aquecimento de ar utilizando combustíveis particulados finos**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa. 2003. 91p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola).
- MENDES, A. N.G.; ABRAHÃO, E. J.; GUIMARÃES, J.R. Recomendações técnicas para a cultura do cafeeiro no Sul de Minas. Lavras, UFLA, 1995. 76p.
- MEYER, J.A.; VILLA, L.G.; ROSSI, S.J. Energia para a secagem dos produtos agropecuários. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.3, n.4, p.4-14. 1978.

- NARIMATSU, C.P. **Contribuição ao estudo da secagem em um leito pneumático vertical**. São Carlos, Tese (Doutorado), UFSCar, 2004. 261p.
- NELLIST, M.E., BRUCE, D.M. Grain dryer testing-procedure, calculation and adjustment of results, and effect of errors. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe Research Institute, v.52, n.1, p.35-51, 1992.
- NELLIST, M.E., BRUCE, D.M. Heated-air grain drying. In: JAYAS, D.S., WHITE, N.D.G., MUIR, W.E. (ed.). **Stored-grain ecosystems**, Marcel Dekker, New York, p.609-659, 1995.
- NOGUEIRA, V.S.; FIORAVANTE, N.D. Teste comparativo do café entre o sistema de e vapor e o sistema de fornalha. In: Congresso Brasileiro sobre Pesquisas Cafeeiras e 1 Congresso Latino Americano de Tecnologia Cafeeira, 14, 1987, Campinas, SP. **Resumo**....Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1987.p254-255.
- NOGUEIRA, V.S.; MATA, J.M. Utilização de caldeira como fonte de calor para secagem de café. In: Congresso Brasileiro sobre Pesquisas Cafeeiras, 12, 1985, Caxambú, MG e 1 Congresso Latino Americano de Tecnologia Cafeeira, 14, 1987, Campinas, SP. **Resumo**....Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1985.p160.
- NOGUEIRA, R.M.; ROBERTO, C.D.; SILVA, J.S.; Viabilidade da produção de café cereja descascado. Disponível em: <http://www.cafepoint.com.br>. Acesso em: 2008.
- OCTAVIANI, J.C. **Avaliação de secadores horizontais rotativos com utilização de lenha e gás liqüefeito de petróleo em secagem de café cereja descascado desmucilado**. Campinas, dissertação (Doutorado), Feagri/UNICAMP, 2005. 115P.
- OCTAVIANI, J.C.; BIAGI, J.D. Avaliação de qualidade e custos de secagem de café cereja descascado desmucilado, em secador horizontal rotativo, com utilização de lenha de eucalipto e gás liquefeito de petróleo. Revista Ecosistema, Vol.29, n^o1. 2004. 6p.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ-OIC. **Coffe market report**. Disponível em: <<http://www.ico.org/documents/cmr0907e.pdf>>. Acesso em: Out. 2007a.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ-OIC. Disponível em: http://www.ico.org/trade_statistics.asp>. Acesso em: Out. 2007b.
- OSÓRIO, A G. S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxos .; Iconcorrentes e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa, MG: UFV, 1982. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1982.).
- PALACIN, J.J.F. Avaliações energética e econômica de sistemas de produção de cafés de montanha. Viçosa-MG: UFV, 2007. 286p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

- PINTO, F.A.C. **Projeto de um secador de fluxos contracorrentes-concorrentes e análise de seu desempenho na secagem de café (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa-MG: UFV, 1993. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- PINTO FILHO, G.L. **Desenvolvimento de um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar de resfriamento, para a secagem de café (*Coffea arábica* L.)**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- REINATO, C.H.R.; BORÉM, F.M.; VILELA, E.F.; CARVALHO, F.M.; MEIRELES, E.P. Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol.6, n.1, 2002. Campina Grande, PB, 2002. p.112-116.
- REZENDE, R.C. **Modelo computacional aplicado a dimensionamento, simulação e análise econômica de unidades pré-processadoras de grãos**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RIBEIRO, D.M.; BORÉM, F.M.; ANDRADE, E.T. DE ROSA, S.D.FRANCO da. **Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem**. *Revista brasileira de Armazenamento*, Viçosa, Edição Especial, n.7, p.94-107, jul.-dez. 2003.
- RIGUEIRA, R.J.A. **Avaliação da qualidade do café processado por via úmida, durante as operações de secagem e armazenagem**. Viçosa – MG: UFV, 2005, xii, 67f.: il. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- SABIONE, P.M. **Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho (*Zea mays* L.)**. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1986. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- SALMAN, A D.; HOUNSLOW, M.J.; VERBA, A. Particle fragmentation in dilute phase pneumatic conveying. *Elsevier Powder Technology* - Budapest, Hungary (126), 109-115. 2002.
- SAMPAIO, C. P. **Desenvolvimento de um secador com reversão do fluxo de ar com sistema de movimentação pneumática de grãos**. Viçosa: UFV, 2004, 97p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- SANTOS, R.R. dos. **Modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal com distribuição radial do fluxo de ar para a secagem de café**. Viçosa – MG: UFV, 2002, 62p.:il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- SEGLER, G. Pneumatic grain conveying with special reference to agricultural engineering. *Natl. Institute of agriculture Engineering*, Wrest Park, Silsoe, Bedfordshire, England, 174p., 1951.

- SILVA, J. S.; HARA, T.; LACERDA FILHO, A.F.; MELO, E.C.; CORRÊA, P.C.; DONZELES, S.M.L. **Alternativas tecnológicas para a secagem e armazenagem de grãos.** In: Simpósio da Pesquisa na UFV. 27 ago./2 ser. 1990.
- 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 Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- SILVA, J. S.; GOMES, R.A.R., HARA, T.; CARVALHO PINTO, F. de A. **Estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto .** Engenharia na Agricultura. Viçosa: Série Armazenamento, v. 1, n. 2, p. 6-10, 1991
- SILVA, J. S.; AFONSO, A.D.L.; PINTO, F.A.C. **Avaliação de secadores e custos de secagem de produtos agrícolas.** Engenharia na Agricultura. Viçosa: AEAGRI-MG/DEA., V.2,N.2.19P.1992a. (Série Armazenamento).
- SILVA, J. S.; BERBERT, P.A. **Colheita, secagem e armazenagem de café.** Viçosa, aprenda fácil, 1999.146p.
- SILVA, J. S.; LUCENA, E. M. P. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: **Pré-Processamento de produtos agrícolas.** Editado por Juarez de Sousa e Silva-Juiz de Fora, MG. Instituto Maria, 2000. 21-37p.
- SILVA, J. S.; **Secagem e Armazenagem de Café -Tecnologias e Custos..** Editora Jard, Viçosa-MG, 2001. 162p.
- SILVA, J.S.; NOGUEIRA, R.M.; MAGALHÃES, E.A. **Secagem em silos – Uma opção para o café.** Viçosa – MG: UFV/DEA, 2008. 31p.
- SILVA, J.S.; NOGUEIRA, R.M.; ROBERTO, C.D. **Tecnologia de secagem e armazenagem para a agricultura familiar.** Viçosa – MG. 2005. 138p.
- TEIXEIRA, C. A. **Avaliação energética e de custo em unidades armazenadoras.** Viçosa: UFV, 2006. 311p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- VIDAL, H. M. **Composição lipídica e a qualidade do café (*Coffea Arabica* L.) durante armazenamento.** UFV – MG: 2001. 81p.:il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- VIEIRA, N.; CARVALHO, G. **Café: Produtividade, Qualidade e Sustentabilidade – Perspectivas para cafés do Brasil.** Viçosa-MG.Laércio Zambolim, p.75-89, 2000.
- VIEIRA, G.; VILELA, E.R. **Secagem intermitente de café (*Coffea arabica* L.) em secador experimental de camada fixa.** Lavras, Ciência e Prática, v.19, n.3, p.289-96, 1995.
- VILELA, E.R. Secagem e qualidade do café. **Informe Agropecuário,** Belo Horizonte, v.1. n.187, p.55-67, 1997.

WOILER, S.; MATHIAS, F. Projetos: planejamento, elaboração e análise. Ed. Atlas S.A. São Paulo-SP. 294p. 1994.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 1A – Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrentes, em função do tempo de secagem, durante o teste FT1

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹)			VE (m ³ kg ⁻¹)		
	aa	As	ae	aa	as*	ae	aa	as	ae	aa	as	ae
0	24,6	60,3	17,1	66,0	10,1	99,0	59,9	96,7	50,6	0,929	1,041	0,905
1	24,6	58,4	19,7	63,0	10,5	99,0	58,3	93,1	53,2	0,929	1,034	0,913
2	26,3	57,1	19,2	61,9	11,3	95,8	59,2	92,2	53,1	0,930	1,030	0,912
3	26,5	60,7	21,2	55,0	9,3	89,0	59,4	94,6	54,0	0,934	1,041	0,917
4	24,8	58,2	21,6	59,1	10,7	86,6	59,8	93,1	55,4	0,932	1,033	0,919
5	23,2	61,4	23,9	69,0	9,2	88,0	57,1	96,4	57,8	0,924	1,043	0,926
6	21,6	57,1	24,3	69,9	11,4	88,3	57,2	92,2	58,4	0,924	1,030	0,928
0	19,0	50,8	26,9	74,0	12,7	99,0	46,9	79,5	55,0	0,908	1,007	0,932
7	22,4	61,1	27,7	71,0	9,2	99,0	55,6	95,4	61,0	0,921	1,042	0,938
8	24,3	58,8	28,5	69,8	9,9	99,0	54,1	91,8	60,7	0,920	1,034	0,940
9	25,7	69,7	31,5	59,0	6,3	90,0	59,4	104,7	65,4	0,932	1,069	0,950
10	25,6	65,9	30,6	59,8	10,5	89,9	58,3	100,2	63,9	0,93	1,057	0,947
11	26,7	63,0	31,5	50,0	7,7	64,0	57,0	94,3	61,9	0,933	1,046	0,948
12	26,3	61,9	31,8	52,4	5,3	70,2	57,6	94,1	63,1	0,933	1,043	0,949
13	24,9	64,7	33,0	63,0	7,9	68,0	59,2	100,2	67,5	0,93	1,054	0,955
14	23,3	62,2	33,4	60,8	9,6	68,8	57,7	96,2	66,5	0,929	1,045	0,955
15	20,5	44,8	34,3	70,4	7,9	84,6	52,3	76,3	65,6	0,917	0,990	0,957
0	17,7	58,9	28,5	82,0	37,6	99,0	27,5	69,3	38,5	0,894	1,020	0,927
16	22,8	53,8	27,5	65,0	12,1	88,0	53,9	85,7	58,7	0,921	1,018	0,936
17	24,5	57,5	27,1	65,6	10,2	85,5	51,3	87,9	56,7	0,917	1,028	0,934
18	22,9	67,9	31,5	55,0	5,4	58,0	49,3	95,4	58,1	0,919	1,059	0,946
19	23,4	63,3	31,0	52,4	5,8	58,8	49,6	90,4	57,3	0,921	1,044	0,944
20	23,9	60,7	34,1	49,0	7,1	47,0	48,9	86,6	59,3	0,921	1,036	0,953
21	24,2	56,7	33,6	49,3	5,0	44,4	48,8	82,5	58,8	0,921	1,023	0,951
22	24,0	62,2	32,4	53,0	7,2	45,0	51,2	90,4	59,8	0,923	1,042	0,949
23	23,0	61,4	35,3	52,2	11,3	46,2	50,3	88,9	62,1	0,922	1,039	0,958
Média	23,7	59,9	28,4	61,4	10,0	78,9	54,7	91,9	59,5	0,924	1,036	0,939

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

Tabela 2A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrente, em função do tempo de secagem, durante o teste FT2

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹)			VE (m ³ kg ⁻¹)		
	aa	as	ae	aa	As	ae	aa	as	ae	aa	as	ae
0	25,2	55,8	21,9	62,0	12,2	94,0	59,57	89,91	56,17	0,931	0,992	0,921
1	24,0	69,5	29,8	58,0	5,7	91,0	53,83	99,52	59,76	0,924	1,030	0,943
2	25,5	54,7	29,2	58,5	11,5	74,4	55,24	97,61	60,18	0,926	1,021	0,941
3	24,6	55,1	36,5	54,0	10,6	57,0	53,39	83,70	65,61	0,926	0,986	0,963
4	24,4	57,4	36,4	53,0	9,2	51,5	52,58	73,50	64,77	0,925	0,960	0,962
5	23,6	58,4	36,5	55,0	8,7	49,0	51,18	85,91	64,39	0,922	0,996	0,962
6	23,2	53,9	36,1	54,5	10,6	48,2	50,92	91,89	63,74	0,922	1,013	0,961
7	22,7	47,3	35,7	61,0	15,7	49,8	51,94	78,29	65,19	0,920	0,964	0,960
0	23,0	54,7	26,8	66,0	11,7	99,0	54,07	80,66	58,28	0,921	0,984	0,934
8	27,5	54,7	27,4	54,0	9,8	86,0	49,08	83,94	53,58	0,919	0,985	0,933
9	25,1	54,4	28,2	54,4	10,6	80,8	51,68	90,50	56,10	0,923	1,004	0,936
10	24,6	55,2	34,5	54,0	10,4	48,0	53,11	87,34	63,36	0,925	0,995	0,956
11	24,5	61,4	35,1	54,4	8,3	50,3	55,58	86,41	65,63	0,925	0,992	0,959
12	24,6	55,2	34,5	57,0	11,0	40,0	54,72	85,22	64,98	0,926	0,988	0,957
13	24,6	53,4	38,3	57,3	12,2	37,2	55,17	88,20	69,25	0,927	0,995	0,969
14	22,4	41,6	39,7	61,0	23,5	38,0	57,18	76,22	72,71	0,928	0,949	0,975
15	20,4	51,7	39,0	63,2	14,0	38,0	56,24	77,01	71,78	0,926	0,958	0,973
16	21,3	59,5	40,9	74,6	9,7	37,9	53,83	95,24	73,98	0,918	1,013	0,979
Média	24,0	55,2	33,7	58,4	10,9	59,5	53,75	86,17	63,83	0,924	1,022	0,955

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

Tabela 3A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrente, em função do tempo de secagem, durante o teste FT3.

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹)			VE (m ³ kg ⁻¹)		
	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae
0	18,7	61,7	24,4	77	7,71	94	47,16	91,27	53,03	0,907	1,041	0,925
1	23,4	65,4	27,7	68	7,68	96	57,18	100,41	61,58	0,925	1,056	0,938
2	23,1	56,5	26,8	65,9	11,01	91	55,21	89,56	59,01	0,923	1,027	0,935
3	25,0	61,4	33,1	48	7,15	56	51,19	88,47	59,47	0,925	1,038	0,951
4	25,0	60,4	32,5	49,8	5,07	63,2	42,69	78,73	50,32	0,921	1,030	0,944
5	23,7	61,2	35,5	56	7,79	61	51,96	90,42	64,05	0,923	1,039	0,959
6	24,3	60,2	35,5	53,3	8,05	56,5	52,19	89	63,67	0,924	1,036	0,959
7	21,7	50,2	33,8	70	14,58	64	52,97	82,27	65,41	0,918	1,007	0,956
8	21,7	60,5	36,2	65,9	8,39	60,2	51,12	90,94	66,01	0,917	1,038	0,962
0	20,9	67,1	29,6	73	6,53	99	51,93	99,4	60,68	0,916	1,059	0,943
9	22,6	69,9	28,9	63	5,57	90	52,34	100,9	58,82	0,920	1,067	0,94
10	22,4	61,5	28,7	64,2	8,15	89,4	52,33	92,48	58,82	0,920	1,041	0,939
11	22,1	62,6	36,2	61	7,23	62	49,99	91,52	64,46	0,917	1,043	0,961
12	23,1	65,7	36,4	60,5	6,63	62,2	52,54	96,27	66,22	0,921	1,054	0,963
13	24,0	66,1	35,5	57	6,47	50	53,31	96,52	65,09	0,924	1,055	0,96
14	23,6	62,5	40,1	54,7	7,13	43,8	51,02	90,9	67,94	0,922	1,043	0,973
15	21,1	49,5	33,9	69	14,34	36	50,78	79,93	63,91	0,915	1,004	0,955
16	22,2	60,7	39,2	61,7	8,02	34,9	50,59	90,09	68,02	0,918	1,038	0,971
Média	22,7	61,3	33,0	62,11	8,10	67,2	52,19	91,81	62,77	0,920	1,040	0,975

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

Tabela 4A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrente, em função do tempo de secagem, durante o teste FTM4.

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹)			VE (m ³ kg ⁻¹)		
	aa	as	ae	aa	As	ae	aa	As	ae	aa	as	ae
0	24,2	60,8	30,5	54	7,89	37,35	52,29	89,82	58,76	0,924	1,038	0,944
1	24,3	45,9	26,5	55	16,64	48,25	53,09	75,25	55,34	0,925	0,992	0,932
2	22,7	50,3	27,4	56,5	12,44	42,69	49,5	77,77	54,3	0,919	1,004	0,933
3	20,1	44,5	27,3	64,4	16,22	41,76	46,07	71,06	53,45	0,91	0,986	0,933
0	20,7	40,5	30,5	70	22,55	39,04	50,06	70,38	60,05	0,914	0,976	0,944
4	27,4	46,3	24,3	54	19,24	64,89	61,54	81,01	58,35	0,937	0,996	0,928
5	27,1	48,6	25,1	56,5	17,61	64,89	63,59	84,36	60,15	0,937	1,004	0,931
6	24,2	64	27,5	56	7,07	46,06	53,34	94,19	56,73	0,925	1,048	0,935
7	25,2	61,1	26,2	53,8	8,23	50,72	53,34	91,85	55,99	0,896	1,040	0,931
8	26,2	55,2	28,2	54	11,55	48,01	57,95	87,76	59,99	0,932	1,023	0,939
9	25,7	49,8	31,1	52,5	14,19	38,36	55,63	80,37	61,17	0,93	1,005	0,947
10	24,3	56,9	34,7	64	11,28	35,15	57,88	91,44	68,58	0,928	1,029	0,960
11	22,7	48,1	34,2	58,3	14,33	29,89	50,36	76,4	62,15	0,919	0,998	0,955
Média	24,2	51,7	28,7	57,6	13,0	44,27	54,20	82,44	58,85	0,923	1,011	0,939

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

Tabela 5A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrentes e no pré – secador tipo terreiro híbrido, em função do tempo de secagem, durante o teste FD5

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹ de água evaporada)			VE (m ³ kg ⁻¹)						
	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae				
		S	PS	S	S	PS	S	S	PS	S	S	PS	S			
0	21	50	52	17	78,0	15,6	14,5	99,5	54,4	84,35	85,9	50,39	0,917	1,008	1,031	0,905
1	21	57	48	17	69,0	10,3	16,0	89,6	51,35	87,6	78,36	47,03	0,916	1,026	0,998	0,903
2	22	54	62	17	66,2	12,2	8,1	90,8	53,28	85,34	94,98	48,34	0,920	1,017	1,044	0,904
3	23	48	54	21	56,0	14,4	11,0	65,2	51,4	76,46	82,1	48,57	0,921	0,998	1,015	0,914
4	24	46	61	21	56,4	16,7	8,2	69,7	53,84	76,42	91,61	50,24	0,925	0,994	1,040	0,914
5	25	55	50	20	51,0	10,6	13,2	70,4	53,12	83,26	78,65	47,68	0,927	1,018	1,004	0,910
6	25	51	59	22	53,2	13,0	8,9	63,7	54,62	81,41	89,42	51,54	0,928	1,009	1,033	0,919
7	21	50	62	24	72,0	15,1	8,3	61,9	52,98	82,07	95,13	55,54	0,917	1,006	0,925	1,045
8	21	47	55	24	71,7	16,9	11,4	62,7	52,55	79,17	87,39	54,80	0,917	0,998	1,022	0,924
0	25	64	45	17	58,0	7,9	18,9	93,0	57,02	96,50	77,89	49,09	0,929	1,049	0,992	0,905
9	26	57	42	22	53,0	10,0	21,2	65,4	55,63	87,98	72,47	52,04	0,930	1,028	0,981	0,919
10	25	67	42	22	56,8	6,8	22,3	68,5	56,93	99,49	74,1	53,75	0,930	1,058	0,982	0,920
11	25	56	53	27	59,0	11,5	12,8	54,0	57,28	88,85	86,48	58,82	0,929	1,025	1,017	0,934
12	25	57	55	27	59,3	5,0	12,2	24,1	40,24	72,66	88,5	42,37	0,920	1,018	1,022	0,926
13	26	69	67	32	54,0	6,1	6,8	38,4	57,07	101,2	98,79	63,14	0,931	1,065	1,058	0,950
14	26	63	61	31	54,5	7,9	8,8	40,5	57,66	95,9	93,53	62,90	0,932	1,048	1,040	0,948
15	24	71	69	33	68,0	6,2	6,9	40,1	59,06	107,6	105,2	68,44	0,927	1,074	1,067	0,956
16	23	63	61	33	69,2	8,7	9,6	38,7	57,78	98,67	96,3	68,07	0,925	1,049	1,042	0,956
0	21	65	63	20	42,0	4,2	4,7	46,7	39,3	84,01	81,67	37,57	0,909	1,045	1,038	0,904
17	20	42	40	19	70,0	19,8	22,4	73,1	47,5	70,2	67,8	46,81	0,910	0,979	0,972	0,908
18	20	51	48	19	66,1	12,3	13,8	71,2	47,31	78,46	76,11	46,07	0,911	1,006	0,999	0,908
19	22	46	44	25	71,0	18,5	20,8	58,2	54,33	79,12	76,75	57,73	0,920	0,995	0,988	0,930
20	22	51	49	24	69,2	13,7	15,3	62,4	52,91	83,33	80,96	54,66	0,918	1,011	1,003	0,924
21	24	66	64	29	62,0	7,0	7,7	45,9	55,03	98,50	96,14	45,90	0,924	1,056	1,049	0,963
22	23	55	52	26	62,7	11,7	13,1	52,8	54,50	86,46	84,10	57,49	0,923	1,020	1,013	0,932
23	23	48	46	28	73,0	19,0	21,4	56,5	59,71	84,87	82,5	64,13	0,926	1,003	0,995	0,940
24	23	47	45	28	72,2	18,7	21,1	53,3	58,02	83,16	80,79	63,27	0,924	1,000	0,993	0,940
Média	23	55	54	24	62,7	11,2	12,2	61,3	54,25	87,18	85,39	54,86	0,923	1,023	1,017	0,925

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

S – secador pneumático de fluxos concorrentes; PS – pré – secador.

Tabela 6A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrentes e no pré – secador tipo terreiro híbrido, em função do tempo de secagem, durante o teste FD6.

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹ de água evaporada)			VE (m ³ kg ⁻¹)						
	aa	As		ae	aa	as		ae	aa	as		ae				
		S	PS	S		S	PS	S		S	PS	S				
0	19	54	52	16	78,0	11,2	12,5	93,1	47,25	83,47	81,11	44,38	0,907	1,017	1,010	0,898
1	23	50	48	18	69,0	15,5	17,4	89,9	55,52	83,50	81,13	51,09	0,922	1,007	1,000	0,909
2	23	65	62	24	66,2	7,6	8,5	63,4	55,36	98,04	95,67	56,06	0,923	1,052	1,045	0,925
3	24	56	54	23	56,0	9,9	11,1	56,7	51,68	84,81	82,45	51,47	0,922	1,023	1,015	0,922
4	24	63	61	23	56,4	7,2	8,0	59,2	52,99	93,42	91,06	52,18	0,924	1,047	1,039	0,922
5	25	52	50	23	51,0	11,7	13,1	53,9	52,85	80,84	78,48	54,15	0,926	1,011	1,004	0,925
6	25	61	59	25	53,2	8,0	8,9	53,9	54,34	91,59	89,23	54,15	0,928	1,04	1,033	0,927
7	21	65	62	39	72,0	7,1	7,9	28,8	50,91	96,10	93,74	73,05	0,914	1,051	1,044	0,972
8	22	58	55	28	71,7	10,5	11,7	50,7	53,75	90,56	88,19	59,72	0,919	1,030	1,023	0,937
0	15	48	45	21	58,0	8,9	10,1	39,2	31,39	64,87	62,32	37,69	0,889	0,990	0,982	0,908
9	21	44	42	18	53,0	14,5	16,5	67,2	44,31	67,82	65,26	40,43	0,912	0,983	0,976	0,900
10	23	61	58	18	56,8	8,0	9,0	78,7	51,54	89,69	87,12	46,10	0,922	1,037	1,029	0,905
11	24	50	48	21	59,0	13,6	15,5	67,0	52,92	80,43	77,87	50,77	0,923	1,006	0,998	0,916
12	25	51	48	22	59,3	14,9	16,8	71,9	57,74	83,98	81,40	54,46	0,929	1,009	1,001	0,92
13	25	61	58	20	54,0	8,4	9,5	74,0	55,64	92,09	89,53	50,28	0,929	1,040	1,032	0,913
14	26	56	54	23	54,5	4,4	12,0	26,9	38,13	69,28	85,18	35,07	0,919	1,014	1,017	0,91
15	25	50	48	26	68,0	17,4	19,7	63,3	62,62	88,53	85,95	63,87	0,932	1,011	1,003	0,936
16	24	56	54	36	69,2	12,0	13,5	34,1	58,10	91,88	89,31	70,77	0,926	1,028	1,02	0,964
0	19	53	51	12	42,0	6,4	7,0	63,8	33,75	68,42	66,49	27,15	0,899	1,004	0,998	0,879
17	20	51	49	14	70,0	12,7	14,0	100,0	47,53	79,11	77,16	40,42	0,910	1,006	1,000	0,891
18	23	52	50	17	66,1	13,3	14,6	92,9	54,12	84,33	82,38	48,45	0,921	1,013	1,007	0,904
19	24	49	47	23	71,0	17,7	19,4	76,8	60,31	86,50	84,54	58,97	0,928	1,007	1,001	0,924
20	25	60	58	25	69,2	10,8	11,8	68,0	61,31	97,62	95,66	61,63	0,930	1,040	1,034	0,931
21	26	61	59	27	62,0	10,0	10,9	58,5	61,45	97,43	95,47	62,49	0,933	1,042	1,036	0,937
22	26	63	61	30	62,7	9,2	10,1	50,5	62,83	101,00	99,04	66,64	0,935	1,051	1,045	0,947
23	25	69	67	31	63,0	6,7	8,3	46,8	60,76	106,00	101,26	66,02	0,932	1,069	1,055	0,948
24	25	69	67	34	65,0	6,8	7,4	37,8	59,98	105,63	103,67	69,68	0,930	1,068	1,062	0,959
25	23	60	58	33	76,0	10,4	11,3	41,9	58,26	97,02	95,06	68,78	0,923	1,041	1,035	0,955
0	17	50	47	25	96,0	15,6	17,4	60,5	49,51	82,84	80,57	57,23	0,905	1,006	0,999	0,928
26	20	46	44	25	86,0	20,0	22,4	66,6	55,58	82,38	80,11	59,91	0,916	0,997	0,990	0,929
27	23	59	57	29	83,6	12,5	13,9	57,6	63,66	100,59	98,31	70,18	0,928	1,039	1,032	0,947
Média	23	56	54	24	65,1	10,8	12,1	60,3	53,89	88,22	85,93	55,19	0,921	1,025	1,019	0,925

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

S – secador pneumático de fluxos concorrentes; PS – pré – secador.

Tabela 7a - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrentes e no pré – secador tipo terreiro híbrido, em função do tempo de secagem, durante o teste FD7.

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg-1 de água evaporada)			VE (m3 kg-1)						
	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae	aa	as	ae				
	S	PS	S	S	PS	S	S	PS	S	S	PS	S				
0	24	57	55	20	78,0	12,9	14,4	99,0	62,93	97,76	95,38	100	0,929	1,034	1,027	
1	25	56	53	23	69,0	13,2	14,7	99,0	61,53	93,51	91,14	75,97	0,930	1,027	1,020	0,925
2	25	67	64	27	66,2	7,7	8,6	97,5	60,97	104,06	101,7	57,47	0,931	1,061	1,054	0,938
3	26	64	62	29	56,0	7,5	8,3	85,0	57,06	97,05	94,69	60,75	0,930	1,051	1,044	0,941
4	26	53	51	35	56,4	12,8	14,3	97,5	57,59	86,07	83,7	67,66	0,931	1,017	1,010	0,961
5	25	69	67	34	51,0	5,5	5,9	81,0	52,31	97,61	95,26	61,95	0,926	1,063	1,056	0,955
6	23	66	64	37	53,2	5,7	6,4	82,7	48,69	92,61	90,26	63,13	0,919	1,052	1,045	0,963
7	21	53	50	39	72,0	12,5	14,0	82,0	50,91	83,78	81,41	70,11	0,914	1,014	1,007	0,973
0	21	54	52	15	58,0	9,7	10,8	87,9	46,25	79,92	77,57	39,49	0,913	1,015	1,008	0,893
8	24	59	57	25	67	10,5	11,5	63,1	58,53	94,58	92,52	59,57	0,927	1,036	1,030	0,930
9	24	59	57	25	53,0	8,1	9,1	85,0	49,90	86,06	83,70	47,85	0,921	1,031	1,023	0,926
10	26	61	59	23	56,8	8,8	9,8	65,2	57,52	94,13	91,76	55,15	0,930	1,041	1,034	0,923
11	26	64	62	34	59,0	8,2	9,1	36,7	60,01	99,44	97,07	68,56	0,933	1,052	1,045	0,959
12	27	54	52	33	59,3	13,6	15,2	40,4	62,06	90,61	88,24	68,97	0,936	1,022	1,015	0,956
13	27	55	53	38	54,0	12,2	13,6	28,8	60,63	89,55	87,18	28,75	0,936	1,024	1,017	0,971
14	27	56	54	36	54,5	11,5	12,9	32,1	59,73	89,98	87,62	69,32	0,935	1,026	1,019	0,964
15	25	59	56	37	68,0	11,5	12,9	34,5	62,29	96,97	94,59	74,58	0,932	1,037	1,030	0,969
16	23	51	49	37	69,2	14,3	16,0	69,9	55,00	84,73	82,37	69,40	0,921	1,011	1,004	0,965
Média	25	59	56	31	60,8	10,0	11,1	42,2	56,80	92,00	89,64	63,23	0,927	1,034	1,027	0,947

aa – ar ambiente; as – ar de secagem; e ae – ar de exaustão.

S – secador pneumático de fluxos concorrente; PS – pré – secador.

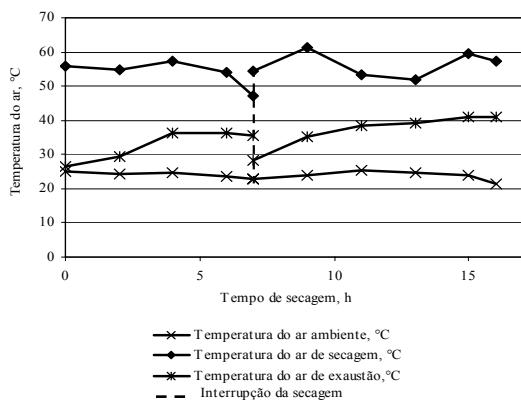
Tabela 8A - Temperatura, umidade, entalpia e volume específico do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão no secador pneumático de fluxos concorrentes e no pré – secador tipo terreiro híbrido, em função do tempo de secagem, durante o teste FDM8.

Tempo (horas)	T (°C)			UR (%)			h (kJ kg ⁻¹ de água evaporada)			VE (m ³ kg ⁻¹)						
	aa	as		ae	aa	as		ae	aa	as		ae				
		S	PS	S		S	PS	S		S	PS	S		S	PS	S
0	15	46	44	20	78,0	12,8	14,4	57,6	36,91	69,09	66,74	41,82	0,891	0,989	0,982	0,906
1	18	51	48	23	69,0	11,5	12,9	57,6	43,12	76,07	73,72	57,64	0,904	1,004	0,997	0,920
2	20	60	57	27	66,2	8,0	8,9	43,2	47,08	87,56	85,2	54,34	0,911	1,034	1,027	0,933
3	22	63	60	29	56,0	6,4	7,2	35,9	46,39	88,34	85,99	54,08	0,914	1,041	1,034	0,937
4	21	62	60	35	56,4	6,4	7,1	24,5	45,30	87,34	84,98	59,92	0,912	1,040	1,033	0,957
5	23	53	51	34	51,0	10,3	11,6	27,3	48,63	78,83	76,47	59,7	0,920	1,011	1,004	0,953
6	24	59	57	37	53,2	8,3	9,2	24,7	50,53	86,49	84,14	64,25	0,922	1,031	1,024	0,963
7	21	65	63	39	72,0	7,2	8,0	25,2	52,09	97,09	94,73	70,88	0,916	1,053	1,045	0,973
8	20	56	54	15	58,0	7,9	8,8	79,1	41,99	79,49	77,14	36,98	0,906	1,020	1,013	0,891
9	18	61	59	25	53,0	5,1	5,6	33,5	36	80,52	78,18	33,48	0,898	1,033	1,026	0,922
Média	20	58	55	28	61,3	7,7	9,1	37,1	44,88	84,45	80,81	53,41	0,910	1,030	1,018	0,935

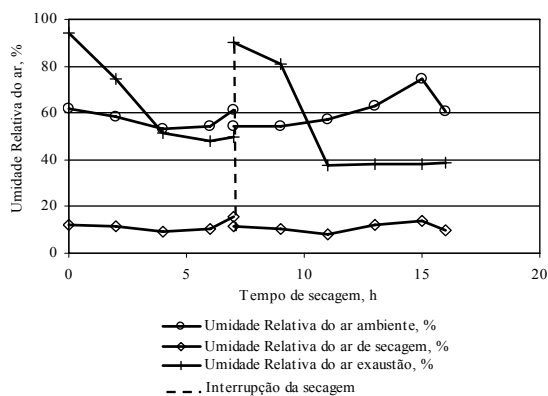
aa – ar ambiente; as – ar de secagem; ae – ar de exaustão.

S – secador pneumático de fluxos concorrentes; PS – pré – secador.

ANEXO B

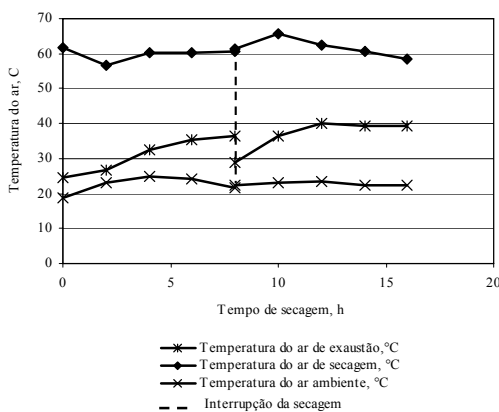


(a)

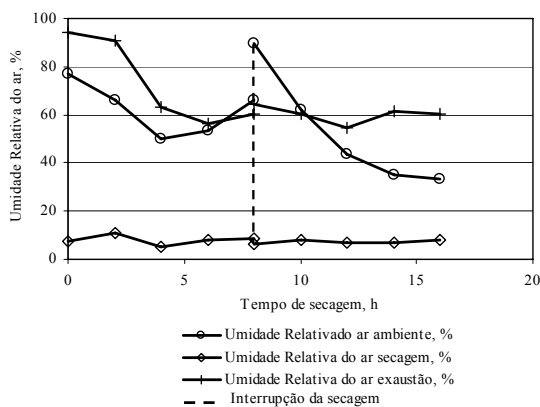


(b)

Figura 4.2 - (a) Variação nas temperaturas do ar ambiente, de secagem e de exaustão; (b) Variação da umidade relativa do ambiente e de exaustão, em função do tempo de secagem, no teste FT2.

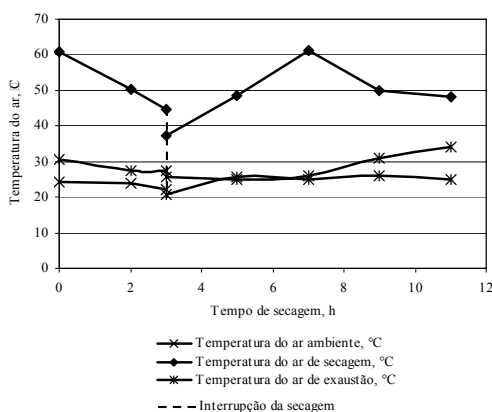


(a)

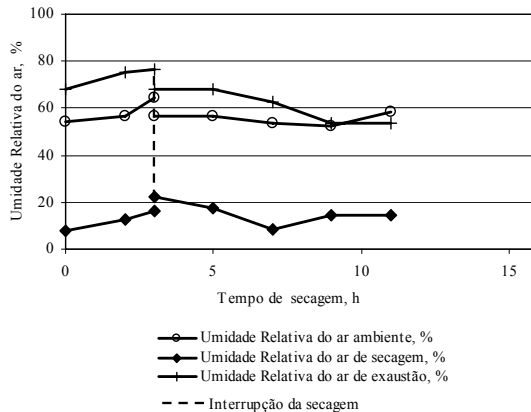


(b)

Figura 4.3 - (a) Variação nas temperaturas do ar ambiente, de secagem e de exaustão; (b) Variação da umidade relativa do ambiente e de exaustão, em função do tempo de secagem, no teste FT3.



(a)



(b)

Figura 4.4 - (a) Variação nas temperaturas do ar ambiente, de secagem e de exaustão; (b) Variação da umidade relativa do ambiente e de exaustão, em função do tempo de secagem, no teste FTM4.

ANEXO C

Tabela 1C - Temperatura do ar de secagem, do ar de secagem no topo do secador e na massa de grãos no secador a 0,40 e 0,80 m do topo do secador (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de descanso) e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FT1

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	13,8	13,8	14,1	15,1	14,3	15
2	57,1	56,2	42,2	20,7	20,7	17,5	15,1	23
4	58,2	57,5	39,9	22,7	21,9	21,5	16,3	20,1
6	57,1	55,8	46,8	28,3	22,5	22,5	22,8	28,9
0	-	-	40,5	40	30,4	37,2	25,8	25,4
8	58,8	58,9	36,3	31,1	29,6	28,6	35,4	28,5
10	65,9	65,2	50	37,6	32,6	30	29,7	26,5
12	61,9	61,3	55,1	38,3	32,5	29,3	29,2	26,4
14	62,2	60,9	51	37,7	33,4	31,1	29,9	26,8
15	44,8	45,7	34,4	34,2	33,9	31,7	30,7	29,5
0	-	-	36,4	32,9	28,1	32,6	23,6	17,5
17	57,5	55,6	47,5	33,5	28,8	28,3	26,7	28,7
19	63,3	61,5	54,8	40,2	32,8	28,7	26,8	31,9
21	56,7	55,5	58,3	36,7	35,6	29,5	27,6	34,8
23	61,4	60	55,7	39,9	36,7	33,8	29,6	34,1

Tabela 2C - Temperatura do ar de secagem, do ar de secagem no topo do secador e na massa de grãos no secador a 0,40 e 0,80 m do topo do secador (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de descanso) e na moega de descanso em função do tempo de secagem, durante o teste FT2

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	27,6	23,4	25,5	24,4	24,2	21,8
2	54,7	53,5	34,4	24,7	31,5	25,9	23,8	20,8
4	57,4	56,8	35,5	29,4	36,3	27	26,7	27,7
6	53,9	52,5	35,7	36,6	29,8	26,1	27,3	27,8
7	47,3	48,1	26,1	34,9	29,2	26,8	26,8	27,1
0	-	-	23,9	34,2	28,4	35,2	28,7	20,7
9	54,4	53,8	36,5	30,2	32,4	25,8	33,3	26,4
11	61,4	58,1	40,7	34,5	36,5	27,5	27,2	28,7
13	53,4	52,3	42,6	39,9	37,7	27,9	27,5	29,7
15	51,7	50,5	45,7	35,7	40	29,5	27,2	28,4
16	59,5	57,4	40,4	36,8	42	31,6	27,9	29,7

Tabela 3C - Temperatura do ar de secagem, do ar de secagem no topo do secador e na massa de grãos no secador, a 0,40 e 0,80 m do topo do secador (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de descanso) e na moega de descanso em função do tempo de secagem, durante o teste FT3

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	60,6*	22,5	20,9	35,3	34,3	26,1
2	56,5	56,7	56*	33,4	27,5	28,3	24,5	26,4
4	60,4	53,3	48,6*	35,2	27,4	27,2	29,2	29,2
6	60,2	63,4	63,6*	41,7	35,4	27,7	28,9	29,7
8	60,5	58,5	56,7*	41,5	36,1	29,6	28,4	29
0	-	-	53,2*	34,2	29,7	32	25,1	24,2
10	61,5	59,7	55,1*	36,5	28,9	26,1	29,6	26,1
12	65,7	52,1	56,1*	40,5	44,1	30,8	28,6	28,2
14	62,5	64,2	65,3*	50,8	38,4	32,7	27,9	30
16	60,7	58,2	58,2*	44,1	42	26,9	20,9	26,2

*Camada de grãos estava um pouco abaixo do sensor de medição de temperatura.

Tabela 4C - Temperatura do ar de secagem no secador e no pré-secador, do ar de secagem no topo do secador, da massa de grãos a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de secagem e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FTM4

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	19,5	19	19,1	15,8
2	50,3	45,3	37,9	36,2	26,9	22,8
3	44,5	40,1	36,2	32,5	26,8	28,4
0	-	-	23,1	34,5	25,7	20,7
5	48,6	47,3	27,6	27,1	23,4	22,9
7	61,01	56,5	50,7	45,5	26,5	32,2
9	49,8	46,7	30,1	35	33,6	32
11	48,1	44,3	35,7	42,2	37,9	32

Tabela 5C - Temperatura do ar de secagem no secador e no pré-secador, do ar de secagem no topo do secador e da massa de grãos no secador a 0,40 e 0,80 m (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m (câmara de descanso) do topo do secador e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FD5

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	13,9	15,9	18,4	35,5	28,1	12,6
2	43,4	37,6	25,2	17,1	17,6	29,8	27,3	16,2
4	42,9	37,6	23,1	19,7	17,3	21,3	36,9	18,6
6	51	45,5	28	25,7	19,1	19	24,3	21
8	47,2	43,1	24,8	36,3	25,9	21	22,8	20,6
0	-	-	17,2	15,9	17,4	23,6	31,2	21,8
10	51,2	45,6	26,7	21,1	22,7	22,6	32,4	26,1
12	57,1	50,7	38,5	26,4	29,3	26,3	30,2	27,3
14	63,2	55,3	46,7	29,4	30,7	28,5	28,7	30,7
16	63,1	55,2	46,6	38	32,6	30,1	29,1	32,5
0	-	-	14,9	13,4	19,1	25,3	21,5	14,5
18	50,7	44,6	31,5	34,2	25,4	20,5	21,2	20,4
20	51,4	45,2	41,1	30,4	24,7	20,9	21,2	20,4
22	54,5	51,5	42,8	40,7	30,8	26,9	21,9	28,9
24	47,4	41,1	35,2	31	27,1	25	20,6	20,4

Tabela 6C - Temperatura do ar de secagem no secador e no pré-secador, do ar de secagem no topo do secador e na massa de grãos no secador, a 0,40 e 0,80 m do topo do secador (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de descanso) e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FD6

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	17,4	17,2	19,1	19,8	19,4	27,4
2	51,8	46,2	46,5*	31,2	20,7	19,5	31,7	23,9
4	56,8	50,5	50,1*	33,1	22,6	20,3	25,7	19,1
6	57	51,5	49,9*	35,6	23,3	19,8	21,9	21,5
8	57,5	54,9	53,7*	30,3	23	22,4	21,8	22,5
0	-	-	34,8	29,5	23	32,2	18,1	15,4
10	46,6	42,7	37,2*	23,1	18,1	18,6	28,6	16,7
12	50,6	44	42,9*	27,7	22,5	19,1	24,1	19,6
14	53,4	49,5	51,1*	32,9	24,4	20,7	29,9	22,3
16	56,3	50,4	33,1	32,7	25,4	24,2	22,3	28,4
0	-	-	32,9	32,1	21,9	26,6	17,9	12
18	48,7	43	37,2	23,1	18,1	18,6	28,6	16,7
20	51,6	46,6	41,9*	34,5	25,5	21,7	20	24,1
22	56,8	50,8	53,8*	34,1	28,7	24,6	22,5	23,1
24	67,5	62,9	61,7*	45,5	30,9	28,1	25,7	23,1
25	66,1	61,9	56,4*	40,2	31,2	28,1	25,7	23,1
0	-	-	26,6	33,3	24,6	26,5	15,2	17,2
27	55,1	49,8	46,9*	33,7	25,8	23,9	21,5	15,9

*Camada de grãos estava um pouco abaixo do sensor de medição de temperatura.

Tabela 7C - Temperatura do ar de secagem no secador e no pré-secador, do ar de secagem no topo do secador, da massa de grãos a 0,40 e 0,80 m do topo do secador (câmara de secagem), a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de descanso) e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FD7

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	0,40 m (°C)	0,80 m (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	19,2	19,5	19,5	20	19,5	21,4
2	55,7	49,6	41,8	31,1	25,5	21,3	19,7	26,6
4	58	54,3	44,9	37,2	28,8	25,7	21,2	23,5
6	63,5	63,2	50,3	46,8	36,6	28,5	26	28,8
7	52,7	49,9	42,9	45,2	41,8	29,3	27,4	28,9
0	-	-	14,8	14,6	14,5	12,9	19,5	17,5
9	50,1	57,3	39,7	28,3	26,9	24,1	12,9	27,7
11	64,2	63,6	48,5	41,4	36,2	28,6	23,4	33,7
13	55,2	51,7	45,8	39,1	36,7	30,3	29,3	29,3
15	54,1	50,1	43,8	46,8	36,6	28,5	26	28,8
16	51,4	46,8	43,8	40,8	36,6	28,5	26	28,8

Tabela 8C - Temperatura do ar de secagem no secador e no pré-secador, do ar de secagem no topo do secador, da massa de grãos a 1,20, 1,60 e 2,00 m do topo do secador (câmara de secagem) e na moega de descanso, em função do tempo de secagem, durante o teste FDM8

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Topo do secador (°C)	1,20 m (°C)	1,60 m (°C)	2,00 m (°C)	Moega de descanso (°C)
0	-	-	19,5	19	19,1	15,8
2	46,6	40,8	28,5	24,4	23,8	24,7
4	53,6	47,1	36,2	32,5	26,8	28,4
6	58,8	50,1	45,1	35,5	26	30,4
8	56,2	49,5	44,4	26,9	27,4	31,7
9	61,4	52	43,9	36,8	26,8	28,4

ANEXO D

Quadro 1D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FT1

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	60,3	37,5
2	57,1	36,7
4	58,2	37
6	57,1	36,7
0	50,8	36,7
8	58,8	35,1
10	65,9	31,3
12	61,9	26,5
14	62,2	25,4
15	44,8	23,6
0	58,9	23,6
17	57,5	21,3
19	63,3	20,1
21	56,7	17,5
23	61,4	13,1

Quadro 2D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FT2

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	55,8	30
2	54,7	30
4	57,4	28,7
6	53,9	23,8
7	47,8	23
0	54,7	23
8	54,4	21,9
10	61,4	19,7
012	53,4	17,5
14	51,7	15,2
15	59,5	15

Quadro 3D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FT3.

Tempo de secagem (horas)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	61,7	31,2
2	56,5	29,7
4	60,4	28,9
6	60,2	26,1
8	60,5	23,2
0	67,1	22,7
10	61,5	20,1
12	65,7	15,3
14	62,5	12,9
16	60,7	13

Quadro 4D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FTM4

Tempo de secagem (°C)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	60,8	31
2	50,3	28,7
3	44,5	28,1
0	59	27,9
5	48,6	24,8
7	61,1	20,7
9	49,8	18,8
11	48,1	16,2

Quadro 5D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FD5

Tempo de secagem (°C)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	50,1	33,4
2	43,4	31,9
4	42,9	30,1
6	51	28,2
8	47,2	27,2
0	63,5	27,2
10	51,2	25
12	57,1	24,7
14	63,2	22,6
16	63,1	21,5
0	65,1	21,5
18	50,7	21,2
20	51,4	20,9
22	54,5	18,3
24	47,4	16

Quadro 6C - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FD6

Tempo de secagem (°C)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	53,9	39,1
2	51,8	37,6
4	56,8	35,9
6	57	33,1
8	57,5	31,8
0	47,7	31,2
10	46,6	30,6
12	50,6	28,5
14	53,4	27,5
16	56,3	24,3
0	52,6	24,3
18	48,7	23,9
20	51,6	21,6
22	56,8	20,2
24	67,5	18,3
25	66,1	17
0	49,6	16,8
27	55,1	15

Quadro 7C - Temperaturas médias do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FD7.

Tempo de secagem (°C)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	57,3	27,3
2	55,7	22,5
4	58	20,1
6	63,5	18,7
7	52,7	17,9
0	54,1	17,3
9	50,1	16,1
11	64,2	15,6
13	55,2	14,2
15	54,1	13,8
16	51,4	13,1

Quadro 8D - Temperatura média do ar de secagem e teor de água dos grãos em função do tempo de secagem, durante o teste FDM8

Tempo de secagem (°C)	Ar de secagem (°C)	Teor de água dos grãos (%)
0	46,2	26,5
2	46,6	23,2
4	53,6	20,7
6	58,8	19,6
8	56,2	17,2
9	61,4	15