

ANDRÉ TESSARI FREIRE

**PROJETO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PARA SECAGEM
COMBINADA DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) DESPOLPADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
JULHO – 1998

ANDRÉ TESSARI FREIRE

**PROJETO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PARA SECAGEM
COMBINADA DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) DESPOLPADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

APROVADA: 26 de março de 1998.

Prof. Jadir Nogueira da Silva

Prof. José Helvecio Martins

Prof. Juarez de Souza e Silva
(Conselheiro)

Prof. Pedro Amorim Berbert
(Conselheiro)

Prof. Evandro de Castro Melo
(Orientador)

Aos meus pais Marcos e Ilka, que me ensinaram a viver com amor e dignidade.

AGRADECIMENTO

À minha esposa Adriane, pelo seu carinho e apoio.

Aos meus pais Marcos e Ilka, pelo exemplo de vida e incentivo.

Aos meus irmãos Silvia, Paula e Pedro, pelo amor e apoio.

À Universidade Federal de Viçosa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Professor Evandro de Castro Melo, pela orientação, ajuda e amizade.

Ao Professor Juarez de Sousa e Silva, pelos ensinamentos e pelo apoio.

Ao Professor Pedro Amorim Berbert, pelas eficientes sugestões e contribuições para realização do trabalho.

Aos Professores Jadir Nogueira da Silva e José Helvécio Martins, pelas valiosas sugestões apresentadas.

Aos funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, Antônio (Inhame), Francisco (Chiquinho) e José Raimundo (Zé Baixinho), pelo auxílio na construção e manutenção do sistema de secagem.

Aos funcionários da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), pelo auxílio.

Ao Grupo Gravatá Agropecuária Ltda., por ceder o café utilizado no experimento.

Aos amigos Ana, Andréia, Fernando, Neri, Rildo e Solenir, pelo companheirismo nos momentos alegres e apoio perante as dificuldades.

Aos amigos e professores do Departamento de Engenharia Agrícola e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ANDRÉ TESSARI FREIRE, filho de Marcos Gianerine Freire e Ilka Denise Tessari Freire, nasceu na cidade de São Paulo - SP, no dia 10 de novembro de 1973.

Em março de 1991, ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, graduando-se em fevereiro de 1996.

Em março de 1996, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em março de 1998.

CONTEÚDO

EXTRATO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Generalidades sobre o café	5
2.1.1. Qualidade	6
2.1.2. Colheita	9
2.1.3. Preparo	9
2.1.4. Armazenamento	11
2.1.5. Beneficiamento	12
2.2. Secagem de café	12
2.3. Sistemas de secagem	14
2.3.1. Secagem artificial com ar natural	15
2.3.2. Secagem a altas temperaturas	16
2.3.3. Secagem a baixas temperaturas	20
2.3.4. Secagem em sistemas combinados	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Secador de altas temperaturas	26
3.2. Silo-secador	28

3.3. Testes experimentais	29
3.3.1. Temperaturas do ar	30
3.3.2. Vazões específicas e pressão estática	32
3.3.3. Consumo de energia	33
3.3.4. Capacidade nominal do secador	36
3.3.5. Características do produto	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Temperaturas e umidades relativas	41
4.2. Curvas de secagem	50
4.3. Pressão estática	53
4.4. Consumo de energia	54
4.5. Classificação do produto	58
5. RESUMO E CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICES.....	67
APÊNDICE A	68
APÊNDICE B	73
APÊNDICE C	75

EXTRATO

FREIRE, André Tessari, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1998.
Projeto e avaliação de um sistema para secagem combinada de café (*Coffea arabica* L.) despulpado. Orientador: Evandro de Castro Melo.
Conselheiros: Juarez de Sousa e Silva e Pedro Amorim Berbert.

Com a finalidade de adaptar a tecnologia de secagem com sistemas combinados para o café, foi projetado, construído e avaliado um sistema em que o café despulpado, pré-secado em terreiro, passava por uma secagem intermediária em um secador experimental de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes e, em seguida, era transportado para um sistema em baixas temperaturas, composto por um silo-secador, no qual era seco até atingir o teor de umidade seguro para armazenamento. Foram realizados três testes de secagem, sendo dois com a utilização dos sistemas combinados e um testemunha, com o sistema a altas temperaturas. A temperatura média do ar de secagem foi de 75,3 °C no sistema a altas temperaturas e de 21,4 °C no sistema em baixas temperaturas. A umidade relativa média do ar ambiente durante a realização dos testes de secagem no sistema a baixas temperaturas foi de 46,1%. Os teores de umidade inicial e final do produto foram, respectivamente: 32 e 13 % b.u. para o teste 1, 42 e 14 % b.u. para o teste 2 e 24 e 14% b.u. para o teste 3. Para a avaliação da eficiência energética de secagem dos sistemas, determinaram-se o

consumo de combustível (lenha de *Eucalyptus grandis*) na fornalha e o consumo de energia elétrica dos motores do ventilador, do elevador e da máquina de pré-limpeza, no sistema a altas temperaturas. Já no sistema em baixas temperaturas foi medido o consumo de energia elétrica pelo motor do ventilador. Com base nos resultados obtidos, foi possível observar a maior eficiência energética da secagem com sistemas combinados (5,0 MJ.kg⁻¹ no teste 1 e 3,3 MJ.kg⁻¹ no teste 2) em relação ao sistema de secagem a altas temperaturas (11,2 MJ.kg⁻¹ no teste 3) e concluir que a secagem com sistemas combinados para café é um método viável no que diz respeito ao consumo de energia e à qualidade do produto.

ABSTRACT

FREIRE, André Tessari, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 1998. **Design, construction and evaluation of a combination drying system for washed coffee (*Coffea arabica* L.)**. Advisor: Evandro de Castro Melo. Committee members: Juarez de Sousa e Silva e Pedro Amorim Berbert.

The object of this research work was to adapt the combination of high-temperature and natural-air drying procedures to the drying of *washed* coffee. To this end, a drying system comprised of a paved terrace, an experimental high-temperature drier and a low-temperature drying bin was designed, constructed and evaluated. The first stage of drying was carried out in the paved terrace, where ripe pulped coffee cherries were allowed to dry using solar energy. The second stage of drying was accomplished in the high-temperature drier comprised of two drying sections: the first drying section consisted of a counterflow chamber, whereas the second one consisted of concurrent flow chamber. Subsequently, natural-air drying in a separate bin was used to complement the drying by further reducing the moisture content of the product to safe moisture levels for long-term storage. Three drying tests were carried out: two using the combination drying system, and one, for comparison purposes, was accomplished using the paved terrace and the high-temperature drier alone. The initial and final moisture contents of the product

for tests 1, 2, and 3 were, 32 and 13% w.b., 42 and 14% w.b., 24 and 14% w.b., respectively. Initial moisture content, in this context, corresponds to the moisture content of the product at the beginning of the high-temperature drying process. Specific energy consumption was evaluated during high-temperature drying by considering the amount of fuel (*Eucalyptus grandis*) burned in the indirectly heated furnace, and the electric energy used to power the fan, the bucket elevator and the cleaning equipment. Energy consumption in the low-temperature drying system, however, was evaluated by considering only the electric energy used to power the fan attached to the bin. Energy use during solar drying was not considered for calculations. The results indicated that the combination drying system is more energy-efficient than the high-temperature drier alone: Specific energy consumption for drying tests 1 and 2 were 5.0 and 3.3 MJ kg⁻¹, respectively, whereas, for the high-temperature drying the value obtained was 11.2 MJ kg⁻¹.

1. INTRODUÇÃO

O café foi introduzido no Brasil no início do século XVIII, e, já na quarta década do século XIX, superou o açúcar como o mais importante produto de exportação brasileiro. A partir daí, sempre participou expressivamente da receita cambial brasileira, constituindo, ainda hoje, um importante produto agrícola de exportação.

A produção anual média de café beneficiado no Brasil, na década de 80, foi da ordem de 24,2 milhões de sacas, sendo 31% desse total destinado ao consumo interno e 69% às exportações (CAIXETA, 1989).

Historicamente, o Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador de café no mercado internacional. Entretanto, no ano de 1961, era responsável por 37% das exportações mundiais do produto, enquanto em 1995 respondeu por apenas 20% dessas exportações (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ, 1996). Apesar do decréscimo da exportação brasileira, o Brasil produziu 27 milhões de sacas de café no ano de 1997 (MORICOCCHI et al., 1997).

Próximo de monopolista no mercado internacional no início do século, ao adotar uma política inadequada de sustentação de preços internacionais para o produto, o Brasil perdeu a hegemonia que tinha no mercado. A valorização dos preços do café brasileiro no mercado externo incentivou concorrentes, o que

resultou numa tendência de menor participação do País no mercado mundial (CAIXETA et al., 1989).

Segundo SOUZA (1996), um dos fatores determinantes do declínio brasileiro no mercado internacional foi a falta de um padrão de qualidade do produto nacional. A estratégia brasileira era exportar grandes quantidades para um mercado em que a exigência quanto à qualidade era crescente.

Atualmente, a qualidade continua sendo determinante de preço e fator imprescindível para a aceitação do café no comércio internacional. A diferença está no fato de que o consumo interno, além de estar aumentando, está cada vez mais exigente quanto à qualidade. Portanto, há uma tendência cada vez maior de redução de mercado para cafés de baixa qualidade, ou seja, o produtor brasileiro que visa a obtenção de lucro com a cafeicultura deverá se especializar na produção de café de qualidade superior.

A qualidade do café, que está relacionada com as características dos grãos quanto a cor, aspecto, número de defeitos, aroma e gosto da bebida, depende de vários fatores, destacando-se, dentre eles, os seguintes: a) composição química do grão, determinada por fatores genéticos, culturais e ambientais; b) processo de preparo e conservação do grão, no qual intervém a ação da umidade e da temperatura; e c) torração e preparo da bebida.

O produtor exerce influência mais direta no controle de qualidade na fase de preparo e conservação dos grãos, sendo este também considerado o fator que causa as principais quedas na qualidade do produto, principalmente devido à condução inadequada e à ineficiência das técnicas utilizadas pelos produtores.

O café cereja, quando ainda na árvore, é a matéria-prima ideal para obtenção de um café de fina qualidade e requer cuidado especial no seu preparo, a fim de que sejam preservadas as suas qualidades. Da colheita ao armazenamento, o preparo do café envolve numerosas operações, e de sua execução racional depende a obtenção de um produto que reúna as características de tipo e de qualidade exigidas para a obtenção de um bom produto. A principal característica dos cafés de boa qualidade é a de possuir propriedades organolépticas desejáveis (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

O café, por ser um produto colhido com elevado teor de umidade (em torno de 60% b.u.) no estágio de cereja, requer cuidados especiais, principalmente no processo de secagem. A secagem inicial deve ser processada de forma rápida, para evitar a ocorrência de fermentações. Entretanto, o grão não deve ser demasiadamente aquecido, para evitar o risco do aparecimento de grãos ardidos, da ocorrência de secagem desuniforme e do branqueamento dos grãos, características indesejáveis no café.

Considerando entre 11 e 12% b.u. o teor de umidade ideal para o armazenamento do café, o fruto, colhido no estágio de cereja (45 a 55% b.u.), deve sofrer uma secagem drástica, o que acarreta grande consumo de energia, tempo e mão-de-obra, cujo valor depende do método de secagem utilizado.

A secagem do café é uma das mais importantes operações do processo produtivo, pois, se mal conduzida, pode acarretar grandes prejuízos ao cafeicultor, seja pelo aumento no custo de produção, seja pela queda na qualidade do produto final. Sabe-se que a secagem adequada de café depende, em grande parte, do sistema utilizado. Por ser homogêneo e não apresentar o pericarpo, o café despulpado apresenta melhores condições para secagem que as do café em coco (CASTRO, 1991).

A secagem ao sol, em terreiros, é o método de secagem de café mais comum no Brasil. Este método, apesar de exigir pouco conhecimento técnico, é considerado de risco, pois o produto pode ter sua qualidade reduzida por condições climáticas adversas, além de exigir longo período de secagem, havendo, por conseguinte, atraso na colheita. Nestas circunstâncias, a utilização de secagem artificial em secadores torna-se um fator imprescindível (PINTO FILHO, 1994).

A secagem artificial do café, por sua vez, tem tido grande aceitação, por agilizar a colheita e, principalmente, por independer das condições climáticas. Em contrapartida, o alto custo de instalação, aliado à exigência de algum conhecimento técnico, dificulta a adoção do sistema pelos pequenos produtores, que são responsáveis por grande parte da produção nacional.

Além da secagem convencional, que utiliza secadores mecânicos a altas temperaturas, o café pode ser ainda secado por seca-aeração e secagem combinada

(CORDEIRO, 1982; GUIMARÃES, 1995). O processo de secagem em sistemas combinados consiste em utilizar o sistema a altas temperaturas para promover redução inicial no teor de umidade e, a partir de um determinado ponto, completar a secagem utilizando o sistema a baixas temperaturas.

As principais vantagens esperadas na utilização do sistema combinado são: utilização do secador em altas temperaturas na faixa de umidade em que ele é mais eficiente, ou seja, alto teor de umidade dos grãos; secagem lenta e uniforme do produto durante a etapa de utilização do sistema de baixas temperaturas; menor consumo de energia; menor custo de operação; e melhor qualidade final do produto.

Tendo em vista os fatos descritos anteriormente e a necessidade de estudar sistemas energeticamente mais eficientes, este trabalho teve como objetivos:

- projetar um sistema para secagem combinada de café;
- quantificar a economia de energia que o processo combinado de secagem pode oferecer em relação ao sistema de altas temperaturas; e
- avaliar a qualidade final do produto obtido com a utilização do sistema combinado de secagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Generalidades sobre o café

O cafeeiro (*Coffea arabica*) é uma planta tropical de altitude, adaptada a clima úmido, de temperaturas amenas, condição que prevalece nos altiplanos da Etiópia, região considerada de origem da espécie. Ultimamente tem sido cultivado em aproximadamente 50 países de latitude tropical e é consumido praticamente em todas as nações, especialmente nas zonas temperadas, onde estão localizados os países industrializados. É um produto cuja produção mundial exibe grande polarização, e, visto que na maioria dos países produtores, com exceção do Brasil, o consumo doméstico é muito reduzido, a maior parte da produção é destinada basicamente à exportação. Na atualidade, o café é considerado uma das bebidas mais populares do planeta e proporciona uma renda média de 8 bilhões de dólares ao ano aos países produtores (HERNÁNDES, 1991).

A importância do café na economia brasileira foi estabelecida durante o início do século XIX, quando o produto representava quase 10% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Apesar de ter mantido importância absoluta, em termos relativos o café perdeu com o desenvolvimento de outras atividades; nos anos 30 já representava menos do que 6% do PIB, e na década de 70 não superava 1% (WILLUMSEN e DUTT, 1991).

A formação socioeconômica da Zona da Mata de Minas Gerais aparece vinculada às primeiras plantações de café, por volta de 1830. Com a expansão da cafeicultura, começou na região o processo de industrialização, para atendimento do mercado criado pela economia cafeeira (CAIXETA et al., 1978).

A produção de café exige a utilização intensiva de mão-de-obra, e cerca de 20 milhões de trabalhadores no mundo têm a cafeicultura como fonte de emprego remunerado (HERNÁNDES, 1991).

2.1.1. Qualidade

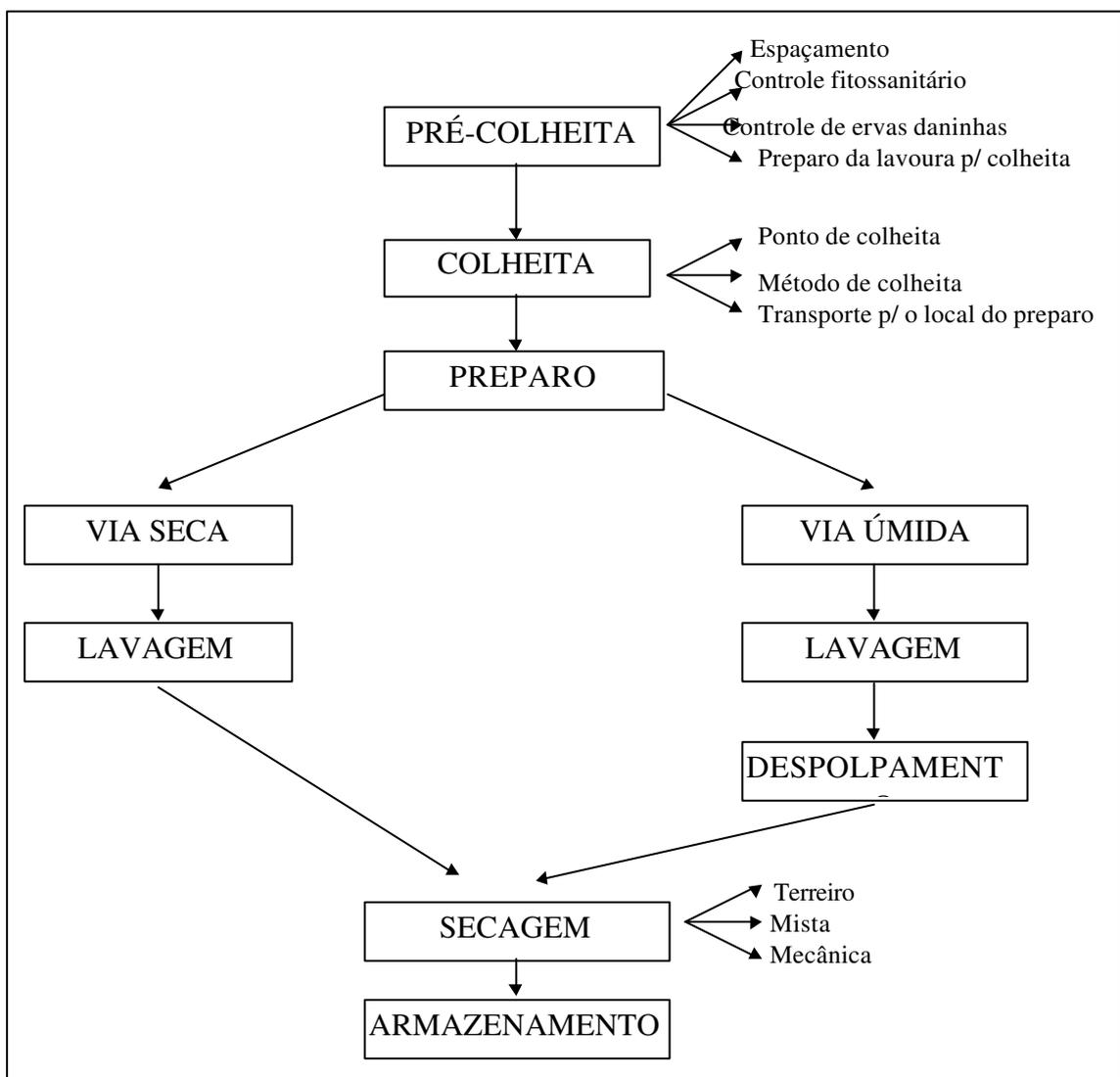
O café é um produto cujo preço está vinculado a parâmetros qualitativos. Partindo do valor obtido por um produto de máxima qualidade, este sofre descontos proporcionais à perda das características desejáveis de tipo e bebida.

A qualidade do café depende principalmente da forma como ele é cultivado, colhido e processado.

A obtenção de um produto de boa qualidade depende de fatores inerentes à planta, como a genética das variedades, e de fatores referentes ao ambiente externo da planta, como: fertilidade do solo, condições climáticas, pragas e doenças. As operações de colheita, preparo, armazenamento e beneficiamento devem ser realizadas de forma a manter a qualidade obtida no campo.

O ataque por microrganismos é extremamente prejudicial à qualidade do grão de café, podendo ocorrer em diversas fases do ciclo produtivo. Entretanto, a adoção de técnicas adequadas de manejo pode minimizar a ação desses microrganismos (Figura 1).

Tem sido intensivamente demonstrado que é obtida bebida de melhor qualidade quando se processa o café cereja. Isto se explica pelo fato de ser o estágio cereja a fase correspondente ao ponto ideal de maturação dos frutos, no qual a casca, polpa e semente se encontram com composição química adequada para proporcionar ao fruto seu máximo de qualidade (CARVALHO e CHALFOUN, 1985).



Fonte: CARVALHO et al., 1997.

Figura 1 - Fases do ciclo de produção do café, com envolvimento de microflora, que podem afetar a qualidade do grão.

É da boa apresentação do produto que depende, em grande parte, a sua colocação no mercado. A classificação do café, portanto, é uma fase muito importante no processo de comercialização.

A classificação pela qualidade analisa os diversos fatores que determinam o seu grau de aceitação, estabelecidos pelo mercado consumidor. Os fatores analisados são os seguintes: fava, peneira, aspecto, cor, seca, preparo, torração e bebida.

Não há dúvida de que a bebida é o fator mais importante na determinação da qualidade. Atualmente, a sua avaliação ainda é feita por degustadores, em função, principalmente, dos sentidos do gosto e do olfato, sendo classificada, da melhor para a pior, como Estritamente Mole, Mole, Apenas Mole, Dura, Riada e Rio (Quadro 1).

A bebida pode apresentar nuances de sabor, podendo ter Moles “muito encorpados”, “encorpados” e “sem corpo”. Pode apresentar ainda leve acidez cítrica ou acidez acética (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

Deve-se considerar, ainda, na apreciação da bebida a possível ocorrência de gostos estranhos, como: de terra, mofo, azedo, chuvado, avinagrado, fermentado, enfumaçado e outros.

Quadro 1 - Classificação oficial de café pela bebida

Classificação	Características
Estritamente Mole	Bebida de sabor suavíssimo e adocicado
Mole	Bebida de sabor suave, acentuado e adocicado
Apenas Mole	Bebida de sabor suave, porém com leve adstringência
Dura	Bebida com sabor adstringente, gosto áspero
Riada	Bebida com leve sabor de iodofórmio ou ácido fênico
Rio	Bebida com sabor forte e desagradável, lembrando iodofórmio ou ácido fênico
Rio Zona	Bebida de sabor e odor intoleráveis ao paladar e ao olfato

Fonte: BÁRTHOLO et al., 1989.

A classificação por tipos admite sete valores decrescentes de 8 a 2, resultantes da apreciação de uma amostra de 300 gramas de café beneficiado. A cada tipo corresponde maior ou menor número de defeitos existentes no café, como grãos pretos, ardidos, verdes, preto-verdes, quebrados, brocados, conchas, chochos, também cocos e marinheiros, e impurezas como cascas, paus, torrões, pedras, etc. O tipo 4 é chamado “Tipo Base”, por corresponder à grande porcentagem dos cafés que aparecem nos lotes para exportação, principalmente no porto de Santos.

2.1.2. Colheita

A colheita deve ser iniciada quando a maior parte dos frutos estiverem maduros e antes que se inicie a sua queda. O período de colheita do café é variável de região para região, em função, principalmente, da altitude, da latitude e das condições climáticas. A pesquisa tem revelado que, quanto mais tempo o café permanecer na árvore ou no chão, maior será a incidência de grãos ardidos e grãos pretos, considerados, juntamente com os verdes, os piores defeitos do café (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

Normalmente o cafeeiro apresenta, na fase de maturação, frutos em diferentes estádios (verdes, cerejas, passas e secos), com diferentes teores de umidades (Quadro 2), devido à característica da planta de produzir várias florações, em intervalos que vão geralmente do final de setembro ao final de novembro (BÁRTHOLO et al., 1989).

2.1.3. Preparo

O preparo do café consiste nas operações que se iniciam com a chegada do produto no terreiro e vão até o armazenamento.

O café pode ser processado de duas formas, por via seca e via úmida. O Brasil é conhecido basicamente como produtor de café “não lavado”, ou seja, a

Quadro 2 - Teores de umidade nos diversos tipos de cafés colhidos

Tipos de Café	Teor de Umidade (% b.u.)
Verde	60 a 70
Cereja	45 a 55
Passa	30 a 40
Coco	20 a 30
Ao ser despulpado	50 a 55

Fonte: BÁRTHOLO et al., 1989

produção de cafés despulpados ainda não é expressiva, embora existam grandes possibilidades, principalmente pelos ágios que podem ser obtidos pela venda de cafés de melhor qualidade em regiões com características de bebida “Rio”. O preparo por via úmida dá origem aos cafés “lavados” ou despulpados, que caracterizam a cafeicultura dos países centro-americanos, do México e da Colômbia. O processamento por via seca inicia-se com a lavagem do café. Nesta operação ocorre a separação dos frutos de acordo com sua densidade. Os frutos verdes e cereja, mais pesados, são separados dos frutos bóias (passas, secos e brocados), que são leves. Por apresentarem tempo de secagem diferente, essas duas frações devem ser secas separadamente, para obtenção de um produto uniforme e de qualidade (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

No processo por via úmida, o café cereja é despulpado depois da lavagem. O despulpamento consiste na retirada da polpa do fruto, com posterior fermentação e lavagem dos grãos (degomagem) despulpados. O café despulpado tem a vantagem de diminuir consideravelmente a área necessária para a secagem em terreiro (redução de 60% no volume) e de reduzir o tempo de secagem, não só

em razão da uniformidade, mas também do teor de umidade inicial mais baixo que o café cereja (BEGAZO, 1979).

CASTRO (1991), estudando o efeito do despulpamento na secagem do café em secador de leito fixo sob alta temperatura, concluiu que o despulpamento proporcionou ao café melhor tipo, menor consumo específico de energia e maior capacidade de secagem, quando comparado ao café seco em coco.

Segundo ANDRADE (1990), a fermentação é o processo natural de solubilização e de digestão da mucilagem por microrganismos presentes no ambiente, e, se for mal conduzida, pode prejudicar a aceitação e o preço do café no mercado.

O tempo ideal de fermentação é muito variável e depende de vários fatores, como a temperatura ambiente, a profundidade e higiene dos tanques, o estado de maturação da cereja, a qualidade da água utilizada, o tempo transcorrido entre o corte e a operação de despulpamento, etc. Normalmente o tempo para uma boa fermentação varia entre 15 e 20 horas.

Os cafés despulpados, quando bem preparados, apresentam invariavelmente, na classificação qualitativa, bebida suave, mole ou estritamente mole, seja qual for a região de produção (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

A secagem é uma das etapas mais importantes no processamento de café, devido ao grande consumo de energia que demanda e à sua influência na qualidade final do produto. Pode ser executada por meio de vários métodos, e sua escolha depende de características como: tamanho e finalidade da produção, condições climáticas da região, nível tecnológico e poder aquisitivo do produtor.

2.1.4. Armazenamento

Depois da secagem, o café deve ser armazenado em locais adequados, de forma que não sofra alterações de qualidade.

O café geralmente é acondicionado em sacos de juta novos, com capacidade para 60 kg. Na entressafra, estes sacos são armazenados, sendo

empilhados de acordo com sua origem. Os armazéns devem ser limpos, abrigados do sol e da chuva e bem ventilados. A utilização de sacos de juta é vantajosa, por serem resistentes e por facilitarem a vedação de aberturas feitas por ocasião da retirada de amostras. Devido ao grande volume a ser armazenado e ao elevado custo da operação de armazenamento, o café pode também ser armazenado a granel, em silos ou tulhas, com a desvantagem da possibilidade de ocorrência de modificações físicas (teor de umidade, peso específico, cor, etc.) e químicas (alterações dos teores de ácidos graxos livres e da acidez), principalmente nas camadas superiores (CARVALHO et al., 1997).

2.1.5. Beneficiamento

O beneficiamento é uma operação pós-colheita que transforma, pela eliminação das cascas e separação dos grãos, o fruto seco (coco ou pergaminho) em grãos de café. É uma operação que deve ser realizada o mais próximo possível da época de comercialização do café, para que o produto possa manter sua cor original (INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ, 1985).

2.2. Secagem de café

A secagem, de forma geral, é o processo mais econômico para manter a qualidade dos produtos agropecuários armazenados (MEYER et al., 1978).

Segundo MEYER et al. (1978), a secagem consiste na remoção de grande parte da água inicial que os produtos agrícolas apresentam depois do amadurecimento fisiológico. O teor final de umidade desejado é o valor máximo com o qual o produto pode ser armazenado por períodos predeterminados, à temperatura ambiente, sem que ocorra sua deterioração.

O café recém-colhido, por ser um produto que apresenta certas peculiaridades, como alto teor de umidade, aproximadamente 60% b.u., e desuniformidade em relação à maturação, difere dos demais grãos cultivados em larga escala, necessitando, portanto, de um método de secagem específico.

OSÓRIO et al. (1983) afirmam que, de acordo com os aspectos tecnológicos envolvidos, são utilizados no Brasil basicamente dois métodos para secagem de café:

- a) Secagem em terreiros: esparrama-se o produto em pisos, que podem ser de cimento, de tijolo, de chão batido ou de asfalto. Este método é o mais utilizado, principalmente pelos pequenos e médios produtores.
- b) Secagem em secadores mecânicos: força-se o ar aquecido por meio da massa de grãos. Devido ao elevado custo, é acessível apenas para grandes cafeicultores.

A secagem em terreiro é um método bastante tradicional, utilizado desde o início da cafeicultura. Apresenta problemas específicos, como a dependência dos fatores climáticos e a necessidade de mão-de-obra e de grandes áreas planas para a construção de terreiros. Já a secagem em secadores mecânicos é mais recente e possui problemas, como o fato de a maioria dos secadores utilizados serem adaptações de modelos projetados para outros grãos, resultando em uma baixa eficiência quando utilizados para secar café.

O teor de umidade do café recém-colhido varia de acordo com o estado de maturação. Todavia, quanto mais homogênea ou uniforme for a matéria-prima, melhor será a secagem e melhores serão as possibilidades de obtenção de um café de qualidade.

No Brasil, a colheita do café é geralmente realizada pelo método da derriça manual, em que todos os frutos são retirados da planta, o que resulta em um produto heterogêneo em relação à maturação e ao teor de umidade. No entanto, a homogeneização do teor de umidade dos grãos pode ser conseguida com uma secagem lenta ou parcelada (RIGITANO et al., 1964).

Segundo SILVA (1991), a dificuldade de escoamento que o café apresenta no início da secagem inviabiliza a utilização de secadores dotados de dispositivos normais de transporte de grãos. O processo mais utilizado atualmente consiste na realização de uma pré-secagem em terreiros, para posterior utilização de secadores mecânicos.

GITIMU (1995) afirma que a secagem do café ao sol é bastante recomendada, tendo um efeito positivo na qualidade, e que alguns cuidados especiais devem ser tomados, de acordo com os estágios da secagem: a) de 44 a 33% b.u., para evitar rachaduras no pergaminho, a secagem deve ocorrer de forma lenta; para isso, deve-se cobrir o café durante as horas mais quentes do dia; b) de 32 a 22% b.u., a cor final do grão é formada; por isso, é recomendado que o café fique exposto à luz solar por um período não menor que dois dias, para melhorar a qualidade da cor; a secagem mecânica não deve ser usada nesse estágio; e c) de 21 a 12% b.u., o café pode ser seco mais rapidamente sem prejuízo na qualidade, inclusive com a utilização de secadores.

VASCONCELOS et al. (1992), estudando o efeito do processo de secagem na qualidade fisiológica de sementes de café (*Coffea arabica* L.), utilizaram a secagem com ventilação natural, ao sol e à sombra, e a secagem com ventilação forçada em secadores de coluna a temperaturas de 35, 40 e 45 °C, até atingirem teor de umidade de 15, 25 e 35% b.u., não encontrando efeito significativo do processo de secagem sob a qualidade fisiológica da semente para essas condições.

A secagem do café pelo ar quente será tanto mais perfeita quanto menor a temperatura, pois é sabido que, quanto mais lenta a secagem, mais uniforme é o produto (TOSELLO, 1946).

2.3. Sistemas de secagem

O processo de secagem pode ser classificado em dois sistemas: secagem natural e secagem artificial. A secagem natural é caracterizada pela secagem do produto no campo, sem a interferência do homem; e a secagem artificial caracteriza-se pela utilização de processos manuais ou mecânicos na secagem, podendo utilizar ventilação natural ou forçada, por meio de ventiladores. Como exemplo de secagem artificial com ventilação natural tem-se a secagem em terreiros, em secadores solares rotativos, entre outros. Já a secagem com ventilação forçada é classificada, de acordo com o aquecimento ou não do ar de

secagem, em: secagem com ar natural não-aquecido; secagem com baixa temperatura, em que o ar é aquecido até 10 °C acima da temperatura ambiente; secagem com alta temperatura, em que o ar é aquecido até mais de 10 °C acima da temperatura ambiente; sistemas combinados, em que se utilizam dois métodos, ou seja, alta e baixa temperatura; e, ainda, seca-aeração e sistemas modificados.

A escolha de um desses métodos depende de diversos fatores, entre eles do nível de instrução tecnológica do produtor, do seu poder aquisitivo, do volume de produção, da velocidade de colheita e do fim a que se destinam os grãos (DALPASQUALE, 1983).

2.3.1. Secagem artificial com ar natural

Este sistema difere daquele de secagem natural simplesmente pelo fato de o produto ser retirado da planta e depositado em locais próprios para esse tipo de secagem, denominados terreiros. A energia utilizada para a remoção da umidade é proveniente da radiação solar e entalpia do ar. No Brasil, os produtos de maior expressividade que se utilizam desse método de secagem são o café e o cacau.

A secagem em terreiros apresenta a desvantagem da dependência dos fatores climáticos, que, quando desfavoráveis, retardam o processo, propiciando a infecção do produto por microrganismos, os quais promovem a deterioração do mesmo.

No Brasil ainda é predominante a secagem de café em terreiros, os quais podem ser construídos de cimento, tijolos ou, ainda, chão batido. Isto se deve, principalmente, à não-preocupação com características qualitativas do produto depois da secagem, bem como ao baixo nível técnico e ao baixo poder aquisitivo dos produtores (PINTO FILHO, 1994).

Nos primeiros dias da secagem, o café é esparramado no terreiro, em camadas finas, sendo revolvido freqüentemente nos dois sentidos e enleirado no sentido das águas à tarde. À medida que vai secando, pode ser esparramado em camadas mais espessas, amontoando-se à noite e cobrindo-se com encerado. A partir da meia seca, o café completará sua secagem em montes, onde se

estabelecerá o equilíbrio entre a umidade interna e externa do grão e dos grãos entre si. Para tanto, diariamente, o café deve ser revirado por duas ou três horas de sol e, a seguir, amontoado e coberto.

2.3.2. Secagem a altas temperaturas

A secagem, por este processo, 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. Depois de ter permanecido em contato com o produto, o ar sai do secador com uma temperatura menor e uma umidade relativa mais elevada (TOSELLO, 1946).

SILVA et al. (1992) afirmam que, em grandes propriedades, a secagem artificial com temperaturas elevadas é uma opção que tem dado bons resultados. O uso desses secadores, entretanto, tem ficado restrito às regiões de maior desenvolvimento agrícola, visto que o investimento inicial nesses equipamentos é proibitivo para pequenos e médios produtores rurais. Os secadores de leito fixo, os secadores de coluna e os secadores de fluxos cruzados são os modelos que se adaptaram melhor à maior parte das condições brasileiras.

Até recentemente, o consumo de energia e o rendimento de um secador eram os parâmetros a que se dava maior ênfase na escolha do sistema. Dessa forma, muitos trabalhos foram feitos com os objetivos únicos de conservação e racionalização de energia (CORDEIRO, 1982). Atualmente, além dessa preocupação, os efeitos dos secadores e métodos de secagem de grãos sobre a qualidade do produto têm sido assunto de importância entre os pesquisadores, processadores e fabricantes de equipamentos.

Os parâmetros que afetam a taxa de secagem e o desempenho de secadores são: a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente, a temperatura e a vazão do ar de secagem, as propriedades físicas do produto, os teores de umidade 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 (SILVA et al., 1992).

O custo da energia utilizada na secagem depende da temperatura de secagem, do fluxo de ar, do tempo de secagem e do preço do combustível. Como o café é um dos produtos agrícolas que requer grande tempo de secagem, devido ao seu elevado teor de umidade, isto significa que o consumo de energia por unidade de produto seco é bastante elevado (CASTRO, 1991).

Segundo DOUGLAS et al. (1992), o controle da umidade do grão durante a secagem é importante, pois é um fator que está diretamente relacionado com a viabilidade econômica do sistema. Se a umidade do grão não estiver dentro das especificações, ele não poderá ser bem armazenado e não fornecerá as propriedades nutricionais esperadas.

Para a 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 há tendência da temperatura da massa de grãos em se igualar à temperatura do ar de secagem. Esta tendência é causada pela dificuldade de migração da umidade das camadas mais internas para a periferia dos grãos.

Segundo CORDEIRO (1982), a temperatura máxima que o café pode suportar é 70 °C. Temperaturas mais elevadas são prejudiciais ao produto, uma vez que muitos grãos ficam supersecos, enquanto outra parte não atinge o teor de umidade ideal, tornando a uniformização durante o processo de torrefação muito difícil.

RIGITANO et al. (1963) afirmam que a secagem de café a alta temperatura (100 °C) apresenta o risco de conferir gosto de óleo à bebida, quando o produto é armazenado durante longos períodos.

No secador de leito fixo, o ar de secagem movimentar-se da camada inferior para a superfície da massa de grãos. A troca de umidade entre o ar e o grão ocorre numa região denominada zona de secagem. Durante a secagem, desenvolvem-se dois gradientes: um de umidade e outro de temperatura, estabelecidos entre as camadas inferior e superior da massa de grãos (BROOKER et al., 1974).

LACERDA FILHO (1986), trabalhando com secagem de café em secador de leito fixo e utilizando temperatura do ar de secagem de 55 °C, concluiu que não houve comprometimento da bebida, sendo esta superior à do produto seco em terreiro com qualquer tipo de piso.

Nos secadores de fluxos cruzados, o ar de secagem atravessa a camada de grãos perpendicularmente ao sentido de seu deslocamento. PINTO FILHO (1994) desenvolveu e avaliou um protótipo de secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para a secagem do café em coco, com teores de umidade inicial de 26,2% e final de 14,7% b.u., tendo obtido consumo de energia de 17.171, 10.656 e 9.197 kJ por kg de água evaporada para as temperaturas de secagem de 60, 70 e 90 °C, respectivamente.

VIERA (1994) estudou a secagem intermitente de café em secadores de fluxos cruzados e em secador experimental de camada fixa, observando menor tempo de secagem no secador experimental de camada fixa, em relação aos secadores comerciais de fluxos cruzados.

Nos secadores de fluxos contracorrentes, o fluxo de ar atravessa a camada de grãos em sentido contrário ao de fluxo de grãos. Nestes secadores, à medida que a massa de grãos vai descendo, a sua temperatura é aumentada, atingindo valores muito próximos aos da temperatura do ar de secagem. Por isso, as temperaturas de secagem, neste tipo de secador, não devem ser muito elevadas.

SILVA (1991), com o objetivo de promover a adaptação da tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes à realidade brasileira, propôs um modelo de secador a ser utilizado na secagem de café. Na avaliação do modelo, reduziu o teor de umidade do café em coco de 30% b.u. para 12% b.u., utilizando temperaturas de secagem de 60, 80 e 100°C, obtendo consumo específico de energia de 8.300, 7.547 e 6.442 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. O autor constatou que, ao se aumentar a temperatura do ar de secagem de 60 para 100°C, reduzia-se o tempo de secagem em 53% e o consumo específico de energia em 23% e a capacidade de secagem aumentava em 111%. O autor recomendou, portanto, utilizar a temperatura de 100°C, em razão do menor período de tempo, do menor

consumo de combustível e da não-constatação de efeitos prejudiciais na qualidade final do produto.

Nos secadores de fluxos concorrentes, o ar aquecido encontra o grão frio e úmido e fluem ambos na mesma direção e sentido, através da câmara de secagem. As trocas simultâneas de energia e massa na entrada do secador, entre o ar e o produto, possibilitam a utilização de temperaturas elevadas do ar de secagem neste tipo de secador, pois a temperatura do produto permanece consideravelmente abaixo da temperatura do ar (SILVA et al., 1992).

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

LACERDA FILHO (1986) trabalhou com a secagem intermitente, em fluxos concorrentes, utilizando café de meia seca e temperatura de secagem de 90°C. Os resultados obtidos confirmaram a maior eficiência energética dos secadores de fluxos concorrentes, quando comparados a outros secadores, sem causar prejuízo da qualidade da bebida.

PINTO (1993) projetou e avaliou o desempenho de um secador 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 do teor de umidade 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.

2.3.3. Secagem a baixas temperaturas

Denomina-se processo de secagem a baixas temperaturas aquele que utiliza ar nas condições ambientais, ou aquecido de 3 a 5 °C e forçado por um ventilador, como meio de transporte de umidade e energia. Esses processos são energeticamente eficientes e o produto final é de boa qualidade. Podem ser empregados para pequenas ou grandes produções e têm como pontos limitantes as condições ambientes e a velocidade de colheita do produto (DALPASQUALE, 1984). Segundo MEYER et al. (1978), a secagem com ar natural ou levemente aquecido é um dos sistemas mais atraentes, pelo baixo custo de investimento e operação e pela ótima qualidade dos produtos assim secados.

De acordo com LYNCH e MOREY (1989), o calor do motor do ventilador e o atrito das pás com o ar provocam pequeno incremento na temperatura do ar de secagem (1 a 2 °C) e, conseqüentemente, aumento em sua capacidade de absorver umidade, aumentando, dessa forma, a eficiência do combustível.

A maioria dos produtos agrícolas podem ser secados nos centros produtores do Brasil, com ar natural ou aquecido até 10 °C acima da temperatura ambiente. Essa opção de secagem é válida quando se dispõe de tempo suficiente para a secagem e quando se utilizam vazões apropriadas de ar. A quantidade de energia gasta pelos ventiladores é sempre significativamente menor que a energia térmica utilizada na evaporação da água dos produtos.

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

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

Os fatores mais importantes a serem observados na secagem com ar natural são as condições psicrométricas do ar ambiente. O Brasil, na maior parte de seu território, apresenta um clima tipicamente tropical. Os elevados valores de umidade relativa média do ar, característicos neste tipo de clima, dificultam grandemente a utilização de secagem de grãos com ar natural, em razão de seu baixo potencial de secagem. Entretanto, esse problema pode ser contornado por meio de estudos visando à otimização da vazão específica de ar necessária e do melhor intervalo de tempo de trabalho do ventilador durante o dia, para diferentes produtos e localidades.

Para utilização desse método, a umidade inicial do produto não deve ser muito elevada, sendo recomendada a faixa de 18 a 20% b.u. Caso não se consiga colher o produto com um teor de umidade adequado, é preciso que se faça uma secagem parcial rápida para, daí então, utilizar a secagem com ar natural. A configuração de dois métodos de secagem é conhecida como secagem em combinação (DALPASQUALE, 1983).

WILCKE et al. (1993) afirmam que muitos produtores na região norte do cinturão do milho americano preferem a secagem com ar ambiente à secagem a altas temperaturas, devido a fatores como menor necessidade de equipamentos e menos trabalho e gerenciamento requeridos durante a safra, sendo a qualidade final do grão melhor. Os mesmos autores recomendam, para o milho, a utilização de fluxos de ar de 0,6 a 2,2 m³/min.t, para alturas da camada de grãos de 4,3 a 5,5m.

Atualmente, no Brasil, o sistema de secagem de grãos em baixas temperaturas tem sido utilizado, em alguns casos, para secagem de sementes. A aplicação deste sistema nas fazendas, para secagem de grãos industriais, é ainda relativamente desprezível, comparada com os processos tradicionais de secagem natural no campo e secagem em terreiros e em secadores de altas temperaturas (SILVA, 1993).

CAMARGO e KASTRUP (1981), estudando a secagem a baixas temperaturas em substituição ao processo de secagem tradicional a altas temperaturas, nas unidades da Central de Armazenagem de Grãos do Estado de São Paulo (CEAGESP), concluíram que se trata de um processo muito econômico.

Além de reduzir os custos operacionais e o consumo de combustível, conserva os grãos armazenados em perfeitas condições, com umidade acima do limite de 13% b.u.

RUMSEY e THOMPSON (1984) secaram noz inglesa de 25 até 8% b.u., utilizando ar ambiente insuflado por ventilador, e encontraram uma economia de até 90% no custo por tonelada, em comparação ao sistema de camada fixa em altas temperaturas.

Muitas pesquisas têm sido feitas com sistemas de secagem a baixas temperaturas, e as atenções estão voltadas para os projetos e o desempenho de diferentes combinações e tamanhos dos equipamentos. Menos esforços têm sido aplicados na definição do melhor gerenciamento dos procedimentos disponíveis (GOLLIVER et al., 1983).

Nos anos recentes, nos Estados Unidos, o custo de secagem em secadores que utilizam ar ambiente teve aumento relativo em comparação ao custo de secagem em secadores de altas temperaturas. Uma razão para essa mudança no custo relativo foram os melhoramentos realizados nos secadores de altas temperaturas, que promoveram incremento em suas eficiências energéticas. Outra razão foi o aumento do preço da eletricidade (principal energia consumida na secagem com ar ambiente) em relação ao preço do gás natural (principal combustível utilizado na secagem a altas temperaturas nos EUA). Portanto, são necessários estudos para reduzir a energia usada na secagem com ar natural, visando manter o seu custo no mesmo patamar que os outros métodos de secagem (WILCKE et al., 1993).

2.3.4. Secagem em sistemas combinados

Para aumentar a eficiência de processos de secagem, pode-se promover a combinação de sistemas, incorporando a secagem em silos com ar ambiente aos

sistemas a altas temperaturas. Esse método envolve a secagem parcial em secadores convencionais de altas temperaturas, com posterior transferência do grão para um processo lento de retirada de umidade. O resultado é uma melhora na qualidade do produto, um aumento na capacidade do secador e uma redução na quantidade de combustível consumido. O sistema a altas temperaturas é utilizado para reduzir a umidade do produto até um teor seguro para secagem em silo, com o uso de pequeno suplemento de energia no ar de secagem (MCKENZIE, 1976).

Segundo GUIMARÃES (1995), com a adoção da secagem combinada, utiliza-se o secador em altas temperaturas para secagem do produto na faixa de umidade na qual ele é mais eficiente. Com isso, reduz-se substancialmente o consumo de energia e aumenta-se a segurança do processo de secagem com baixa temperatura, por meio da redução do teor de umidade inicial.

A secagem combinada foi desenvolvida na década de 70 para o milho, nos Estados Unidos, com a finalidade de melhorar a eficiência energética e as características qualitativas do grão e aumentar a capacidade dos sistemas de secagem a altas temperaturas.

Conforme CLOUD e MOREY (1980), na secagem combinada de milho, os grãos são descarregados quentes no silo armazenador equipado com adequado sistema de ventilação. O término da secagem e o armazenamento ocorrem de forma simultânea no mesmo silo, de forma que, depois de completada a secagem, o produto pode ser comercializado ou permanecer armazenado neste silo. A capacidade do secador aumenta de 20 a 40% quando a secagem combinada é praticada.

A etapa a baixa temperatura pode ser iniciada para o milho com teores de umidade que variam de 18 a 23% b.u. e pode demorar de dois dias a dois meses, dependendo do fluxo e da temperatura do ar insuflado na massa de grãos (BAKKER-ARKEMA, 1984).

GUIMARÃES (1995) realizou seis testes de secagem combinada para café, sendo cinco com café cereja e um com café descascado. Concluiu que a secagem de café cereja com ar ambiente deve ser iniciada quando o teor de umidade do produto estiver em torno de 20% b.u. Já para o café descascado, a

secagem com ar ambiente pode ser iniciada com um teor de umidade bem superior ao indicado para o café cereja, pois, com a remoção da casca, rica em açúcares, diminui-se o risco do desenvolvimento de fungos, e o café descascado apresenta taxa de secagem superior à do café cereja.

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 da 40% b.u.. Portanto, no sistema de secagem combinada de café, anterior à etapa de secagem a altas temperaturas, deve-se executar uma pré-secagem em terreiros, em secadores de leito fixo ou rotativos (LACERDA FILHO, 1986).

Teixeira et al., citados por CASTRO (1991), estudaram o desempenho de vários secadores mecânicos e concluíram que o café que sofreu pré-secagem em secador de leito fixo ou em terreiro apresentou, na maioria dos casos, uma melhor qualidade do produto.

Embora a seca-aeração apresente vantagens sobre o sistema de secagem combinada, relativas à economia de energia e capacidade, a eliminação do manuseio extra freqüentemente requerido na seca-aeração faz da secagem combinada uma opção factível, por produzir menores danos aos grãos (CLOUD e MOREY, 1980).

3. MATERIAL E MÉTODOS

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

O produto utilizado foi o café (*Coffea arabica* L.) despulpado, da variedade Catuaí, procedente da fazenda Gravatá, situada no município de Ponte Nova, Minas Gerais. A colheita do produto foi realizada manualmente, pelo sistema de derriça no pano, com um teor de umidade de, aproximadamente, 60% b.u. Em seguida procedeu-se à lavagem, ao descascamento, à fermentação e à degomagem do produto, caracterizando-o, assim, como café despulpado.

O café despulpado foi submetido a uma pré-secagem, em terreiro, até atingir o teor de umidade no intervalo de 30 a 40% b.u., sendo esta a faixa de teor de umidade inicial para a realização dos testes.

Depois da pré-secagem em terreiro, o café passou por uma secagem intermediária em um secador experimental intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes. Em seguida, o produto foi transportado para silos-secadores de alvenaria, onde foi realizada a secagem complementar com ar a baixas temperaturas (Figura 2).

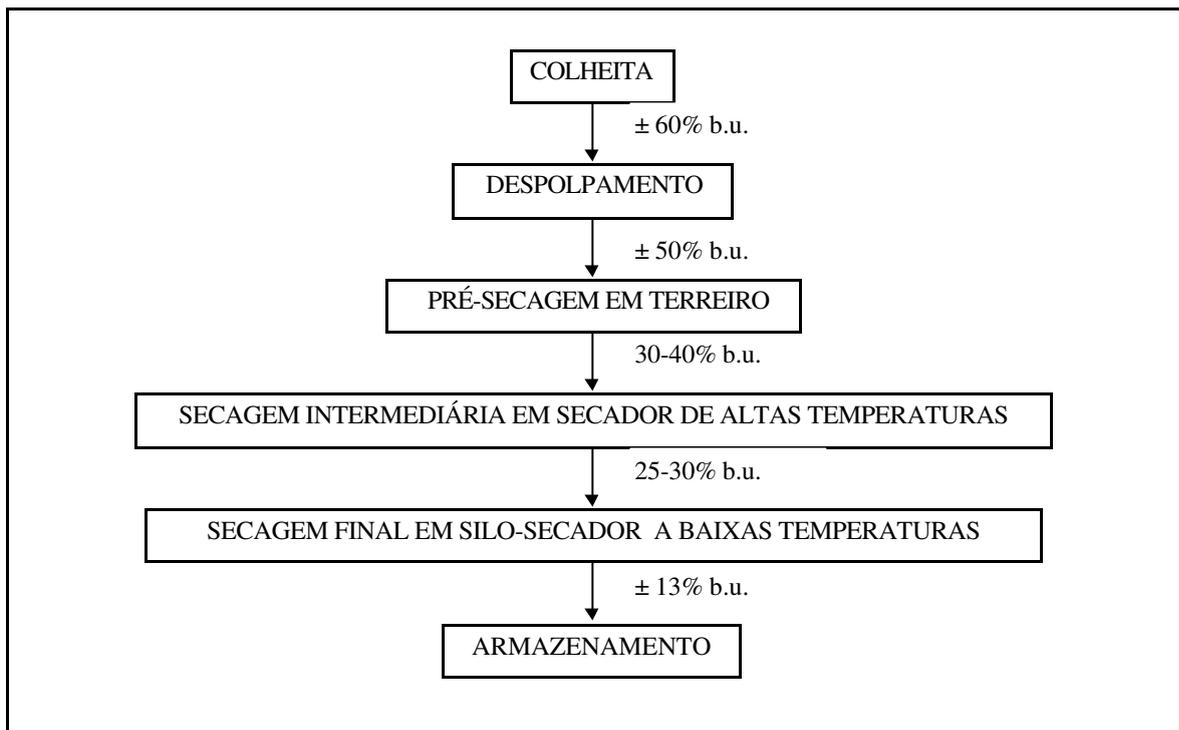
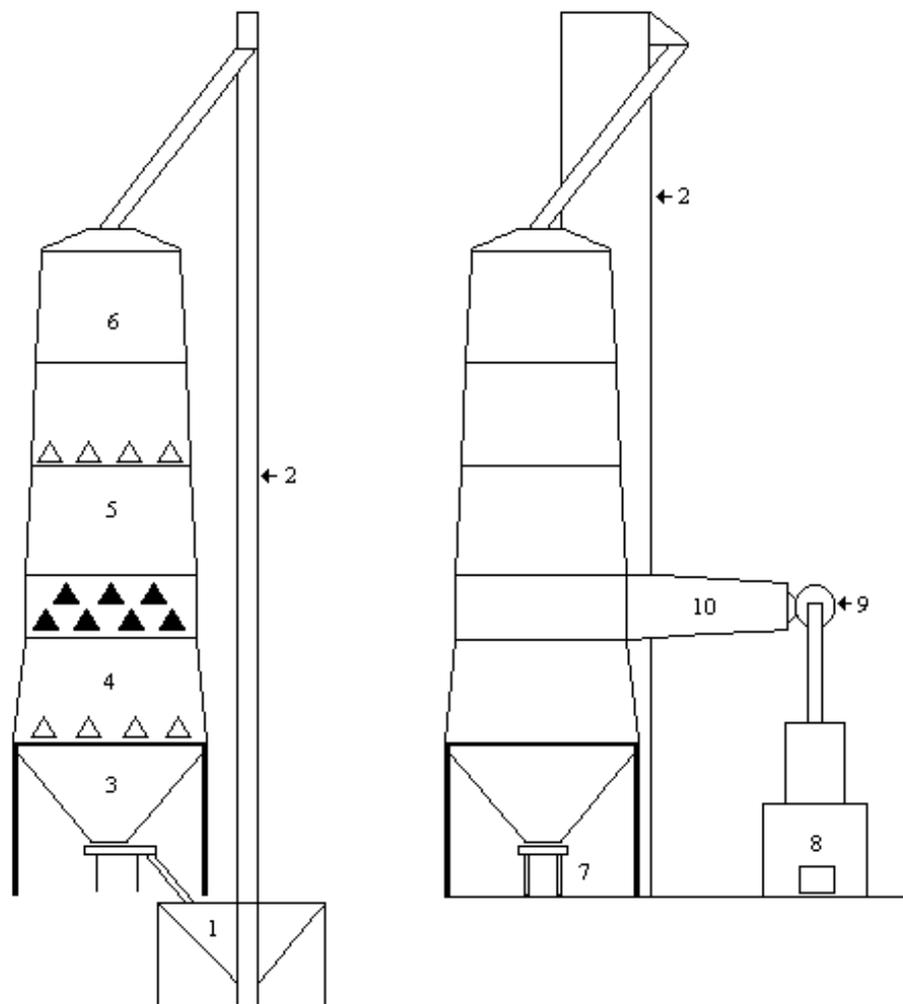


Figura 2 - Fluxograma do sistema combinado de secagem proposto.

3.1. Secador de altas temperaturas

O secador experimental utilizado possui uma seção transversal de $2,0 \text{ m}^2$ e uma capacidade estática de $7,3 \text{ m}^3$ (Figura 3). Com altura de 6 m e largura média de 1,3 m, caracteriza-se como um secador vertical, composto basicamente por uma entrada de ar central, onde está acoplado o ventilador, e dois pontos de exaustão, um superior e outro inferior, relativos àquela entrada do ar. Este secador foi modificado em relação ao projeto original proposto por PINTO (1993), no que diz respeito à inclinação de suas paredes, ou seja, elas foram construídas com um ângulo de 2,86 graus em relação à vertical, para facilitar o escoamento de produto no interior do secador, além de apresentar volume menor em relação ao original (11 m^3).



- 1 - Moega de recepção
- 2 - Elevador de canecas
- 3 - Câmara de descanso inferior
- 4 - Câmara de secagem concorrente
- 5 - Câmara de secagem contracorrente

- 6 - Câmara de descanso superior
- 7 - Pré-limpeza
- 8 - Fornalha de fogo indireto
- 9 - Ventilador
- 10 - Difusor de ar

Figura 3 - Vistas lateral e frontal do secador de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes.

De acordo com a Figura 3, o produto passa, primeiramente, por uma câmara de secagem de fluxos contracorrentes (1,8 m³) e, posteriormente, por uma câmara de secagem de fluxos concorrentes (2,1m³). Na parte superior do secador, acima da zona de fluxo contracorrente, existe uma câmara de descanso (2,4 m³). O restante do produto (1,0 m³) fica na moega de descarga do silo, que também funciona como uma câmara de descanso. As câmaras de descanso, tanto a superior como a inferior, possuem a finalidade de fornecer resistência ao fluxo de ar, para que o mesmo tenha uma distribuição homogênea nas câmaras de secagem. A câmara de descanso superior possui ainda a finalidade de homogeneizar o teor de umidade da massa de grãos, e a inferior, de favorecer a movimentação homogênea da massa.

O ventilador utilizado para succionar o ar aquecido da fornalha e insuflá-lo através da massa de grãos é do tipo centrífugo de pás retas, acionado por um motor elétrico de 3 cv a 1.750 rpm.

A fornalha utilizada para aquecer o ar de secagem é do tipo fogo indireto, e o combustível utilizado, a lenha de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).

3.2. Silo-secador

Para a realização da etapa final de secagem construíram-se dois silos-secadores em alvenaria (Figura 4), com diâmetro de 2,26 m, altura de 2,35 m e capacidade estática individual para 8,0 m³ de produto. Os silos são equipados com pisos em chapa perfurada, com perfuração de 21% da área, e uma porta lateral, para descarga do produto.

O ar ambiente foi insuflado no silo-secador por meio de um ventilador centrífugo de pás retas, acionado por um motor elétrico de 1 cv a 1.730 rpm.

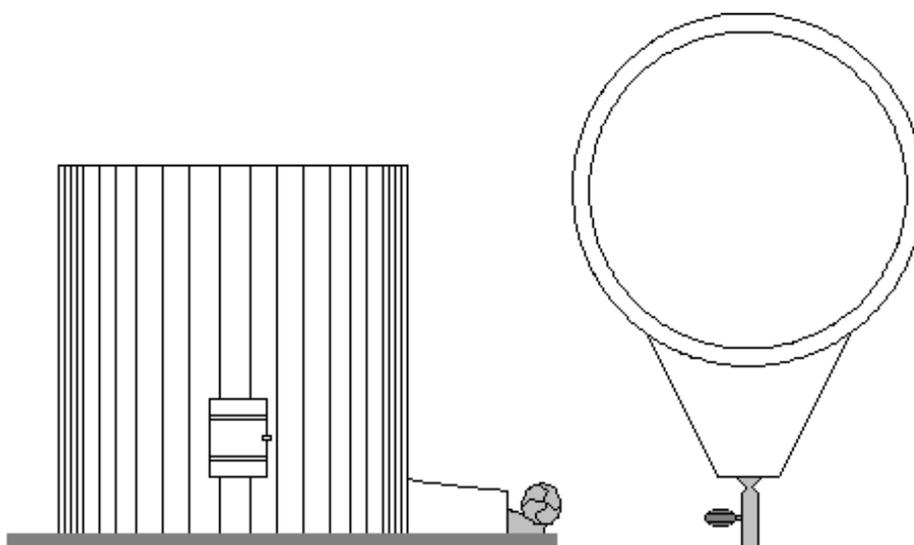


Figura 4 - Vista frontal e superior do silo utilizado nos testes de secagem com ar a baixas temperaturas.

3.3. Testes experimentais

Foram realizados três testes de secagem durante os meses de junho e julho de 1997, sendo dois utilizando o sistema combinado e um, testemunha, utilizando apenas o secador de fluxos contracorrentes/concorrentes.

Nos dois primeiros testes, iniciados dias 10 e 23 de junho, respectivamente, o café despulpado e pré-secado em terreiro passou por uma secagem intermediária no secador de fluxos contracorrentes/concorrentes à temperatura média de 75,7 °C (PINTO, 1993), até atingir os teores de umidade de 25,5 e 31% b.u., preestabelecidos com base em GUIMARÃES (1995). Os testes com este secador foram conduzidos de tal forma que a temperatura do ar em contato com o produto não superasse 40°C. Depois, o produto foi transportado para silos-secadores, onde se realizou a secagem complementar com insuflação de ar ambiente, até atingir, aproximadamente, 13% b.u. Para aproveitar os períodos em que o ar ambiente apresentava maior potencial de secagem, o ventilador operou diariamente das 9 às 17 horas, até o final da secagem.

No terceiro teste, que foi o da testemunha, utilizou-se apenas o secador de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, que recebia o produto despolpado e pré-secado diretamente do terreiro. A temperatura média de secagem foi de 74,5°C, e o teor de umidade final do produto, igual a 13% b.u.

3.3.1. Temperaturas do ar

As medições das temperaturas do ar de secagem, do ar na massa de grãos e do ar de exaustão no secador de fluxos contracorrentes/concorrentes, bem como do ar na massa de grãos no silo-secador, foram realizadas em intervalos de 15 minutos, usando termopares acoplados a um sistema automático de aquisição de dados, da marca Fluke, modelo Hydra 2625A.

No secador de fluxos contracorrentes/concorrentes, para a medição da temperatura do ar na massa de grãos, um cabo de aço foi posicionado verticalmente em seu interior, no qual foram fixados cinco termopares em intervalos de 1 m, originando os pontos de medição 1, 2, 3, 4 e 5 (Figura 5). Também foram registradas a temperatura do ar de secagem antes de entrar na massa de grãos (ponto 6, Figura 5) e as temperaturas de bulbo seco (pontos 7 e 8, Figura 5) e molhado (ponto 8, Figura 5) do ar de exaustão.

As temperaturas do ar na massa de grãos no interior do silo-secador foram registradas em oito pontos, sendo dois por altura, a cada 0,45 m a partir de 0,05 m acima da chapa perfurada que compõe o fundo do silo (Figura 6). Apenas um silo foi instrumentalizado com termopares, devido ao número reduzido de entradas do sistema automático de aquisição de dados.

As condições ambientais (temperatura e umidade relativa) foram medidas e registradas por um termoigrógrafo, da marca Hidrologia, modelo THG-1, durante todo o período do experimento.

A temperatura do ar ambiente também foi medida durante o período de secagem, a cada intervalo de 15 minutos, usando um termopar fixado em local próximo ao silo e ao secador.

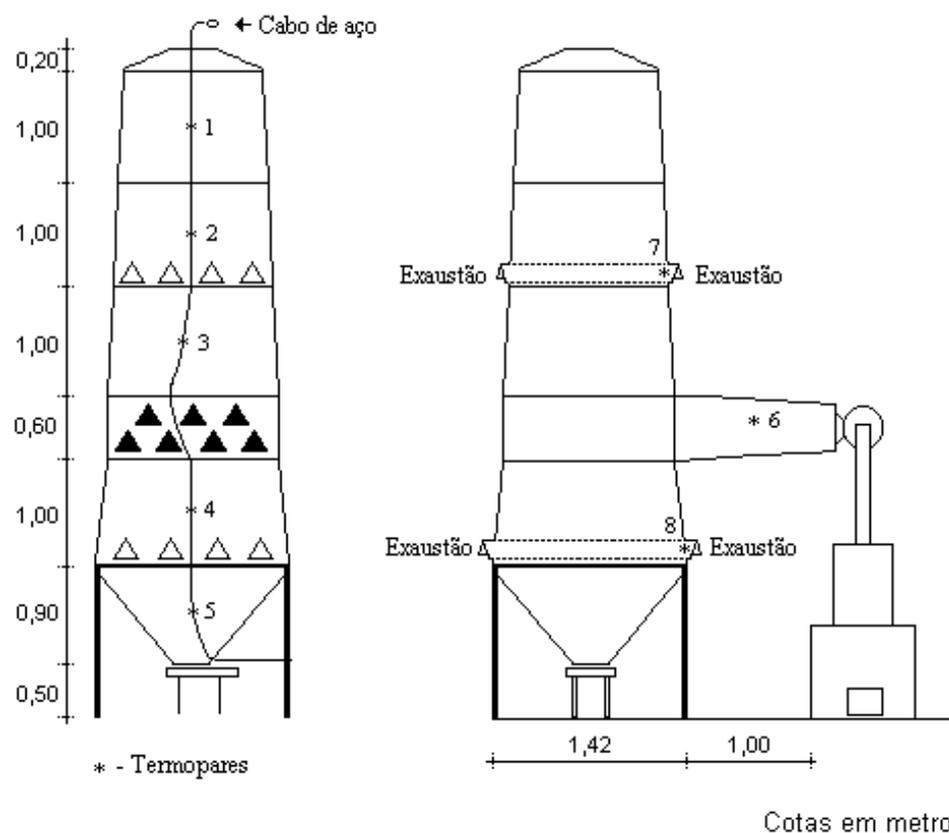
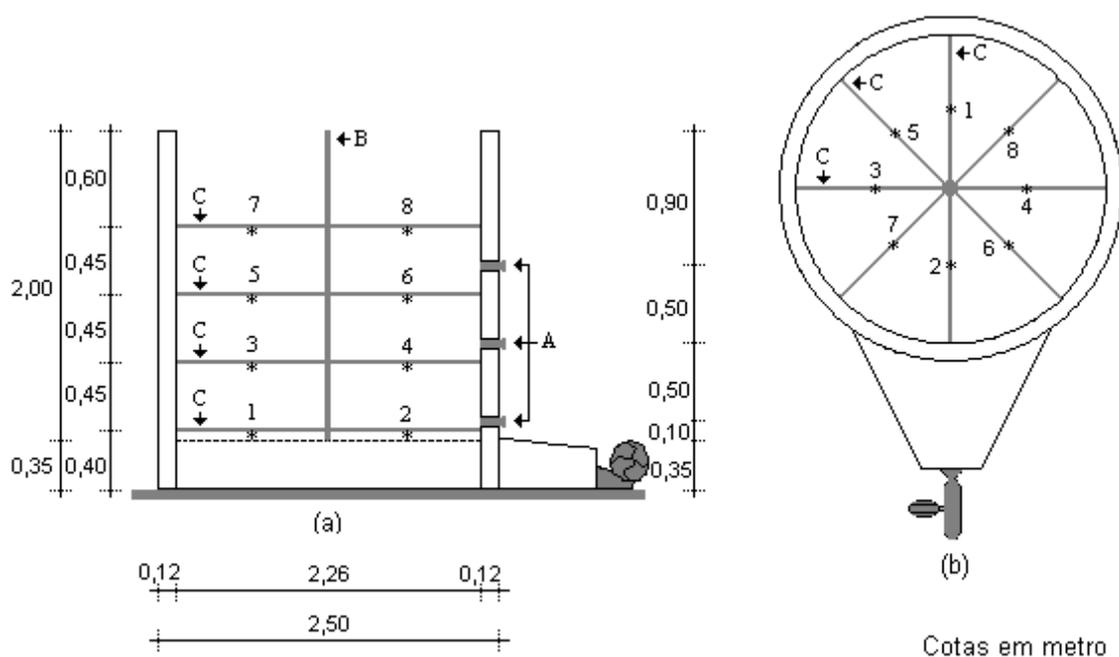


Figura 5 - Diagrama da localização dos termopares no secador de altas temperaturas e fluxos contracorrente/concorrente.

3.3.2. Vazões específicas e pressão estática

No secador de fluxos contracorrentes/concorrentes a vazão do ar de secagem foi determinada pela medição da velocidade do ar nos dutos de exaustão do secador, utilizando-se de um anemômetro digital de pás rotativas, da marca Airflow, modelo LCA 6000.

A vazão de ar fornecida pelo ventilador ao seu respectivo silo-secador foi determinada segundo a metodologia proposta por NAFM (1952), baseando-se na pressão estática máxima registrada no sistema. A pressão estática foi medida com um micromanômetro inclinado, da marca Dwyer, modelo D-2, com sensibilidade de leitura de 0,5 mmca, e as medições foram realizadas a cada 0,20 m, ao longo da altura da camada de café no silo, em dois pontos no mesmo plano horizontal, com um ângulo de 180° entre eles.



A - Pontos de retirada de amostras C - Ferro 5/16", para fixação dos termopares
 B - Suporte da estrutura de fixação dos termopares 1 a 8 - Termopares

Figura 6 - Diagrama da localização dos termopares no silo-secador em vista lateral (a) e superior (b).

3.3.3. Consumo de energia

O consumo de energia no secador de altas temperaturas foi calculado a partir do consumo de combustível na fornalha, somado ao consumo de energia elétrica dos motores do ventilador, da máquina de pré-limpeza e do elevador.

As medições para determinar o consumo de lenha pela fornalha só foram iniciadas depois que esta atingiu o regime permanente de operação.

O consumo de energia do sistema silo-secador foi obtido baseando-se na energia elétrica consumida pelo motor do ventilador.

O poder calorífico superior da madeira (PCS) foi determinado por meio da bomba calorimétrica de Malher (MELO, 1987).

Para a determinação do poder calorífico inferior (PCI), utilizou-se a seguinte equação proposta por Tiliman, citado por OSÓRIO (1982):

$$PCI = PCS \cdot (1 - 0,0114 \cdot U) \quad \text{eq. 1}$$

em que

PCI = poder calorífico inferior, kJ.kg^{-1} ;

PCS = poder calorífico superior, kJ.kg^{-1} ; e

U = teor de umidade da madeira, % b.u.

O teor de umidade da madeira foi obtido pelo método-padrão de estufa, 103 ± 1 °C por 72 h. Pelo fato de todo o lote de madeira utilizado ser homogêneo e estar armazenado em local coberto, realizou-se uma única amostragem para determinação do teor de umidade e do poder calorífico superior, que foram considerados nos três testes.

O consumo específico de energia foi obtido de duas maneiras:

a) Real - conhecendo-se o poder calorífico da lenha :

$$E_1 = \frac{PCI \cdot c \cdot t \cdot (100 - U_f)}{M \cdot (U_i - U_f)} \quad \text{eq. 2}$$

em que

E_1 = consumo específico de energia (real), kJ.kg^{-1} de água evaporada;

c = consumo de lenha, kg.h^{-1} ;

t = tempo total de secagem, h;

M = massa inicial do produto, kg;

U_i = teor de umidade inicial do produto, % b.u.; e

U_f = teor de umidade final do produto, % b.u..

b) Teórico - balanço energético do ar que passa pela fornalha:

$$E_2 = \frac{Q \cdot Ca \cdot (Ts - Ta) \cdot t \cdot (100 - U_f) \cdot 60}{Ve \cdot M \cdot (U_i - U_f)} \quad \text{eq. 3}$$

em que

E_2 = consumo específico de energia (teórico), kJ.kg^{-1} de água evaporada;

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

Ca = calor específico do ar ambiente, $1,0048 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;

Ts = temperatura do ar de secagem, °C ;

Ta = temperatura do ar ambiente, °C ; e

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

A determinação da massa de lenha consumida foi realizada em uma balança de plataforma, da marca Toledo, com sensibilidade de leitura de 0,1 kg.

A massa inicial do café foi obtida pela pesagem do caminhão contendo o produto, em balança rodoviária, da marca Filizola, com sensibilidade de leitura de 10 kg. Já a massa final foi obtida indiretamente, pela relação entre a massa inicial e os teores de umidade final e inicial, utilizando a seguinte equação:

$$M_f = \frac{(100 - U_i) \cdot M_i}{(100 - U_f)} \quad \text{eq. 4}$$

em que

M_f = massa final do produto, kg; e

M_i = massa inicial do produto, kg.

Na equação do balanço energético do ar supõe-se que a fornalha seja ideal e que nenhuma perda de calor ocorra. Portanto, pôde-se calcular a eficiência energética da fornalha usando a seguinte equação:

$$\eta = \frac{E_2 \cdot 100}{E_1} \quad \text{eq. 5}$$

em que

η = eficiência energética da fornalha, %.

O consumo total de energia térmica, proveniente da queima do combustível, foi determinado, para cada teste, pela equação a seguir:

$$E_{1T} = \frac{E_1 \cdot M_i \cdot (U_i - U_f)}{(100 - U_f)} \quad \text{eq. 6}$$

em que

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

Os consumos de energia elétrica dos motores, tanto no secador quanto no silo-secador, foram medidos utilizando-se um medidor de consumo de energia, da marca Nansen, modelo BN 5T, com sensibilidade de leitura de 1 kWh. Visando à uniformização dos dados de consumo de energia, utilizou-se a relação 1 kWh = 3.601 kJ.

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

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

em que

ET = consumo específico total de energia, kJ.kg^{-1} de água evaporada; e

EC = energia consumida na secagem (térmica + elétrica), kJ.

A energia consumida na secagem é dada por:

$$EC = E_{IT} + E_e \quad \text{eq. 8}$$

em que

E_e = consumo total de energia elétrica, kJ.

3.3.4. Capacidade nominal do secador

A capacidade nominal do secador foi determinada para os três testes, utilizando a seguinte fórmula:

$$C = \frac{M_1}{t} \quad \text{eq. 9}$$

em que

C = capacidade nominal do secador, t.h^{-1} ; e

M₁ = massa inicial do produto, t.

3.3.5. Características do produto

Para a determinação do teor de umidade do café no decorrer da secagem, foram coletadas amostras a cada uma hora, durante a fase de alta temperatura no secador de fluxos contracorrentes/concorrentes, e a cada 48 horas durante a fase em baixa temperatura no silo-secador.

As amostras foram coletadas manualmente na descarga da moega do secador durante o seu funcionamento, e no silo-secador a amostragem foi realizada

com auxílio de um calador, introduzindo-o horizontalmente nos pontos indicados pela letra “A”, de acordo com a Figura 6.

O teor de umidade do produto foi determinado por meio do teste-padrão de estufa, 105 ± 3 °C, por um período de 24 horas, sendo realizadas três repetições por amostra (BRASIL, 1992).

Para a avaliação do tipo do produto e da qualidade da bebida ao final de cada teste, foram enviadas amostras para a Cooperativa dos Cafeicultores de Guaxupé (COOXUPÉ), Minas Gerais, para a realização dos ensaios pertinentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios das condições do ar ambiente, ar de secagem e ar de exaustão do secador, assim como as condições iniciais e finais do produto e os resultados de consumo de energia e tempo gasto nos testes de secagem a altas temperaturas, estão apresentados no Quadro 3.

Observa-se, no Quadro 3, que não foi possível manter a temperatura do ar de secagem em 80 °C, sendo obtidos valores médios de 76,9; 74,6 e 74,5 °C para os testes 1, 2 e 3, respectivamente. Foram obtidos altos valores de umidade relativa do ar ambiente (próximos a 100%), porque os testes se estenderam pelo período noturno.

Devido a problemas operacionais, não foi possível conseguir uma padronização no teor de umidade inicial do café em todos os testes.

Pode-se observar, no Quadro 3, que a temperatura média do ar na massa de grãos não superou o limite preestabelecido de 40 °C.

Os valores médios das condições do ar ambiente e ar de secagem, assim como as condições iniciais e finais do produto e os resultados de consumo de energia e tempo gasto nos testes de secagem nos silos com temperatura ambiente, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 3 - Resultados médios dos testes no secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes

Resultados dos testes	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Ar Ambiente:			
Temperatura, °C	16,6	20,7	20,0
Umidade relativa, %	73,5	77,8	83,0
Ar de Secagem:			
Temperatura, °C	76,9	74,6	74,5
Umidade relativa, %	3,3	5,0	5,1
Vazão, m ³ .min ⁻¹	46,0	46,0	46,0
Temperatura do ar na massa de grãos, °C	32,1	31,5	33,3
Ar de Exaustão:			
Temperatura, °C	31,0	31,9	32,3
Umidade Relativa, %	91,1	88,6	80,1
Produto:			
Teor de umidade inicial, % b.u.	32,4	42,3	24,0
Teor de umidade final, % b.u.	25,5	31,0	14,0
Massa total inicial, kg	3.250	3.550	2.830
Massa total final, kg	2.949	2.968	2.500
Resultados:			
Tempo de secagem, h	9,3	10,2	12,0
Capacidade nominal do secador, t.h ⁻¹	0,35	0,35	0,24
Consumo de energia elétrica, kWh	25,1	30,4	25,0
Consumo de lenha, kg	250	275	300
Teste de bebida	-	-	Dura

Quadro 4 - Resultados médios dos testes nos silos

Resultados dos testes	Teste 1	Teste 2
Ar Ambiente:		
Temperatura, °C	16,6	15,7
Umidade relativa, %	70,8	65,7
Ar de Secagem:		
Temperatura, °C	21,4	21,3
Umidade relativa, %	49,6	42,6
Vazão, m ³ .min ⁻¹	32,5	32,5
Fluxo, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	8,1	8,1
Temperatura do ar na massa de grãos, °C	-	20,7
Produto:		
Teor de umidade inicial, % b.u.	25,5	31,0
Teor de umidade final, % b.u.	13,0	14,0
Massa total inicial, kg	2.949	2.968
Massa total final, kg	2.525	2.381
Resultados:		
Tempo de secagem (vent. ligado), h	232,0	200,0
Tempo de secagem (total), h	632,0	584,0
Consumo de energia elétrica, kWh	145,0	125,0
Teste de bebida	Dura	Dura

As condições do ar ambiente, representadas no Quadro 4, referem-se a valores médios de registros diários de 24 h, durante os testes 1 e 2. No mesmo quadro, as condições do ar de secagem referem-se a valores médios do período em que o ventilador estava em funcionamento (das 9 às 17 h).

No Quadro 4, observa-se que, no teste 1, o produto apresentou uma redução de umidade de 12,5 pontos percentuais (de 25,5 para 13% b.u.), com tempo de secagem igual a 232 h; e no teste 2, de 17 pontos percentuais (de 31 para 14% b.u.), para um tempo de secagem de 200 h. A taxa de secagem média foi de 0,48 ponto percentual de umidade por dia no teste 1 e de 0,64 no teste 2. O teste 2 apresentou tempo de secagem no silo inferior ao teste 1, devido, principalmente, às menores médias de umidades relativas do ar ambiente, conferindo ao ar de secagem maior capacidade de remoção de umidade do produto. As temperaturas médias do ar de secagem para os testes 1 e 2 foram praticamente iguais: 21,4 e 21,3 °C, respectivamente.

Foram realizados testes de bebida visando determinar a qualidade do produto ao final dos processos de secagem. Nos testes 1 e 2 de secagem combinada o produto foi avaliado somente ao final da secagem a baixas temperaturas (Quadro 6), e no teste 3, ao final da secagem a altas temperaturas (Quadro 5). Para todos os testes, a bebida foi classificada como "Dura", considerada de boa qualidade para as condições de produção na região da Zona da Mata mineira.

4.1. Temperaturas e umidades relativas

A representação gráfica da variação das temperaturas do ar de secagem e do ar na massa de grãos em função do tempo, para os testes no secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, encontra-se nas Figuras 7, 8 e 9.

Os pontos de medição 1 e 2 (Figuras 7, 8 e 9) representam os pontos localizados na câmara de descanso superior, e o ponto 1, por estar mais próximo

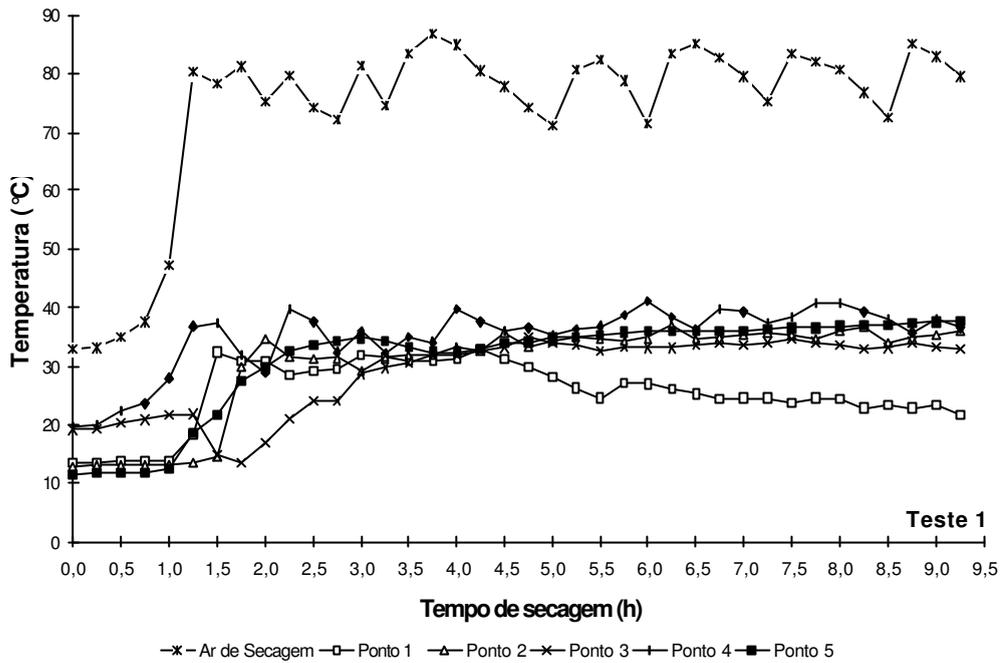


Figura 7 - Temperaturas do ar de secagem e do ar na massa de grãos, nos pontos de medição instalados dentro do secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, em função do tempo de secagem no teste 1.

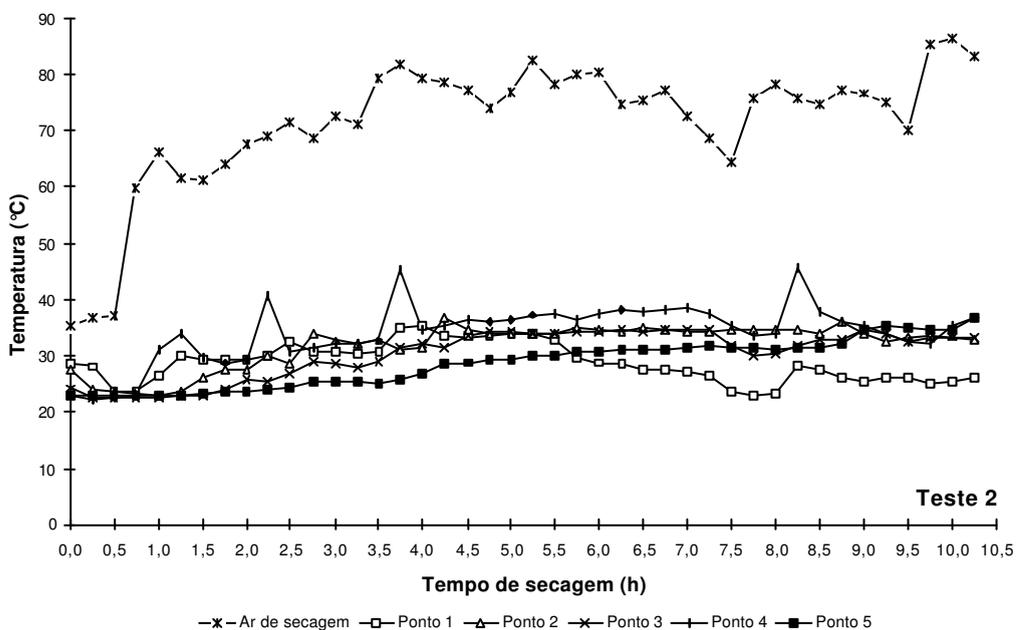


Figura 8 - Temperaturas do ar de secagem e do ar na massa de grãos, nos pontos de medição instalados dentro do secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, em função do tempo de secagem no teste 2.

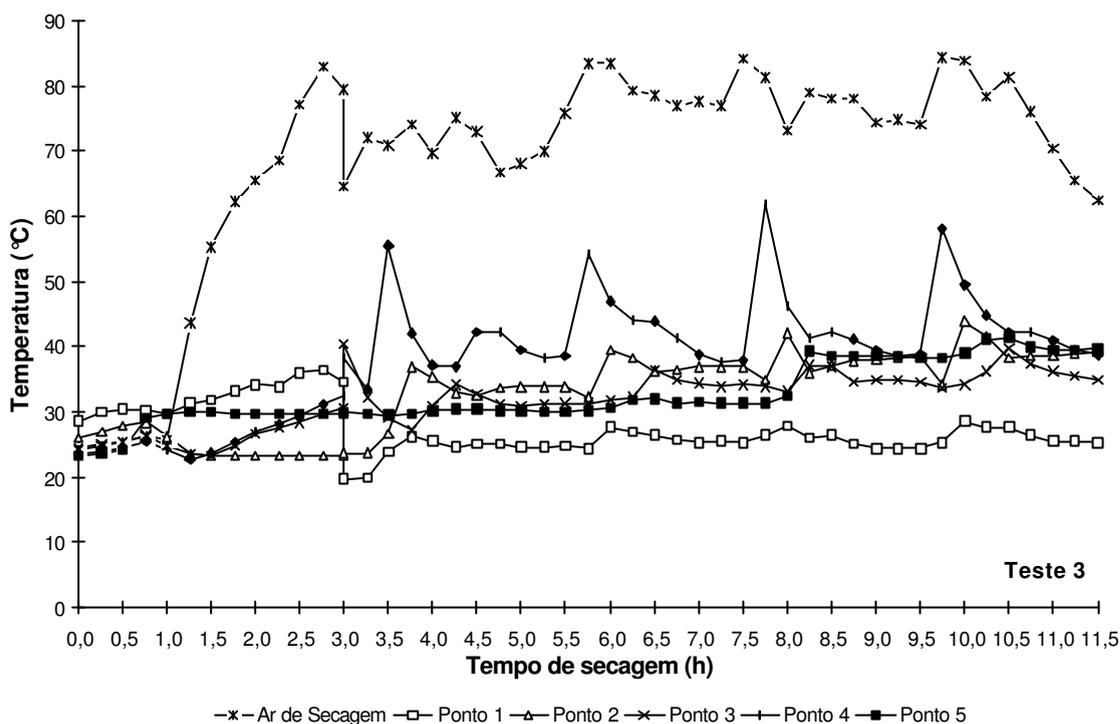


Figura 9 - Temperaturas do ar de secagem e do ar na massa de grãos, nos pontos de medição instalados dentro do secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, em função do tempo de secagem (teste 3).

à superfície externa da massa de grãos, no ponto de carga do secador, apresentou, de maneira geral, as menores temperaturas, acompanhando a variação da temperatura ambiente.

A temperatura do ar de secagem não permaneceu constante durante a realização dos testes (Figuras 7, 8 e 9), apresentando picos de aquecimento que ocorreram nos períodos subsequentes à colocação de lenha na fornalha. Essa oscilação na temperatura do ar de secagem é característica da utilização de fornalha de fogo indireto em sistemas de secagem.

Os pontos de medição 3 e 4 (Figuras 7, 8 e 9) estavam localizados nas câmaras de secagem contracorrentes e concorrentes, respectivamente, portanto, próximos da entrada do ar de secagem no secador, implicando, assim, variações de temperatura semelhantes às do ar de secagem.

O ponto de medição 5 (Figuras 7, 8 e 9) era o ponto localizado na câmara de descanso inferior. Este ponto apresentou temperaturas praticamente constantes durante cada teste, quase sempre inferiores às do ponto 4.

Na Figura 10 encontra-se a representação gráfica dos dados referentes a temperatura e umidade relativa do ar de exaustão, para os testes de secagem a altas temperaturas.

Observou-se que durante os testes 1 e 2 (Figura 10) o ar de exaustão apresentou valores de umidade relativa acima de 70% durante todo o período de secagem, devido, possivelmente, aos elevados teores de umidade inicial e final do produto.

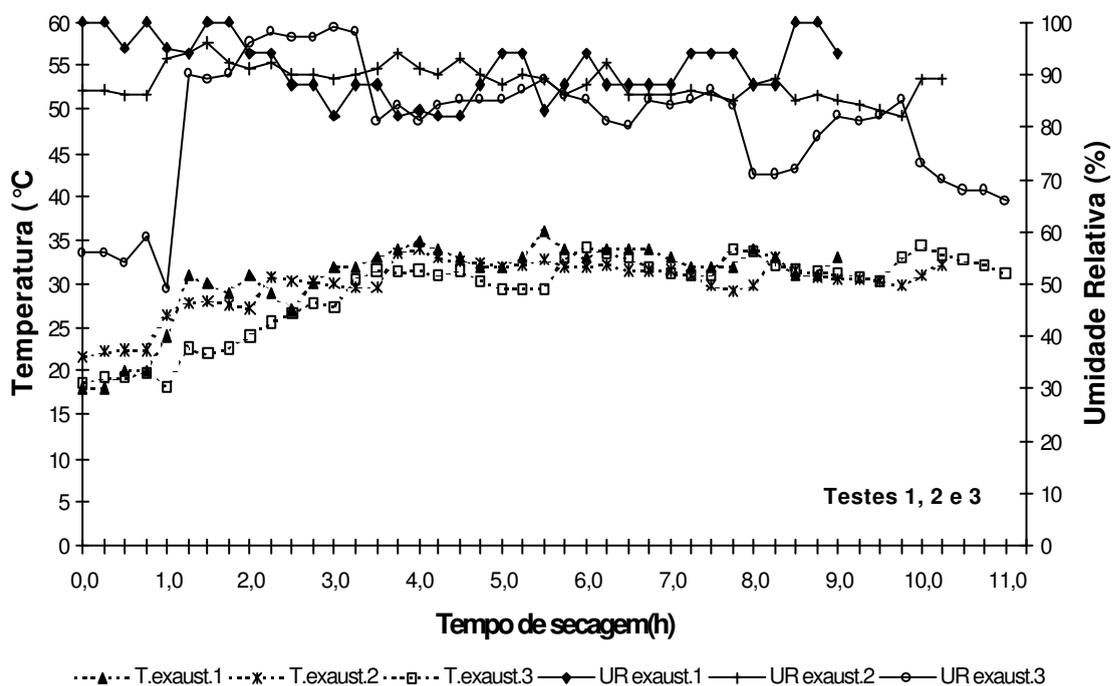


Figura 10 - Temperatura e umidade relativa do ar de exaustão durante os testes 1, 2 e 3 de secagem a altas temperaturas no secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes.

No teste 3, o produto, com um teor de umidade inicial (24% b.u.) inferior aos testes 1 e 2, necessitou de um intervalo de tempo para o seu aquecimento antes de começar a perder umidade. Essa inércia térmica pode ser observada no início do processo, acompanhando-se a curva de umidade relativa do ar de exaustão 3 até o tempo de secagem igual a 1 hora (Figura 10). Na mesma curva, observa-se que ao final do teste a umidade relativa do ar de exaustão apresenta valores inferiores aos demais testes, indicando taxas de secagem decrescentes. As temperaturas do ar de exaustão apresentaram tendências semelhantes para os três testes de secagem (Figura 10).

A Figura 11 mostra a representação gráfica dos valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, durante os testes 1, 2 e 3 de secagem a altas temperaturas.

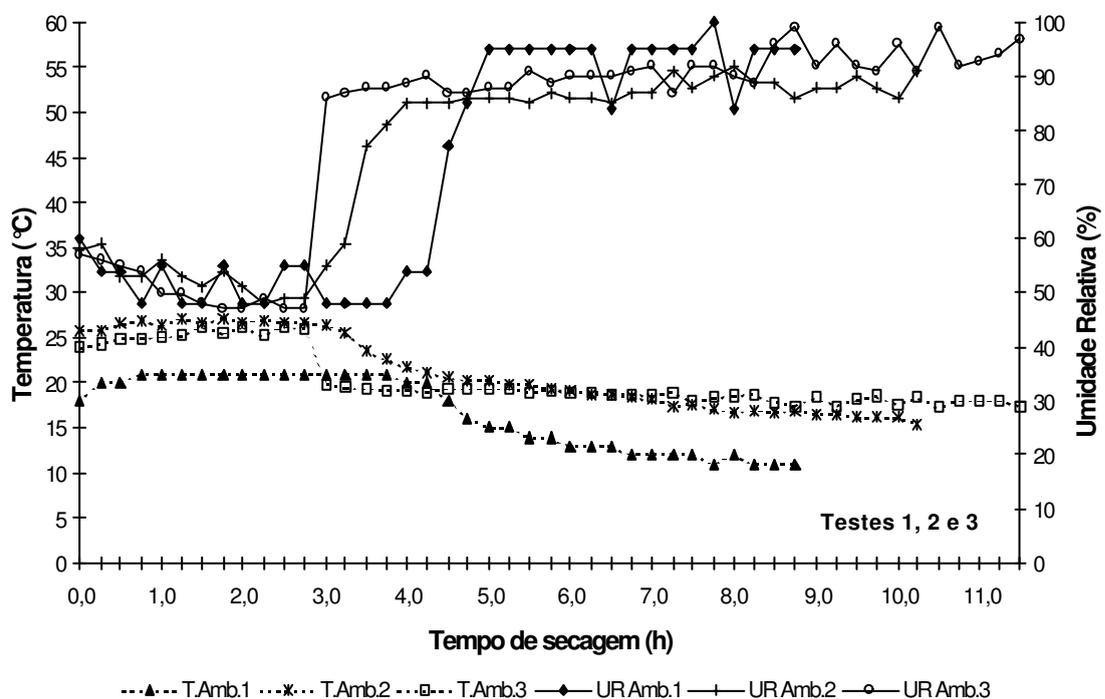


Figura 11 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante os testes 1, 2 e 3 de secagem a altas temperaturas no secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes.

Observa-se, na Figura 11, que as condições do ar ambiente apresentaram tendências semelhantes nos três testes de secagem a altas temperaturas, com exceção das temperaturas do teste 1, que apresentaram valores inferiores aos das demais. A elevação na umidade relativa, observada a partir da terceira hora de secagem, para todos os testes, ocorreu porque estes se iniciaram no período da tarde, a partir das 14 h.

A Figura 12 apresenta a variação das temperaturas médias do ar ambiente e do ar na massa de grãos durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas no silo secador.

A Figura 12 indica que a temperatura média do ar em contato com a camada de grãos situada a 1,40 m do fundo do silo foi sempre inferior à temperatura média do ar nas demais camadas e também em relação à temperatura

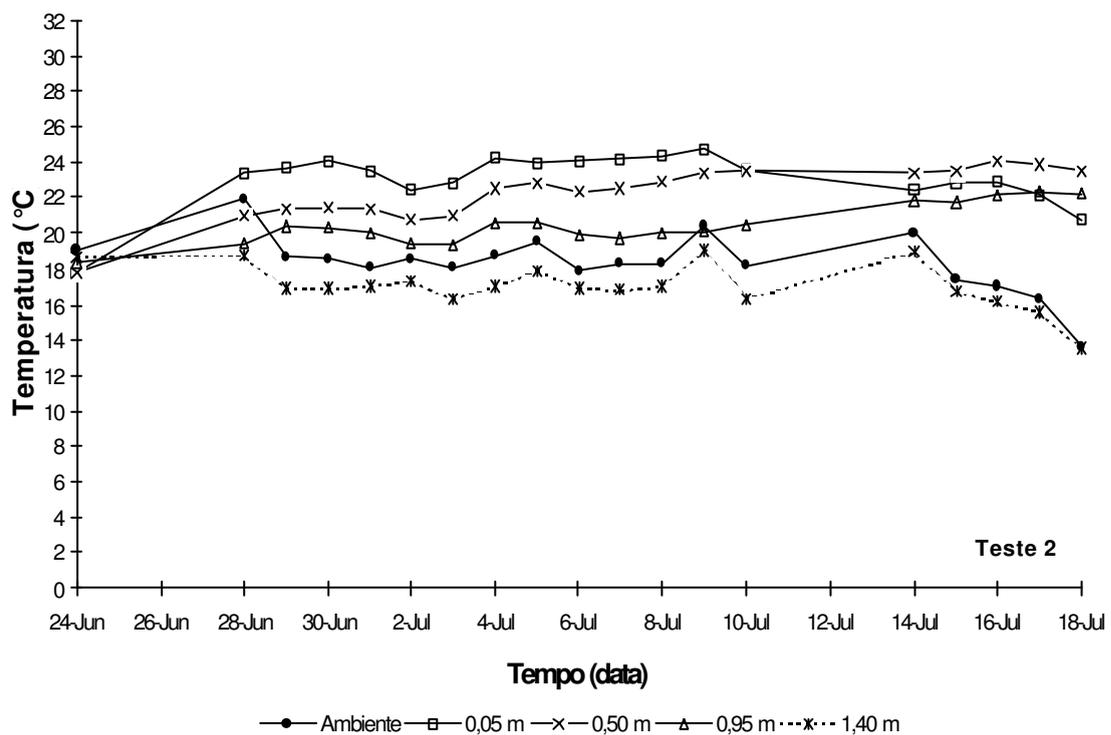


Figura 12 - Temperaturas médias diárias do ar ambiente e do ar na massa ao longo da camada de grãos, nas alturas de 0,05; 0,50; 0,95 e 1,40 m a partir do fundo do silo, durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas em silo secador.

média do ar ambiente. Esse comportamento se explicaria pela troca de energia do ar de secagem com o grão, à medida que ele vai atravessando as camadas de baixo para cima. Ou seja, as camadas inferiores de grãos tendem a entrar em equilíbrio térmico com o ar de secagem que está em sua temperatura inicial mais alta. À medida que este ar vai subindo, sua temperatura vai decrescendo.

Não se registraram as temperaturas médias dos dias 25, 26 e 27 de junho e 11, 12 e 13 de julho, devido a problemas ocorridos com o sistema de aquisição automático de dados.

A temperatura média da massa de grãos permaneceu dentro de níveis adequados ao seu armazenamento e praticamente constante durante quase todo o período do teste, com tendência em acompanhar as variações da temperatura ambiente. Cabe ressaltar que o produto não apresentou, durante o teste, nenhum aquecimento resultante de processos de deterioração.

Com o objetivo de determinar a variação média da temperatura do ar na massa de grãos em um dia médio, durante o teste 2, construiu-se o gráfico representado na Figura 13.

Na Figura 13 observa-se que, nos períodos em que o ventilador permaneceu desligado (das 0 às 9 h e das 17 às 24 h), a temperatura do ar na massa de grãos nas camadas situadas a 0,05; 0,50 e 0,95 m, a partir do fundo do silo, apresentaram valores (entre 20 e 25 °C) superiores à temperatura do ar ambiente. O não-resfriamento da massa de grãos no período noturno ocorreu em consequência da baixa condutividade térmica dos grãos, conferindo-lhes características de isolante térmico. Já a temperatura da camada situada a 1,40 m apresentou tendência em acompanhar a variação da temperatura do ar ambiente, porque o termopar para medição se encontrava próximo à superfície mais externa desta camada.

Nota-se também que durante os períodos em que o ventilador permaneceu ligado (das 9 às 17 h), o ar ambiente apresentou temperaturas superiores à do ar na massa de grãos em todas as camadas, com exceção da

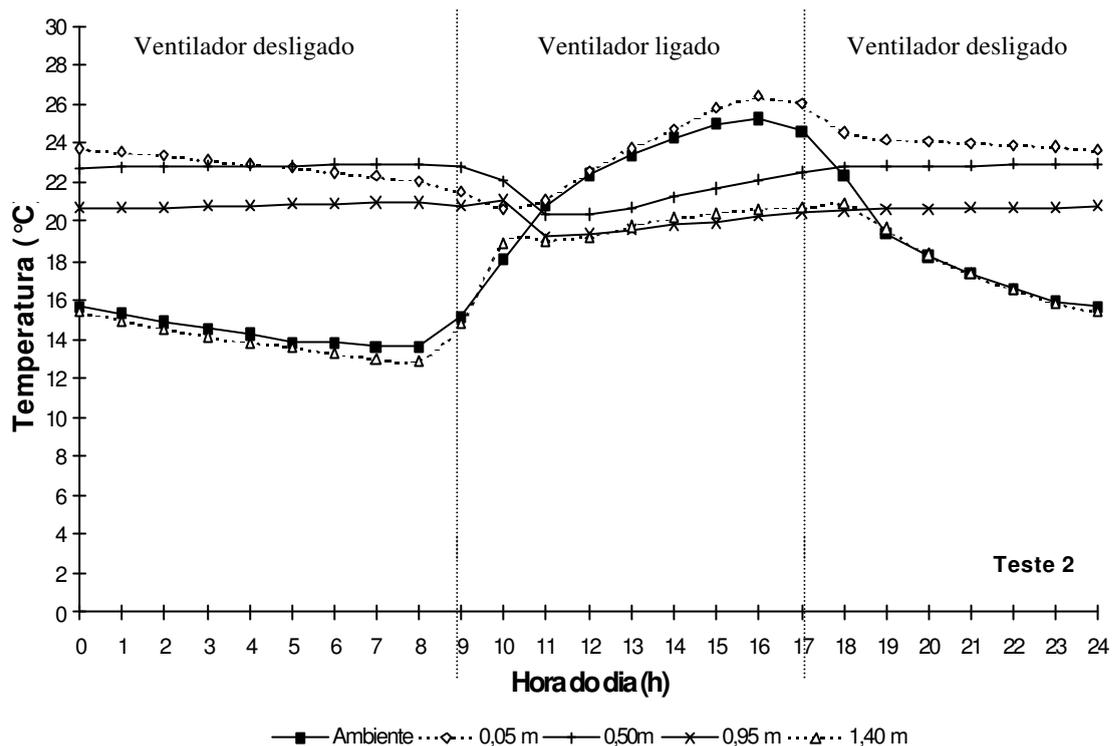
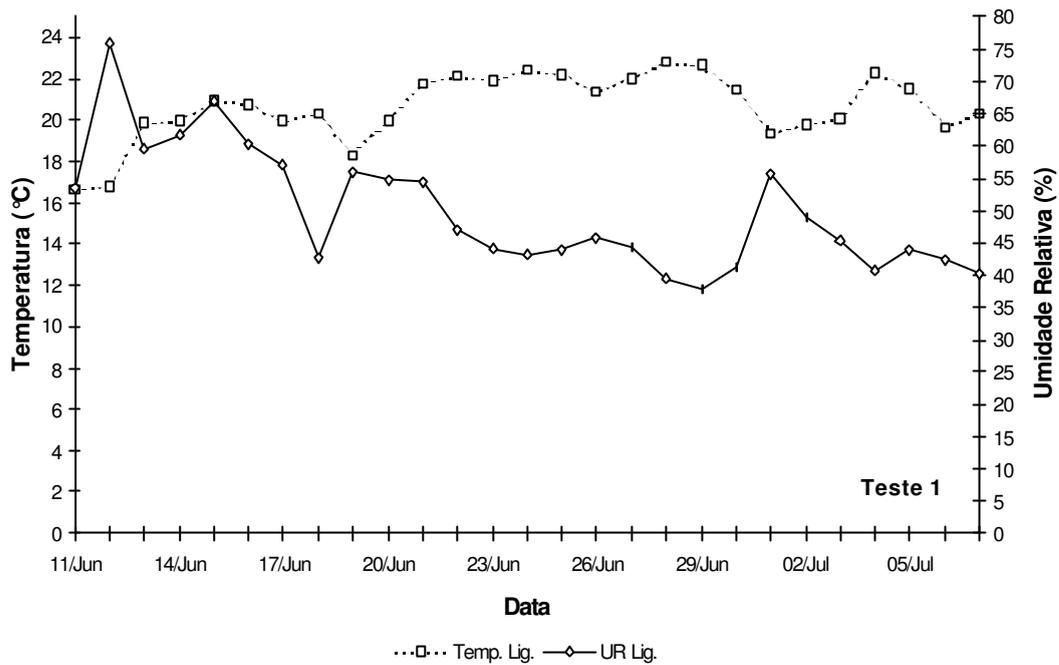


Figura 13 - Temperaturas do ar ambiente e do ar na massa ao longo da camada de grãos, nas alturas de 0,05; 0,50; 0,95 e 1,40 m a partir do fundo do silo, durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas em silo secador, em um dia médio.

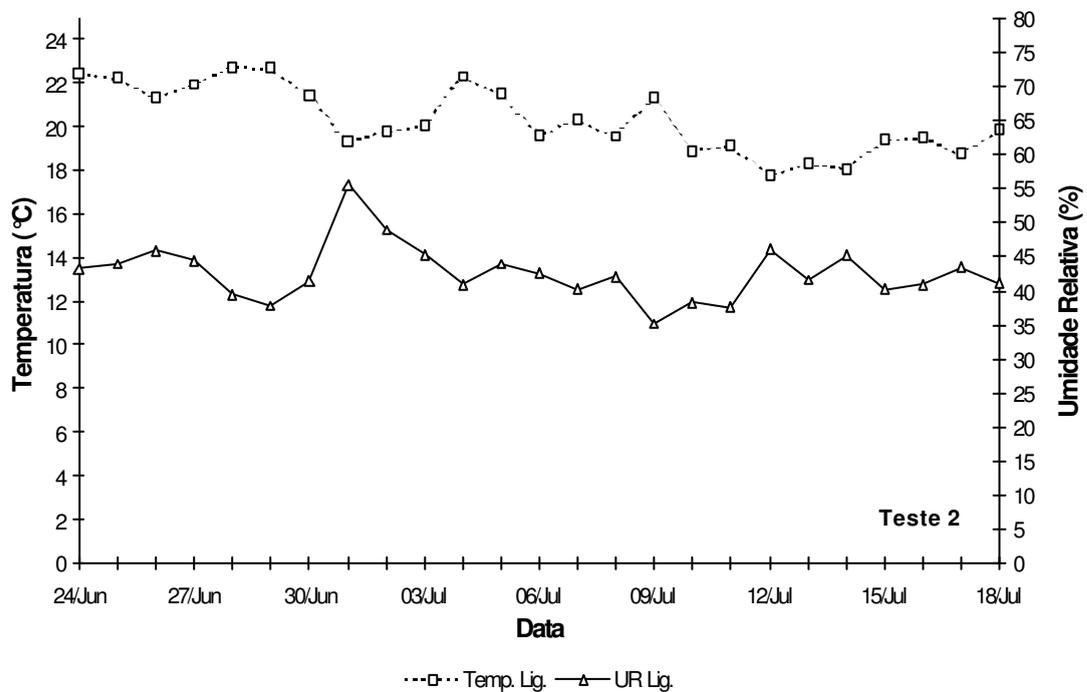
situada a 0,05 m da chapa perfurada. A provável explicação seria o aumento de 1 a 2 °C na temperatura do ar ambiente ao passar pelo ventilador (LYNCH e MOREY, 1989), seguido de resfriamento ao passar por grãos úmidos.

As Figuras 14 e 15 representam graficamente a temperatura média e umidade relativa média do ar ambiente, para os períodos de ventilador ligado, ou seja, das 9 às 17 h, durante o período de realização da etapa de secagem a baixas temperaturas, nos testes 1 e 2.

Comparando os testes 1 e 2 (Figuras 14 e 15), observa-se que o ar ambiente no teste 1 apresentou valores de umidade relativa média superiores àqueles ocorridos no teste 2, principalmente nos primeiros dias da secagem, o que explicaria o maior tempo de secagem do teste 1 em relação ao teste 2.



Figuras 14 - Temperatura média e umidade relativa média do ar ambiente, para os períodos de operação do ventilador, durante o teste 1, na etapa de secagem a baixas temperaturas.



Figuras 15 - Temperatura média e umidade relativa média do ar ambiente, para os períodos de operação do ventilador, durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas.

4.2. Curvas de secagem

A Figura 16 apresenta as curvas de secagem do café despolpado durante os testes 1, 2 e 3 no secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes.

Observa-se, na Figura 16, que o teste 3, mesmo apresentando redução no teor de umidade inferior ao teste 2 (10 e 11,3 pontos percentuais, respectivamente), apresentou tempo superior de secagem, devido à maior dificuldade do produto em perder umidade, porque estava com teor de umidade inicial inferior, 24% b.u., comparado aos 42,3% b.u. do teste 2. Nos testes 1 e 2 observaram-se quedas no teor de umidade mais acentuadas nas primeiras horas de secagem, em razão dos altos teores de umidade iniciais do produto (32,4 e 42,3% b.u., respectivamente), o que proporcionou maior facilidade de remoção

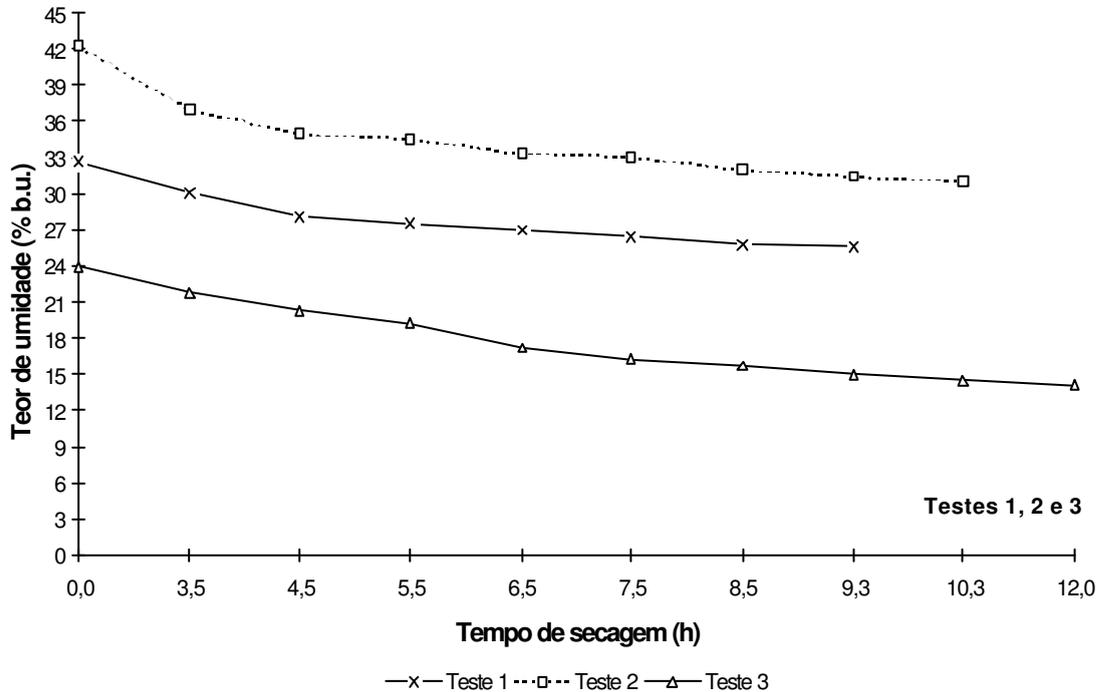


Figura 16 - Variação do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante os testes 1, 2 e 3, no secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes.

de umidade no início dos testes, em relação ao final, e a dificuldade na remoção da umidade aumenta com a diminuição do teor de umidade do produto ao longo da secagem.

As Figuras 17 e 18 apresentam a variação média do teor de umidade da massa de grãos durante os testes 1 e 2 de secagem a baixas temperaturas e a variação do teor de umidade do café nas camadas situadas a 0,10; 0,60 e 1,10 m de altura a partir do fundo do silo.

Observa-se, nas Figuras 17 e 18, que o teste 1, mesmo apresentando redução menor no teor de umidade do produto em comparação ao teste 2 (12,5 e 17,0 pontos percentuais, respectivamente), necessitou de maior tempo para realização da secagem: 26 dias no teste 1 contra 24 dias no teste 2. Isto é explicado com base nas condições do ar ambiente (Figuras 14 e 15), que foram mais favoráveis durante o período do teste 2.

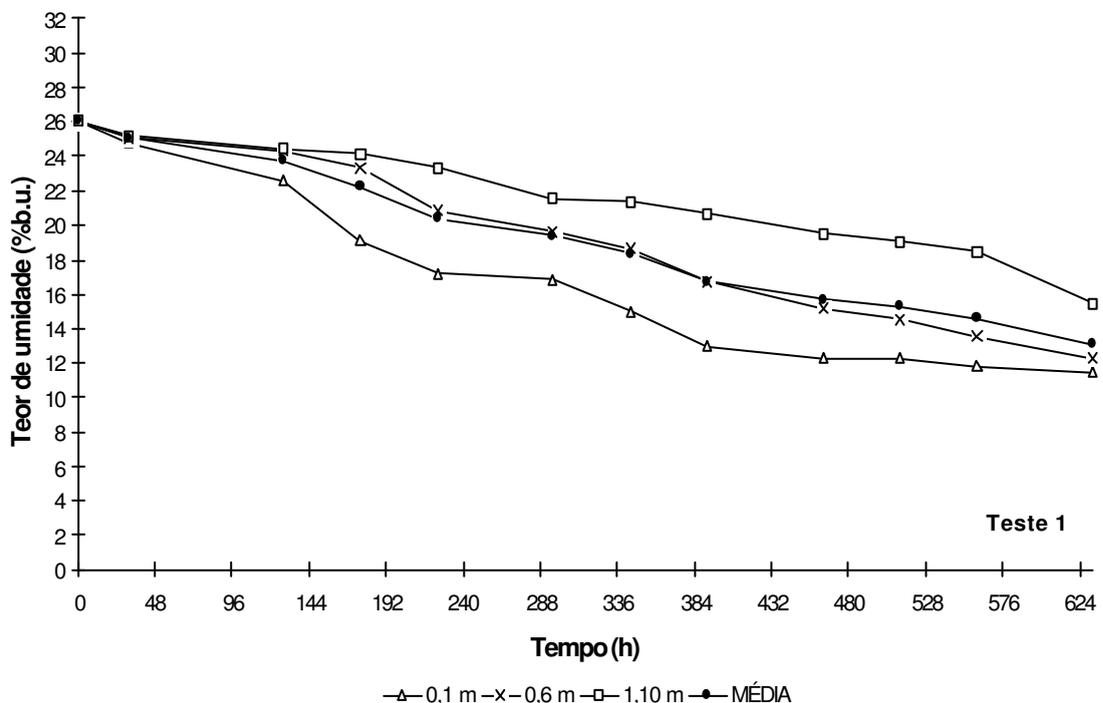


Figura 17 - Variação, média e por camada, do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante o teste 1, na etapa de secagem a baixas temperaturas nos silos secadores.

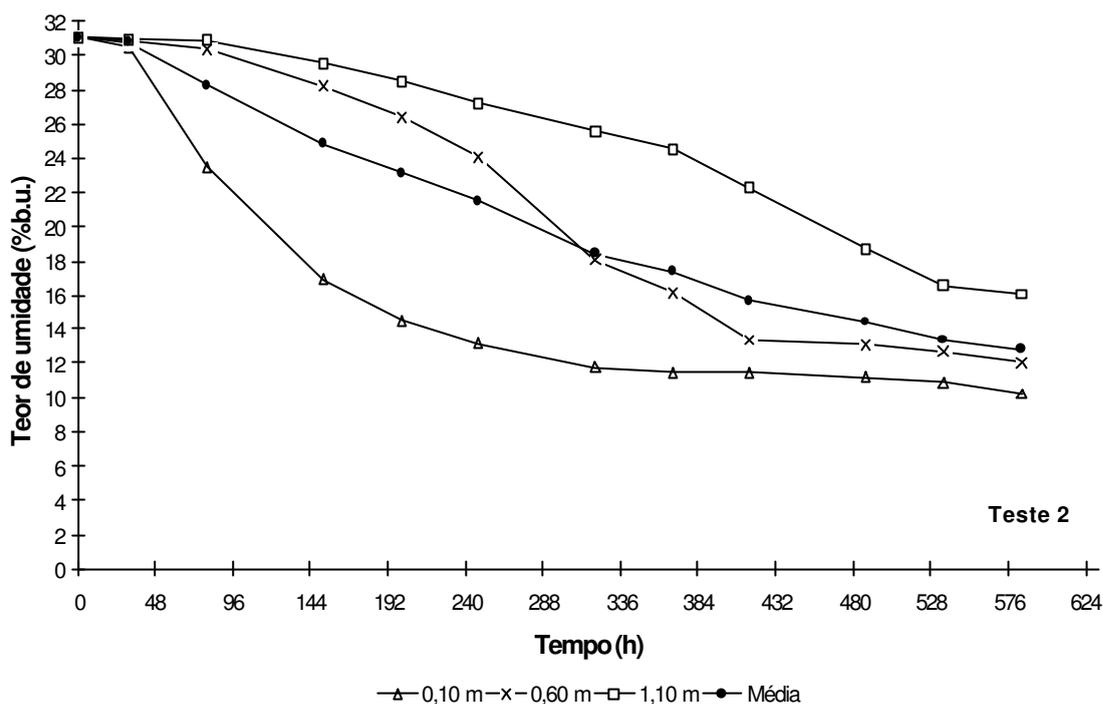


Figura 18 - Variação, média e por camada, do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas nos silos secadores.

Nas Figuras 17 e 18 observa-se que, quanto mais próximo o produto está do fundo do silo, mais rapidamente perderá umidade, ou seja, mais rapidamente tenderá a entrar em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem.

Comparando as Figuras 17 e 18, observa-se redução muito mais brusca no teor de umidade do produto nas alturas de 0,10 e 0,60 m no teste 2 (Figura 18) em relação ao teste 1 (Figura 17). Essa diferença ocorreu devido às condições do ar ambiente, que não foram as mesmas para os dois testes.

Ambas as figuras indicam um gradiente no teor de umidade entre as camadas dos grãos ao final do processo de secagem. No teste 1 o gradiente observado entre a primeira e a última camada foi de 4 pontos percentuais b.u. No teste 2 este gradiente foi de 5,8 pontos percentuais b.u. A ocorrência desse gradiente no teor de umidade é explicada pelo fato de o ventilador funcionar somente no período diurno. Esse modo de operação do ventilador implicaria um

teor médio de umidade de equilíbrio mais baixo do que aquele que o produto atingiria se o ventilador operasse 24 horas diárias. Assim, optou-se por finalizar o processo de secagem quando o teor médio de umidade da massa de grãos fosse de 13% b.u. GUIMARÃES (1995) obteve menores valores de gradiente de teores de umidade na massa de grãos ao final da secagem, porque o ventilador funcionou por 24 horas.

4.3. Pressão estática

A Figura 19 apresenta a variação da pressão estática do ar ao longo da camada de café no silo, em função do tempo de secagem, para o teste 2.

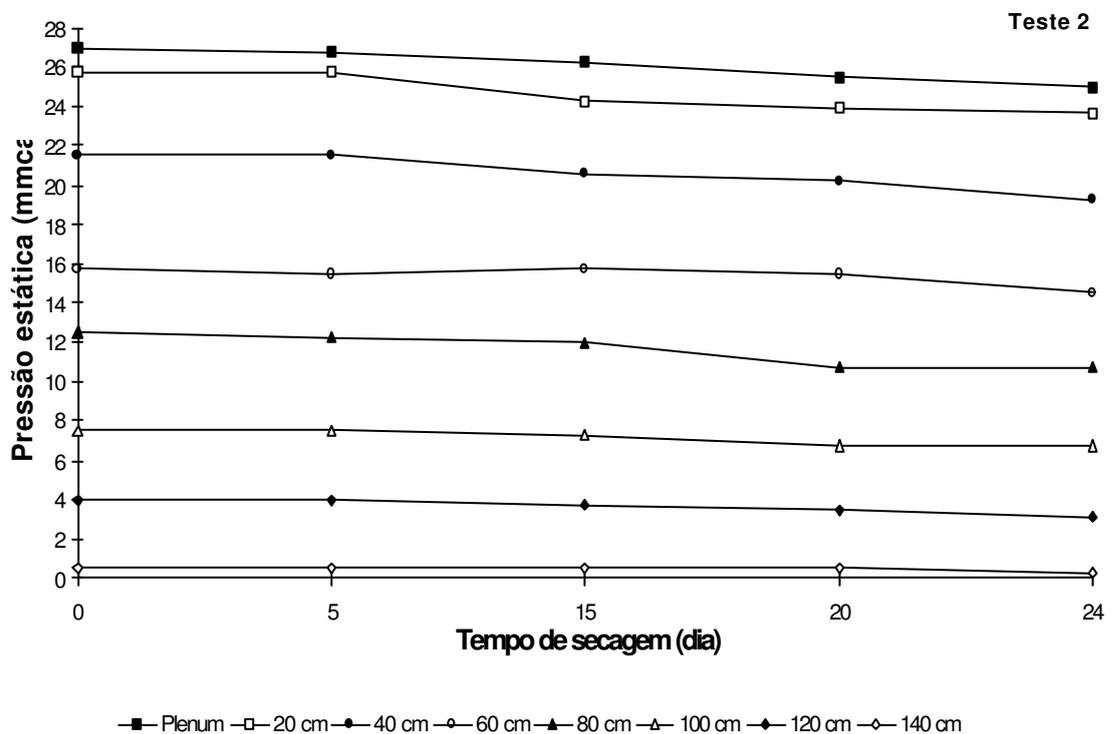


Figura 19 - Pressão estática do ar ao longo da camada de café, durante a realização do teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas no silo secador.

Observa-se, na Figura 19, que praticamente não houve variação na pressão estática, apenas uma tendência de diminuição, que, por ser pequena, não influenciou na vazão de ar fornecida pelo ventilador durante o teste.

O gradiente de pressão estática ao longo da camada de grãos foi em média de 17 milímetros de coluna d'água (mmca) a cada metro de coluna de café. A perda de pressão estática na massa de grãos é geralmente superior para o café despulpado, em comparação com o café em coco. GUIMARÃES (1995) encontrou valores médios de perda de pressão estática de 7,5 mmca por metro de coluna de café em coco e de 10 mmca por metro de coluna de café descascado.

4.4. Consumo de energia

No Quadro 5 estão apresentados os valores de teor de umidade, poder calorífico inferior (equação 1), consumo horário de combustível, consumo específico de energia real e teórico (equações 2 e 3) e eficiência da fornalha (equação 5).

Observa-se, no Quadro 5, que o teste 3 apresentou consumo específico de energia ($11,0 \text{ MJ.kg}^{-1}$) superior aos dos testes 1 e 2 ($10,0$ e $5,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$, respectivamente). Isso ocorreu, principalmente, devido à faixa de teor de umidade do produto neste teste, que foi inferior aos demais, resultando em maior dificuldade na remoção de umidade.

Quadro 5 - Poder calorífico inferior (PCI), teor de umidade, consumo de lenha, consumo específico de energia do secador e eficiência da fornalha

Teste (N°)	PCI (kJ.kg^{-1})	Teor de Umidade (% b.u.)	Consumo de Lenha (kg.h^{-1})	Consumo Específico de Energia		Eficiência da Fornalha (%)
				Teórico (kJ.kg^{-1})	Real (kJ.kg^{-1})	
1	12.044	30	26,8	7.700	10.003	77
2	12.044	30	26,9	3.839	5.697	67
3	12.044	30	25,0	8.081	10.980	73

PINTO (1993), utilizando secador similar de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes, para a secagem de café em coco, do teor de umidade de 30 para 20% b.u., encontrou o valor de consumo específico de energia de 5,1 MJ.kg⁻¹. Entretanto, a fornalha utilizada foi a de fogo direto, com temperatura do ar de secagem de 100 °C, o que explicaria a melhor eficiência energética de secagem.

O Quadro 6 apresenta os valores da energia produzida pela queima do combustível (equação 6), nos testes 1, 2 e 3 de secagem a altas temperaturas.

Quadro 6- Resultados do consumo de energia produzida pela combustão da lenha de eucalipto nos testes 1, 2 e 3, na etapa de secagem a altas temperaturas

Teste (N°)	Massa de água evaporada (kg)	Energia térmica consumida (MJ)
1	301	3.010
2	582	3.315
3	330	3.613

No Quadro 7 estão apresentados os valores de consumo de energia térmica (equação 6); consumo de energia elétrica e consumo total de energia (equação 8); a quantidade de água evaporada durante a secagem; e o consumo específico total de energia (equação 7), observados durante os três testes realizados.

A Figura 20 representa os dados referentes aos consumos totais de energia (térmica + elétrica) e a redução no teor de umidade do produto, ocorridos durante os três testes de secagem.

Quadro 7- Resultados do consumo de energia nos testes 1, 2 e 3 nas etapas de secagem em altas e baixas temperaturas e eficiência energética de secagem

Teste (N°)	Consumo de energia térmica (MJ)	Consumo de energia elétrica (MJ)	Consumo total de energia (MJ)	Massa de água evaporada na secagem (kg)	Consumo específico total de energia (MJ. kg ⁻¹)	
1	Secador	3.010,9	90,4	3.101,3	301	10,3
	Silo	-	522,1	522,1	424	1,2
	Total	3.010,9	612,5	3.623,4	725	5,0
2	Secador	3.315,6	109,5	3.425,1	582	5,8
	Silo	-	450,1	450,1	587	0,7
	Total	3.315,6	559,6	3.875,2	1.169	3,3
3	Secador	3.613,0	90,0	3.703,0	330	11,2
	Total	3.613,0	90,0	3.703,0	330	11,2

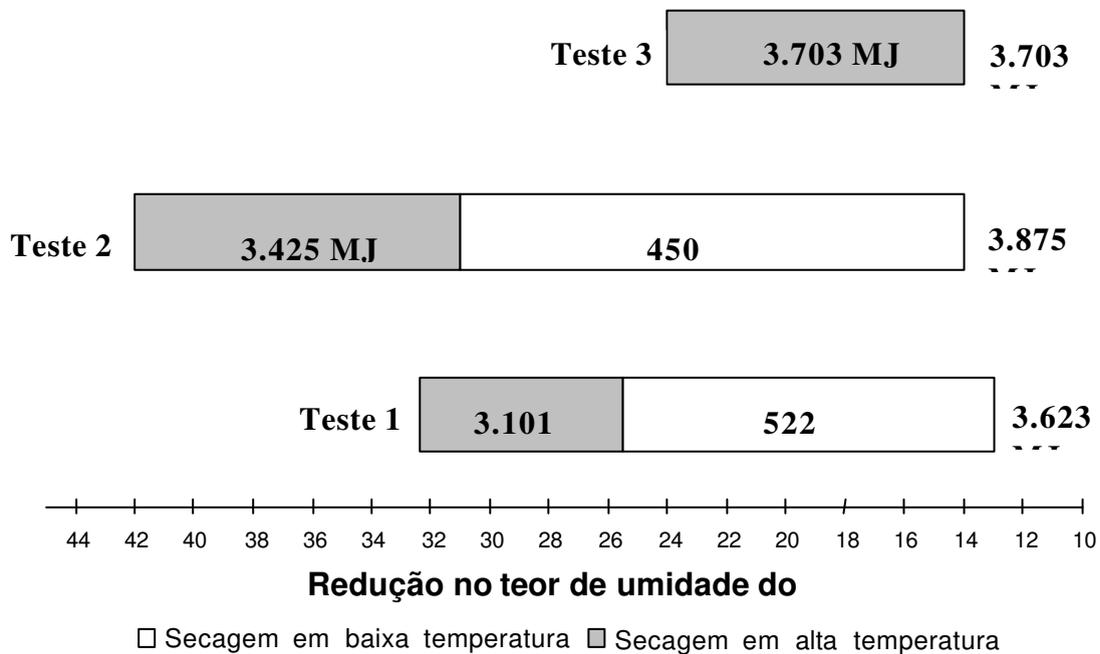


Figura 20 - Consumos totais de energia (térmica + elétrica) e redução no teor de umidade do produto, durante a realização dos testes de secagem combinada e secagem total no secador de altas temperaturas.

Observa-se, na Figura 20, uma perceptível diferença na redução do teor de umidade do produto nos testes 1 e 2, em relação ao teste 3. No entanto, o consumo total de energia foi semelhante nos três testes (Quadro 7), caracterizando-se o teste 3 como aquele menos eficiente.

Fazendo a sobreposição das colunas na Figura 20, poder-se-ia estimar a quantidade de energia que seria gasta para realização do teste 2, utilizando somente o sistema de secagem a altas temperaturas. Dessa maneira, o consumo seria superior a 10.000 MJ, um valor 60% maior que os 3.871 MJ gastos com a utilização do sistema combinado.

A Figura 21 representa graficamente os valores de consumo específico de energia (MJ de energia gasto por kg de água evaporada) dos sistemas de secagem testados, apresentados no Quadro 7.

Pode-se observar, no Quadro 5 e nas Figuras 20 e 21, que o consumo total de energia (térmica + elétrica) no teste 2 (3.875,1 MJ) foi 6,9% superior ao do teste 1 (3.623,4 MJ) e 4,6% superior ao do teste 3 (3.703,0 MJ). Entretanto, o consumo de energia por kg de água evaporada foi, no teste 2 (3,3 MJ/kg), 51%

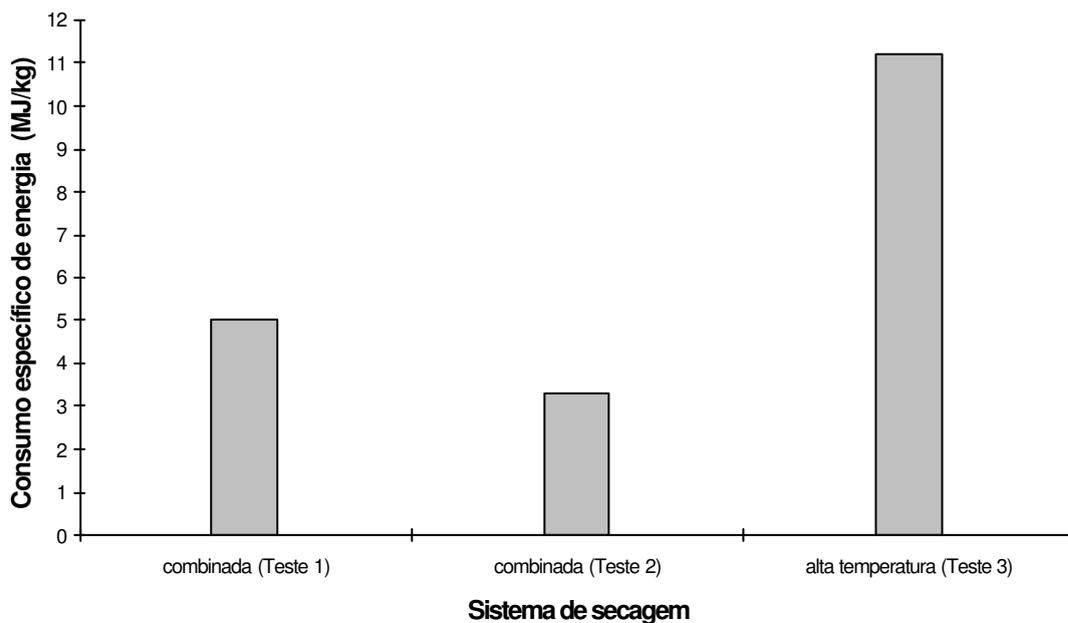


Figura 21 - Consumo específico de energia nos testes realizados.

inferior ao do teste 1 (5,0 MJ/kg) e 239% inferior ao do teste 3 (11,2 MJ/kg). A melhor eficiência energética do teste 2 explica-se pelo fato de o sistema de secagem a altas temperaturas ter sido utilizado quando o produto apresentava alto teor de umidade (secagem de 42,3 a 31% b.u., Quadro 3) e em razão das condições climáticas favoráveis durante a realização da etapa de secagem a baixas temperaturas no silo-secador (umidades relativas médias do ar de secagem de 42,6%, Quadro 4 e Figura 15).

Como não foi possível padronizar os parâmetros de secagem (teores de umidade inicial e final, temperatura do ar de secagem, manejo do secador e condições climáticas, Quadros 3 e 4), os valores de consumo e os de consumo específico de energia apresentados nos Quadros 5, 6 e 7 e nas Figuras 20 e 21 não podem ser estatisticamente comparados entre si. Entretanto, eles permitem visualizar a maior eficiência energética do sistema combinado, em relação ao sistema a altas temperaturas.

4.5. Classificação do produto

Amostras do produto coletadas depois do término dos testes foram enviadas à Cooperativa dos Cafeicultores de Guaxupé - MG (COOXUPÉ), para avaliação da qualidade da bebida e das características dos grãos. O Quadro 8 apresenta os resultados obtidos nessas avaliações.

Quadro 8 - Resultados dos testes de qualidade dos produtos obtidos ao final dos processos de secagem, combinada (testes 1 e 2) e em altas temperaturas (teste 3)

Teste	Bebida	Tipo	Cor
1	Dura	4/5	Verde-claro
2	Dura	5	Esbranquiçada
3	Dura	4/5	Verde-claro

Os resultados do Quadro 8 não podem ser comparados entre si, devido ao fato de os lotes de café utilizados nos testes terem sido provenientes de lavouras distintas, colhidas em períodos diferentes. No entanto, todos os testes apresentaram resultados satisfatórios de “Bebida” e “Tipo”, sendo a bebida obtida nos três testes classificada como “Dura”, que caracteriza um produto de boa qualidade. O tipo obtido foi entre 5 e 4, sendo o tipo 4 considerado o tipo-padrão para exportação.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Com a finalidade de adaptar a tecnologia de secagem de sistemas combinados para o café, foi projetado, construído e avaliado um sistema em que o café, despulpado e pré-secado em terreiro, passava por uma secagem intermediária em um secador experimental de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes e, em seguida, era transportado para um silo-secador, no qual era seco até atingir o teor de umidade seguro para armazenamento.

Foram realizados três testes de secagem, sendo dois com a utilização dos sistemas combinados e um com o sistema a altas temperaturas. A temperatura média do ar de secagem foi de 75,3 °C no sistema a altas temperaturas e de 21,4°C no sistema a baixas temperaturas. A umidade relativa média do ar ambiente durante a realização dos testes de secagem no sistema a baixas temperaturas foi de 46,1%. Os teores de umidade inicial e final do produto foram, respectivamente, de 32 e 13 % b.u. para o teste 1, 42 e 14 % b.u. para o teste 2 e 24 e 14% b.u. para o teste 3. A vazão de ar de secagem no secador foi de 46 m³.min⁻¹, e no silo-secador, de 32 m³.min⁻¹.

Para a avaliação da eficiência energética de secagem dos sistemas, foi calculado o consumo de energia no secador de altas temperaturas a partir do consumo de combustível na fornalha (lenha de *Eucalyptus grandis*), somado ao consumo de energia elétrica dos motores do ventilador, da máquina de pré-limpeza

e do elevador. Já o consumo de energia do sistema silo-secador foi obtido baseando-se na energia elétrica consumida pelo motor do ventilador.

Com base nos resultados obtidos nos testes experimentais, conclui-se que:

- O sistema de secagem em combinação é energeticamente mais eficiente que o sistema a altas temperaturas, para a secagem do café despolpado.
- Quanto maior o teor de umidade inicial do produto, maior a eficiência energética de secagem. Entretanto, não se recomenda a utilização de teores de umidade superiores a 40% b.u. no secador testado, devido a problemas de fluidez do produto.
- A secagem com utilização do sistema em combinação possibilita a obtenção de um café de boa qualidade.
- A etapa de secagem a baixas temperaturas em silos-secadores de café despolpado pode ser iniciada com teores iniciais de umidade dos grãos iguais a 30% b.u., contanto que as condições ambientais sejam favoráveis (temperatura elevada e umidade relativa baixa) e o dimensionamento do sistema permita a redução da umidade da camada superior dos grãos antes que se inicie o processo de deterioração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J.L.V. Cosecha y beneficiado del café. In. **El cultivo del cafeto en México**. México, D.C.: Instituto Mexicano del Café, 1990. p.193-212.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ. Rio de Janeiro: Coffee Business, v.2, n.2, 1996.
- BAKKER-ARKEMA, F.W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.30, n.1, p.1-22, July, 1984.
- BÁRTHOLO, G.F., MAGALHÃES FILHO, A.A.R., GUIMARÃES, P.T.G., CHALFOUN, S.M. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário**, v.14, n.162, p.33-44, 1989.
- BEGAZO, J.C.E.O. **Colheita e processamento do café**. Viçosa: UFV, 1979. 19p. (Boletim de Extensão).
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes (RAS)**. Brasília, 1992. 365p.
- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Westport: AVI Publishing, 1974. 265p.
- CAIXETA, G.Z.T. A conveniência do acordo internacional do café para o Brasil. **Economia Rural**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa (1): p.8-10, 1989.

- CAIXETA, G.Z.T., LEITE, C.A.M., OLIVEIRA, A.M. Tendências do mercado de café no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.27, n.2, p.173-196, 1989.
- CAIXETA, G.Z.T., NACIF, C.A.M., TEIXEIRA, J.G. **A cafeicultura da Zona da Mata de Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG, EPAMIG, 1978. 39p. (Série Programação, 5).
- CAMARGO, E.L., KASTRUP, L.F. C. Aeração-secante substitui o processo de secagem. **Jornal da Armazenagem**, n.3, v.11. p.8-10, 1981.
- CARVALHO, V.D.; CHALFOUN, S.M. Aspectos qualitativos do café. **Informe Agropecuário**, v.11, n.126, p.79-92, 1985.
- CARVALHO, V.D., CHAGAS, S.J.R., SOUZA, S.M.C. Fatores que afetam a qualidade do café. **Informe Agropecuário**, v.18, n.187, p.5-20, 1997.
- CASTRO, L.E. **Efeito do despulpamento, em secador de leito fixo sob alta temperatura, no consumo de energia e na qualidade do café (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa: UFV, 1991. 61p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- CLOUD, H.A., MOREY, R.V. **Dryaeration and in-storage cooling for corn drying**. S.l.: 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 arabica*, L.) em camadas fixas**. Viçosa: UFV, 1982. 60p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - 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.
- DALPASQUALE, V.A. Tecnologia apropriada para secagem e armazenagem de grãos. **Jornal da Armazenagem**, n.6, v.19. p.7-8, 1984.
- DOUGLAS, P.L., SULLIVAN, G.R., WHALEY, M.G. Control performance measures for grain drying processes. **Transactions ASAE**, v.35, n.4, p.1235-1241, 1992.
- GITIMU, C.W. Better coffee farming: coffee processing. **Kenya Coffee**, v.60, n.703, p.1997-1998, 1995.

- GOLLIVER, D.G., PEART, R.M., BROOK, R.C., BARRET, J.R. Energy usage for low temperature grain drying with optimized management. **Transactions ASAE**, v.26, n.2, p.594-600, 1983.
- GUIMARÃES, A.C. **Secagem de café (*Coffea arabica* L.) combinando sistemas em altas e baixas temperaturas**. Viçosa: UFV, 1995. 64p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- HERNÁNDEZ, J.H. La comercialización externa del café mexicano. In. **El cultivo del cafeto en México**. Mexico, D.C.:Instituto Mexicano del Café, 1991. p.215-217.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. 5.ed. Rio de Janeiro: Gráfica IBC - GERCA, 1985. 580p.
- LACERDA FILHO, A.F. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (*Coffea arabica* L)**. Viçosa: UFV, 1986. 136p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- LYNCH, B.E., MOREY, R.V. Control strategies for ambient air corn drying. **Transactions ASAE**, v.32, n.5, p.1727-1736, 1989.
- MCKENZIE, B.A. **Operating grain dryers for capacity, fuel efficiency, and grain quality**. West Lafayette: Purdue University, 1976. 15p.
- MELO, E.C. **Rendimento térmico de uma fornalha a lenha de fluxos descendentes**, Viçosa: UFV, 1987. 115p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1987.
- MEYER, J.A., VILLA, L.G., ROA, G., ROSSI, S.J. Energia para a secagem dos produtos agropecuários. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.3, n.4, p.4-14. dez.1978.
- MORICOCCHI, L., MARTIN, N.B., VEGRO, C.L.R. Produção de café nos países concorrentes do Brasil e tendências do consumo mundial. **Informações econômicas**, v.27, n.5, p.7-24. 1997.
- NAFM - NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURERS. **Standards, definitions, terms and test codes for centrifugal, axial and propeller fans**. 2.ed. Detroit: s.n., 1952. (Bulletin, 110).
- OSÓRIO, A.G.S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa: UFV, 1982. 57p.

Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1982.

OSÓRIO, A.G.S., SILVA, J.S., DALPASQUALE, V.A., OLIVEIRA, J.L. Secagem de café em secadores de fluxos concorrentes. **Informe Agropecuário**, v.9, n.99, p.18-24, 1983.

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: UFV, 1993. 72p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1993.

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 arabica* L.)**. Viçosa: UFV, 1994. 80p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.

RIGITANO, A., TOSELLO, A., SOUZA, O.F., GARRUTTI, R.S., JORGE, J.P.N. Influência da alta temperatura de secagem sobre a formação do gosto de óleo do café. **Bragantia**, v.22, n.66, p.799-805, 1963.

RIGITANO, A., TOSELLO, A., SOUZA, O.F., GARRUTTI, R.S., JORGE, J.P.N. Influência do parcelamento na secagem de café. **Bragantia**, v.23, n.24, p.299-322, 1964.

RUNSEY, T., THOMPSON, J. Ambient air drying of english walnuts. **Transactions ASAE**, v.27, n.3, p.942-945, 1984.

SILVA, L.C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes**. Viçosa: UFV, 1991. 74p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.

SILVA, J.S. Estado da arte da secagem e armazenagem de grãos, no Brasil. **Engenharia na Agricultura**. Série Armazenamento. v.3, n.1, Viçosa, MG, 1993. 17p.

SILVA, J.S., SABIONE, P.M., AFONSO, A.D.L., PINTO, F.A.C. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**. Série Armazenamento, v.2, n.2, p.1-17, 1992.

SOUZA, S.M.C. **O café (*Coffea arabica* L.) na região sul de Minas Gerais: relação da qualidade com fatores ambientais, estruturais e tecnológicos**. Lavras: UFLA, 1996.171p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, 1996.

- TOSELLO, A. Ensaio sobre a secagem dos produtos agrícolas pelo ar quente. **Bragantia**, v.6, n.2, p.39-109, 1946.
- VASCONCELOS, L.M., GROTH, D., RAZERA, L.F. Efeito de processos de secagem, diferentes graus de umidade e tipos de embalagens na conservação de sementes de café (*Coffea arabica* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v.14, n.2, p.181-188, 1992.
- VIEIRA, G. **Secagem intermitente de café (*Coffea arabica* L.) em secadores de fluxos cruzados e em secador experimental de camada fixa**. Lavras: UFLA, 1994. 91p. Dissertação (Mestrado em Processamento e Armazenamento de Grãos) Universidade Federal de Lavras, 1994.
- WILCKE, W.F., MOREY, R.V., HANSEN, D.J. Reducing energy use for ambient-air corn drying. **American Society of Agricultural Engineers**, v.9, n.2, p.241-248, 1993.
- WILLUMSEN, M.J., DUTT, A.K. Café, cacau e crescimento econômico no Brasil. **Revista de Economia Política**, v.11, n.3, p.49-67, 1991.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1A - Temperatura do ar de secagem e do ar na massa de grãos nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, durante o teste 1 de secagem no secador de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes

Tempo (h)	Ar de Secagem (°C)	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)	Ponto 5 (°C)
0	32,97	13,42	12,73	19,12	19,63	11,57
0,25	33,17	13,58	12,95	19,38	19,85	11,82
0,5	35,18	13,63	13,01	20,36	22,32	11,84
0,75	37,60	13,67	13,10	20,81	23,52	11,87
1,00	47,27	13,86	13,24	21,70	27,86	12,41
1,25	80,09	18,15	13,55	21,92	36,85	18,66
1,50	78,22	32,30	14,48	14,72	37,32	21,59
1,75	81,14	30,93	29,97	13,57	32,00	27,48
2,00	75,30	31,00	34,49	17,00	28,89	29,95
2,25	79,71	28,36	31,54	21,18	39,75	32,52
2,50	74,00	29,09	31,22	23,92	37,40	33,67
2,75	72,00	29,31	31,29	24,10	32,44	34,35
3,00	81,46	31,98	29,09	28,60	35,97	34,75
3,25	74,64	31,50	31,66	29,69	32,15	34,37
3,50	83,47	31,01	31,77	30,73	35,01	33,32
3,75	86,88	30,98	31,92	31,82	34,12	32,41
4,00	84,88	31,26	33,07	31,97	39,76	32,30
4,25	80,54	32,79	32,73	32,73	37,56	32,79
4,50	77,72	31,06	35,75	33,19	36,09	33,78
4,75	74,05	29,87	33,37	35,01	36,53	34,08
5,00	71,06	28,17	34,25	34,21	35,31	34,72
5,25	80,58	26,24	34,95	33,58	36,30	35,13
5,50	82,49	24,41	34,53	32,68	36,74	35,32
5,75	78,67	27,16	34,43	33,38	38,66	35,88
6,00	71,27	26,98	34,76	33,01	41,32	36,00
6,25	83,30	25,97	37,07	33,03	38,26	36,04
6,50	85,15	25,16	34,58	33,52	36,38	35,96
6,75	82,63	24,38	34,70	34,11	39,80	36,10
7,00	79,43	24,57	35,30	33,51	39,32	36,15
7,25	75,22	24,55	35,82	34,04	37,24	36,25
7,50	83,47	23,76	35,22	34,50	38,29	36,43
7,75	81,89	24,59	34,66	33,99	40,70	36,61
8,00	80,70	24,22	36,05	33,63	40,67	36,90
8,25	76,74	22,76	36,84	32,88	39,22	36,96
8,50	72,37	23,31	33,84	33,21	37,99	37,04
8,75	85,01	22,71	34,70	34,01	35,80	37,40
9,00	82,83	23,42	35,33	33,29	38,04	37,57
9,25	79,50	21,68	36,05	32,81	36,61	37,87

Quadro 2A - Temperatura do ar de secagem e do ar na massa de grãos nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, durante o teste 2 de secagem no secador de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes

Tempo (h)	Ar de Secagem (°C)	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)	Ponto 5 (°C)
0,00	35,32	28,43	27,34	24,07	22,84	22,84
0,25	36,92	28,08	23,86	22,45	22,38	22,80
0,50	36,96	23,58	23,37	22,54	22,45	22,77
0,75	59,89	23,68	23,14	22,45	22,78	22,70
1,00	66,03	26,40	23,06	22,48	30,98	22,73
1,25	61,48	30,10	23,74	22,83	33,88	22,95
1,50	61,29	29,53	25,94	22,93	29,75	23,25
1,75	64,00	29,21	27,40	23,90	28,86	23,40
2,00	67,57	29,23	27,67	25,77	29,46	23,40
2,25	69,09	29,85	30,24	25,48	40,59	24,00
2,50	71,53	32,51	28,51	26,95	30,89	24,42
2,75	68,84	30,66	34,15	28,91	31,43	25,26
3,00	72,41	30,62	32,77	28,44	31,93	25,43
3,25	71,19	30,30	32,00	27,96	32,04	25,25
3,50	79,51	30,90	32,60	29,07	32,66	25,16
3,75	81,69	35,10	31,15	31,41	45,19	25,74
4,00	79,35	35,22	31,37	31,98	34,61	26,60
4,25	78,45	33,65	36,74	31,59	35,56	28,45
4,50	77,30	33,29	34,70	33,50	36,40	28,77
4,75	74,19	33,51	33,84	34,37	36,11	29,34
5,00	76,83	33,85	33,79	34,22	36,39	29,40
5,25	82,60	33,96	34,06	33,96	37,21	29,85
5,50	78,21	32,94	34,08	34,04	37,47	30,22
5,75	80,01	29,59	34,98	34,22	36,27	30,71
6,00	80,34	28,80	34,69	34,30	37,46	30,79
6,25	74,75	28,60	34,37	34,61	38,24	31,17
6,50	75,52	27,70	34,88	34,41	37,91	31,04
6,75	77,39	27,29	34,54	34,42	38,12	31,13
7,00	72,41	27,16	34,27	34,69	38,40	31,20
7,25	68,67	26,47	34,40	34,44	37,62	31,71
7,50	64,53	23,47	34,49	31,70	35,20	31,49
7,75	75,78	22,80	34,56	30,25	33,68	31,34
8,00	78,36	23,20	34,69	30,48	34,12	31,16
8,25	75,78	28,32	34,64	31,83	45,62	31,36
8,50	74,80	27,38	34,05	32,93	37,64	31,38
8,75	77,39	25,99	36,02	32,93	35,86	32,01
9,00	76,72	25,44	33,79	34,65	35,44	34,75
9,25	75,12	26,16	32,40	33,81	33,75	35,27
9,50	70,09	26,09	33,45	32,56	32,53	34,96
9,75	85,35	25,20	33,65	33,21	32,17	34,59
10,00	86,35	25,61	33,47	33,41	35,55	34,61
10,25	83,39	25,93	32,87	33,21	36,48	36,73

Quadro 3A - Temperatura do ar de secagem e do ar na massa de grãos nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, durante o teste 3 de secagem no secador de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes

Tempo (h)	Ar de Secagem (°C)	Ponto 1 (°C)	Ponto 2 (°C)	Ponto 3 (°C)	Ponto 4 (°C)	Ponto 5 (°C)
0,00	24,20	28,52	26,04	24,36	23,57	23,35
0,25	24,88	30,08	27,03	25,05	23,97	23,78
0,50	25,43	30,40	27,90	25,45	24,37	24,18
0,75	26,20	30,25	28,38	26,42	25,49	29,12
1,00	25,81	29,85	26,39	24,99	24,22	29,73
1,25	43,76	31,40	23,54	23,40	22,80	29,94
1,50	55,29	31,78	23,31	23,27	23,64	30,00
1,75	62,37	33,26	23,30	24,98	25,36	29,75
2,00	65,63	34,14	23,30	26,64	27,09	29,72
2,25	68,50	33,93	23,30	27,63	28,18	29,76
2,50	77,18	35,99	23,28	28,43	29,32	29,77
2,75	82,94	36,60	23,29	29,87	31,16	29,77
3,00	79,64	34,54	23,33	30,72	32,46	29,82
3,25	72,17	20,11	23,70	32,38	33,47	29,81
3,50	71,01	24,00	26,68	29,13	55,51	29,62
3,75	74,20	26,19	37,06	27,16	42,04	29,69
4,00	69,75	25,57	35,41	30,82	37,29	30,15
4,25	75,11	24,57	33,10	34,14	37,04	30,38
4,50	73,06	25,14	32,60	32,72	42,22	30,52
4,75	66,79	25,03	33,68	31,11	42,42	30,33
5,00	68,21	24,72	33,91	30,88	39,59	30,19
5,25	70,11	24,75	33,97	31,07	38,44	30,08
5,50	75,78	24,81	33,95	31,36	38,71	29,99
5,75	83,45	24,40	32,41	31,47	54,07	30,12
6,00	83,39	27,70	39,57	31,95	46,88	30,78
6,25	79,33	26,94	38,26	32,28	44,26	31,85
6,50	78,50	26,49	36,33	36,45	43,89	32,10
6,75	76,86	25,76	36,48	34,88	41,39	31,40
7,00	77,64	25,37	36,90	34,37	38,87	31,60
7,25	77,05	25,50	36,91	33,99	37,72	31,40
7,50	84,12	25,41	36,95	34,09	37,96	31,40
7,75	81,47	26,42	34,78	33,96	61,89	31,47
8,00	73,37	28,02	42,13	33,14	46,38	32,45
8,25	79,08	26,00	35,98	37,27	41,44	39,25
8,50	78,23	26,62	37,18	36,92	42,43	38,71
8,75	78,08	25,17	37,93	34,67	41,07	38,66
9,00	74,53	24,52	38,24	34,80	39,49	38,65
9,25	74,78	24,42	38,40	34,78	38,63	38,59
9,50	74,24	24,53	38,52	34,69	38,74	38,48
9,75	84,36	25,44	34,08	33,67	58,13	38,31
10,00	83,86	28,62	43,93	34,14	49,47	39,00
10,25	78,45	27,59	41,57	36,17	44,91	41,09
10,50	81,38	27,62	38,30	39,67	42,30	41,42
10,75	76,06	26,53	38,59	37,34	42,41	39,92
11,00	70,55	25,67	38,70	36,28	40,93	39,61
11,25	65,48	25,50	39,01	35,47	39,45	39,63
11,50	62,66	25,30	39,29	34,96	38,84	39,73

Quadro 4A - Temperatura e umidade relativa do ar de exaustão do secador de altas temperaturas, durante os testes 1, 2 e 3

Tempo (h)	T1 exhaust. (°C)	T2 exhaust. (°C)	T3 exhaust. (°C)	UR1 exhaust. (%)	UR2 exhaust. (%)	UR3 exhaust. (%)
0,00	18,6	21,6	18,6	100	87	56
0,25	18,2	22,2	19,2	100	87	56
0,50	20,4	22,4	19,3	95	86	54
0,75	20,8	22,5	19,8	100	86	59
1,00	24,3	26,4	18,3	95	93	49
1,25	31,9	27,9	22,6	94	94	90
1,50	30,0	28,0	22,1	100	96	89
1,75	29,6	27,6	22,6	100	92	90
2,00	31,2	27,2	24,1	94	91	96
2,25	29,4	30,8	25,6	94	92	98
2,50	27,5	30,4	26,7	88	90	97
2,75	30,2	30,2	27,8	88	90	97
3,00	32,3	30,0	29,1	82	89	98
3,00	32,5	29,6	27,4	88	90	99
3,50	33,3	29,7	30,6	88	91	98
3,75	34,4	33,5	31,5	82	94	81
4,00	35,7	33,9	31,4	83	91	84
4,25	34,3	32,9	31,5	82	90	81
4,50	33,4	32,6	30,9	82	93	84
4,75	32,3	32,4	31,5	88	90	85
5,00	32,4	31,9	30,3	94	88	85
5,25	33,7	32,2	29,5	94	90	85
5,50	36,3	32,8	29,4	83	89	87
5,75	34,7	31,9	29,5	88	86	89
6,00	33,6	32,0	32,9	94	88	86
6,25	34,4	32,1	34,1	88	92	85
6,50	34,3	31,6	33,5	88	86	81
6,75	34,1	31,5	32,9	88	86	80
7,00	33,0	31,5	31,9	88	86	85
7,25	32,1	30,9	31,2	94	87	84
7,50	32,0	29,9	30,9	94	86	85
7,75	32,2	29,2	31,0	94	85	87
8,00	34,5	29,9	34,0	88	88	84
8,25	33,6	32,9	33,7	88	89	71
8,50	31,8	31,6	32,2	100	85	71
8,75	31,1	30,7	31,6	100	86	72
9,00	33,3	30,6	31,4	94	85	78
9,25		30,5	31,1		84	82
9,50		30,3	30,7		83	81
9,75		29,9	30,4		82	82
10,00		30,9	32,9		89	85
10,25		32,1	34,3		89	73
10,50			33,4			70
10,75			32,8			68
11,00			31,2			66

Quadro 5A - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante os testes 1, 2 e 3, no secador de altas temperaturas

Tempo (h)	T1ambient. (°C)	T2 ambient. (°C)	T3 ambient. (°C)	UR1 ambient. (%)	UR2 ambient. (%)	UR3 ambient. (%)
0,00	18,8	25,8	23,9	60	58	57
0,25	20,3	25,8	24,3	54	59	56
0,50	20,5	26,5	24,8	54	53	55
0,75	21,9	27,0	24,9	48	53	54
1,00	21,0	26,4	25,0	55	56	50
1,25	21,1	27,1	25,2	48	53	50
1,50	21,6	26,6	26,1	48	51	48
1,75	21,5	27,1	25,5	55	54	47
2,00	21,2	26,7	26,2	48	51	47
2,25	21,9	26,9	25,3	48	48	49
2,50	21,1	26,7	26,1	55	49	47
2,75	21,8	26,8	26,0	55	49	47
3,00	21,3	26,4	25,3	48	55	45
3,25	21,6	25,6	19,8	48	59	86
3,50	21,5	23,5	19,5	48	77	87
3,75	21,6	22,6	19,3	48	81	88
4,00	20,7	21,7	19,2	54	85	88
4,25	20,1	21,1	19,1	54	85	89
4,50	18,9	20,6	18,9	77	85	90
4,75	16,3	20,2	19,3	85	86	87
5,00	15,2	20,2	19,3	95	86	87
5,25	15,3	19,9	19,3	95	86	88
5,50	14,8	19,8	19,3	95	85	88
5,75	14,0	19,3	19,0	95	87	91
6,00	13,3	19,2	19,1	95	86	89
6,25	13,8	18,7	18,9	95	86	90
6,50	13,7	18,8	18,9	84	85	90
6,75	12,6	18,4	18,8	95	87	90
7,00	12,3	18,2	18,7	95	87	91
7,25	12,5	17,4	18,5	95	91	92
7,50	12,7	17,7	18,9	95	88	87
7,75	11,1	17,1	18,1	100	90	92
8,00	12,4	16,8	18,3	84	92	92
8,25	11,7	16,9	18,5	95	89	90
8,50	11,5	16,7	18,7	95	89	89
8,75	11,9	16,9	17,8	95	86	96
9,00		16,5	17,4		88	99
9,25		16,5	18,3		88	92
9,50		16,1	17,5		90	96
9,75		16,1	18,2		88	92
10,00		16,2	18,5		86	91
10,25		15,5	17,7		91	96
10,50			18,3			91
10,75			17,2			99
11,00			18,1			92
11,25			18,1			93
11,50			17,5			97

APÊNDICE B

Quadro 1B - Temperatura do ar ambiente e do ar na massa de grãos, nas camadas situadas a 0,05; 0,50; 0,95 e 1,40 m do fundo do silo, a cada hora, em um dia médio do período de realização do teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas

Hora	Ambiente (°C)	0,05 m (°C)	0,50 m (°C)	0,95 m (°C)	1,40 m (°C)
0	15,68	23,79	22,74	20,70	15,43
1	15,27	23,59	22,77	20,74	14,92
2	14,86	23,39	22,80	20,78	14,55
3	14,53	23,18	22,84	20,82	14,18
4	14,27	22,96	22,87	20,86	13,84
5	13,81	22,75	22,91	20,91	13,58
6	13,81	22,53	22,93	20,96	13,24
7	13,58	22,32	22,96	21,00	13,01
8	13,66	22,11	22,99	21,05	12,88
9	15,17	21,50	22,78	20,85	14,79
10	18,04	20,67	22,10	21,13	18,84
11	20,82	21,10	20,38	19,27	19,04
12	22,40	22,61	20,36	19,37	19,25
13	23,45	23,79	20,73	19,59	19,74
14	24,26	24,75	21,29	19,83	20,17
15	25,01	25,79	21,74	19,98	20,44
16	25,27	26,40	22,21	20,28	20,62
17	24,65	26,08	22,54	20,44	20,75
18	22,31	24,59	22,79	20,60	20,90
19	19,42	24,21	22,84	20,64	19,65
20	18,21	24,16	22,89	20,68	18,34
21	17,33	24,08	22,92	20,71	17,37
22	16,58	23,97	22,95	20,74	16,55
23	15,93	23,83	22,97	20,77	15,83
24	15,64	23,70	22,99	20,80	15,38

Quadro 2B - Temperatura média do ar ambiente e do ar na massa de grãos, nas camadas situadas a 0,05; 0,50; 0,95 e 1,40 m do fundo do silo, durante a realização do teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas

Data	Ambiente (°C)	0,05 m (°C)	0,50 m (°C)	0,95 m (°C)	1,40 m (°C)
24/06/97	19,09	17,81	17,75	18,39	18,64
28/06/97	21,90	23,37	21,02	19,43	18,77
29/06/97	18,69	23,71	21,34	20,36	16,93
30/06/97	18,60	24,04	21,44	20,32	16,89
01/07/97	18,07	23,51	21,36	20,02	17,00
02/07/97	18,53	22,44	20,79	19,47	17,31
03/07/97	18,09	22,81	20,98	19,36	16,35
04/07/97	18,74	24,27	22,57	20,57	17,00
05/07/97	19,54	24,02	22,83	20,63	17,90
06/07/97	17,90	24,09	22,30	19,94	16,93
07/07/97	18,24	24,20	22,51	19,71	16,87
08/07/97	18,27	24,34	22,88	20,01	17,01
09/07/97	20,41	24,71	23,42	20,12	19,09
10/07/97	18,15	23,58	23,45	20,52	16,38
14/07/97	19,97	22,45	23,42	21,85	18,96
15/07/97	17,44	22,80	23,47	21,76	16,72
16/07/97	17,02	22,93	24,04	22,18	16,13
17/07/97	16,38	22,17	23,85	22,33	15,58
18/07/97	13,62	20,82	23,45	22,19	13,54

APÊNCICE C

Quadro 1C - Variação do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante os testes 1, 2 e 3 no secador intermitente de altas temperaturas e fluxos contracorrentes/concorrentes

Tempo (h)	Teste 1, Teor de umidade (% b.u.)	Teste 2, Teor de umidade (% b.u.)	Teste 3, Teor de umidade (% b.u.)
0	32,6	42,2	24,0
3,5	30,1	37,0	21,8
4,5	28,0	35,0	20,3
5,5	27,5	34,5	19,3
6,5	27,0	33,3	17,2
7,5	26,4	33,1	16,2
8,5	25,8	32,0	15,7
9,3	25,6	31,5	15,0
10,2		31,0	14,5
12,0			14,0

Quadro 2C - Variação, média e por camada, do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante o teste 1, na etapa de secagem a baixas temperaturas nos silos secadores

Tempo (h)	0,1 m (% b.u.)	0,6 m (% b.u.)	1,10 m (% b.u.)	Média (% b.u.)
0	26,0	26,0	26,0	26,0
32	24,8	25,1	25,1	25,0
128	22,5	24,2	24,4	23,7
176	19,1	23,3	24,0	22,1
224	17,2	20,8	23,3	20,4
296	16,8	19,6	21,4	19,4
344	14,9	18,6	21,3	18,3
392	12,9	16,6	20,6	16,7
464	12,3	15,1	19,4	15,6
512	12,2	14,4	19,0	15,2
560	11,7	13,5	18,3	14,6
632	11,4	12,2	15,4	13,0

Quadro 3C - Variação, média e por camada, do teor de umidade do café em função do tempo de secagem, durante o teste 2, na etapa de secagem a baixas temperaturas nos silos secadores

Tempo (h)	0,1 m (% b.u.)	0,6 m (% b.u.)	1,10 m (% b.u.)	Média (% b.u.)
0	31,0	31,0	31,0	31,0
32	30,4	30,8	30,9	30,7
80	23,4	30,4	30,8	28,2
152	16,9	28,2	29,4	24,8
200	14,5	26,3	28,4	23,0
248	13,1	24,0	27,1	21,4
320	11,7	18,0	25,5	18,4
368	11,4	16,1	24,5	17,3
416	11,4	13,3	22,2	15,6
488	11,1	13,1	18,7	14,4
536	10,8	12,6	16,5	13,3
584	10,2	12,0	16,0	12,7