

LUÍS CÉSAR DA SILVA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SECADOR
DE CAFÉ (Coffea arabica L.) INTERMITENTE
DE FLUXOS CONTRACORRENTES

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências de Curso de Engenharia
Agrícola, para Obtenção do Título
de "Magister Scientiae".

VICOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JANEIRO - 1991

Aos meus pais,
Ao meu irmão,
Aos meus familiares,
A Sônia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela proteção e pelos benefícios concedidos.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, à Universidade Federal de Viçosa - UFV, à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Professor Juarez de Sousa e Silva, pelo apoio e pela dedicada orientação.

Ao Professor Daniel Marçal de Queiroz, pelo apoio e pela valiosa colaboração no desenvolvimento do programa de computador.

Aos Professores Delly Oliveira Filho e Adílio Flauzini de Lacerda Filho e ao Engenheiro de Alimentos José Antônio Marques Pereira, pelas valiosas críticas e sugestões.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo indispensável apoio na realização deste trabalho.

Aos proprietários e funcionários das Fazendas São Geraldo e Colônia, pela colaboração.

Aos alunos Ana Claudia Baiker e Almir Casais Costa, pela colaboração na obtenção dos dados.

Aos colegas de curso, que me proporcionaram um agradável convívio.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

LUÍS CÉSAR DA SILVA, filho de Sebastião José da Silva e Maria do Carmo Araújo da Silva, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 27 de maio de 1963.

Em julho de 1985, graduou-se em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 1986, ingressou na Fundação Universidade Estadual do Oeste do Paraná, onde, ligado à Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Cascavel, Cascavel-PR, é professor no Departamento de Engenharia Agrícola.

Em agosto de 1987, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
1 . INTRODUÇÃO	1
2 . REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Secagem	4
2.2. Secagem Artificial	5
2.2.1. Secagem em Fluxos Contracorrentes	6
2.3. Secagem de Café	9
2.3.1. Qualidade do Produto Final	10
2.4. Simulação de Secagem	12
2.4.1. Modelo de THOMPSON	13
3 . MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Protótipo	17
3.2. Procedimento Experimental	19
3.2.1. Temperaturas	19
3.2.2. Pressões	20
3.2.3. Teor de Umidade e Massa Específica	20
3.2.4. Condições Ambientais	21
3.2.5. Uso de Combustível	21
3.3. Simulação de Secagem	21
4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. Temperaturas	24

	Página
4.1.1. Temperatura do Ar de Secagem	27
4.1.2. Temperatura da Massa de Grãos	27
4.1.3. Temperaturas do Ar de Exaustão e no Ponto A	31
4.2. Teor de Umidade	32
4.3. Massa Específica	32
4.4. Energia	33
3.5. Simulação de Secagem	34
1.6. Qualidade do Produto Final	39
4.7. Avaliação de Desempenho do Protótipo	41
5. RESUMO E CONCLUSÕES	44
BIBLIOGRAFIA	37
APÊNDICES	51

EXTRATO

SILVA, Luís César da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 1991. Desenvolvimento e Avaliação de um Secador de Café (Coffea arabica L.) Intermitente de Fluxos Contracorrentes. Professor Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Professores Conselheiros: Daniel Marçal de Queiroz e Delly Oliveira Filho.

Com o objetivo de introduzir a secagem em fluxos contracorrentes no Brasil foi projetado, construído e avaliado um protótipo de secador intermitente de fluxos contracorrentes, destinado à secagem de café, adaptado à realidade brasileira.

Como ferramental para as fases de projeto e avaliação foi implementado um programa de computador para a simulação do processo de secagem baseado no modelo proposto por THOMPSON *et alii* (33).

Para condução dos testes, a secagem do café até o estágio de meia seca foi executada em secador de leite fixo a 50°C e fluxo de ar de $3,8 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A complementação foi executada em secador intermitente de fluxos contracorrentes; utilizando as temperaturas de 60, 80 e 100°C , fluxo de ar de $18,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e fluxo de grãos de $0,13 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

De acordo com os dados experimentais e o programa de simulação desenvolvido para a redução do teor de umidade de 0,43 para 0,14 b.s. foi constatado: consumos específicos de energia de 8.380, 7.547 e 6.442 kJ kg⁻¹ de água evaporada; capacidade de secagem de 50,2, 76,1 e 105,9 kg h⁻¹ e tempos de secagem de 21,5; 14,2 e 10,2h para as temperaturas de 60, 80 e 100°C, respectivamente.

De modo geral, em razão do transportador helicoidal, o produto seco no secador apresentou uma ligeira degeneração de tipo. Com relação à qualidade da bebida, este produto apresentou melhor resultado quando comparado à classificação das amostras-testemunhas, secas em terreiros. No que se refere aos efeitos das temperaturas do ar de secagem sobre a qualidade do produto final, secos no secador, não foram constatados. Recomenda-se, portanto, a utilização da temperatura do ar de secagem de 100°C e a substituição do transportador helicoidal por um transportador de correias.

1. INTRODUÇÃO

A produção anual média de café beneficiado no Brasil na década de 80 foi na ordem de 24,2 milhões de sacas, sendo 41% destas destinadas ao consumo interno e 69% às exportações (8).

Até julho de 1989, pelo AIC (Acordo Internacional do Café), ao Brasil era garantida uma cota de 30% do mercado mundial. Porém, com a extinção do acordo e o aumento da oferta fez com que os países importadores passassem a optar por café de melhor qualidade. Essa demanda o Brasil não tem conseguido atender, por não adotar uma política que estimule a produção de café de qualidade (7, 8).

A não-obtenção de café de qualidade está correlacionada, principalmente, às práticas adotadas no processamento. Dentre essas, a secagem tem peso considerável, em razão de seus efeitos sobre a qualidade do produto final (3, 10, 24, 27).

No Brasil predomina a secagem do café em terreiros, necessitando-se de um período de 10 a 15 dias para a realização do processo (10). Em virtude desse longo período, o produto fica exposto a agentes biológicos e circunstâncias climáticas que proporcionam a perda da qualidade do produto e, conseqüentemente, o valor comercial (10, 20, 27). Para contornar esses problemas é recomendado o emprego de secadores mecânicos, o que implica em gastos significativos com

investimentos pasa a aquisição do sistema e com consumos energéticos. Como fonte de energia, a mais utilizada pelos cafeicultores é a madeira proveniente das matas nativas, já que não é tradição o cultivo de espécies florestais para tal finalidade.

Outro fator importante e que influencia negativamente tanto no aspecto da qualidade quanto no de consumo de energia é que os secadores no geral utilizados são oriundos de adaptações realizadas em equipamentos destinados à secagem de cereais ou de oleaginosas, sem se promover os devidos estudos de adequação (10).

Um modelo de secador ainda não difundido no mercado nacional, que é caracterizado pelo baixo custo operacional e pelo baixo consumo de energia (3.500 a 4.500 kJ kg⁻¹ de água evaporada) é o dos silos secadores, que operam em fluxos contracorrentes (2, 6, 29). A não-difusão do sistema no Brasil está vinculada ao baixo poder aquisitivo dos cafeicultores e à dificuldade por parte das indústrias na aquisição e, ou, desenvolvimento de tecnologia.

Pasa a adaptação e, ou, desenvolvimento de secadores são recomendados a construção de protótipos e a implementação de programa de computador para simular o funcionamento do sistema.

Pasa simulação da secagem são difundidos vários modelos, dentre eles o proposto por THOMPSON *et alii* (333, de caráter semi-teórico, tem apresentado aplicabilidade em termos de engenharia, apesar de simplificações adotadas na sua formulação. Com a simulação são evitados gastos desnecessários, como mão-de-obra, material e tempo no desenvolvimento e na avaliação de secadores (21, 33).

Em virtude dos problemas enumerados, este trabalho teve por objetivo introduzir no País a tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes, por meio das seguintes proposições:

- 1.1. projetar um novo secador para a secagem de café adaptado à realidade brasileira que opere em fluxos contracorrentes;
 - 1.1.1. construir e avaliar o secador, considerando o aspecto energético e a qualidade do produto final; e

- 1.1.2. implementar um programa de computador para *a* simulação *de* secagem de café em fluxos contracorrentes, com base no modelo proposto por THOMPSON et alii (33).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Secagem

A secagem de produtos agrícolas é uma operação que tem por objetivo a retirada do excesso de água a um nível que propicie condições adequadas para o beneficiamento, armazenagem e comercialização (5, 11, 26). A adoção generalizada da referida técnica esta vinculada a fatores como o menor custo e a facilidade de execução, isto quando comparada à refrigeração, ao enlatamento, aos tratamentos químicos e à irradiação (25).

Basicamente existe dois tipos de secagem, a natural e a artificial. A natural consiste na exposição do produto à radiação solar, sendo realizada na própria planta. Este tipo de secagem é muitas das vezes dificultado por períodos de baixa taxa de radiação, em razão do índice de nebulosidade. Outro fator a ser considerado é a possibilidade de degeneração do produto, em virtude do ataque de microrganismos e insetos (11). Estes fatores também são influentes na secagem artificial, executada em terreiros.

A secagem artificial, utilizando-se secadores mecânicos, caracteriza-se por permitir (13):

- antecipação da colheita, reduzindo perdas no campo;
- planejamento da calendário agrícola, o que possibilita usar o tempo mais racionalmente; e

- execução independente das condições climáticas.

O método de **secagem** a ser empregado depende de diversos fatores, dentre eles o nível de **instrução** da produtor e do operador, **do poder aquisitivo** do produtor, **do volume de produção**, **da velocidade de colheita** e do sistema de recepção e do fim que **se destina** o produto (11, 18).

2.2. Secagem Artificial

A secagem artificial', que utiliza **secadores mecânicos**, pode *ser* executada em temperaturas baixas, altas ou ainda de forma **combinada**. A secagem em **baixas** temperaturas utiliza o ar **natural** ou levemente aquecido. Geralmente **este** tipo de secagem **é realizado** em silos que possuem o fundo perfurado, por onde o ar **é insuflado** por um ventilador (11).

A secagem em altas temperaturas utiliza o ar aquecida a mais de 10°C , acima da temperatura ambiente, e < nesta categoria que se encontram os **secadores** do tipo leito fixo, cascata, fluxos cruzados, fluxos concorrentes e fluxos contracorrentes. Quanto à forma de operação, com exceção dos **secadores de leito Eixo**, eles podem ser contínuos ou intermitentes (5). São contínuos quando o produto passa pelo secador **uma única vez**, e intermitentes quando há a necessidade do produto recircular pelo secador **virias vezes**, até que se ja atingido' o teor de umidade desejado (11).

A secagem *de* forma **combinada** representa o avanço mais recente. Esta técnica consiste em **realizar a secagem** em altas temperaturas até que o teor de umidade seja reduzido para a faixa de L6 a 18%b.u. A partir *deste* ponto, a secagem passa a **ser executada** em um sistema que opere em baixas temperaturas. Com a adoção desta técnica o consumo *de* energia **é** reduzido, a capacidade do sistema **é** aumentada e o produto final apresenta melhor qualidade do que sistemas que operam em altas temperaturas (S, 11, 29).

2.2.1. Secagem em Fluxos Contracorrentes

A secagem em fluxos contracorrentes é caracterizada nos silos **secadores** {Figura 1} em que **se têm** os **sentidos** **contrários** dos fluxos de ar e de grãos. **Neste** tipo de secador a frente de secagem permanece sempre **próxima** da **fundo** perfurado. **A medida** que **ocorre** a secagem, o produto **seco** é conduzido para o centro por um transportador **helicoidal** que varre toda a **seção** transversal. Uma **segunda** rosca **retira** o produto, podendo **conduzi-la** para a parte superior da camada, funcionando assim de forma **intermitente**, ou então para um silo **armazenador**, passando a **funcionar** de forma **contínua**. Sendo assim, a massa de grãos tem sentido **descendente**, **enquanto** o ar é insuflado em sentido **ascendente** (6, 29).

A ativação de sistema de movimentação de grãos é coordenada por um **termostato** colocado a 0,46 m acima do "plenum", que é **aferido** para o **acionamento** quando **há** ocorrência de **uma temperatura pré-estabelecida** (2, 6).

Nos silos secadores de fluxos contracorrentes, à medida que a **massa** de grãos vai **descendo** a sua temperatura é **aumentada**, **atingindo** valores **muito** próximos à temperatura da ar de secagem. Por isso, as temperaturas de secagem nesse tipo de secador **normalmente** não devem **ultrapassar** a **70°C** (2).

Segundo BROOKER et alii (5), a secagem em fluxos **contracorrentes** em silos apresenta as seguintes **características**:

- não há perda de energia, uma vez que não **se** permite **que** o produto atinja o teor de umidade de **equilíbrio**;

- os grãos são sujeitos a **temperaturas** elevadas quando ainda **possuem** um teor de umidade que possibilita o uso da energia do ar para a secagem. Isso evita que o produto atinja a temperatura do ar de secagem. **Comparando** com os secadores de leito fixo, o tempo de exposição **às** condições do ar de secagem é menor;

- como não se obtém produto **superseco**, os danos **mecânicos** durante o transporte **são** reduzidos; e

- se o sistema operar de forma **contínua**, tem-se o **aumento** da **flexibilidade** e **eficiência** do sistema.

- 1 - Termostato
- 2 - Sistema de aquecimento e ventilador
- 3 - "Plenum"
- 4 - Sistema de movimento de grãos

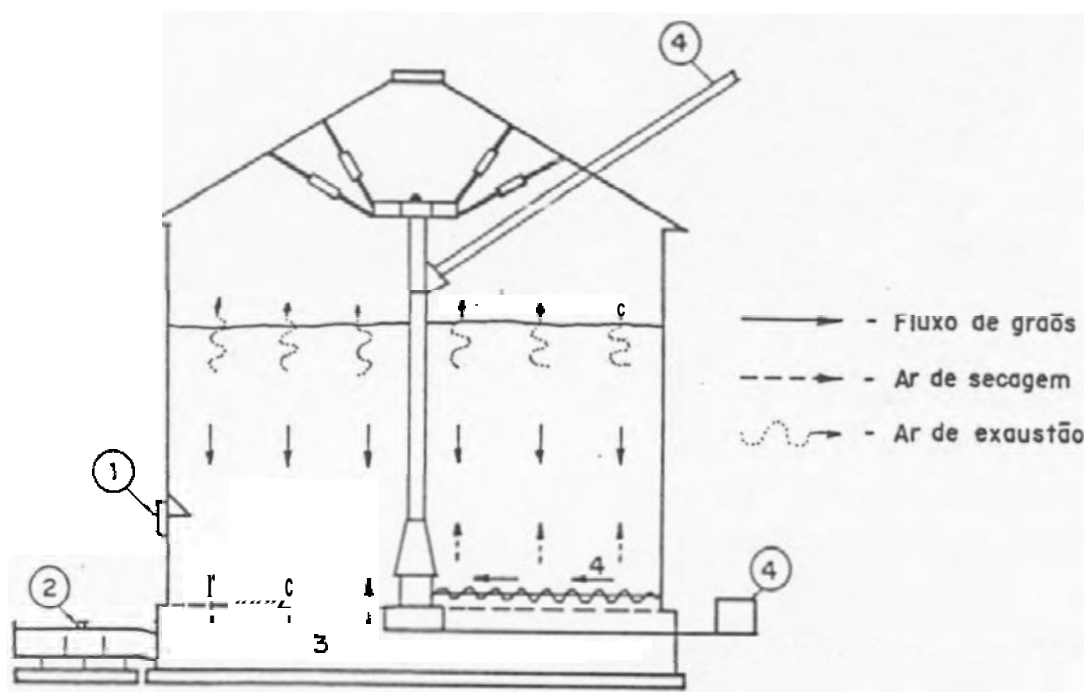


FIGURA 1 - Esquema de um Silo Secador em Fluxos Contra-correntes (6).

Segundo Evans, citado por SILVA (29), os secadores de fluxos contracorrentes são os menos eficientes no uso da energia do ar de secagem, pois parte da energia é utilizada para o aquecimento dos grãos, reduzindo a disponibilidade para a realização da secagem. Entretanto, segundo BROOKER et alii (6), se a espessura da camada de grãos for suficiente para absorver o potencial do ar de secagem, o consumo de energia nestes secadores torna-se relativamente baixo, podendo apresentar um consumo específico de energia entre 3.500 a 4.600 kJ kg⁻¹ de água evaporada.

Na operação dos silos secadores devem ser adotados procedimentos com a limpeza da massa de grãos e o nivelamento da altura da carga. Tais procedimentos visam a distribuição uniforme do fluxo de ar, propiciando assim uma secagem uniforme (5, 29).

A espessura da camada de grãos nos silos secadores pode ser de 0,6 a 5 m. O aumento da espessura faz com que a resistência ao fluxo de ar seja aumentada, o que, conseqüentemente, reduz a capacidade de secagem (2, 5). Outro cuidado com relação à definição da espessura da camada está correlacionado à possibilidade de ocorrência de condensação, pois o ar que abandona a zona de secagem, saturado ou próximo da saturação, ao translocar pela massa de grãos pode trocar calor com o produto, reduzindo assim a sua temperatura, o que, dependendo da situação, pode ocasionar a condensação (5).

THOMPSON et alii (32), ao simular o funcionamento dos secadores de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes, considerando o mesmo fluxo de ar e a espessura de camada de milho, concluíram que são nos de fluxos contracorrentes que se tem a maior capacidade de secagem.

SILVA (29), trabalhando com milho, comparou o desempenho dos silos secadores com os de outros quatro tipos diferentes e concluiu que:

- a qualidade do produto final nos silos secadores é superior à dos outros que utilizam altas temperaturas;
- a operação não requer constante supervisão; e
- ao se comparar fatores como consumo de energia, custos operacionais e de implantação os silos secadores apresentaram como uma das melhores alternativas.

Outra forma de emprego dos fluxos **contracorrentes** é a utilização no **resfriamento** de grãos fazendo parte de **secadores de fluxos concorrentes**. Os princípios são os mesmos da secagem, só que o interesse passa a ser a **retirada** de calor (5, 14, 15).

2.3. Secagem de Café

No Brasil ainda é **predominante** a **secagem** de café em **terreiros**, os quais podem ser **construídos** de cimento, de tijolos ou ainda de **chão batido**. O produto é **espalhado** sobre a superfície e **periodicamente revolvido**. À medida que o produto tem o teor de umidade reduzido, a **espessura** da camada é **aumentada**. Quando o café atinge o **estádio** de meia seca é **recomendado** amontoá-lo e **cobri-lo** quando as condições não são adequadas para a secagem. Tais procedimentos **repetem-se** até que seja **complementado** o processo (31).

Segundo **QUILAQUEO** (24), qualquer que seja o método de **secagem** empregado deve-se:

- evitar a **fermentação** do produto;
- evitar a **excesso** de **temperatura**;
- **secar** os grãos, **até** 18% b.u., no menor período possível; e
- **procurar** obter um produto com características **uniformes**.

A **ocorrência** de fermentação é resultado da ação de **microrganismos** que **encontram** condições favoráveis para a **proliferação**, em decorrência do alto teor de umidade do café no início da **secagem** (70 a 60% b.u.) e da constituição do **pericarpo** (7, 20, 27). Para contornar este problema tem sido **recomendado** trabalhar com o café **despolpado**. Com a **remoção** do **pericarpo**, o **teor** de umidade é reduzida para 50% b.u. e se **elimina** substratos para o desenvolvimento de **microrganismos** (3, 7, 27).

Em razão do alto **teor** de umidade e da **pouca** fluidez que o **café** apresenta no **início** da secagem, é **impraticável** a secagem em secadores que **possuem** os equipamentos **tradicionais** de **transporte** de grãos. Sendo, portanto, **necessária** a **realização** da **pré-secagem**, que pode ser executada em **terreiros**

ou em secadores de Leito fixo (16, 18).

Segundo Hara e Northmere, citados por TASCÓN (31), a secagem em terreiros ou à exposição por um período de tempo à luz solar promove a ocorrência de reações fotoquímicas que propiciam a obtenção de produto com melhor qualidade de bebida e um melhor comportamento durante a secagem.

Mônaco, citado por VILELA (34), recomenda combinar a secagem natural com a artificial da seguinte forma: secagem em terreiros até 40 a 35% b.u., secagem em alta temperatura até 20% b.u. e complementar a secagem em tulhas com ventilação forçada.

LACERDA FILHO (16), realizando a avaliação dos seguintes sistemas de secagem de café: secagem em terreiros, secagem em secador de leito fixo, combinação entre secagem em terreiros e secagem em leito fixo, combinação entre a secagem em terreiro e a secagem em fluxos concorrentes e combinação entre a secagem em leito fixo e a secagem em fluxos concorrentes, concluiu que técnica e operacionalmente o melhor desempenho foi obtido no último sistema.

2.3.1. qualidade do Produto Final

A cafeicultura nacional vem atravessando uma fase de transformações, em virtude da extinção do AIC. Em termos de quantidade, a produção brasileira é suficiente para atender os mercados interno e externo. Porém, no momento, em virtude do aumento da oferta, a opção do mercado externo é por café de qualidade (8).

Segundo PUZZI (20), a qualidade do café brasileiro tem como fatores desfavoráveis a presença de grãos podres, verdes e, principalmente, de ardides. Estes têm origem na má condução da colheita e, ou, da secagem,

Um dos fatores que poderia contribuir para a melhoria da qualidade do café brasileira seria o conhecimento, por parte dos cafeicultores, das normas de classificação. Assim passariam a dispensar maiores cuidados no processamento, o que, conseqüentemente, resultaria em maior valorização do produto (20).

No Brasil, classifica-se o café segundo seis critérios, que são: cor, peneira, torração, bebida, tipo e descrição (9, 20, 27).

a) Classificação quanto à cor

A cor é a indicados do grau de envelhecimento do café. Nesta classificação são empregadas as seguintes denominações: verde, esverdeado, claro, amarelo e velho. Contribuem para a variação da cor o teor de umidade, o tempo da exposição aos raios solares, o método de preparo, as condições de armazenagem e o brunimento (20).

b) Classificação quanto à peneira

A classificação quanto à peneira tem por base as dimensões e a forma dos grãos, procedendo a classificação em: chato-grosso, médio e miúdo, moca-graúdo, médio e miúdo, quebrado (com no mínimo 2/3 dos grãos inteiros) e minimal, que corresponde aos resíduos (conchas, triângulos, quebrados, marinheiros e côco), com 10% de grãos pretos e ardidos (9).

c) Classificação quanto ao aspecto ou torração

O café é classificado como de torração fina, boa, regular e má, de acordo com a maior ou menor homogeneidade do produto (27).

d) Classificação quanto à qualidade da bebida

A classificação da qualidade da bebida é feita de acordo com o sabor detectado na prova da mistura resultante da infusão do produto torrado e moído, classificando segundo os critérios (9):

- Estritamente mole; gosto doce, muito suave;
- Mole: gosto doce e suave;
- Duro: gosto áspero;
- Rio: gosto áspero, lembrando iodofórmio; e
- Riado: gosto leve de rio.

e) Classificação quanto ao tipo

A classificação do café por tipo consiste na determinação dos grãos imperfeitos e, ou, impurezas contidas em amostras de 300 gramas. Nesta classificação existem sete tipos numerados, de dois a oito.

f) Descrição ou caracterização

São observações feitas pelos classificadores no que se refere à caracterização de uma variedade, a detecção de algum odor ou a constatação de algum acidente ocorrido durante o processamento (27).

2.4. Simulação de Secagem

Com a facilidade de utilização de computadores, a simulação matemática da secagem de produtos agrícolas transformou-se numa ferramenta de importância no desenvolvimento, avaliação e otimização de secadores, economizando gastos com material, mão-de-obra e tempo (21, 22, 23).

Os modelos geralmente são utilizados para preverem a perda de umidade do produto como função das condições iniciais do produto, das condições do ar de secagem e da configuração do secador (22, 31).

Vários modelos são conhecidos, como o de HUKIIL, que foi um dos primeiros propostos, o qual baseia-se numa equação que prevê o teor de umidade do produto conforme a altura da camada e o tempo de secagem. O de Michigan, que baseia-se em leis de transferências de calor e massa entre ar e grãos, o de Morey, que é utilizado na simulação de secagem em baixas temperaturas, envolvendo equações que descrevem os processos de secagem e reumedecimento, e o de THOMPSON, considerado como semiteórico, per envolver um conjunto de equações baseadas em leis de transferências de energia e massa e uma equação empírica de secagem em camada delgada (5, 22).

2.4.1. Modelo de THOMPSON

Para o desenvolvimento do modelo, adotou-se o artifício de dividir o processo de secagem em vários subprocessos. Assim o leito de grãos passa a ser composto por várias camadas de espessura reduzida, colocadas uma sobre as outras. As variações nas condições das massas de ar e grãos, em cada camada, são simuladas a cada incremento de tempo (22, 32).

Na Figura 2 é apresentado um esquema demonstrando como ocorre as variações na simulação de secagem de uma camada delgada, segundo o modelo proposto por THOMPSON *et alii* (33).

Quando o ar passa pela camada delgada, durante um determinado intervalo de tempo, certa quantidade de água é evaporada e transferida ao ar. Neste intervalo a temperatura do ar decresce em consequência do aumento de temperatura dos grãos e do resfriamento evaporativo que acompanha a transferência de umidade. A quantidade de água perdida pelo produto é calculada por meio de uma equação empírica de secagem em camada delgada. Após o balanço de energia, consistente com o resfriamento evaporativo, define-se a temperatura do ar e dos grãos (22).

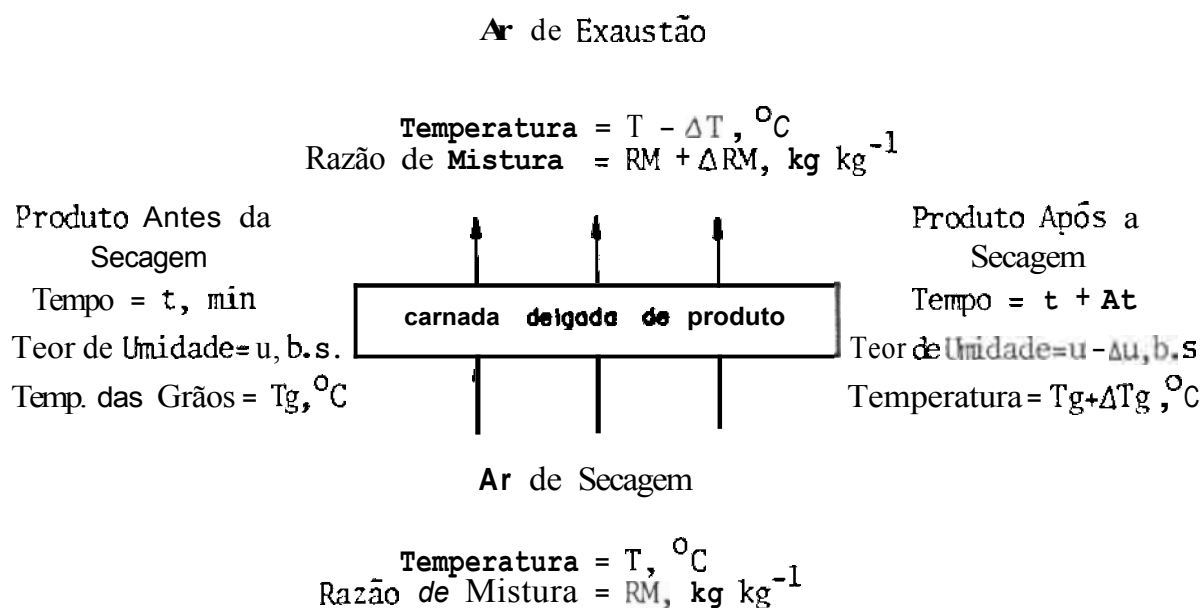


FIGURA 2 - Representação Esquemática da Secagem em uma Camada Delgada Durante um Intervalo de Tempo, Δt (33).

O modelo a princípio foi desenvolvido para simular a secagem de milho, porém pode ser utilizado para qualquer produto, desde que sejam conhecidas as seguintes equações para descrevê-lo (22):

- secagem em camada delgada;
- teor de umidade de equilíbrio, em função da temperatura e umidade relativa do ar nas vizinhanças do grão;
- entalpia específica do produto, em função do teor de umidade; e
- entalpia de vaporização da água no produto, em função do teor de umidade e da temperatura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no *Setor de Armazenagem e Processamento de Produtos de Origem Vegetal* do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

O produto utilizado foi café (Coffea arabica L.) da variedade Catuaí, procedente das Fazendas Colônia e São Geraldo, município de Paula Cândido, Minas Gerais. A colheita foi realizada pelo sistema de derricha ao chão, com um teor de umidade de aproximadamente 60% b.u., em seguida procedeu-se a Lavagem do produto.

Para secar este até o estágio de meia seca empregou-se um secador de leito fixo (Figura 3), com capacidade estática de $3,5 \text{ m}^3$ e fluxo de ar de $3,8 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. O aquecimento do ar foi realizado por meio de uma fornalha de fogo direto descendente (28, 301, que utilizou como combustível lenha de eucalipto.

Para complementação da secagem, foi utilizado um protótipo de secados intermitente de fluxos contracorrentes.

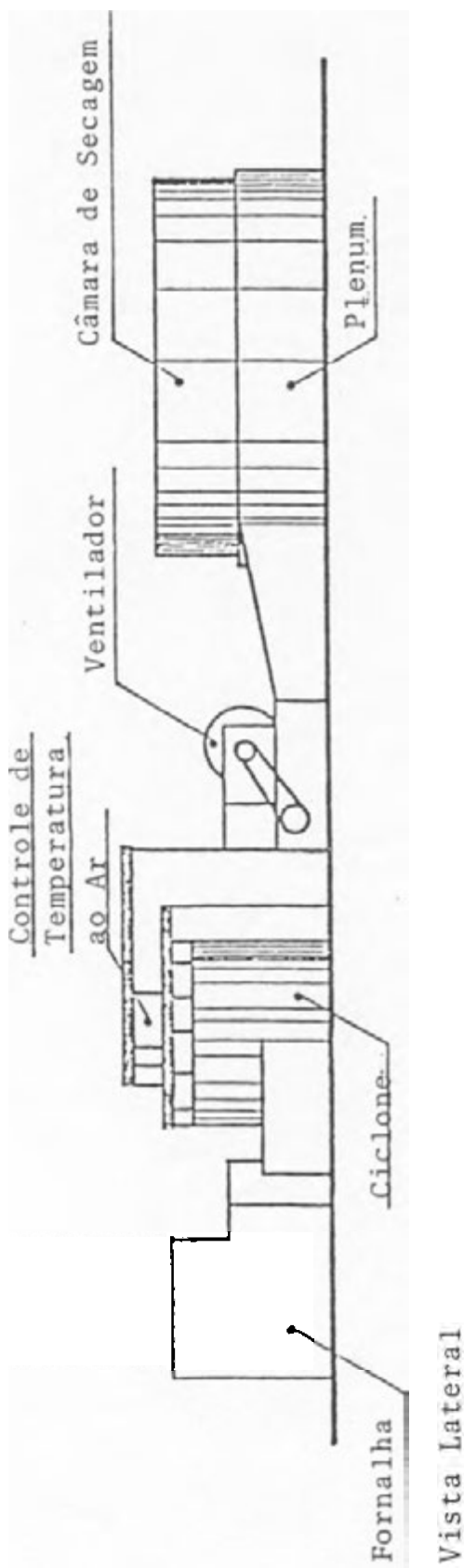
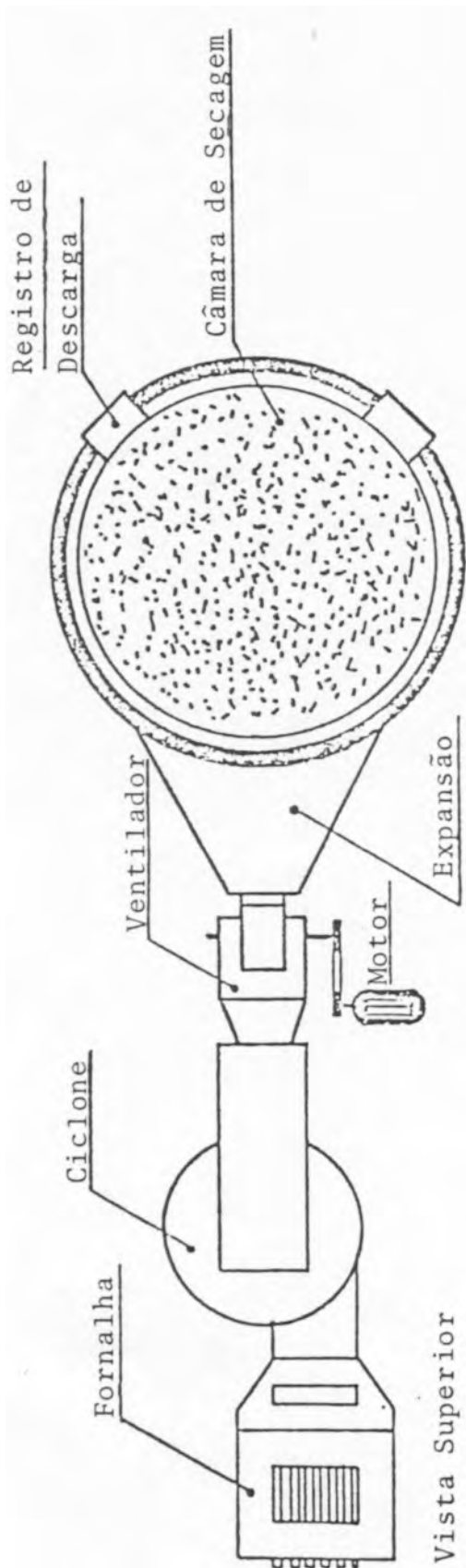


FIGURA 3 - Vistas Superior e Lateral do Secador de Leito Fixo (30).

3.1. Protótipo

O secador projetado e construído (Figura 4) possui uma capacidade estática de 2,7 m³, o que corresponde a uma carga de aproximadamente 1.000 kg de café em estágio de meia seca.

A forma de operação do secador foi intermitente, sendo que a movimentação da massa de grãos dava-se a cada 15 minutos, por um período de 2 min.

Basicamente o secador é composto das seguintes partes:

- moega de recepção (1 - Figura 4) - confeccionada em chapa metálica, tendo uma capacidade de 0,5 m³, com a finalidade de receber o produto por ocasião da carga do secador;

- sistema de movimentação de grãos - constituído do elevador de caçamba e transportador helicoidal (2 e 10 - Figura 4) - com a finalidade de promover a carga, descarga e recirculação do produto, operando com um fluxo de 0,13 m³ min⁻¹ .m⁻²;

- câmara de descanso superior (3 - Figura 4) - com a finalidade de reter quantidade de produto suficiente para encobrir os dutos de saída do ar de exaustão, fazendo com que o fluxo de ar na câmara de secagem seja homogêneo;

- câmara de secagem (4 - Figura 4) - com o volume de 1 m³ e altura de 1 m;

- câmara de descanso inferior (7 - Figura 4) - com o volume de 1,2 m³ e altura de 1,2 m - com o objetivo de obstruir o fluxo de ar, em razão da maior resistência oferecida;

- "plenum" (5 - Figura 4) - confeccionado em chapa metálica;

- ventilador (6 - Figura 4) - cuja finalidade é succionar o ar aquecido e promover a injeção na câmara de secagem;

- fornalha (11 - Figura 4) - construída segundo especificações citadas por SILVA (28);

- saída suplementar e dutos de exaustão (12 e 13 - Figura 5) - confeccionados em chapa metálica - com a finalidade de escoar para a atmosfera o ar de exaustão;

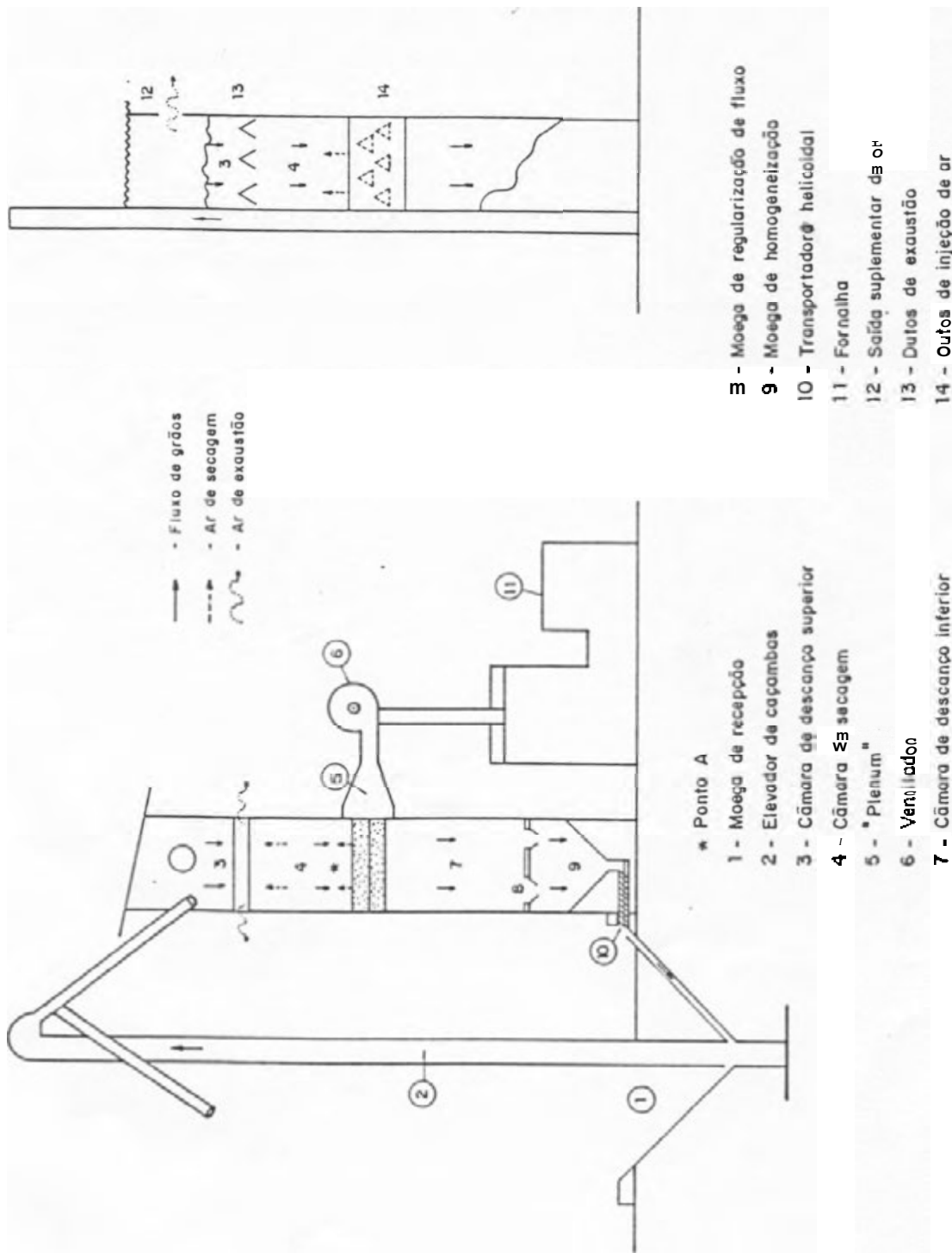


FIGURA 4 - Esquema Básico do Secador Estudado.

- dutos de injeção (14 - Figura 4) - construídos com chapa perfurada - em número de 5 - tem por objetivo promover a injeção do ar aquecido na câmara de secagem; e

- moegas de regularização de fluxo (8 - Figura 4) - em número de 4 - confeccionadas em chapa metálica - tem por função promover a regularização dos fluxos de grãos pela seção do secador e bloquear o fluxo de ar descendente.

- moega de homogeneização (9 - Figura 4) - confeccionada em chapa metálica - tem por função promover a homogeneização do produto.

Com exceção do elevador de caçambas e do ventilador, as outras partes componentes do secador foram construídas com mão-de-obra e recursos disponíveis na oficina do setor de Armazenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Das partes componentes do secador, foram construídas em alvenaria a fornalha e o corpo do secador, as demais em material metálico.

3.2. Procedimento Experimental

Foram realizados 12 testes, utilizando-se temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100°C, sendo realizado quatro testes por nível de temperatura do ar de secagem. Nos testes 01, 05, 06, 09 e 10 utilizou-se produto proveniente da Fazenda Colônia, nos demais da Fazenda São Geraldo. Na realização dos testes foram avaliados os seguintes parâmetros:

3.2.1. Temperaturas

As medições das temperaturas foram realizadas a cada 30 minutos, utilizando-se um termômetro digital, com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, conectado a uma chave comutadora, que possibilitava a ligação de quatro termopares do tipo cobre-constantan, instalados:

- no "plenum" (5 - Figura 4) - temperatura do ar de secagem;

- na moega de homogeneização (9 - Figura 4) - temperatura da massa de grãos;

- no duto de exaustão (13 - Figura 4) - temperatura do ar de exaustão; e
- no ponto **A** situado a 0,25 m acima dos dutos de injeção - temperatura na câmara de secagem.

3.2.2. Pressões

As pressões estáticas, medidas no "plenum" e no duto, a 0,10 m da entrada do ventilador, foram determinadas a cada 30 minutos. Com base nestes parâmetros e com o uso das curvas características do ventilador foi determinado o fluxo de ar.

3.2.3. Teor de Umidade e Massa Específica

Determinaram-se o teor de umidade e a massa específica das amostras retiradas no início, no final e a cada uma hora de teste. As amostras iniciais e finais foram coletadas de forma aleatória no momento da carga e descarga do secador, respectivamente. Quanto às demais, foram coletadas na saída do transportador helicoidal.

Os teores de umidade foram obtidos pelo método da estufa, $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$, por 24 horas (4), utilizando-se amostras de aproximadamente 30 g, e as massas específicas foram determinadas com o uso de uma balança de peso hectolítrico (20). As determinações foram realizadas com três repetições.

Das amostras finais, beneficiou-se parte para que fossem determinados os teares de umidade e se fizesse a classificação.

As classificações foram realizadas na regional do Instituto Brasileiro do Café, situada no município de Manhumirim, MG, sendo determinados o tipo e a qualidade da bebida. As amostras enviadas foram codificadas de tal forma a não caracterizar o tratamento empregado na secagem.

Para a avaliação dos efeitos da secagem, amostras-testemunhas foram secas em terreiro.

3.2.4. Condições Ambientais

As temperaturas e as umidades relativas, referentes aos períodos de realização dos testes, foram obtidas dos registros da Estação Meteorológica Principal, localizada no "Campus" da Universidade Federal de Viçosa.

3.2.5. Uso de Combustível

O combustível utilizado foi madeira proveniente de eucalipto (Eucalyptus grandis).

A lenha foi serrada e selecionada, apresentando dimensões médias de 0,40 m de comprimento e 0,15 m de diâmetro. A quantidade consumida em cada teste foi pesada e dela retirou-se amostras para a determinação do teor de umidade e do poder calorífico.

O teor de umidade foi obtido pelo método da estufa, 105 + 3°C por 24 horas, enquanto o poder calorífico superior foi determinado através da Bomba Calorimétrica de Malher (17).

Para se determinar o poder calorífico inferior empregou-se a equação 01, segundo Gomes, citado por MELO (17).

$$P_{ci} = P_{cs} - \frac{2508 (u + 9 H)}{(1 + u)}, \quad \text{eq. 01}$$

em que:

P_{ci} - poder calorífico inferior, kg kg^{-1} ;

P_{cs} - poder calorífico superior, kg kg^{-1} ;

u - teor de umidade da madeira, b.s.:

H - teor de hidrogênio da madeira, igual a 0,04 kg kg^{-1} .

3.3. Simulação de Secagem

Foi desenvolvido um programa de computador baseado no modelo proposto por THOMPSON et alii (33), para simular o funcionamento do secador estudado. A linguagem utilizada foi PASCAL, compatível aos microcomputadores padrão "IBM-PC" - marca registrada da International Business Machines Corporation.

Para efeito de simulação, a massa de grãos foi dividida em 26 camadas com o volume de $0,10 \text{ m}^3$ e espessura de $0,10 \text{ m}$, sendo que instantaneamente 13 das camadas estariam em descanso e a outra em contato com o ar de secagem.

Os cálculos das razões entre a quantidade de matéria seca e a quantidade de ar seco, nas camadas que estavam sendo submetidas a secagem, foram realizados a cada incremento de tempo. A quantidade de matéria Seca contida em cada camada foi calculada com o uso de uma equação que descreve a massa específica da matéria seca do café em função do teor de umidade. Essa equação foi obtida por meio de regressão a partir dos dados obtidos na fase experimental.

As equações referentes a café utilizadas para o desenvolvimento do programa foram:

a) Teor de Umidade de Equilíbrio (1)

$$U_e = 1,1298 \left[\frac{(1 - UR_e)}{T_e + 40,535} \right]^{0,5405} \quad \text{eq. 02}$$

em que:

U_e - teor de umidade de equilíbrio, b.s.;

UR_e - umidade relativa nas condições de equilíbrio, decimal; e

T_e - Temperatura de equilíbrio, °C.

b) Umidade Relativa de Equilíbrio, deduzida da equação 02

$$UR_e = 1 - e^{-0,8 (T_e + 40,535) U_e^{1,85}} \quad \text{eq. 03}$$

c) Razão de Umidade (19)

$$RU = e^{-a t_{eq}^b e^{(-c/T_{abs})}} \quad \text{eq. 04}$$

em que:

RU - razão de umidade, decimal;

t_{eq} - tempo equivalente, min;
 T_{abs} - temperatura de equilíbrio, K;
 a, b, c - constantes.

- Para teor de umidade entre 44 e 28% b.u.

$$\begin{aligned}
 a &= 173.705; \\
 b &= 0,73681; \\
 c &= 5.533,11.
 \end{aligned}$$

- Para teor de umidade menor ou igual a 28% b.u.

$$\begin{aligned}
 a &= 105,756; \\
 b &= 0,60564; \\
 c &= 2.751,51.
 \end{aligned}$$

d) Tempo Equivalente, equação essa deduzida da equação 04

$$t_{eq} = \left| \frac{-\ln RU}{a e^{(-c/T_{abs})}} \right| \quad \text{eq. 05}$$

e) Entalpia Específica do Café (31)

$$C_p = 1,674 + 2,510 \left| \frac{u}{u+1} \right| \quad \text{eq. 06}$$

em que:

C_p - entalpia específica do produto, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
 u - teor de umidade, b.s.

f) Entalpia Específica de Vaporização, obtida a partir da metodologia proposta por DAMASCENO et alii (12).

$$L_v = 3.109,4 - 2,38 T_{abs} + 0,369 T_{abs}^2 U_e^{1,85} \left[\frac{1 - UR_e}{UR_e} \right], \quad \text{eq. 07}$$

em que:

L_v - entalpia específica de vaporização, kJ kg^{-1} .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação do protótipo foram empregados 12.722 kg de café em estágio de meia seca e foram consumidos 892,2 kg de lenha durante as 120,5 horas de funcionamento. Em razão da quantidade de produto utilizado, não foi possível a obtenção de toda a quantidade na Fazenda Colônia, sendo necessário utilizar o produto proveniente da Fazenda São Geraldo. Estas fazendas foram escolhidas por estarem localizadas na mesma região e pos cultivarem café da mesma variedade.

Os resultados obtidos na avaliação de desempenho do secador, referentes aos parâmetros dos produtos, parâmetros do ar de secagem, das condições ambientes e do secador em funcionamento, estão relacionados nos Quadros 1 e 2.

O fluxo de ar definido em função das pressões estática no "plenum" e no duto de sucção, a 0,10 m da entrada do ventilador, foi de $18,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

4.1. Temperaturas

Os valores médios das temperaturas da massa de grãos e do ar de secagem, de exaustão e no ponto A encontram-se nos Quadros 1 e 2, respectivamente. A representação gráfica encontra-se nas Figuras 5, 6 e 7.

QUADRO 1 - Parâmetros Relativos às Temperaturas do Ar de Secagem Fixadas, Pesos dos Lotes e Massas Específicas, Teores de Umidade e Temperaturas da Massa de Grãos

Teste (Nº)	Temperatura do Ar de Secagem Fixada (°C)		Peso do Lote		Massa Específica		Teor de Umidade dos Grãos			Temperatura da Massa de Grãos	
	Inicial (kg)	Final (kg)	Inicial (kg m ⁻³)	Final (kg m ⁻³)	Inicial (% b.u.)	Final (% b.u.)	Beneficiado (% b.u.)	Inicial (°C)	Final (°C)	Inicial (°C)	Final (°C)
01	60	927	405,8	424,1	22,1	16,7	14,2	12,1	47,3	12,1	47,3
02	60	932	427,5	412,3	33,4	20,6	18,5	23,5	44,4	23,5	44,4
03	60	968	387,6	415,7	20,2	16,9	14,6	26,4	49,6	26,4	49,6
04	60	1.049	403,6	407,8	25,9	17,6	16,4	31,2	45,1	31,2	45,1
05	80	950	404,3	425,6	23,8	15,8	13,2	32,0	59,9	32,0	59,9
06	80	838	414,0	408,6	24,6	14,4	13,4	36,8	60,8	36,8	60,8
07	80	897	392,5	400,9	24,8	14,5	11,8	24,1	62,3	24,1	62,3
08	80	940	401,3	409,2	26,9	13,0	11,1	18,1	59,4	18,1	59,4
09	100	1.020	405,9	411,3	22,6	15,6	11,8	29,6	60,6	29,6	60,6
10	100	961	474,1	412,9	41,2	15,8	12,5	24,9	57,3	24,9	57,3
11	100	953	425,3	412,7	32,7	12,7	11,8	18,1	68,9	18,1	68,9
12	100	897	416,7	404,4	29,8	12,9	11,7	19,1	63,2	19,1	63,2

QUADRO 2 - Parâmetros Relativos às Temperaturas Médias do Ar de Secagem, de Exaustão, no Ponto A e Ambiente, Umidade Relativa, Tempo de Secagem, Consumo de Lenha e Pressões Estáticas

Teste (Nº)	Temperaturas Médias do Ar			Umidade Relativa Média (%)	Tempo de Se- cagem (h)	Consumo de Lenha		Consumo Especí- fico de Energia (kJ kg ⁻¹)	Pressões Estáticas		
	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ponto A* (°C)			Ambiente (°C)	Total (kg)		Horário (kg h ⁻¹)	"Plenum" (mm ca)	Sucção** (mm ca)
01	59,8	29,3	32,0	16,5	54	8,5	46,8	5,5	11.419	14,2	44
02	59,7	32,0	37,0	19,7	86	16,0	86,5	5,4	7.488	15,0	43
03	59,8	33,7	33,0	21,1	60	7,5	41,8	5,6	16.252	15,0	42
04	60,2	32,1	30,3	22,9	53	10,5	55,1	5,2	7.386	16,7	40
05	78,3	39,1	34,5	15,9	85	7,0	53,6	7,7	8.282	12,5	42
06	79,1	38,1	37,3	20,2	74	8,0	59,3	7,4	8.146	15,1	40
07	78,4	37,8	36,5	21,4	61	10,0	73,9	7,4	9.314	15,7	41
08	80,8	37,3	34,2	20,6	47	11,5	86,7	7,5	7.518	13,7	42
09	96,6	40,4	37,7	20,6	76	4,5	40,0	8,9	6.275	10,5	41
10	96,4	35,4	35,0	19,9	77	15,0	127,9	8,5	6.061	14,2	37
11	97,7	36,4	35,3	14,7	64	12,5	133,6	9,0	9.274	13,5	40
12	99,8	39,9	36,9	16,9	64	9,5	37,0	9,2	6.259	14,7	38

* Temperatura na câmara de secagem, a 0,25 m acima dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção, a 0,10 m da entrada do ventilador.

4.1.1. Temperatura do Ar de Secagem

Em virtude das características operacionais da fonte de aquecimento utilizada no trabalho não se foi possível obter os valores das temperaturas do ar de secagem fixadas em 60, 80 e 100°C, sendo obtidos os valores médios de $59,9 \pm 3,0$; $79,3 \pm 5,2$ e $97,6 \pm 8,2$ °C, respectivamente. Entretanto, para as finalidades propostas, os valores obtidos não variaram do planejado.

Com relação à representação gráfica (Figuras 5, 6 e 7), a temperatura de secagem atinge um patamar logo no início da secagem e permanece durante todo o processo. Quanto às quedas de temperaturas detectadas nos testes 10 e 11, estas devem-se a problemas com o sistema de movimentação de grãos. Nestas situações o fluxo de ar foi interrompido.

4.1.2. Temperatura da Massa de Grãos

O equilíbrio termodinâmico entre o termopar e a massa de grãos era proporcionado pelo fato de a movimentação da massa de grãos ser executada a cada 15 minutos, não sendo necessária, portanto, a retirada de amostras para a determinação da temperatura da massa de grãos.

Observa-se no Quadro I temperaturas inicial na faixa de 30°C, estas temperaturas ocorreram quando se executava a transferência do café ainda aquecido do secador de leito fixo.

Com relação aos valores da temperatura final, estes corresponderam ao produto que se encontrava na moega de homogeneização, por ocasião do fim dos testes. Nota-se que proporcionalmente a temperatura da massa de grãos aproximou-se mais da temperatura do ar de secagem nos testes realizados a 60°C.

Conforme as Figuras 5, 6 e 7, nota-se que a medida que ocorre a secagem a temperatura da massa de grãos tende a aproximar dos valores da temperatura do ar de secagem.

No teste 10 (Figura 7) o pica de temperatura, no tempo de três horas de secagem, pode ter sido decorrente da

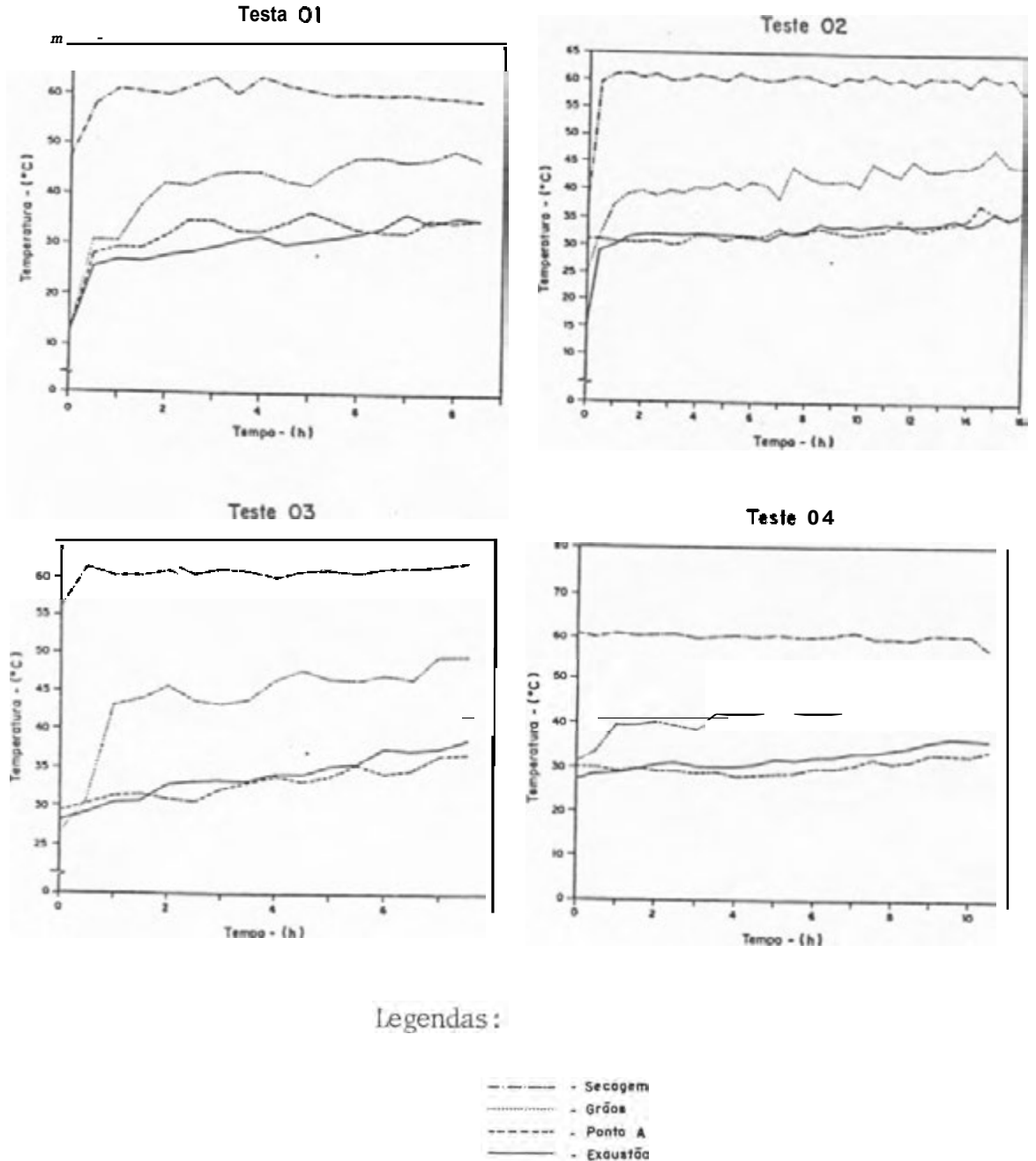
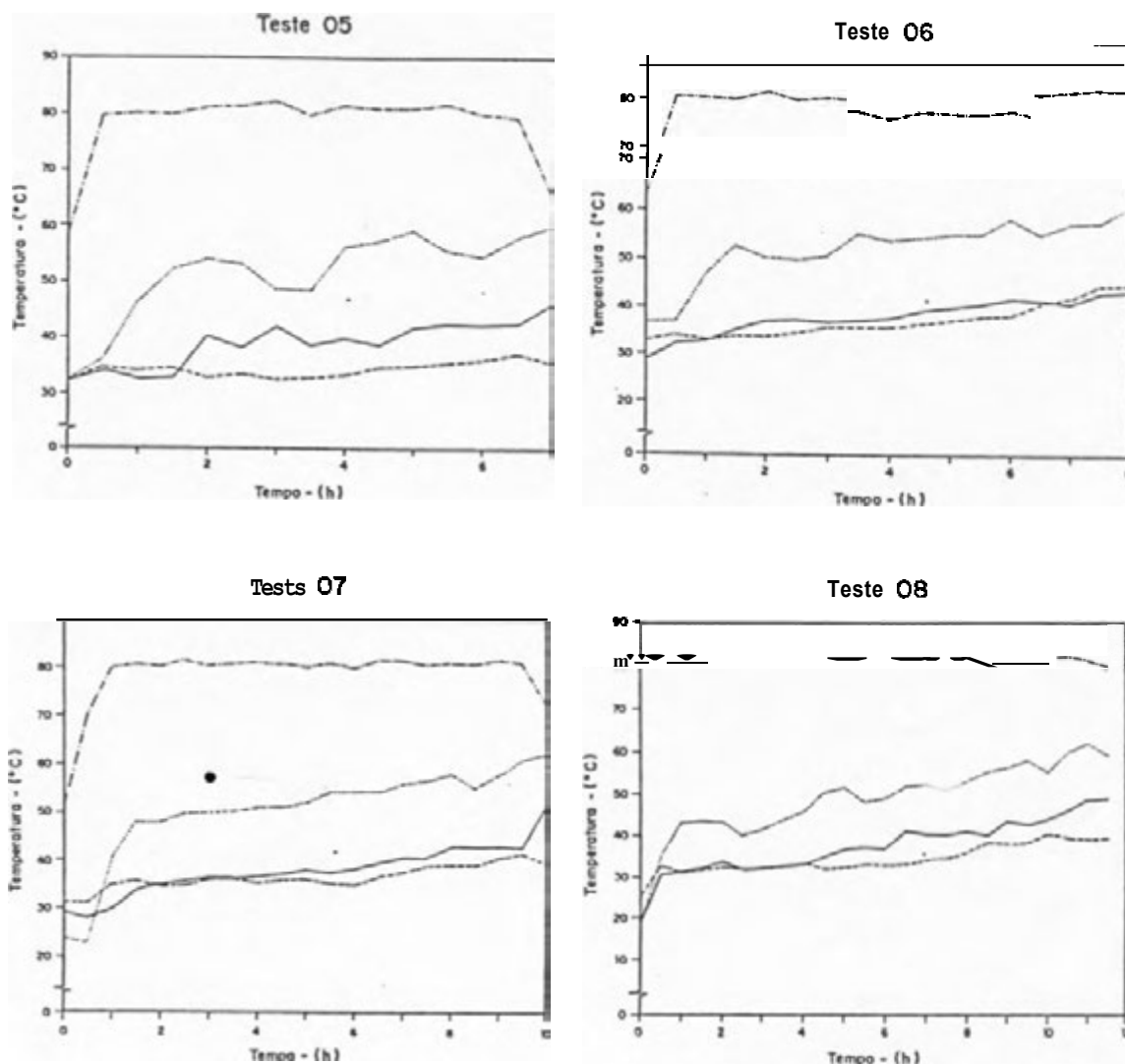


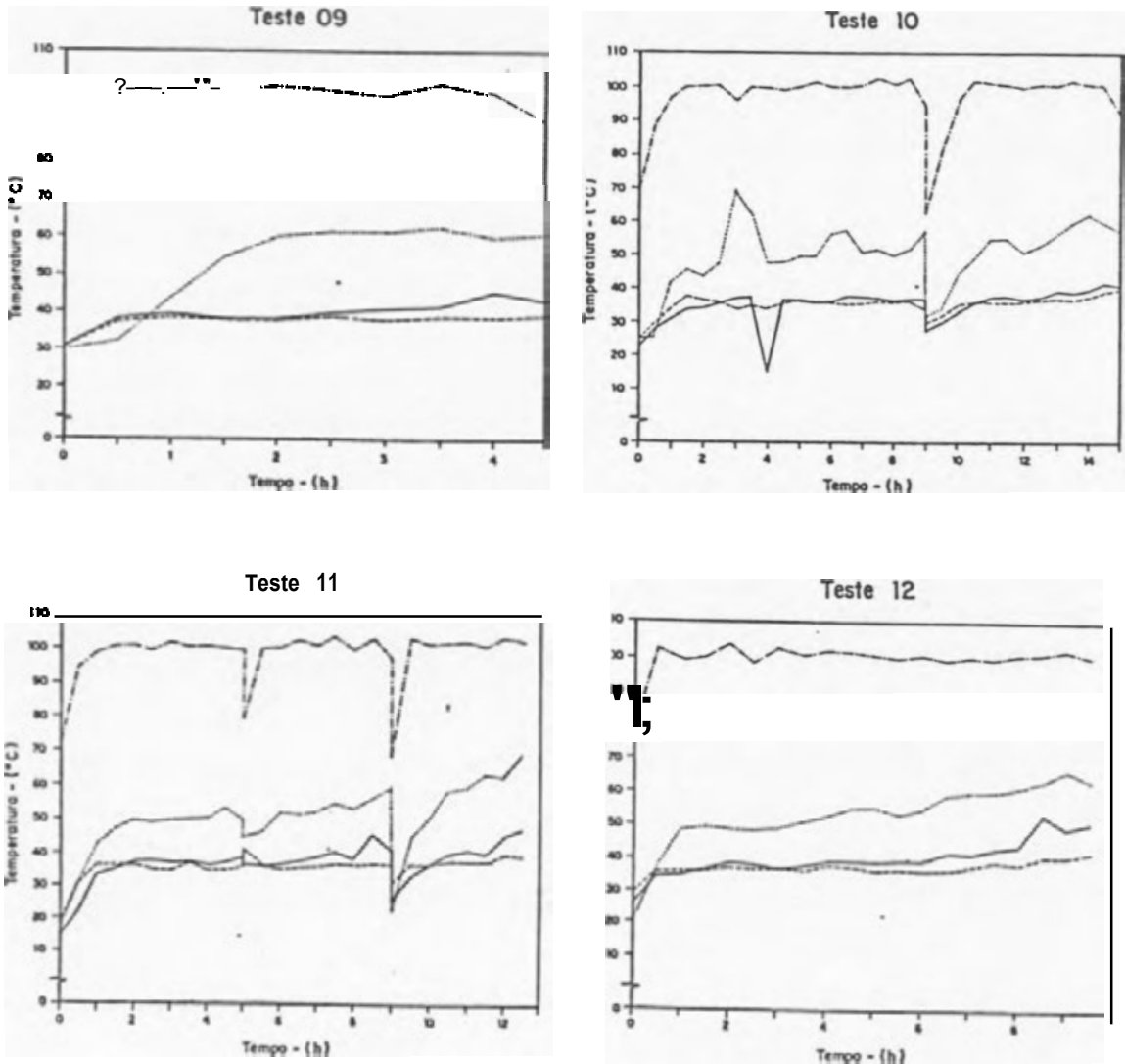
FIGURA 5 - Curvas das Temperaturas da Massa de Grãos, do Ar de Secagem, de Exaustão e no Ponto A, Localizado a 0,25 m dos Dutos de Injeção de Ar na Câmara de Secagem, Referentes aos Testes que Utilizaram Temperaturas do Ar de Secagem de 60°C.



Legendas :

- - - - - Secagem
 - - - - - Grãos
 - . - . - Ponto A
 - - - - - Exaustão

FIGURA 6 - Curvas das Temperaturas da *Massa* de Grãos, do *Ar* de Secagem, de Exaustão e no Ponto A, Localizado a 0,25 m dos Dutos de Injeção de *Ar* na Câmara de Secagem, Referentes aos Testes que Utilizaram Temperaturas do *Ar* de Secagem de 80 °C.



Legendas :

- - - - - Secagem
- Grãos
- . - . - Ponto A
- Exaustão

FIGURA 7 - Curvas das Temperaturas da Massa de Grãos, do Ar de Secagem, de Exaustão e no Ponto A, Localizado a 0,25 m dos Dutos de Injeção de Ar na Câmara de Secagem, Referentes aos Testes que Utilizaram Temperaturas do Ar de Secagem de 100°C.

baixa fluidez do café, o que fez com que o material permanecesse maior tempo na câmara de secagem.

As quedas de temperatura nos testes 10 e 11 (Figura 7) são consequência do corte do fluxo de ar, conforme exposição no item 4.1.1.

4.1.3. Temperaturas do Ar de Exaustão e no Ponto A

Ao se analisar o Quadro 2 e as Figuras 5, 6 e 7 nota-se que as temperaturas do ar de exaustão e as no ponto R têm os seus valores praticamente iguais. A única situação em que as temperaturas não tiveram um comportamento semelhante foi no teste 10 (Figura 7), no tempo de quatro horas de secagem. A queda acentuada da temperatura do ar de exaustão comprova a ocorrência de elevação da taxa de secagem ou troca de calor com a massa de grãos, o que pode ter sido consequência do contato do ar de secagem com uma massa de grãos úmidos e, ou, frios, recém-chegada à câmara de secagem. Este fato é atribuído a uma possível retenção da massa de grãos, devido à baixa fluidez do produto, em decorrência do teor de umidade em torno de 34% b.u..

Com relação à queda da temperatura do ar de secagem após deslocar 0,25 m dentro da câmara de secagem, pode ser consequência do aumento da temperatura dos grãos e do resfriamento evaporativo.

Do ponto A até o topo da câmara de secagem pode ter acontecido um repasse contínuo de calor e umidade dos grãos para o ar, pois caso estivesse ocorrendo apenas o resfriamento dos grãos a temperatura do ar de exaustão atingiria valores próximos à temperatura dos grãos que estavam chegando à câmara de secagem.

Para uma discussão mais consistente a respeito do fenômeno ocorrido, haveria de ter sido instalados mais termopares dentro da câmara de secagem e de coletar amostras do produto em diversos pontos dentro da referida câmara, durante a realização da secagem.

4.2. Teor de Umidade

Em virtude das chuvas ocorridas durante o período de realização dos testes, exigiu-se maior rapidez na liberação do secador de leito fixo, a fim de minimizar os prejuízos decorrentes da possibilidade de fermentação do café que aguardava a secagem. Tal procedimento inviabilizou a padronização dos teores de umidade inicial e final. Outro fator que também contribuiu foi a dificuldade de se determinar com exatidão tal parâmetro em condições de campo.

A variação do teor de umidade durante o processo de secagem é representada pela equação 08, obtida por meio de regressão com um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,94.

$$u = 7,46722 \cdot 10^{-2} + 8,25484 \cdot 10^{-1} u_0 + 2,09492 \cdot 10^{-2} t - 3,86860 \cdot 10^{-2} u_0 t - 1,03502 \cdot 10^{-3} T_s - 3,09735 \cdot 10^{-4} t T_s + 2,24833 \cdot 10^{-3} u_0 T_s, \quad \text{eq. 08}$$

em que:

u - teor de umidade dos grãos, b.s.;

u_0 - teor de umidade inicial dos grãos, b.s.;

t - tempo de secagem, h; e

T_s - temperatura de secagem, °C.

Ao se analisar os valores do teor de umidade do produto beneficiado (Quadra 1) constata-se que em média os valores são 2,1 pontos percentuais inferior ao do produto em côco. Fatores como variedade, idade da lavoura, textura do tegumento, processo de secagem utilizado, tempo de armazenagem, dentre outros, podem causar estas variações.

4.3. Massa Específica

Sabe-se que a massa específica é influenciada pelo teor de umidade, pela quantidade de produto danificado e pelo grau de impurezas (20). Isto mostra que para se estudar a correlação destes fatores há necessidade de se padronizar cuidadosamente a massa do produto. Como não foi possível ser feita a padronização do produto utilizado, não foi obtida

uma correlação, como amplamente difundida, entre a massa específica e o teor de umidade em base úmida. Sendo assim, optou-se pela variação da massa específica, expressa em quantidade de matéria seca, em função do teor de umidade em base seca. A equação 09, obtida por meio de regressão, foi a que melhor se ajustou, tendo um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,86.

$$W = 4,806144 \cdot 10^2 - 4,08575 \cdot 10^2 \cdot u + 3,1224 \cdot 10^2 \cdot u^2, \quad \text{eq. 09}$$

em que:

W - massa específica do produto, kg matéria seca m^{-3} ; e

u - teor de umidade dos grãos, b.s.

A referida equação foi utilizada no programa de simulação de secagem para o cálculo da massa específica das camadas que estavam sendo simuladas à secagem.

4.4. Energia

A lenha utilizada apresentou teor de umidade de 17,5 e 2,1% b.u., com um poder calorífico inferior de $15.591 \pm 730 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Os valores relativos ao consumo de lenha e consumo específico de energia encontram-se no Quadro 2.

O consumo horário médio de combustível para as temperaturas de 60, 80 e 100°C foram, respectivamente, $5,5 \pm 0,2$; $7,5 \pm 0,1$ e $8,9 \pm 0,3 \text{ kg h}^{-1}$. A pouca variação detectada demonstra a estabilidade no consumo do sistema de aquecimento.

Para a análise do consumo específico de energia é necessário considerar fatores como: teores de umidade inicial e final, temperatura do ar de secagem, tempo de secagem e as condições climáticas (5). Conforme se constata nos Quadros 1 e 2, estes parâmetros apresentaram variações de um teste para outro. Conseqüentemente, ocorreram valores de consumo específico variados, não sendo possível fazer comparação entre os testes, sendo, portanto, necessário o uso de um método de avaliação que analise estas variações.

Com os dados experimentais foi possível obter, por meio de regressão, a equação 10, cujo coeficiente de determinação, R^2 , é 0,97.

$$C_{es} = 1,31542 \cdot 10^5 - 1,64013 \cdot 10^5 u_o + 1,01835 \cdot 10^5 u_o^2 - 6,91561 \cdot 10^5 u_f + 2,14471 \cdot 10^8 u_f^2 - 9,86437 \cdot 10^3 t - 4,37673 \cdot 10^2 T_s + 7,52909 \cdot 10^1 t T_s, \quad \text{eq. 10}$$

em que:

- C_{es} - consumo específico de energia, kJ kg^{-1} ;
 u_o - teor de umidade inicial dos grãos, b.s.;
 u_f - teor de umidade final dos grãos, b.s.;
 t - tempo de secagem, h; e
 T_s - temperatura de secagem, $^{\circ}\text{C}$.

4.5. Simulação de Secagem

Para a validação do programa implementado foi simulado cada um dos testes realizados, sendo utilizados como parâmetros de inicialização:

- valores médios de temperatura de secagem, temperatura ambiente e umidade relativa (Quadro 2); e
- valores iniciais da massa específica, teor de umidade e temperatura dos grãos (Quadro 1).

O gráfico comparativo dos valores dos teores de umidade experimentais com os simulados relativos ao produto na saída do transportador helicoidal encontram-se na Figura 8.

Nas Figuras 9, 10 e 11 têm-se as curvas de secagem simuladas e experimentais para os testes. Os valores correspondem aos teores de umidade do produto na saída do transportador helicoidal.

Os valores dos teores de umidade final não foram considerados na elaboração das curvas de secagem (Figuras 9, 10 e 11), por se tratar de valores médios, representativos de toda a massa de grãos. Estes valores encontram-se no Quadro 3.

Conforme as Figuras 9, 10 e 11, os maiores desvios são constatados no teste 10. Para os testes que utilizaram temperaturas do ar de secagem 60, 80 e 100°C , foi constatado

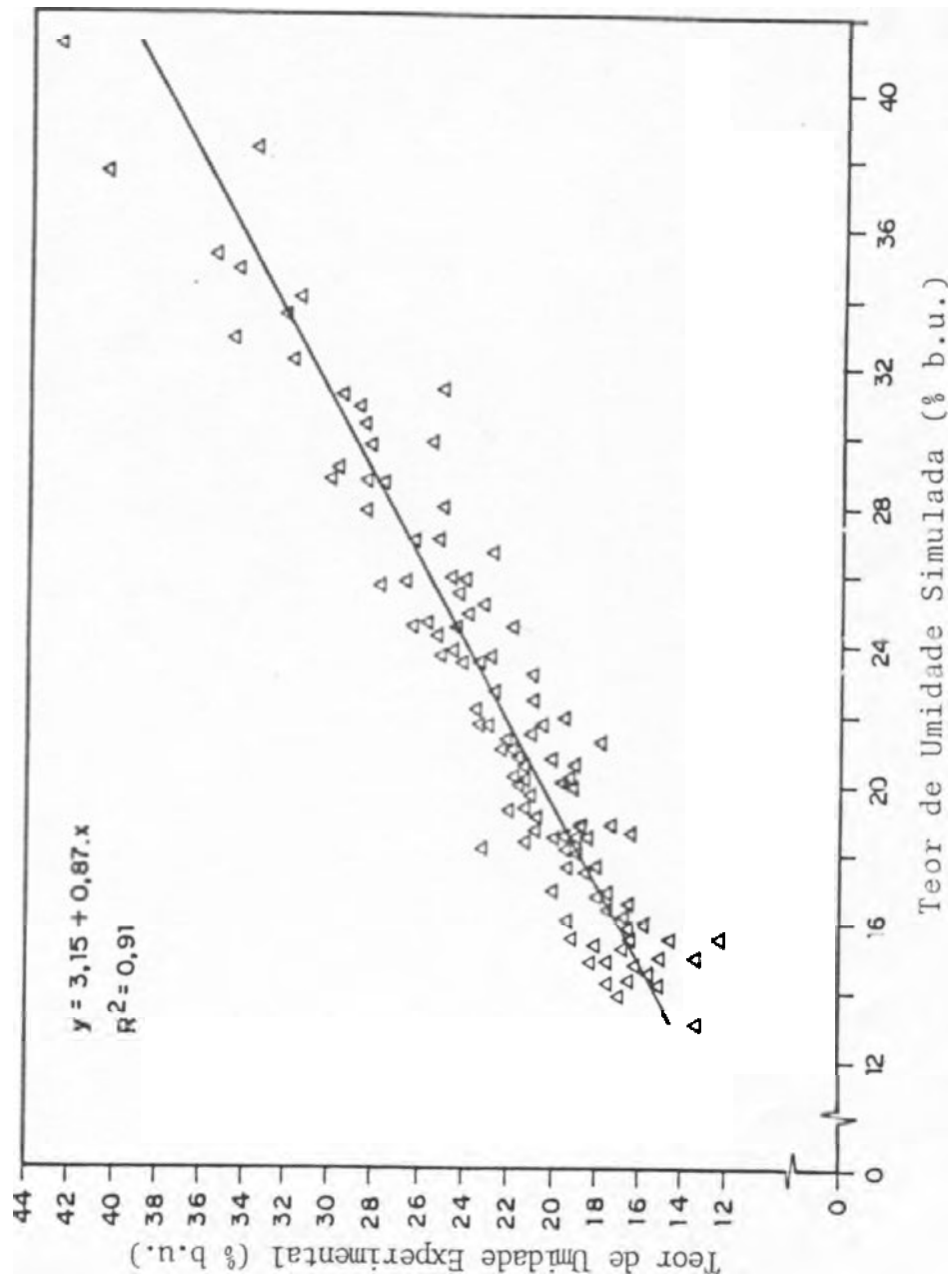


FIGURA 8 - Comparação dos Valores dos Teores de Umidade Experimentais e Simulados Referentes ao Produto na Saída do Transportador Helicoidal.

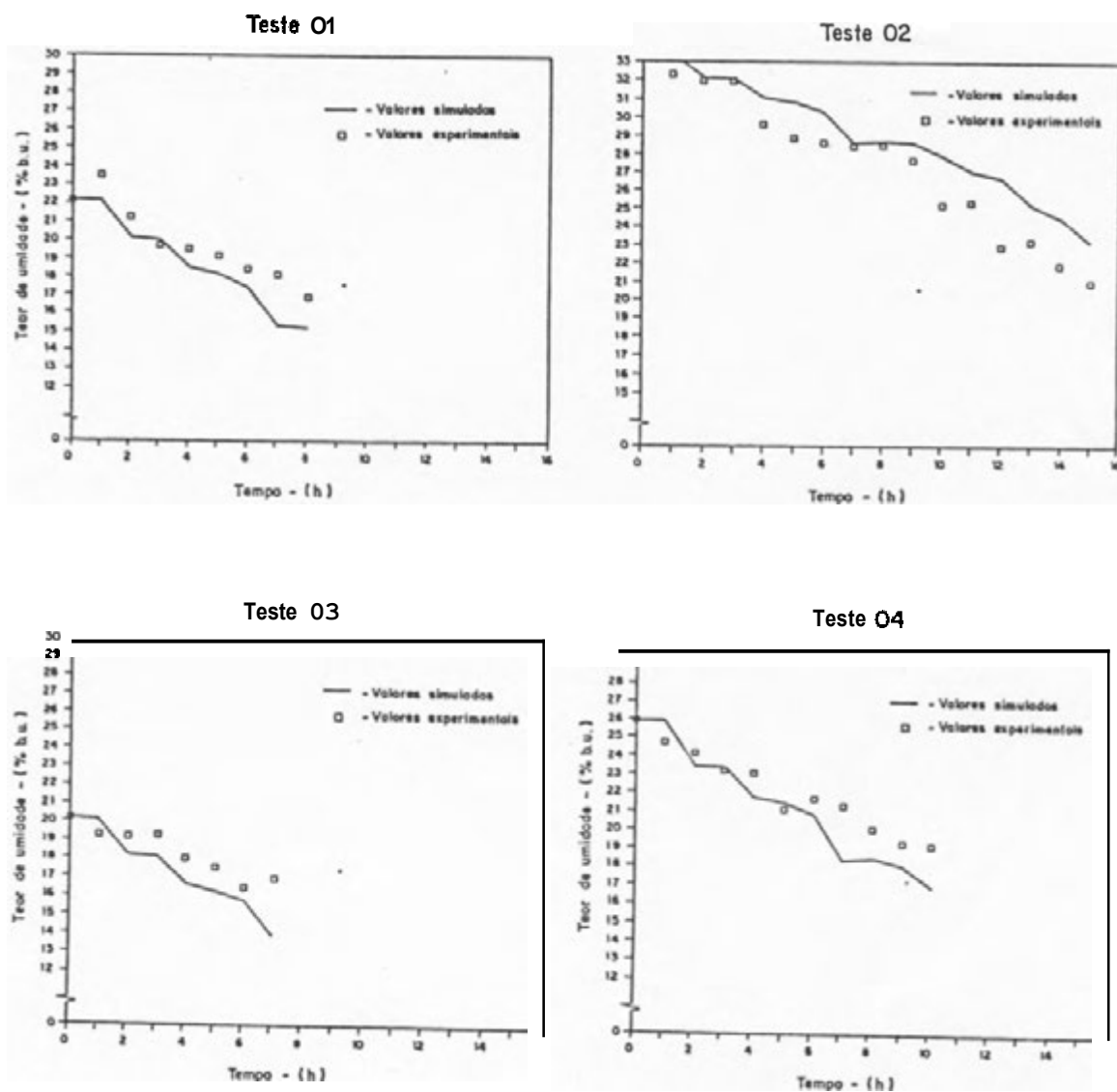


FIGURA 9 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas por meio do Programa Desenvolvido, Correspondentes ao Produto na Saída do Transportador Helicoidal, para os Testes que Utilizaram Temperatura do Ar de Secagem de 60°C.

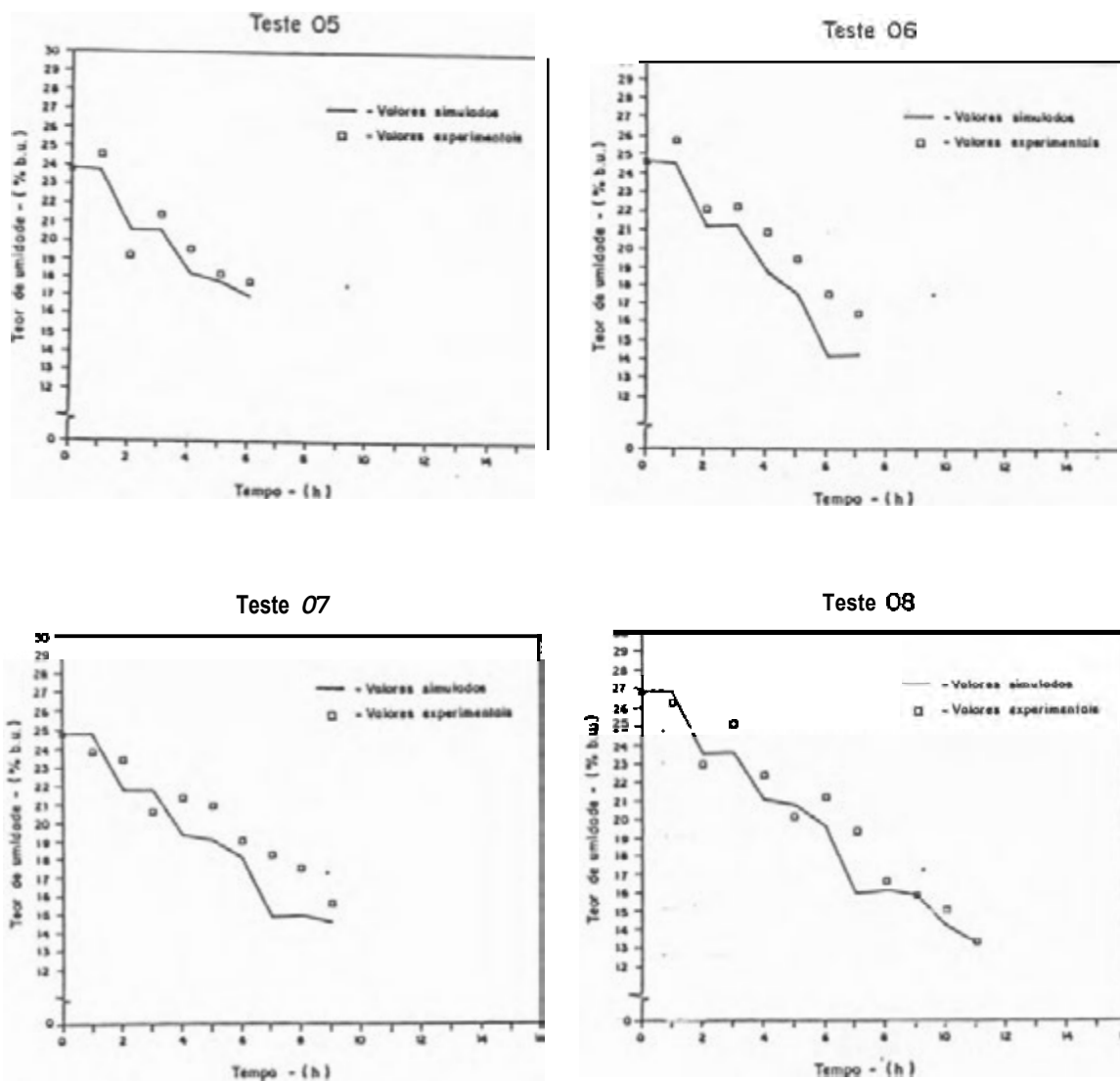


FIGURA 10 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas por meio do Programa Desenvolvido, Correspondentes ao Produto na Saída do Transportador Helicoidal, para os Testes que Utilizaram Temperatura do Ar de Secagem de 80°C.

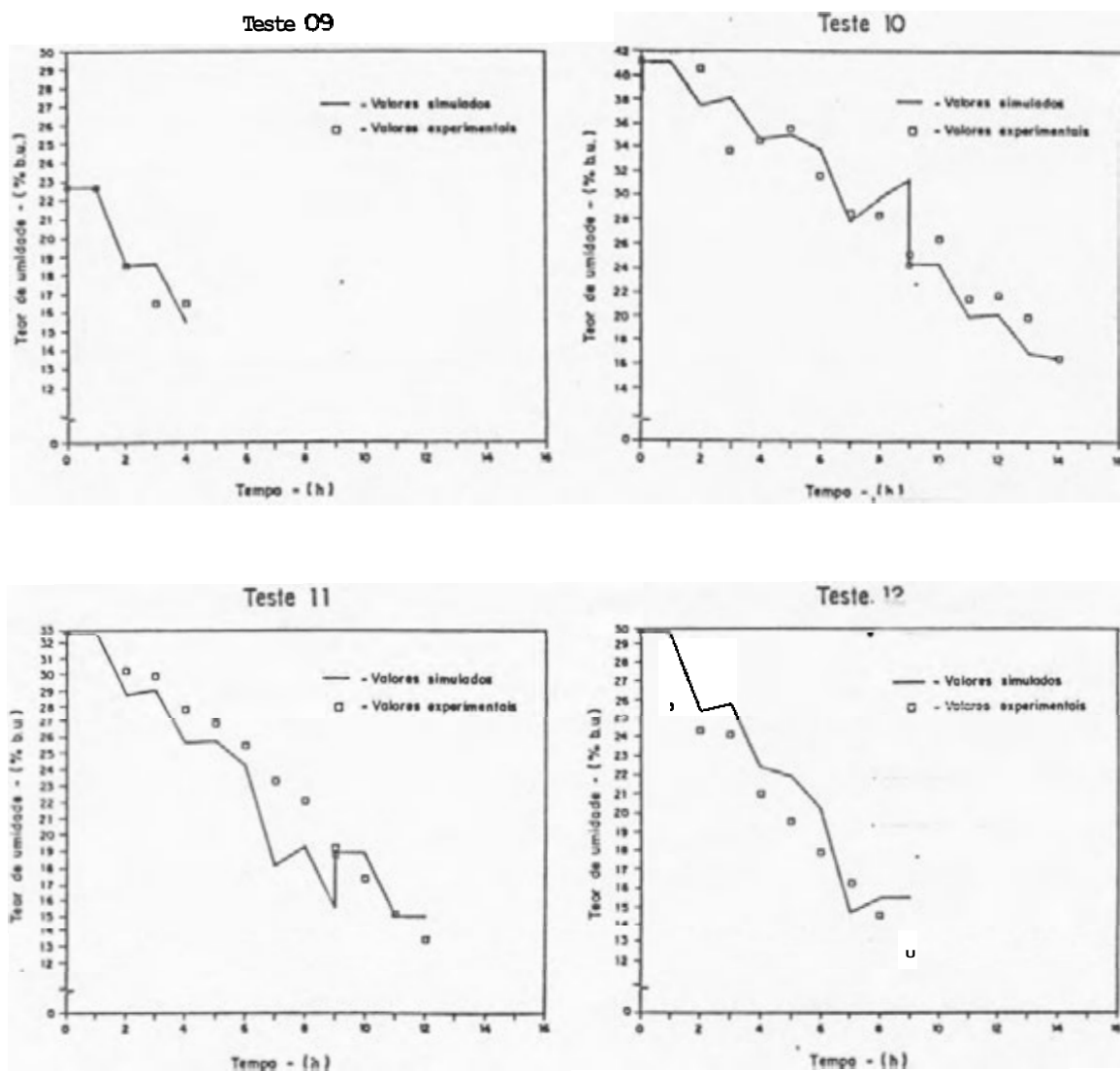


FIGURA 11 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas por meio do Programa Desenvolvido, Correspondentes ao Produto na Saída do Transportador Helicoidal, para os Testes que Utilizaram Temperatura do Ar de Secagem de 100°C.

um desvio absoluto médio $1,4 \pm 0,1$; $1,4 \pm 0,4$ e $1,7 \pm 0,6$ em b.u., respectivamente. Os maiores desvios ocorreram nos testes que utilizaram temperatura do ar de secagem de 100°C , reflexo das interrupções ocorridas durante a realização dos testes 10 e 11.

Ao se analisar o Quadro 3 constata-se que com exceção dos testes 02, 11 e 12 nos demais os valores simulados de teor de umidade são inferiores aos experimentais, tendo um desvio médio de $1,60 \pm 0,9\%$ em b.u. Ao se considerar todos os testes, o desvio absoluto médio passa a ser de $1,3 \pm 0,9\%$ em b.u. Com estes valores, em termos de engenharia, pode-se considerar o programa implementado como validado, podendo, portanto, ser utilizado para a avaliação e otimização do secador estudado,

4.6. Qualidade do Produto Final

No Quadro 4 são apresentados os resultados das análises do tipo e da qualidade da bebida, realizadas no T.B.C., situado na cidade de Manhumirim, MG.

O odor residual detectado não se refere somente aos resíduos da combustão. Conforme o Quadro 4, amostras secas em terreiro também apresentaram o odor, o que pode ser explicado pela susceptibilidade de assimilação de odores ou pela ocorrência de alguma troca química que possibilitou tal caracterização (9, 27).

No que se refere ao tipo, com exceção dos testes 01 e 10, o produto seco no secador apresentou tipo inferior ou igual ao das amostras-testemunhas. Isto se deve, provavelmente, aos danos mecânicos provocados pelo sistema de movimentação de grãos, principalmente pelo transportador helicoidal. Este problema pode ser perfeitamente eliminado pela adoção de um transportador de correias. Sob o aspecto comercial, o produto apresentou boa classificação, visto que o tipo 6 é o padrão comercial no Brasil (7).

Ao analisar a qualidade da bebida, com exceção do Teste 10, o produto seco no secador apresentou melhor resultado. Com relação aos efeitos das temperaturas de secagem sobre

QUADRO 3 - Comparação entre os Valores dos Teores de Umidade Final Experimentais e Simulados e os Respe^tivos Desvios Absolutos

Teste (Nº)	Teor de Unidade		Desvio Absoluto (% b.u.)
	Experimental (% b.u.)	Simulado (% b.u.)	
01	16,7	14,6	2,1
02	20,6	21,3	0,7
03	16,9	13,9	3,0
04	17,6	15,9	1,7
05	15,8	14,6	1,2
06	14,4	14,0	0,4
07	14,6	12,3	2,3
08	13,0	11,6	1,4
09	15,6	15,3	0,3
10	15,8	14,2	1,6
11	12,7	13,4	0,7
12	12,9	12,9	0,0
Desvio Absoluto Médio (% b.u.)			1,3

QUADRO 4 - Resultados das Análises do Tipo e da Qualidade da Bebida, Realizadas pelo I.B.C., Regional de M^hnumirim, MG

Teste (Nº)	Tempe- ratura (°C)	Secador		Testemunha	
		Tipo	Bebida	Tipo	Bebida
01	60	5	Riado*	6	Dura/sujo
02	60	7	Dura/riada*	5	Rio
03	60	6	Dura/riada	5	Rio
04	60	6	Riada	5	Rio
05	80	6	Dura*	5	Dura/riada*
06	80	6	Dura/riada*	5	Dura/riada*
07	30	6	Riada*	5	Rio
08	80	7	Dura*	5	Rio
09	100	5	Dura	5	Dura/riada*
10	100	4	Dura/riada	6	Dura*
11	100	6/7	Dura*	5	Rio
12	100	7	Rio	5	Rio

* Odor residual característico de contaminação por fumaça.

a qualidade da bebida não foi constatada diferenciação entre os níveis de temperatura estudados como também sobre o tipo.

1.7. Avaliação de Desempenho do Prototipo

Em razão das dificuldades de ordem prática, não foi feita a padronização das propriedades físicas do produto utilizado, o que dificultou a análise de desempenho do secador pelos métodos estatísticos convencionais, sendo assim, optou-se por executar a avaliação utilizando o programa de simulação implementado. Para tal, tomou-se como valores de referência de condição de secagem os apresentados no Quadro 5.

Os parâmetros referentes ao produto foram definidos segundo as constatações de ordem prática observadas na região de Viçosa.

Com relação às condições ambientes, estas foram definidas segundo dados dos registres da Estação Meteorológica Principal de Viçosa, tendo por base dados de 30 anos, relacionados ao período de maio a julho.

Nos cálculos de consumo de combustível e consumo específico de energia foram considerados os consumos horário médio e de poder calorífico inferior, obtidos na fase experimental.

QUADRO 5 - Condição de Secagem Estabelecida para Avaliação de Desempenho do Protótipo por meio do Programa de Simulação

. Produto		
- Teor de umidade inicial	30	% b.u.
- Teor de umidade final	12	% b.u.
- Massa específica	415	kg m ⁻³
. Ar		
- Umidade relativa	82	%
- Temperatura ambiente	15,8	°C
. Secador		
- Fluxo de ar	18,5	m ³ min ⁻¹ m ²
- Carga	1.080	kg

A temperatura inicial da massa de grãos foi considerada como sendo igual à temperatura ambiente.

Na Figura 12 têm-se as curvas de secagem para as temperaturas do ar de 60, 80 e 100°C, simuladas segundo as condições estabelecidas (Quadro 5). Os valores correspondem ao teor de umidade do produto na saída do transportador helicoidal. Os resultados referentes ao desempenho do secador protótipo encontram-se no Quadro 6.

Analisando o Quadro 6, constata-se que ao aumentar a temperatura do ar de secagem de 60 para 100°C reduz-se o tempo de secagem em 52,6%, o consumo de lenha em 23,2% e o consumo específica de energia em 23,1%. Quanto à capacidade de secagem, constata-se um aumento de 111,0%.

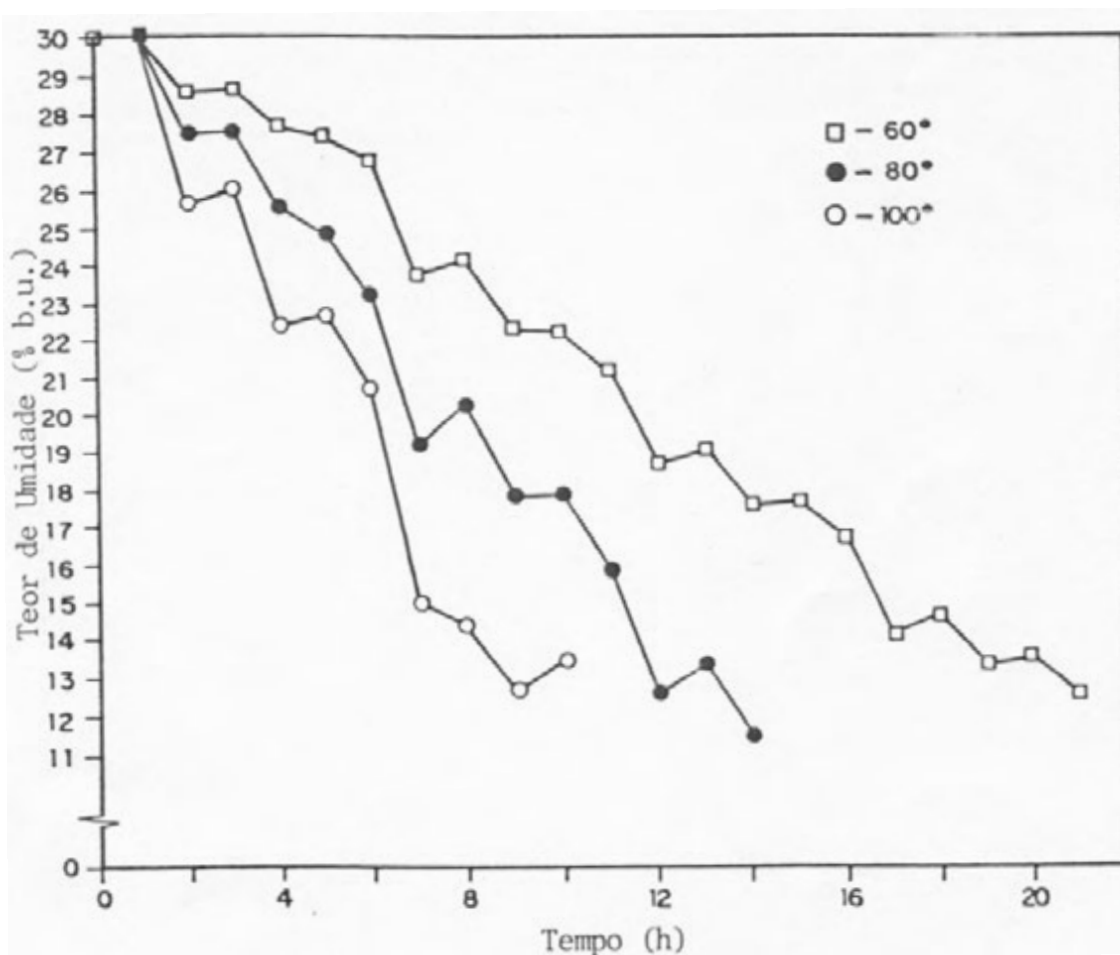


FIGURA 12 - Curvas de Secagem Simuladas, Referentes ao Produto na Saída do Transportador Helicoidal, para as Temperaturas do Ar de Secagem de 60, 80 e 100°C.

QUADRO 6 - Avaliação de Desempenho do Secador Protótipo, por meio de Simulação, para as Três Temperaturas de Secagem, Considerando as Condições Estabelecidas no Quadro 5

Temperatura do Ar de Secagem (°C)	Tempo de Secagem (h)	Consumo de Lenha (kg)	Consumo Específico de Energia (kJ kg ⁻¹)	Capacidade de Secagem (kg h ⁻¹)
60	21,5	118,3	8.300	50,2
80	14,2	106,5	7.547	76,1
100	10,2	90,9	6.542	105,9

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de promover a adaptação da tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes à realidade brasileira, sendo proposto um modelo de secador a ser utilizado na secagem de café.

O protótipo do secador estudado foi construído no Setor de Processamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, MG.

A fase experimental deu-se nos meses de maio a julho de 1989, tendo sido realizado quatro testes para os níveis de temperatura do ar de secagem de 60; 80 e 100°C, totalizando 12 testes. O fluxo de ar utilizado foi $18,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$, e o de grãos, $0,13 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Implementou-se um programa de computador com base no modelo proposto por THOMPSON et alii (33) para a simulação da secagem no secador proposto. A comparação entre os resultados de teor de umidade final obtidos por meio da simulação com os obtidos experimentalmente mostra que o modelo matemático pode ser utilizado, por ter sido constatado um desvio médio absoluto de 1,3% em b.u.

Com base nos dados experimentais e no programa de simulação, observou-se que para a redução do teor de umidade

do café de 0,43 b.s., utilizando-se temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100°C, obteve-se os consumos específicos de energia de 5.380, 7.537 e 6.442 kJ kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente.

Os valores do consumo específico constatados são superiores aos observados por BAKKER-ARKEMA *et alii* (2), que, secando milho em silos secadores, constatou valores na faixa de 3.500 a 4.600 kJ kg⁻¹ de água evaporada.

A diferença entre os consumos específicos de energia do secador protótipo em relação aos dos silos secadores pode ser justificada pelos seguintes fatores, dentre outros:

- produtos utilizados na avaliação: café e milho, respectivamente;
- combustível utilizado: lenha de eucalipto e gás liquefeito de propano, respectivamente;
- fluxos de ar de secagem: 18,5 m³ min⁻¹ m⁻² e 3,15 m³ min⁻¹ m², respectivamente; e
- não-adoção da técnica de seca-aeração na avaliação do secador protótipo, prática comumente utilizada quando se trabalha com os silos secadores.

Para a secagem de café no secador estudado, recomenda-se utilizar a temperatura 100°C do ar de secagem, em razão do menor período de tempo, do menor consumo de combustível e da não-constatação dos efeitos desta temperatura sobre a qualidade do produto final. Recomenda-se também a substituição do transportador helicoidal por um transportador de correias.

Para a condução de trabalhos futuros, relacionados com secagem de café, recomendam-se:

- a) a padronização das propriedades físicas do produto antes da secagem;
- b) a realização de estudos que avaliem os efeitos do fluxo de ar, da temperatura do ar de secagem e do tempo de residência sobre a qualidade do produto final; e
- c) a utilização da seca-aeração ou da secagem combinada.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. ARTEAGA, M.S. Modelacion del proceso de secado. In: SEMINARIO DE SECADO SOLAR, 2, 1986, Cusco, Peru. Lima: Instituto General de Investigacion, 1986. p. 51-6.
2. BAKKER-ARKEMA, F.M., SILVA, J.S., MWAURA, E.N. Testing of the shivvers in-bin counterflow dryer-special report. East Lansing, Michigan: Michigan State University, 1980. 18 p.
3. BEGAZO, J.C.E.O. Ensaio sobre degomagem e armazenamento de café (Coffea arabica L.). Vicosa. MG: UFV. 1964. 34 p. (Tese M.S.).
4. BRASIL. Ministério da Agricultura. Regras para análise de sementes. Brasília: DNPV/DISEM, 1976. 188 p.
5. BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. Drying cereal grains. Westport, Connecticut: The AVI Publishing, 1974. 265 p.
6. BROOKER, D.B., MACKENZIE, B.A., JOHNSON, H.K. The present status of on-farm grain drying, St. Joseph Michigan: ASAE, 1978. 25 p. (ASAE Paper, 78-3007).
7. CAFÉ. Agroanalysis, Rio de Janeiro: v, 13, n. 6, p. 5-7, 1989.

8. CAIXETA, G.Z.T. A conveniência do acordo internacional do café pasa o Brasil. Economia Rural, Viçosa, MG: n. 1, p. 8-10, 1989.
9. CARVALHO, V.D., CHALFOUN, S.M. Aspectos qualitativos do café. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 79-90, 1985.
10. CORREA, P.C. Simulação de secagem de café em camada espessa. Viçosa, MG: UFV, 1982. 47 p. (Tese M.S.).
11. DALPASQUALE, V.A. Secagem em altas temperaturas. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1984. 29 p.
12. DAMASCENO, G.S., MORREIRA, S.M.C., FURTES, M. Método simples para avaliação de equação de isotermas e entalpias de sorção e vaporização de água em materiais biológicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE SECAGEM, 3, 1981. Viçosa, MG. Anais..., Viçosa, MG: CENTREINAR, 1981. p. 69-86.
13. HALL, C.W. Drying farm crops. Michigan: Edward Brother, 1957. 336 p.
14. HALL, G.E., ANDERSON, R.J. Bacth Internal Recycling Dryer [BIRD]. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1980. 19 p. (ASAE Paper, 80-3515).
15. IVES, N.C., HUKILL, W.V., BLACK, H.M. Corn-drying time at counterflow steady state. Transation of ASAE, St. Joseph, Michigan: v. 11, n. 2, p. 240-9, 1968.
16. LACERDA FILHO, A.F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (Coffea arabica L.). Viçosa, MG: UFV, 1986. 136 p. (Tese M.S.).
17. MELO, E.C. Rendimento térmico de uma fornalha a lenha de fluxos descendentes. Viçosa, MG: UFV, 1987. 45 p. (Tese M.S.).
18. OSÓRIO, A.G.S. Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café. Viçosa, MG: UFV, 1982. 57 p. (Tese M.S.).
19. PEREIRA, J.A.M. [Equações de Page, para secagem de café em camada fina], Comunicação Pessoal. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1989.
20. PUZZI, D. Abastecimento e armazenamento de grãos. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603 p.

21. QUEIROZ, D.M. Simulação desecagem de milho (Zeamays L.) em secador de fluxos concorrentes. Viçosa, MG: UFV, 1984. 69 p. (Tese M.S.).
22. QUEIROZ, D.M., PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1986. 55 p.
23. QUEIROZ, D.M., SILVA, J.S., MELO, E.C. Práticas de simulação de secagem de calculadoras programáveis. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1982. 82 p. [Serie CENTREINAR, 33.
24. QUILAQUEO, A.R.I. Previsão da deterioração do café durante a pré-secagem em barcaças por convecção forçada com o auxílio de coletores solares. Campinas: UNICAMP, 1979. 88 p. (Tese M.S.).
25. ROA, G. Secagem e armazenamento dos principais alimentos brasileiros, usando o ar natural, coletores solares, sistemas armazenadores e gasogenio. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1979. 75 p.
26. SABIONI, P.M. Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados. intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho (Lea mays L.). Viçosa, MG: UFV, 1986. 106 p. (Tese M.S.).
27. SAMPAIO, A.L.P. Classificação comercial do café. São Paulo: Nobel, 1967. 198 p.
28. SILVA, J.S. Adaptação da fornalha de fogo direto descendente, UFV II, para a secagem de cereais. Viçosa, MG: UFV, 1982. 8 p. (Serie Técnica - Boletim, 28).
29. SILVA, J.S. An enigneering-economic comparison five drying techniques for shelled corn on Michigan farms. East Lasing: Michigan State University, 1980. 200 p. (Tese Ph.D.).
30. SILVA, J.S., LACERDA FILMO, A.F. Construção de secadores para produtos agrícolas. Vicosa, MG: 1984. 17 p. (Serie Técnica - Boletim, 41).
31. TASCÓN, C.E.O. Simulação de secagem de café, em camada fixa, com inversão do sentido de fluxo de ar. Viçosa, MG: UFV, 1984. 64 p. (Tese M.S.).
32. THOMPSON, T.L., FOSTER, G.H., PEART, R.M. Comparison of concorrente-flow, crossflow, and counterflow grain drying methods. Washington, DC: USDA, 1969. 23 p. (Market Research Report, 841).

33. THOMPSON, T.L., PEART, R.M., FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying - a new model. Transation of the ASAE, St. Joseph, Michigan: v. 11, n. 4, p. 582-6, 1968.

35. VILELA, E.R. Secagem de café em terreiro e silo com energia solar. Campinas: UNICAMP, 1977. 107 p. (Tese M.S.).

APÉNDICES

APÊNDICE A

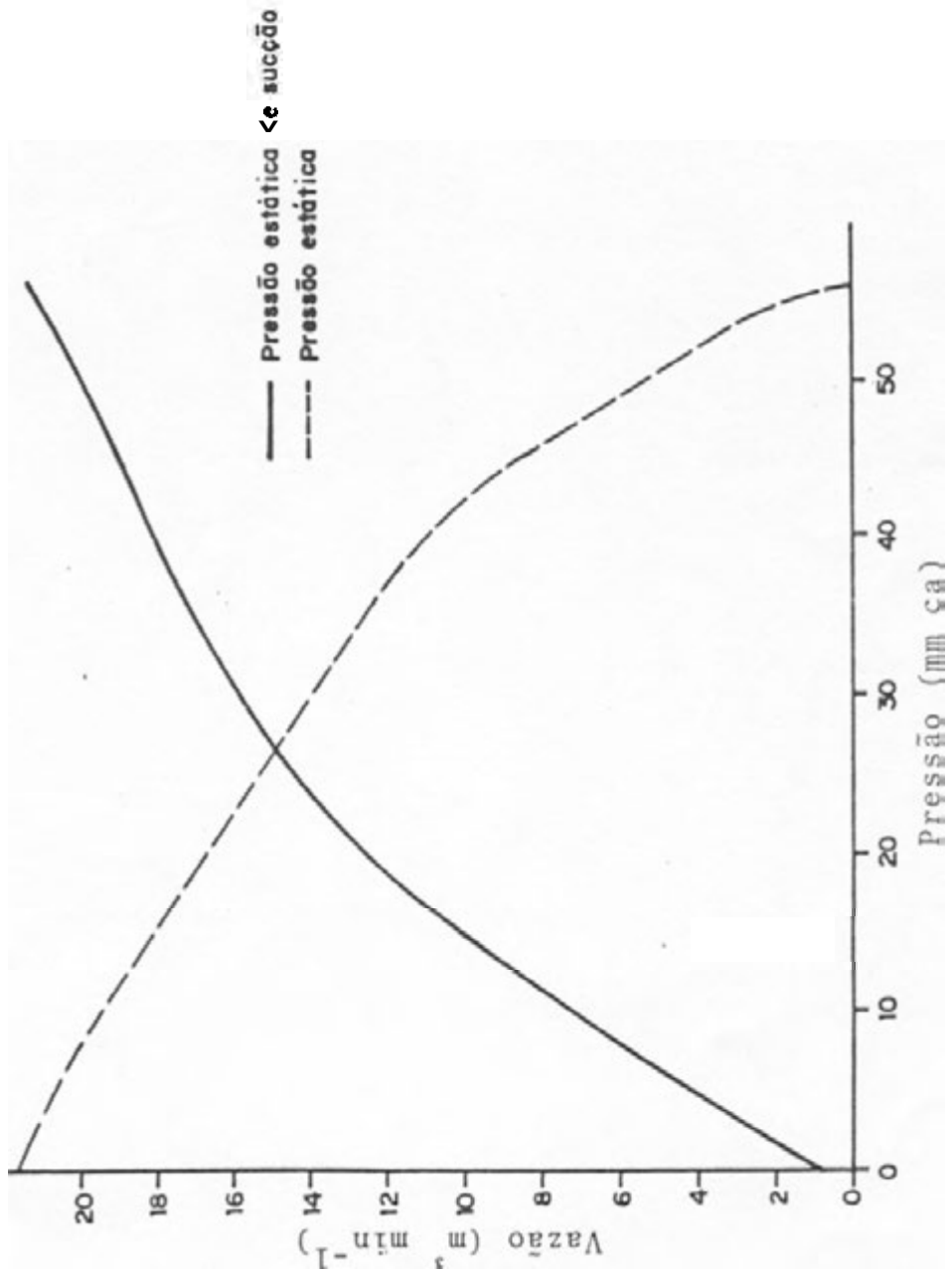


FIGURA 1A - Curvas Características do Ventilador.

APÊNDICE B

LISTAGEM DO PROGRAMA DE COMPUTADOR IMPLEMENTADO

```
PROGRAM THOMPSON; (* Este programa simula secagem de café em secador
intermitente de fluxos contracorrentes, usando o
modelo proposto por Thompson *)
```

```
(* Programa elaborado por: Luis Cesar da Silva
Juarez de Sousa e Silva
Daniel Marcal de Queiroz
```

```
Departamento de Engenharia Agricola - Universidade Federal de Vicosa
Vicosa - MG - janeiro de 1990.
```

*)

```
{$N+}
uses crt,printer;
```

```
const dim = 31;
type matriz = array [1..dim] of real;
```

```
var u, tg, t, ru, urar, umini : matriz;
ui0, tamb, ruamb, ru0, tsec, gar0, xtotal, ttotal, deltt, timp, ga : real;
tgi, t0, ui, umed, umax, umin, tgmed, tgmax, tgmin, deltx, tpar : real;
dimp, tmin, eff, trev, drev, ur8, vpcs, uitroca, teste, umfre : real;
reptotal, tstop, tmove, pei, tzero, tum, tgtroca, utroca, deltmin : real;
i, n, ntotal, pareflag : integer;
cflag : char;
```

```
FUNCTION VESP (ta, rma: real): real;
(Calcula volume especifico. Entrada: temperatura e razao de mistura)
```

```
var pv : real;
```

```
begin
pv := rma*101325.0/(0.622+rma);
vesp := 287*(ta+273.16)/(101325.0-pv);
end;
```

```

FUNCTION PVSF(tabs: real): real;
{Calcula a pressao de vapor de saturacao. Entrada: temperatura absoluta}

var x      : real;

begin
  x:=-7511.52/(tabs)+89.63121+0.02399897*tabs-12.150799*ln(tabs);
  x:=x+2.0998405E-11*exp(4*ln(tabs))-1.1654551E-5*tabs*tabs;
  pvsf:=exp(x-1.2810336E-8*exp(3*ln(tabs)))/0.1333;
end;

```

```

FUNCTION RMIS(ta,ura: real): real;
{Calcula razao de mistura. Entrada: temperatura e umidade relativa}

var pv1      : real;

begin
  pv1:=PVSF(ta+273.16)*ura/100;
  rmis:=0.622*pv1/(760-pv1);
end;

```

```

FUNCTION UREL(ta,rmal: real): real;
{Calcula a umidade relativa. Entrada: temperatura e razao de mistura}

var pv3      : real;

begin
  pv3:=rmal*760.0/(0.622+rmal);
  urel:=pv3/PVSF(ta+273.16)*100.0;
end;

```

```

PROCEDURE CORRIGE(var tf,ruf,uf,tgf,cp,r : real);
{Calcula ponto factivel do ar, simulando condensacao agua do ar no produto}

var t1,rm1,h1,pv9,rm2,t2,ur1,ur2,t3,rm3,ur3      : real;
    nvezes,jflag                                  : integer;

begin
  t1:=tf; rm1:=ruf; h1:=0.24*t1+rm1*(588.0+0.45*t1); nvezes:=0;
  pv9:=PVSF(t1+273.16);
  rm2:=0.622*pv9/(760.0-pv9);
  t2:=(h1+(rm2-rm1)*t1+cp*r*(1+uf)*t1-rm2*588);
  t2:=t2/(0.24+rm2*0.45+cp*r*(1+uf));
  ur1:=UREL(t1,rm1);
  ur2:=UREL(t2,rm2);
  repeat
    nvezes:= nvezes+1;

```

```

t3:= t1-(ur1-100)/(ur1-ur2)*(t1-t2);
rm3:= (h1-rm1*t1+cp*r*(1+uf)*(t1-t3)-0.24*t3)/(-t1+588+0.45*t3);
ur3:= urel(t3,rm3);
jflag:= 1;
if(ur3>100) then
begin
    ur1:=ur3; h1:=0.24*t3+(588.0+0.45*t3)*rm3;
    rm1:=rm3; t1:=t3; jflag:=0;
end;
if(ur3<99) then
begin
    ur2:=ur3; rm2:=rm3; t2:=t3; jflag:=0;
end;
if(nvezes>100) then jflag:=1;
until (jflag = 1 );
ruf:=rm3; uf:=uf-(rm3-ruf)/r; tf:=t3; tgf:=t3;
end;

```

```

PROCEDURE DELGADA(var tg0,u0,cp,r,te,tf,ruf,tgf,uf,ur,teor : real);
{Balanco de massa para o ar e o produto, para uma camada delgada}

```

```

var ue,xmr,a1,a2,a3,duu,dxmr,teq,teabs,dhfg,ativ : real;

```

```

begin
    ue:=1.1282*exp(0.5405*ln(-ln(1-0.01*ur)/(te+40.535)));
    xmr:=(u0-ue)/(teor-ue);
    if(teor>0.38889) then
    begin
        a1:=0.73681; a2:=173705; a3:=5533.11;
    end
    else
    begin
        a1:=0.605804; a2:=105.758; a3:=2751.53;
    end;
    duu := 0.0;
    if (xmr > 1 ) then
    begin
        xmr:=1; duu:=u0-teor;
    end;
    if(xmr > 0 ) then
    begin
        dxmr := ln(xmr);
        if xmr<> 1 then teq:=exp((1/a1)*ln(-ln(xmr)/
            (a2*exp(-a3/(te+273.16)))))/60;
        if xmr = 1 then teq:=0.0;
        teq:=teq+deltt;
        if teq = 0 then uf:=teor+duu;
        if teq > 0 then uf:=(teor+duu-ue)*exp(-a2*exp(a1*ln(60*teq))*
            exp(-a3/(te+273.16)))+ue;
    end;
    if(xmr <= 0 ) then uf := u0;
    ruf:=ru0+r*(u0-uf); ativ:=1-exp(-0.8*(te+40.535)*exp(1.85*ln(u0)));

```



```

teabs:=te+273.16; dhfg:=0.088*teabs*teabs*exp(1.85*ln(u0))*(-1+1/ativ);
tf:=(0.24+0.45*ru0)*te-(ruf-ru0)*(588+dhfg-te)+cp*r*(1+u0)*te;
tf:=tf/(0.24+0.45*ruf+cp*r*(1+u0)); tgf:=tf;
ur:=UREL(tf,ruf);
end;

```

```

PROCEDURE CAMADA(var i : integer; var t0,ru0,deltx,ga,deltt : real;
                var u,tg,umini,ru,t,urar : matriz);
{Simula a secagem de uma camada delgada de produto}

```

```

var tg0,u0,cp,r,te,tf,ruf,tgf,uf,ur,teor : real;

```

```

begin
  tg0:=tg[i]; u0:=u[i]; cp:=0.4+0.6*u0/(1.0+u0);
  r:= (406.14-u0*(408.6-312.2*u0))*deltx/ga/deltt;
  te:=((0.24+0.45*ru0)*t0+cp*r*(1.0+u0)*tg0)/(0.24+0.45*ru0+cp*r*(1+u0));
  tf:=te; ruf:=ru0; tgf:=te; uf:=u0;
  ur := urel(tf,ruf);
  teor:=umini[i];
  if (ur < 99.99) then DELGADA(tg0,u0,cp,r,te,tf,ruf,tgf,uf,ur,teor)
  else CORRIGE(tf,ruf,uf,tgf,cp,r);
  tg[i]:=tf; u[i]:=uf; ru[i]:=ruf; t[i]:=tf; t0:=tf; ru0:=ruf;
  urar[i]:=UREL(tf,ruf);
end;

```

```

PROCEDURE IMPRIME(var u,tg,urar,t : matriz; var cflag : char;
                var dimp,deltx,eff,tmin,timp,umed,ui0: real;
                var ntotal : integer);
{Apresenta os resultados via video e/ou impressora}

```

```

var ix,jl,ii,hora : integer;
    minuto,efic : real;

```

```

begin
  efic:=eff*(tmin/60)*(100-umed)/(ui0-umed);
  hora:=trunc(tmin/60);minuto:=tmin-hora*60;
  if ((cflag = 'V') or (cflag = 'O')) then
  begin
    clrscr;gotoxy(15,2);write('TESTE DE NUMERO : ',TESTE:3:0);
    gotoxy(3,4);write('TEMPO DE SECAGEM: ',hora:3);
    write(' horas e ',minuto:4:1,' minutos');gotoxy(1,6);
    for jl:=1 to 20 do write('*');
    write('RESULTADOS');
    for jl:=1 to 20 do write('*');
    gotoxy(1,8);
    write('posicao  umidade do grao  temperatura do grao');
    write(' temp. do ar  umid. rel. ');
    gotoxy(1,9);write(' (m) (% b.u.) (graus Celsius)');
    write(' (graus Celsius) (%)');
    ii:=1;ix:=9;

```

```

repeat
  ix:=ix+1;gotoxy(1,ix);write(deltx*ii:5:2);
  gotoxy(14,ix);write(u[ii]*100/(1+u[ii]):6:3);
  gotoxy(34,ix);write(tg[ii]:6:2);
  if ii <= n then
  begin
    gotoxy(52,ix);write(t[ii]:6:2);
    gotoxy(68,ix);write(urar[ii]:6:2);
  end;
  ii:=ii+2;
until ii >= ntotal;
if ii <> ntotal then
begin
  ii:=ntotal;ix:=ix+1;gotoxy(1,ix);write(deltx*ii:5:2);
  gotoxy(14,ix);write(u[ii]*100/(1+u[ii]):6:3);
  gotoxy(34,ix);write(tg[ii]:6:2);
end;
ix:=ix+2;gotoxy(1,ix);
write(' ***** UMIDADE FINAL MEDIA (% b.u.) ');
writeln(' .....: ',umed:9:2);ix:=ix+1;
gotoxy(1,ix);write(' ***** CONSUMO ESPECIFICO DE');
write(' ENERGIA (kJ/kg de agua) .....: ',efic:9:2);
end;
if ((cflag = 'I') or (cflag = 'O')) then
begin
  writeln (lst);
  writeln (lst,'          TESTE DE NUMERO : ',TESTE:3:0);
  writeln (lst);
  write(lst,' T E M P O   D E   S E C A G E M: ',hora:3);
  writeln(lst,' horas e ',minuto:4:1,' minutos');
  writeln(lst);
  write(lst,'***** R E S U L T A D O S');
  writeln(lst,'*****');
  writeln(lst);
  write(lst,'posicao  umidade do grao  temperatura do grao');
  writeln(lst,'  temp. do ar  umid. rel. ');
  write(lst,'  (m)      (% b.u.)      (graus Celsius)');
  writeln(lst,'      (graus Celsius)  (%)');
  ii:=1;
  repeat
    write(lst,deltx*ii:5:2,' ');
    write(lst,u[ii]*100/(1+u[ii]):6:3);
    write(lst,' ',tg[ii]:6:2);
    if ii <= n then
    begin
      write(lst,' ',t[ii]:6:2);
      writeln(lst,' ',urar[ii]:6:2);
    end;
    if ii > n then writeln(lst);
    ii := ii+2;
  until ii >= ntotal;
  if ii <> ntotal then
  begin
    ii:=ntotal; write(lst,deltx*ii:5:2,' ');
    write(lst,u[ii]*100/(1+u[ii]):6:3,' ');

```

```

        writeln(lst,tg[ii]:6:2);
    end;
    writeln(lst);writeln(lst);
    write(lst,'***** UMIDADE FINAL MEDIA (% b.u.) ');
    writeln(lst,'.....: ',umed:9:2);
    write(lst,'***** CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGIA');
    writeln(lst,' (kJ/kg de agua) .....: ',efic:9:2);
end;
timp:=timp+dimp;

```

end;

```
{ ***** PROGRAMA PRINCIPAL ***** }
```

begin

{Entrada de dados}

```

clrscr;gotoxy(7,1);
write('SIMULACAO DE SECAGEM DE CAFE EM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS');
gotoxy(15,2);write('CONTRACORRENTES, SEGUNDO O MODELO DE THOMPSON');
gotoxy(5,5);write('Entrada de dados para a etapa de secagem:');
gotoxy(1,7);write('Teste de Numero .....: ');readln(teste);
write ('Teor de umidade inicial      (%): '); readln (ui0 );
write ('Temperatura inicial dos graos. (.C): '); readln (tgi);
write ('Massa especifica inicial      (kg/m3): '); readln (pei);
write ('Temperatura ambiente           (.C): '); readln (tamb);
write ('Umidade relativa media         (%): '); readln (ur8);
write ('Temperatura do ar de secagem    (.C): '); readln (tsec);
write ('Fluxo de ar                      (m^3/min/m^2): '); readln (gar0);
write ('Velocidade do produto           (m/min): '); readln (vpcs);
write ('Espes. da camada de secagem     (m): '); readln (xtotal);
write ('Espes. da camada de repouso     (m): '); readln (reptotal);
write ('N' divisoes da camada de secagem : '); readln(n);
write ('Tempo de secagem                 (h): '); readln (ttotal);
if tttotal = 0.0 then
begin

```

```

    write ('Teor de umidade final      (%): ');readln(umfre);
end;

```

```

end;
write ('Tempo do produto parado (min): '); readln (tstop);
write ('Tempo do produto em movimento (min): '); readln (tmove);
write ('Tempo para impressao (min): '); readln(dimp);
deltmin:=xtotal/(n*vpcs); deltt:=deltmin/60.0;
write('Impressao (v)ideo (i)mpressora ou (a)mbos ? ');readln(cflag);
cflag:=upcase(cflag); ruamb:=RMIS(tamb,ur8);
if (cflag = 'I') then clrscr;
if (cflag = 'A') then cflag := '0';
if (cflag = 'I') or (cflag = '0') then
begin

```

{Imprime os dados de entrada}

```

writeln (lst,'SECAGEM DE CAFE EM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS');
writeln (lst,' CONTRACORRENTES, SEGUNDO O MODELO DE THOMPSON');

```

```

writeln (lst);
writeln (lst, '      TESTE DE NUMERO : ',TESTE:3:0);
writeln (lst);
writeln (lst, 'Dados de entrada para a etapa de secagem:');
writeln (lst);
writeln (lst, 'Teor de umidade inicial ( % ) ..... : ',ui0:7:2);
writeln (lst, 'Temperatura inicial dos graos (.C) ..... : ',tgi:7:2);
writeln (lst, 'Massa especifica inicial do produto (kg /m3).. : ',pei:7:2);
writeln (lst, 'Temperatura ambiente (.C) ..... : ',tamb:7:2);
writeln (lst, 'Umidade relativa media (X) ..... : ',ur8:7:2);
writeln (lst, 'Temperatura do ar de secagem (.C) ..... : ',tsec:7:2);
writeln (lst, 'Fluxo de ar (m^3/min/m^2) ..... : ',gar0:7:2);
writeln (lst, 'Velocidade do produto (m/min) ..... : ',vpcs:7:2);
writeln (lst, 'Espessura total da camada de secagem (m) .... : ',xttotal:7:2);
writeln (lst, 'Espessura total da camada de repouso (m) ..... : ',reptotal:7:2);
writeln (lst, 'Numero de divisoes camada de secagem ..... : ',n:7);
writeln (lst, 'Incremento de tempo de simulacao (min)..... : ',deltmin:7:2);
if ttotal = 0.0 then
  writeln (lst, 'Teor de umidade final ( % ) ..... : ',umfre:7:2)
else
  writeln (lst, 'Tempo de secagem (h) ..... : ',ttotal:7:2);
  writeln (lst, 'Intervalo de tempo produto parado (min) ..... : ',tstop:7:2);
  writeln (lst, 'Intervalo de tempo produto movimentando (min): ',tmove:7:2);
end;
ui:=ui0/(100.0-ui0); deltax:=xttotal/n;
ntotal:=n+trunc(reptotal/deltax+0.5); ga:=gar0*60.0/VESP(tamb,ruamb);
for i:=1 to ntotal do
begin
  u[i]:=ui; tg[i]:=tgi; umini[i]:=ui;
end;
tpar:=0.0; tmin:=0; timp:=dimp; trev:=drev;
tzero:=0; tum:=0; pareflag:=0;
eff:=ga*1.0048*(tsec-tamb)/(pei*(xttotal+reptotal));
repeat

  {Simula a secagem do produto, durante e periodo em que este
  permanece estatico na camara de secagem}

  while ((tzero < tstop) and (pareflag = 0)) do
  begin
    tzero:=tzero+deltmin; tpar:=tpar+deltt; tmin:=tpar*60.0;
    t0:=tsec; ru0:=ruamb;
    for i:=1 to n do
      CAMADA(i,t0,ru0,deltax,ga,deltt,u,tg,umini,ru,t,urar);
    umed:=0.0;
    for i:=1 to ntotal do umed:=umed+u[i]/ntotal;
    umed:=100*umed/(1+umed);
    if (tmin > timp) then
      IMPRIME(u,tg,urar,t,cflag,dimp,deltax,eff,tmin,timp,umed,ui0,ntotal);
    if (ttotal = 0 ) then if(umed <= umfre) then pareflag:=1;
    if (ttotal <>0 ) then if(tpar >= ttotal) then pareflag:=1;
  end;
  tzero:=tzero-tstop;

```

{Simula a secagem durante o periodo de tempo em que o produto esta sendo movimentado)

```

while ((tum<=tmove) and (pareflag=0)) do
begin
  tum:=tum+deltmin; tpar:=tpar+deltt; tmin:=tpar*60.0;
  t0:=tsec; ru0:=ruamb;
  for i:=1 to n do
  CAMADA(i,t0,ru0,deltx,ga,deltt,u,tg,umini,ru,t,urar);
  umed := 0;
  for i:=1 to ntotal do umed:=umed+u[i]/ntotal;
  umed:=100*umed/(1+umed);
  if (tmin > timp) then
  IMPRIME(u,tg,urar,t,cflag,dimp,deltx,eff,tmin,timp,umed,ui0,ntotal);
  utroca:=u[1]; tgtroca:=tg[1]; uitroca:=u[1];
  for i:=1 to ntotal +1 do
  begin
    u[i]:=u[i+1]; tg[i]:=tg[i+1]; umini[i]:=umini[i+1];
  end;
  u[ntotal]:=utroca; tg[ntotal]:=tgtroca;
  umini[ntotal]:=uitroca;
  if (ttotal = 0 ) then if(umed <= umfre) then pareflag:=1;
  if (ttotal<> 0 ) then if(tpar >= ttotal) then pareflag:=1;
end;
  tum:=tum-tmove;
until pareflag=1;
IMPRIME(u,tg,urar,t,cflag,dimp,deltx,eff,tmin,timp,umed,ui0,ntotal);
end.

```

APÊNDICE C

QUADRO 1C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 01. Data: 14/06/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)	Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*				
7:30	0,0	47,1	12,1	12,4	75	12,0	22,1	405,8
8:00	0,5	57,9	30,7	28,0	75	13,0	44	
8:30	1,0	61,0	30,6	29,4	80	13,5	42	394,9
9:00	1,5	60,4	37,8	29,1	65	13,5	44	
9:30	2,0	59,9	42,2	31,8	62	13,5	43	398,2
10:00	2,5	61,6	41,8	34,9	55	12,5	44	
10:30	3,0	63,3	43,8	34,7	57	12,5	45	413,4
11:00	3,5	60,3	44,4	32,9	50	13,0	44	
11:30	4,0	63,4	44,4	32,8	50	13,0	42	410,4
12:00	4,5	62,0	42,8	34,3	45	14,0	44	
12:30	5,0	61,0	42,0	36,7	46	14,5	46	409,8
13:00	5,5	60,1	45,2	35,1	45	14,5	44	
13:30	6,0	60,3	47,4	33,3	45	15,0	44	414,1
14:00	6,5	60,1	47,6	32,7	42	16,0	44	
14:30	7,0	60,3	46,8	32,7	41	16,5	42	418,9
15:00	7,5	59,8	47,3	35,2	43	16,5	42	
15:30	8,0	59,4	49,1	35,0	43	16,5	42	425,8
16:00	8,5	59,2	47,3	35,5	45	16,0	42	424,1

Peso Inicial (kg) : 991

Peso Final (kg) : 927

Consumo de Lenha (kg) : 46,8

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹) : 11,419

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 2C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 02. Data: 01/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática "Plenum" (mm ca)	Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*				
7:00	0,0	37,0	23,5	31,0	100	14,5	33,4	427,6
7:30	0,5	59,6	31,4	31,0	96	14,5	44	415,5
8:00	1,0	60,8	36,9	30,7	95	13,5	44	421,5
8:30	1,5	61,2	38,8	30,8	95	13,5	44	409,3
9:00	2,0	60,4	39,4	30,7	92	13,5	44	412,1
9:30	2,5	61,0	38,8	30,9	93	14,0	44	28,9
10:00	3,0	60,0	39,6	30,1	90	14,0	44	413,5
10:30	3,5	60,1	39,3	30,5	89	14,5	44	405,1
11:00	4,0	60,8	40,3	31,8	87	14,5	44	406,9
11:30	4,5	60,4	40,2	31,8	87	14,5	43	28,5
12:00	5,0	60,0	41,3	30,8	75	14,5	44	402,5
12:30	5,5	61,3	40,0	31,7	72	13,5	44	27,7
13:00	6,0	60,5	41,3	31,3	65	13,5	44	25,1
13:30	6,5	60,0	40,7	31,8	62	14,0	44	399,6
14:00	7,0	60,1	38,3	33,1	61	14,5	44	397,3
14:30	7,5	60,8	44,0	32,1	61	15,0	42	22,8
15:00	8,0	60,8	42,4	32,5	62	15,0	43	23,2
15:30	8,5	60,1	41,6	33,3	62	15,0	42	403,3
16:00	9,0	59,5	41,7	32,7	64	15,5	42	21,9
16:30	9,5	60,9	41,8	32,2	65	15,5	40	404,9
17:00	10,0	60,3	40,8	32,3	65	15,5	42	20,9
17:30	10,5	61,4	44,8	32,7	70	15,5	42	16,5
18:00	11,0	60,0	43,4	32,8	80	15,5	43	17,0
18:30	11,5	60,6	42,5	38,8	85	15,5	44	15,5
19:00	12,0	59,5	45,5	33,0	89	15,5	42	16,5
19:30	12,5	60,8	44,0	33,0	89	15,5	42	17,0
20:00	13,0	60,5	43,5	33,7	100	16,0	42	15,0
20:30	13,5	60,6	44,3	34,9	100	16,0	42	16,5
21:00	14,0	59,3	44,3	34,8	100	16,5	42	17,0
21:30	14,5	61,5	45,2	37,7	100	17,0	42	15,5
22:00	15,0	60,2	47,7	36,0	100	17,0	42	16,5
22:30	15,5	60,6	44,7	35,1	100	16,5	42	20,6
23:00	16,0	58,0	44,4	35,6	100	16,5	42	412,3

Peso Inicial (kg): 1.112

Peso Final (kg): 932

Consumo de Lenha (kg): 86,5

Consumo Específico da Energia (kJ kg⁻¹): 7.488

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 3C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados na Teste 03. Data: 05/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (nun ca)	Teor de Umidade 1%(b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Pontc A*	Exaustão				
10:15	0,0	55,7	29,3	28,2	73	13,5	387,6	
10:45	0,5	61,3	30,3	29,1	76	13,5		
11:15	1,0	60,2	31,4	30,5	70	15,0	396,9	
11:45	1,5	60,2	31,5	30,8	68	14,5		
12:15	2,0	61,0	30,9	32,7	62	14,5	399,2	
12:45	2,5	59,4	30,6	33,2	59	15,0		
13:15	3,0	60,1	32,2	33,4	57	15,0	396,2	
13:45	3,5	59,8	33,0	33,3	55	15,5		
14:15	4,0	59,0	33,9	34,1	53	16,0	401,4	
14:45	4,5	59,8	33,2	34,1	52	16,5		
15:15	5,0	60,0	33,9	35,2	52	17,0	405,4	
15:45	5,5	59,6	35,4	35,5	53	17,5		
16:15	6,0	60,2	34,3	37,5	54	17,0	411,8	
16:45	6,5	60,3	34,8	37,2	57	17,5		
17:15	7,0	60,5	36,6	37,5	60	18,0	413,7	
17:35	7,5	60,9	36,7	38,6	61	18,5	415,7	

Peso Inicial (kg) : 1.008

Peso Final (kg) : 968

Consumo de Lenha (kg) : 41,8

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹) : 16.252

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 4C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 04. Data: 26/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)		Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)	
		Secagem	Grãos	Ponto A*		Exaustão	Ambiente			"Plenum"
7:30	0,0	60,8	31,2	30,1	27,3	10,5	14,0	42	25,9	403,6
8:00	0,5	60,0	33,3	30,1	28,8	12,5	14,5	42	24,7	401,3
8:30	1,0	60,9	39,3	29,3	28,7	14,0	15,0	42	24,1	402,2
9:00	1,5	60,5	39,5	30,0	29,8	17,8	15,5	42	23,3	394,6
9:30	2,0	60,6	40,2	29,3	30,8	18,1	15,5	42	23,1	403,6
10:00	2,5	60,8	39,4	29,2	31,1	22,5	16,5	42	21,1	406,4
10:30	3,0	59,8	38,4	28,8	30,2	23,0	16,5	42	21,6	402,6
11:00	3,5	60,2	41,0	29,1	30,2	23,5	16,5	42	21,2	406,4
11:30	4,0	60,5	41,1	28,0	30,3	24,6	16,5	42	20,0	403,4
12:00	4,5	60,1	42,8	28,3	30,7	25,0	17,5	40	19,2	409,1
12:30	5,0	60,6	41,2	28,7	32,2	26,0	17,5	41	19,1	409,3
13:00	5,5	60,2	41,1	21,8	31,5	26,2	17,5	40	17,6	407,7
13:30	6,0	60,1	42,3	19,8	32,4	27,7	17,5	40	17,6	402,6
14:00	6,5	60,4	43,7	29,8	32,4	27,0	17,5	40	21,2	406,4
14:30	7,0	61,2	43,9	30,6	33,2	27,0	17,5	40	20,0	403,4
15:00	7,5	59,8	44,4	32,0	33,2	26,5	18,0	38	19,2	409,1
15:30	8,0	59,7	44,2	31,0	34,0	26,5	18,5	38	19,1	409,3
16:00	8,5	59,6	45,2	31,5	34,0	26,5	19,5	38	17,6	407,7
16:30	9,0	60,8	44,0	33,0	35,9	26,5	18,5	39	17,6	407,7
17:00	9,5	60,6	46,6	33,0	36,5	26,0	18,5	38	17,6	407,7
17:30	10,0	60,7	45,4	32,7	36,3	25,0	18,5	38	17,6	407,7
18:00	10,5	57,2	45,1	33,9	36,1	23,0	19,5	38	17,6	407,7

Peso Inicial (kg): 1.166

Peso Final (kg): 1.049

Consumo de Lenha [kg]: 55,1

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 7.386

• Temperatura na câmara de secagem a 0,25m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 5C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 05. Data: 12/06/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)	Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Ponto A*	Exaustão				
14:00	0,0	32,0	32,7	32,4	80	13,5	404,3	
14:30	0,5	36,1	34,9	34,3	78	10,5	399,6	
15:00	1,0	46,4	34,3	32,7	48	10,5	405,2	
15:30	1,5	52,1	34,8	33,0	80	10,5	404,3	
16:00	2,0	53,9	32,9	40,4	80	11,5	405,2	
16:30	2,5	53,3	33,6	38,2	81	12,5	405,1	
17:00	3,0	48,8	32,7	42,1	82	12,0	405,1	
17:30	3,5	48,5	32,9	38,6	84	12,5	404,7	
18:00	4,0	56,3	33,5	40,0	85	13,0	404,7	
18:30	4,5	57,3	34,9	38,8	86	12,5	404,7	
19:00	5,0	59,3	35,1	41,9	88	12,5	417,8	
19:30	5,5	55,6	35,6	42,5	90	13,0	417,8	
20:00	6,0	54,6	36,2	42,4	95	14,0	416,6	
20:30	6,5	58,0	37,4	42,6	95	14,0	416,6	
21:00	7,0	59,9	35,6	46,5	100	14,5	425,4	

Peso Inicial (kg): 1.051

Peso Final (kg): 950

Consumo de Lenha (kg): 53,6

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 8.282

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de inj~ Co; de a . .

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 6C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 06. Data: 22/06/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)				Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)	Teor de Umidade (%)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*	Exaustão				
13:30	0,0	51,7	36,8	32,7	28,8	55	12,0	42	414,0
14:00	0,5	30,7	37,0	34,1	32,2	55	11,5	41	408,2
14:30	1,0	30,6	46,9	33,0	32,8	53	13,0	41	402,0
15:00	1,5	30,1	52,6	34,0	35,2	52	14,5	40	407,8
15:30	2,0	31,6	50,4	33,9	37,1	53	14,0	41	407,8
16:00	2,5	30,1	49,8	34,6	37,4	55	15,0	41	407,8
16:30	3,0	30,6	50,8	35,7	36,9	57	15,5	40	407,8
17:00	3,5	30,2	55,0	35,7	37,2	62	15,0	40	407,8
17:30	4,0	29,0	53,9	35,9	37,8	73	15,5	40	407,8
18:00	4,5	30,1	54,5	36,6	39,3	80	16,0	40	407,8
18:30	5,0	30,0	55,1	37,3	40,1	82	16,0	40	407,8
19:00	5,5	29,8	55,0	38,2	40,9	90	16,0	40	407,8
19:30	6,0	30,6	58,3	38,5	42,0	94	16,0	40	407,8
20:00	6,5	29,5	55,2	41,1	41,6	100	16,5	40	407,8
20:30	7,0	29,7	57,2	42,2	41,0	100	16,5	40	407,8
21:00	7,5	30,5	57,4	44,7	43,2	100	16,5	40	407,8
21:30	8,0	30,1	60,8	45,1	43,9	100	16,5	40	407,8

Peso Inicial (kg): 952

Peso Final (kg): 838

Consumo de Lenha (kg): 59,3

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 8,146

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 7C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 07. Data: 03/07/89

Hora	Tempo (h.)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)		Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*		Exaustão	Ambiente		
9:30	0,0	50,8	24,1	31,4	29,4	18,5	14,0	46	392,5
10:00	0,5	70,4	23,1	31,3	28,2	19,0	13,0	42	388,6
10:30	1,0	80,1	40,5	35,3	29,9	19,2	13,5	42	387,5
11:00	1,5	80,2	47,8	35,8	34,0	19,9	14,5	42	387,5
11:30	2,0	80,2	47,8	35,0	35,0	21,0	14,8	40	388,1
12:00	2,5	81,6	49,5	35,8	35,1	21,4	14,5	42	387,3
12:30	3,0	80,1	49,8	36,5	36,3	21,8	15,0	42	382,8
13:00	3,5	80,5	49,9	36,2	36,3	22,0	15,0	40	392,9
13:30	4,0	80,9	50,7	35,3	36,5	23,0	15,0	39	398,9
14:00	4,5	80,7	50,9	35,8	37,2	24,0	15,5	40	393,9
14:30	5,0	80,0	51,8	36,1	38,4	24,3	16,0	38	390,9
15:00	5,5	80,9	54,1	35,2	37,6	25,0	16,5	40	400,9
15:30	6,0	79,9	54,1	35,1	38,4	25,0	16,5	40	
16:00	6,5	81,5	54,1	36,8	39,7	23,0	16,5	39	
16:30	7,0	81,5	56,0	37,6	40,5	24,0	17,0	38	
17:00	7,5	80,3	56,8	38,9	40,5	23,0	17,5	40	
17:30	8,0	81,0	58,2	39,0	42,9	22,0	17,0	40	
18:00	8,5	80,7	55,2	39,0	42,4	20,0	17,5	39	
18:30	9,0	81,6	57,8	40,5	42,8	19,5	17,5	39	
19:00	9,5	80,7	61,0	41,3	42,5	17,0	17,8	40	
19:30	10,0	72,6	62,3	39,5	51,1	16,5	17,0	40	

Peso Inicial (kg): 1.021

Peso Final (kg): 897

Consumo de Lenha (kg): 73,9

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 9.314

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 8C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 08. Data: 24/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)		Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*		"Plenum"	Sucção		
9:05	0,0	80,6	18,1	24,8	70	11,0	42	27,0	401,1
9:35	0,5	80,9	34,8	32,8	65	12,0	42	26,3	400,4
10:05	1,0	80,2	43,0	31,1	47	12,5	42	22,9	398,5
10:35	1,5	80,1	43,4	32,0	43	12,5	42	25,1	407,3
11:05	2,0	79,6	43,3	32,2	38	12,5	42	22,3	394,4
11:35	2,5	81,2	40,3	31,8	37	12,7	42	20,1	393,3
12:05	3,0	80,8	41,4	32,2	36	13,0	42	21,1	395,6
12:35	3,5	81,7	43,8	32,4	35	12,5	42	19,4	400,8
13:05	4,0	81,4	45,8	33,3	34	14,0	42	16,7	399,6
13:35	4,5	81,7	50,6	31,8	32	14,5	42	15,8	407,2
14:05	5,0	80,2	51,8	32,1	32	14,5	42	15,1	404,0
14:35	5,5	80,6	48,2	32,9	32	14,5	42	13,3	405,9
15:05	6,0	80,0	49,1	32,7	32	14,0	42	13,0	409,2
15:35	6,5	80,9	51,9	33,0	32	14,5	42	13,0	409,2
16:05	7,0	81,8	52,2	34,1	34	14,0	42	13,0	409,2
16:35	7,5	81,8	51,1	34,4	34	14,0	42	13,0	409,2
17:05	8,0	81,9	53,1	35,8	35	14,5	42	13,0	409,2
17:35	8,5	80,4	55,2	38,2	45	14,5	42	13,0	409,2
18:05	9,0	81,1	56,2	37,6	47	14,5	42	13,0	409,2
18:35	9,5	80,8	57,8	38,1	55	14,5	42	13,0	409,2
19:05	10,0	81,0	55,2	40,4	56	15,5	40	13,0	409,2
19:35	10,5	81,2	59,8	39,3	60	15,0	40	13,0	409,2
20:05	11,0	80,4	61,8	38,8	63	15,5	40	13,0	409,2
20:35	11,5	79,2	59,4	39,2	67	15,5	41	13,0	409,2
					68	15,5	40		

Peso Inicial [kg]: 1.120

Peso Final (kg): 940

Consumo de Lenha [kg]: 86,7

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 7.518

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 9C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 09. Data: 09/06/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)		Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)	
		Secagem	Grãos	Ponto A*		Exaustão	Ambiente			"Plenum"
16:00	0,0	76,7	29,6	30,7	30,3	25,5	11,0	40	22,6	405,7
16:30	0,5	100,0	32,1	37,5	38,1	25,3	10,0	40		
17:00	1,0	100,0	43,4	38,7	39,7	25,0	10,5	41	22,7	404,1
17:30	1,5	99,1	54,5	37,9	38,3	24,6	10,0	42		
18:00	2,0	100,5	59,9	37,9	38,0	22,0	10,0	42	18,5	398,7
18:30	2,5	99,5	61,3	39,0	40,0	22,0	10,5	41		
19:00	3,0	98,5	61,5	38,3	41,1	18,0	10,0	42	16,8	401,3
19:30	3,5	101,3	62,5	39,2	41,8	17,9	11,0	42		
20:00	4,0	99,1	60,1	39,0	45,6	17,0	11,0	41	16,4	407,8
20:30	4,5	91,6	60,6	39,1	43,3	17,0	11,0	41	15,6	411,3

Peso Inicial [kg]: 1.119

Peso Final [kg]: 1.020

Consumo de Lenha (kg): 40,0

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 6.275

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 10C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste 10. Data: 15/06/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática "Plenum" (mm ca)	Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Grãos	Ponto A*				
14:15	0,0	67,0	24,9	23,5	21,8	15,5	41,2	474,1
14:45	0,5	88,7	25,5	29,2	27,4	13,0	41	474,2
15:15	1,0	97,1	41,4	33,9	30,9	13,5	40	
15:45	1,5	100,2	45,2	37,6	33,6	14,0	40	
16:05	2,0	100,1	43,5	36,0	33,9	14,5	40	407,8
16:45	2,5	100,3	47,5	35,5	35,4	14,0	40	
17:15	3,0	96,1	69,4	33,9	36,4	14,0	40	445,1
17:45	3,5	100,2	63,0	34,9	36,8	14,0	40	
18:15	4,0	99,6	47,7	34,0	14,5	14,5	40	451,0
18:45	4,5	99,2	47,8	35,4	36,6	14,0	40	
19:15	5,0	100,0	49,4	36,0	36,0	14,0	41	
19:45	5,5	101,6	49,5	35,8	35,5	13,0	42	446,4
20:15	6,0	99,7	56,3	35,4	35,7	14,5	40	
20:45	6,5	99,9	57,1	35,4	37,6	14,5	39	434,7
21:15	7,0	100,5	51,1	35,4	37,2	14,0	39	
21:45	7,5	102,7	51,8	36,2	36,9	14,5	40	428,9
22:15	8,0	100,5	50,1	35,9	36,3	14,5	39	
22:45	8,5	102,7	51,8	36,2	36,9	13,5	40	430,5
23:15	9,0	94,6	57,2	33,9	36,8	13,5	40	
8:15	9,0	62,4	31,8	29,7	27,4	14,4	42	424,6
8:45	9,5	81,9	33,7	31,9	29,9	13,5	38	412,4
9:15	10,0	96,4	44,1	34,9	33,0	13,5	36	
9:45	10,5	101,7	48,8	36,1	35,6	14,0	32	421,8
10:15	11,0	100,9	54,7	35,8	37,1	14,0	32	
10:45	11,5	100,4	54,6	35,7	37,2	14,5	32	415,1
11:15	12,0	99,7	50,8	35,8	36,6	14,0	32	
11:45	12,5	100,6	52,7	36,4	37,3	14,5	32	714,4
12:15	13,0	100,5	56,0	36,7	39,1	15,0	32	
12:45	13,5	101,5	59,5	36,5	38,4	14,5	32	411,8
13:15	14,0	100,2	61,8	37,3	39,5	14,5	32	
13:45	14,5	100,5	59,5	38,8	41,5	15,0	32	417,1
14:15	15,0	91,6	57,7	40,0	40,8	15,5	32	

Peso Inicial (kg): 1.090

Peso Final (kg): 761

Consumo de Lenha (kg): 127,9

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 6.061

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

QUADRO 11C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no Teste PI. Data: 11/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)	Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)
		Secagem	Ponto A*	Exaustão				
7:50	0,0	71,5	16,1	14,6	100	11,0	425,2	
8:20	0,5	94,3	30,7	22,0	100	12,0	435,0	
8:50	1,0	98,8	42,4	33,0	98	13,0	421,8	
9:20	1,5	100,3	47,0	35,0	70	13,5	421,0	
9:50	2,0	100,5	49,6	36,9	35	12,5	410,7	
10:20	2,5	99,1	48,7	37,3	55	12,5	406,4	
10:50	3,0	101,7	49,3	36,5	47	12,5	399,3	
11:20	3,5	100,4	49,7	37,3	40	13,5	389,6	
11:50	4,0	100,3	50,1	35,9	40	13,0	392,9	
12:20	4,5	99,9	53,3	36,8	40	13,5	406,4	
12:50	5,0	99,3	49,8	38,3	42	14,0	395,8	
13:20	5,5	79,1	44,5	36,5	40	14,0	397,2	
13:50	6,0	100,1	46,1	35,9	40	14,0	399,0	
14:20	6,5	100,2	51,8	36,3	40	14,0	399,3	
14:50	7,0	102,7	51,2	37,3	42	14,5	389,6	
15:20	7,5	100,7	52,2	38,5	40	13,0	406,4	
15:50	8,0	103,8	54,6	40,5	47	13,5	421,8	
16:20	8,5	99,5	53,1	38,0	55	13,5	421,0	
16:50	9,0	103,2	56,2	45,2	67	13,0	410,7	
17:20	9,5	97,3	59,5	40,9	73	13,5	406,4	
17:50	10,0	68,5	22,5	25,4	100	15,5	409,1	
18:20	10,5	103,2	44,2	33,1	100	15,5	412,7	
18:50	11,0	101,3	49,5	36,6	100	12,0	421,8	
19:20	11,5	101,4	58,6	39,6	85	13,0	421,0	
19:50	12,0	102,2	59,5	37,4	72	14,0	410,7	
20:20	12,5	102,2	37,2	40,6	40	14,0	406,4	
20:50	13,0	100,8	63,1	39,4	62	14,0	409,1	
21:20	13,5	103,5	42,3	44,7	62	15,6	412,7	
21:50	14,0	102,2	68,9	47,1	60	15,0	421,8	

Peso Inicial (kg): 978
Peso Final (kg): 753

Consumo de Lenha (kg): 133,6
Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 9.274

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,16 m da entrada do ventilador.

QUADRO 12C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidade Relativa, Pressões, Teor de Umidade, Massa Específica, Pesos, Consumo de Lenha e Consumo Específico de Energia Observados no teste 12. Data: 18/07/89

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)			Umidade Relativa (%)	Pressão Estática (mm ca)		Teor de Umidade (% b.u.)	Massa Específica (kg m ⁻³)	
		Secagem	Grãos	Ponto A*		Exaustão	"Plenum"			Sucção**
8:10	0,0	78,3	19,1	28,7	24,9	8,0	12,5	42	29,8	416,7
8:40	0,5	102,2	36,7	35,5	34,3	8,5	13,0	41	25,6	403,1
9:10	1,0	99,6	48,1	35,8	34,7	10,0	13,5	39	24,3	397,4
9:40	1,5	100,3	49,2	36,1	36,6	14,5	13,5	38	24,1	399,1
10:10	2,0	103,7	48,4	37,6	38,5	16,5	13,5	38	21,0	389,1
10:30	2,5	98,7	48,1	36,2	37,6	16,7	14,5	38	19,6	388,2
11:10	3,0	102,5	48,7	36,9	37,3	18,0	14,5	38	17,9	389,5
11:40	3,5	100,8	50,4	35,9	37,2	19,0	15,0	38	16,3	401,3
12:10	4,0	102,1	52,5	37,6	39,8	20,9	14,5	38	14,6	396,1
12:40	4,5	101,5	54,6	37,1	38,9	20,3	15,0	38	12,3	407,6
13:10	5,0	100,6	55,1	36,0	38,9	20,0	15,0	38	12,9	400,4
13:40	5,5	99,8	52,9	36,5	39,2	20,0	15,0	38		
14:10	6,0	100,8	54,5	36,2	39,6	19,5	15,0	38		
14:40	6,5	99,4	59,0	36,2	41,5	20,0	15,5	38		
15:10	7,0	100,1	59,5	37,2	41,0	19,5	15,0	38		
15:40	7,5	99,6	59,7	38,6	42,8	19,0	15,5	33		
16:10	8,0	100,7	61,0	38,0	43,7	19,0	15,5	38		
16:40	8,5	101,0	63,0	40,5	52,7	18,0	15,5	38		
17:10	9,0	102,0	66,0	40,2	49,0	17,0	15,5	38		
17:40	9,5	100,1	63,2	41,5	50,6	16,0	16,0	38		

Peso Inicial (kg): 1.114

Peso Final (kg): 897

Consumo de Lenha (kg): 87,0

Consumo Específico de Energia (kJ kg⁻¹): 6.259

* Temperatura na câmara de secagem a 0,25 m dos dutos de injeção de ar.

** Pressão estática de sucção a 0,10 m da entrada do ventilador.

APÊNDICE D

QUADRO 1D - Códigos das Amostras Enviadas para Análise do Tipo e da Qualidade da Bebida

Teste nº	Código	
	Secador	Testemunha
01	CG	BH
02	RN	GO
03	HL	GO
04	MG	GO
05	IA	PS
06	RX	PS
07	UD	GO
08	SG	GO
09	LT	PS
10	GT	SGI
11	BR	GO
12	AA	60

Obs.: Em anexo, laudo de classificação do Instituto Brasileiro do Café, regional de Manhumirim - Minas Gerais,



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ

AMOSTRAS DE CAFÉ ANALISADAS

	TIPO	BEBIDA
01 - RN	7- 216 def.	Dura/Riada-fumaça
02 - CG	5- 71 def.	Riado - fumaça
03 - PS	5- 69 def.	Dura/riada - fumaça
04 - RX	6- 123 def.	Dura/riado - fumaça
05 - UD	6- 108 def.	Riado - fumaça
06 - HL	6- 138 def.	Dura/riada
07 - SGI	6- 102 def.	Dura - fumaça
08 - VT	6- 130 def.	Riado/rio
09 - AA	7- 189 def.	Rio
10 - BH	6- 130 def.	Dura - sujo
11 - GT	4- 40 def.	Dura/riado
12 - SE	7- 180 def.	Dura - fumaça
13 - GO	5- 69 def.	Rio
14 - MG	6- 93 def.	Riado
15 - LT	5- 66 def:	Dura
16 - BR	6/7-144 def.	Dura - fumaça
17 - IA	6- 123 def.	Dura - fumaça
18 - MTZ	6- 102 def.	Dura/riado
19 - QLX	7- 160 def.	Rio
20 - DJK	7- 150 def.	Dura/riado
21 - AGY	6- 130 def.	Riada/rio