

GERALDO LUIZ PINTO FILHO

DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR DE FLUXOS CRUZADOS COM
REVERSAO DO FLUXO DE AR E REAPROVEITAMENTO DO
AR DE RESFRIAMENTO, PARA A SECAGEM DE CAFÉ
(*Coffea arabica*, L.)

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JANEIRO - 1994

Aos meus Pais Geraldo e Maria Aparecida

Aos meus Irmãos Patricia e Eduardo

Aos meus Familiares

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha existência.

A Universidade Federal de Viçosa. ao Departamento de Engenharia Agrícola e à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES. pela oportunidade de realização deste Curso.

Ao Professor Juarez de Souza e Silva, pela orientação e amizade no decorrer do Curso e participação ativa na realização das diversas etapas deste trabalho,

Ao Professor Daniel Marçal de Queiróz, pelo apoio, valiosas críticas, colaboração no desenvolvimento do programa de simulação e incentivo.

Aos Professores José Helvécio Martins e Adílio Flauzino de Lacerda Filho e ao engenheiro de alimentos José Antônio Marques Pereira, pelas sugestões e atenção.

Aos colegas de curso, pela amizade e pela ajuda moral recebida.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola que tiveram participação, direta ou

indireta, na realização do trabalho.

Ao proprietário da Fazenda Aruanã, Aloisio Geraldo Soares Osório, pela colaboração.

Ao funcionário do CENTREINAR, Francisco Carlos Alves Neto, pela indispensável ajuda na construção e instalação do secador experimental.

Aos alunos Sergio, Frederico e Cristiano, pela colaboração na obtenção dos dados.

Ao carinho, estímulo e compreensão de meus Pais Geraldo e Maria Aparecida e de meus irmãos Patricia e Eduardo.

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

BIOGRAFIA

GERALDO LUIZ PINTO FILHO, filho de Geraldo Luiz Pinto e Maria Aparecida Lopes Pinto, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 14 de maio de 1965.

Em janeiro de 1989, graduou-se em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal de Viçosa.^c

Em março de 1989, iniciou seus estudos com vistas à obtenção do título de M.S. em Engenharia Agrícola, nesta Universidade. Concluiu seu curso de mestrado, com a defesa da tese, em 24 de abril de 1992.

CONTEUDO

LISTA DE SIMBOLOS	viii
EXTRATO	ix
1. INTRODUCAO	1
2. REVISAO DE LITERATURA	4
2.1. Secagem em Secadores de Fluxos Cruzados ...	4
2.2. Secagem de Café	7
2.3. Metodologia de Avaliação de Desempenho de Secadores	9
2.4. Simulação	10
3. MATERIAL E METODOS	12
3.1. O Protótipo	33
3.2. Procedimento Experimental	14
3.2.1. Processo de Secagem	16
3.3. Avaliação do Desempenho do Secador	17
3.3.1. Parâmetros Relativos aos Grãos	17
3.3.2. Parâmetros Relativos ao Ar	18

3.3.3. Consumo de Energia	13
3.3.4. Especificações do Secador	21
3.3.5. Simulação de Secagem	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Avaliação do Desempenho	26
4.1.1. Parâmetros Relativos aos Grãos	26
4.1.2. Especificações do Secador	33
4.2. Simulação de Secagem	40
5. RESUMO E CONCLUSÕES	50
BIBLIOGRAFIA	53
APÊNDICES	57

LISTA DE SIMBOLOS

b.s. □ base seca

b.u. = base úmida

c = calor específico do produto, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

L = entalpia de vaporização, kJ.kg^{-1}

RU = razão de umidade, adimensional

T = temperatura do ar, °C

t = tempo de secagem, min

U = teor de umidade do produto, decimal, b.s.

UR = umidade relativa do ar, decimal

INDICES

abs = absoluta

e = equilibrio

eq = equivalente

o = inicial

p = produto

v = vapor

EXTRATO

PINTO FILHO, Geraldo Luiz, M.S., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 1994. Desenvolvimento de um Secador de Fluxos Cruzados com Reversão do Fluxo de Ar e Reapro- veitamento do Ar de Resfriamento, para a Secagem de Café (Coffea arabica L.). Professor Orientador: Juarez de Souza e Silva. Professores Conselheiros: Daniel Marçal de Queiróz e José Helvécio Martins.

Desenvolveu-se um protótipo de secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para a secagem de café. Para a avaliação desse secador, utilizou-se a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et alii, a qual prevê testes de campo, acompanhados de simulação de secagem. Nos testes foram utilizados três níveis de temperatura para o ar de secagem (60, 75 e 90°C), fluxo de ar total e fluxo de grãos em torno de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e $6.000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente.

O secador apresentou maior capacidade de secagem e menor consumo de energia, à medida que se aumentava a temperatura de secagem.

Testes de simulação mostraram que a reversão do fluxo de ar foi eficiente na redução dos gradientes de umidade e de temperatura, ao longa da espessura da camada de grãos. Por meio da simulação de secagem, também, pôde-se verificar que o consumo de energia experimental era superior ao exigido pelo protótipo, em virtude de a fornalha não estar dimensionada para o mesmo.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento político-econômico de um país depende, em grande parte, das divisas geradas pelas exportações. Apesar das dificuldades atuais, o Brasil vem se firmando a cada ano no cenário mundial como exportador não só de produtos agrícolas, mas também de matéria-prima e produtos industrializados. Dentre estes, o café ainda se constitui num dos principais produtos exportados e geradores de divisas para o País. A safra cafeeira para o ano de 1990/1991 foi de 26,5 milhões de sacas, sendo que 79% desse montante foi destinado a exportação (CAFÉ, 1992).

No ano de 1990, pela primeira vez em 200 anos de cafeicultura no Brasil, a renda obtida pelas exportações brasileiras do produto não foi a maior dentre a dos países exportadores de café (BRASIL, 1991). Não seria demais afirmar que contribuiu para este fato a *decrecente* aceitação do café brasileiro no mercado internacional, que, cada vez mais exigente, vem em confronto com a baixa qualidade do produto nos últimos anos (XAVIER, 1987).

Para a obtenção de um café com qualidade superior é necessário o emprego de técnicas adequadas de produção, desde o plantio até a colheita, e a estas somar práticas de processamento que possam preservar a sua qualidade inicial. No processamento pós-colheita, a secagem é uma das etapas mais importantes, pois, se malconduzida, poderá acarretar grandes prejuízos ao cafeicultor.

A secagem em terreiros é o método de secagem de café mais comum no Brasil. Esse método, apesar de exigir pouco conhecimento técnico, é considerado de risco, pois o produto pode ter sua qualidade reduzida por condições climáticas adversas, além de exigir longo período de secagem e, por conseguinte, atraso na colheita. Nestas circunstâncias, a utilização de secagem artificial em secadores com ar aquecido torna-se um fator imprescindível.

Dentre os secadores mecânicos existentes, o de fluxos cruzados é o de maior comercialização por apresentar menor custo de industrialização e ser de simples construção e operação. No Brasil, os secadores desse tipo apresentam alto consumo específico de energia e elevado gradiente de temperatura e de umidade, ao longo da espessura da camada de grãos. Isto pode favorecer o crescimento de fungos, durante o período de armazenamento, acarretando perda de qualidade do produto (SABIONI, 1986).

Muitas modificações têm sido introduzidas no projeto original dos secadores de fluxos cruzados, no sentido de minimizar os problemas acima citados. Assim, há clara necessidade de estudar os secadores de fluxos cruzados modificados, avaliá-los sob as diferentes condições de

trabalho, bem como ponderar o efeito da secagem sobre a qualidade do café.

Como complementação das avaliações e com o propósito de diminuir custos gerais, tempo e necessidade de produto, a Informática tem se mostrado uma importante ferramenta na complementação dos testes de campo. Deste modo, os modelos matemáticos de simulação de secagem tornaram-se fator indispensável no projeto de novos secadores, bem como na avaliação e modificação dos já existentes.

Tendo em vista que, em grande parte, os secadores mecânicos de café disponíveis comercialmente no Brasil são do tipo fluxos cruzados e apresentam problemas como gradientes de umidade e de temperatura, ao longo da espessura da massa de grãos, e alto consumo específico de combustível, este trabalho tem como objetivos:

- desenvolver um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento para a secagem de café, considerando o aspecto energético; e

- implementar um programa de computador para a simulação de secagem de café no secador estudado, com base no modelo de THOMPSON et alii (1968).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Secagem em Secadores de Fluxos Cruzados*

Os **secadores de fluxos cruzados** caracterizam-se pela **passagem do ar perpendicularmente a uma camada de grãos, que se move entre chapas perfuradas**. Esses secadores podem ter diversas configurações, e a forma comercial mais comum é o **secador tipo torre**, fixado numa **fundação permanente**.

No **secador de fluxos cruzados convencional**, o **produto úmido é colocado em uma mopega superior**, o qual, por gravidade, **vai descendo pelo secador, onde é secado até determinado teor de umidade, resfriado e descarregado na parte inferior**. Neste tipo de secador, **ha formação de gradientes de temperatura e de teor de umidade. ao longo da espessura da massa de grãos**. Esses gradientes surgem porque os grãos próximos da entrada do ar **secam e se aquecem mais do que os grãos próximos do local de exaustão da ar**. Assim, os **secadores de fluxos cruzados normalmente operam com alto fluxo de ar e com uma coluna de grãos mais delgada**, o que acarreta um alto **consumo específico de**

energia, ou seja, necessita de maior quantidade de energia para evaporar uma unidade de massa de água do produto.

GUSTAFSON e MOREY (1980), estudando a secagem de milho em secadores de fluxos cruzados convencionais, com espessura da camada de grãos de 0,3 m, observaram gradientes de umidade e de temperatura, ao longo da espessura da camada de grãos que chegaram em alguns casos a 20 pontos percentuais no teor de umidade e a 40°C na temperatura, trabalhando com o ar de secagem de 116°C.

BAKKER-ARKEMA et alii (1981) observaram um consumo específico de energia, em média, 25% menor nos secadores de fluxos concorrentes, em relação aos secadores de fluxos cruzados, para as mesmas condições de secagem de milho.

Para reduzir as desvantagens apresentadas pelos secadores de fluxos cruzados convencionais, foram estudados inicialmente os efeitos da reversão do fluxo de ar na metade da zona de secagem. Embora essa mudança no secador convencional tenha resultado num decréscimo na capacidade do secador e num pequeno aumento no consumo específico, observou-se uma redução de 60 a 70% no gradiente de umidade, por meio da coluna de grãos (PAULSEN e THOMPSON, 1973; DALPASQUALE, 1984).

SABIONI (1986) desenvolveu um secador de fluxos cruzados com reversão de fluxo de ar para a secagem de milho. Em testes realizados com esse secador, para secar o produto de, aproximadamente, 24% b.u. a, aproximadamente, 14,5% b.u., obteve-se um consumo específico de energia de 6.638, 6.432 e 5.608 kJ/kg, operando, respectivamente, com temperaturas de 60, 80 e 100 °C. Ainda, segundo o autor, os

secadores de fluxos cruzados convencionais, contínuos e intermitentes, consomem cerca de 30 a 50% mais de energia para evaporar uma mesma quantidade de água do produto, quando comparado ao secador estudado.

A recirculação de parte do ar de exaustão constitui um passo a mais no aperfeiçoamento dos secadores de fluxos cruzados. O principal benefício da recirculação é a diminuição do consumo específico de energia.

Converse, citado por RODRIGUEZ (1982), projetou o primeiro secador comercial de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e recirculação de parte do ar de resfriamento. Um modelo deste secador, segundo o autor, foi testado por Lerew et alii que observaram uma redução de 50% no consumo específico de energia, em relação aos modelos convencionais.

RODRIGUEZ (1982) cita que, em trabalhos realizados por Pierce e Thompson, o consumo de energia em secadores de fluxos cruzados modificados (reversão do fluxo de ar e recirculação de parte do ar de resfriamento) diminuiu 37%, em relação aos secadores convencionais, mantendo-se a mesma capacidade de secagem.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar e melhorar o desempenho de diferentes sistemas de secagem, procurando obter menor consumo específico de energia e melhor qualidade do produto seco. Particularmente, sobre os secadores de fluxos cruzados, há necessidade de maiores estudos, visando melhorar o seu funcionamento e minimizar suas deficiências para as condições de secagem encontradas no Brasil.

2.2. 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. Isto se deve, principalmente, à não preocupação com características qualitativas do produto depois da secagem, bem como ao baixo nível técnico e ao baixo poder aquisitivo dos produtores. TASCON (1984) afirmou que diversos estudos sobre a secagem do café em terreiros, ou sua exposição por um período de tempo à luz solar, proporcionam melhor qualidade de bebida, em virtude das reações fotoquímicas que ocorrem durante o processo.

A secagem artificial do café, por sua vez, tem tido grande aceitação entre os grandes produtores, por agilizar a colheita e, principalmente, por independe das condições climáticas.

A utilização de secadores que possuem equipamentos tradicionais de transporte de grãos e que necessitam de certa fluidez do produto não é recomendada para o café, quando este apresenta teor de umidade acima de 40% b.u. Portanto, a secagem deve ser executada numa primeira etapa, em terreiros, em secadores de leito fixo ou rotativos (LACERDA PILHO, 1986).

Segundo TOSELLO (1956), nos secadores de camada fixa, a temperatura máxima em que o café mantém as melhores condições possíveis, quanto ao tipo de bebida, é 70°C. O mesmo autor citou que Benthall recomenda secagem à temperatura máxima de 85°C para o café com umidade

homogênea, pois, do contrário, parte ficaria com teor de umidade abaixo do desejado e parte, com teor de umidade acima do desejado. Segundo QUILAQUEO (1979), qualquer que seja o método de secagem empregado, devem-se evitar a fermentação do produto e o excesso de temperatura; secar os grãos até 18% b.u. no menor período de tempo possível; e tentar obter um produto com características uniformes.

O processo de secagem mais utilizado atualmente consiste na realização de uma pré-secagem em terreiro, visando reduzir o teor de umidade para a faixa de 30% b.u., para posterior utilização de secadores contínuos (SILVA, 1991).

OSORIO (1982), estudando a secagem de café em secadores de fluxos concorrentes, concluiu que o secador é energeticamente mais eficiente, quando se usam temperaturas mais altas (100 e 120°C); os respectivos valores médios obtidos para o consumo específico de energia foram 4.869 e 4.759 kJ/kg de água evaporada, para o café com teor de umidade inicial de $24,7 \pm 6,9\%$ b.u. e final de $10,7 \pm 1,6\%$ b.u.

SILVA (1991) trabalhou com secador intermitente de fluxos contracorrentes, na secagem de café e constatou que, ao se aumentar a temperatura do ar de secagem de 60 para 100°C reduzia-se o tempo de secagem em 53% e o consumo específico de energia em 23%. A capacidade de secagem aumentava em 111%.

2.3. Metodologia de Avaliação de Desempenho de Secadores

EAKKER-ARKEMA et alii (1978) propuseram uma metodologia para avaliação do desempenho de secadores, baseado em um número reduzido de testes de campo, sob determinadas condições padronizadas. Propuseram também a simulação do processo de secagem, para reduzir o tempo e os custos dos testes experimentais, e a avaliação da qualidade dos grãos secos para complementar os testes de campo.

Os parâmetros a serem considerados na avaliação do desempenho dos secadores são os seguintes:

a) Parâmetros Relativos aos Grãos :

- . tipo de grão;
- . umidades inicial e final (% b.u.);
- . temperaturas inicial e final ($^{\circ}\text{C}$);
- . percentagens de impureza inicial e final (%);
- . massas específicas globais inicial e final ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);
- . peso do produto úmido (kg);
- . índice de qualidade.

b) Parâmetros Relativos ao Ar :

- . temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$);
- . temperatura do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$);
- . umidade relativa do ar ambiente (%).

c) Especificações do Secador :

- . densidade do fluxo de ar ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$);
- . fluxo de grãos ($\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$);
- . tempo de secagem (h);
- . tempo de resfriamento (h);
- . largura da coluna de secagem (m);
- . tempo de carregamento (h);
- . tempo de descarga (h).

d) Energia Utilizada :

- . ventilador e transportadores (kJ);
- . tipo de combustível e quantidade utilizada por lote ou por hora (kg ou $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$).

e) Dados de Desempenho do Secador :

- . duração do teste (h);
- . pontos percentuais de umidade removida (\times b.u.);
- . capacidade de secagem com produto úmido ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$);

- . capacidade de secagem com produto seca (kg.h^{-1});
- . consumo específico de energia, excluindo a energia elétrica (kJ.kg^{-1});
- . consumo específico de energia, incluindo a energia elétrica (kJ.kg^{-1}).

2.4. Simulação

A utilização de modelos matemáticos de simulação de secagem tem auxiliado muito o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores. Os modelos são usados, geralmente, para calcular a perda de umidade do produto como função:

- a) do teor de umidade inicial, da temperatura e do tipo de grão;
- b) da umidade relativa, da temperatura e do fluxo de ar; e
- c) da configuração do secador (RODRIGUEZ, 1982).

Segundo QUEIROZ et alii (1986), a simulação de secagem em fluxos cruzados tem sido realizada com a utilização de diferentes modelos, THOMPSON et alii (1968) apresentaram um modelo para a simulação de secagem de milho em secadores contínuos incluindo os de fluxos cruzados. No desenvolvimento do modelo foi utilizado, como artifício, a divisão do processo de secagem em vários subprocessos. O leito de grãos foi considerado como formado de várias camadas de espessura reduzida, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do produto em cada camada foram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo.

Trabalhos de validação, realizados por QUEIROZ et alii (1981), FIOREZE (1982), SINICIO (1983), SABIONI (1986)

e SILVA (1991), demonstram que o modelo de THOMPSON et alii (1968) simula o processo de secagem com boa precisão. Além disso, esse modelo apresenta a vantagem de ser de fácil solução, consumir pouco tempo de computação e apresentar solução mais estável, quando comparado com modelos mais complexos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Setor de Armazenagem e Processamento de Produtos de Origem Vegetal do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

O produto utilizado foi o café (*Coffea arabica*, L.) da variedade Catuai, procedente da Fazenda Aruanã, Município de Viçosa, Minas Gerais. A colheita foi realizada pelo sistema de derrica no chão, com um teor de umidade aproximada de 60% b.u.

Em virtude do grande volume de café proveniente da lavoura e do curto período de tempo disponível para deixá-lo em estado de meia-seca, foram empregados dois modos de pré-secagem. O primeiro foi com um secador de leito fixo, com capacidade estática de $3,5 \text{ m}^3$ e fluxo de ar de $3,8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. O aquecimento do ar neste caso foi promovido por meio de uma fornalha de fogo direto descendente, utilizando-se como combustível lenha de eucalipto. O segundo modo foi a secagem em terreiro. Nas dois casos,

secou-se o café até atingir a meia-seca, com teor de umidade de, aproximadamente, 30% b.u.

A secagem foi completada no protótipo de secador intermitente de fluxos cruzados, com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, projetado.

3.1. O Protótipo

O protótipo de secador, cujo esquema está ilustrado na Figura 1, possui uma capacidade estática aproximada de $0,6\text{m}^3$ de café em estágio de meia-seca. Seus componentes principais são:

a - **Depósito Superior** - parte superior do secador com a finalidade de depósito de produto a entrar no primeiro estágio de secagem.

b - **Câmara de secagem superior** (1.º estágio de secagem) - construída de chapa perfurada nas laterais, apresenta uma espessura de 0,3 m.

c - **Plenum superior** - câmara de expansão do ar resultante da mistura do ar de exaustão do 2.º estágio, com ar proveniente da fornalha.

d - **Câmara de exaustão superior** - responsável por realizar a exaustão do ar do 1.º estágio.

e - **Câmara de secagem inferior** (2.º estágio de secagem) - de dimensões e confecção semelhantes à câmara de secagem superior, porém recebe o ar em sentido oposto ao 1.º estadia.

f - **Plenum inferior** - câmara de expansão do ar resultante da mistura do ar de exaustão da seção de resfriamento, com o ar proveniente da fornalha.

g - Câmara de exaustão inferior - responsável por realizar a exaustão do ar do 2.º estágio e direcioná-lo, de forma a ser reaproveitado no 1.º estágio de secagem.

h - Câmara de resfriamento - de dimensões e confecção semelhantes às câmaras de secagem superior e inferior, pode funcionar como câmara de descanso, quando se fecha a entrada de ar.

i - Plenum de ar frio - câmara de expansão do ar ambiente.

j - Câmara de exaustão da secção de resfriamento - câmara responsável pela exaustão do ar da secção de resfriamento e por direcioná-lo para ser reaproveitado no 2.º estágio de secagem.

k - Regulador de fluxo de grãos - mecanismo localizado no final da câmara de resfriamento.

l - Dutos de ar quente - tubos de aço revestidos com isolante térmico que levam ar quente às câmaras de secagem.

m - Duto de exaustão - tubo de aço por onde escoar o ar de exaustão para a atmosfera.

O conjunto de equipamentos para a realização da secagem, além do protótipo de secador, constituiu-se de moega de recepção, elevador de caçambas, peneira para Wé-limpeza do produto, ventilador, fornalha e ciclone.

3.2. Procedimento Experimental

Para a avaliação do protótipo, utilizaram-se três temperaturas no ar de secagem (60, 75 e 90°C), sendo que para cada nível de temperatura foram realizados quatro testes.

- a - Depósito superior;
 b - Câmara de secagem superior;
 c - Plenum superior;
 d - Câmara de exaustão superior;
 e - Câmara de secagem inferior;
 f - Plenum Inferior;
 g - Câmara de exaustão inferior;
 h - Câmara de resfriamento ou
 câmara de descanso;
 i - Plenum de ar frio;
 j - Câmara de exaustão de ar aquecido;
 k - Regulador de fluxo de grãos;
 l - Dutos de ar quente;
 m - Duto de exaustão.

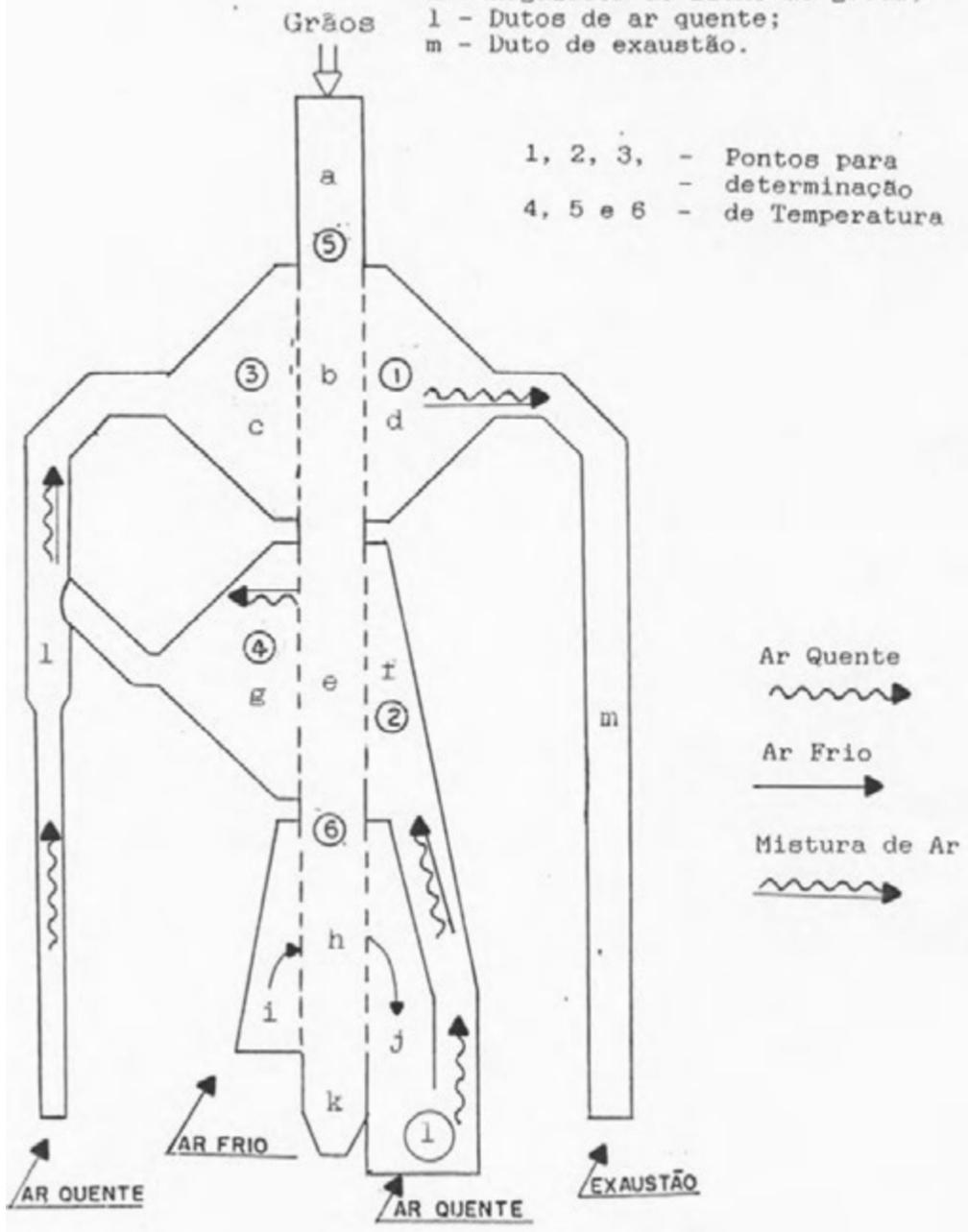


FIGURA 1 - Esquema do Secador Projetado.

Para cada teste, procurou-se manter o fluxo de ar total e o fluxo de grãos em torno de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e $6000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente.

3.2.1. *Processo de Secagem*

O café, em estágio de meia-seca, foi colocado em um sistema de limpeza por ar forçado para a retirada do excesso de impurezas, proveniente da colheita e carregado, manualmente, na moega de recepção.

A câmara de combustão da fornalha era acesa 45 minutos antes de ser iniciado o teste. Este tempo era suficiente para que se atingisse o regime de operação.

O secador foi operado de modo intermitente, sendo que, durante o processo de secagem, a entrada de ar frio permanecia fechada e a coluna de resfriamento dos grãos funcionava como câmara de descanso para o café. Pelo fato de o café diminuir de volume, à medida que perde umidade, o nível do produto dentro do depósito superior era verificado periodicamente e completado, se necessário. Para tal situação foi feito um teste preliminar, secando um lote de café até, aproximadamente, 20% b.u. Este café era usado para reposição, a fim de minimizar a diferença de umidade entre esse e o café que estava secando.

No final, da secagem, o registro de ar frio era totalmente aberto e o fluxo de grãos, direcionado para a descarga.

3.3. Avaliação do Desempenho do Secador

A avaliação do desempenho do secador estudado foi realizada, com base na metodologia apresentada por BAKKER-ARKEMA et alii (1978).

3.3.1. Parâmetros Relativos aos Grãos

a) Teor de umidade e massa específica

Para a determinação do teor de umidade e da massa específica, foram colhidas amostras no regulador de fluxos de grãos, em intervalos de tempo distintos para os testes:

- testes com temperatura do ar de secagem de 60°C - no início, no final e durante os testes, a intervalos regulares de 60 minutos:

- testes com temperatura do ar de secagem de 75°C - no início, no final e durante os testes, a intervalos regulares de 45 minutos;

- testes com temperatura do ar de secagem de 90°C - no início, no final e durante os testes, a intervalos regulares de 30 minutos.

Este procedimento evitava que nos testes de maior duração houvesse retirada de grandes quantidades de amostras, diminuindo o nível de café dentro do secador. Por este mesmo motivo, as amostras utilizadas na determinação da massa específica retornavam ao secador.

Os teores de umidade foram obtidos pelo método de estufa a $103 \pm 1^\circ\text{C}$, por um período de 72 horas, conforme recomendação da "American Society of Agricultural

Engineers" (1991), e as massas específicas foram determinadas com o uso de balança de peso hectolítrico com capacidade de 1 litro. Todas as determinações foram realizadas com três repetições para cada amostra.

b) Temperaturas

As temperaturas dos grãos foram obtidas por meio de um termômetro digital, com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$, conectado a termopares de cobre-constantan, localizados nos pontos cinco e seis ilustrados na Figura 1. No ponto cinco obteve-se a temperatura de entrada do grão no 1.º estágio de secagem e, no ponto seis a temperatura na saída da 2.º estágio de secagem.

c) Pesagens

O peso final do produto foi obtido em uma balança de plataforma, com precisão de 0,1 kg. O peso inicial foi determinado, calculando-se a quantidade de água evaporada do produto.

3.3.2. *Parâmetros Relativos ao Ar*

a) Temperaturas

As temperaturas do ar foram determinadas de 5 em 5 minutos nos primeiros 30 minutos de operação em todos os testes e, durante os testes, nos mesmos instantes em que foram retiradas as amostras para a obtenção de teor de umidade e da massa específica. Foi utilizado um termômetro digital, com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$, conectado a termopares do

tipo cobre-constantan. instalados como segue:

- na câmara de exaustão superior (ponto um) - temperatura do ar de exaustão do secador;
- no plenum inferior de secagem (ponto dois) - temperatura do ar de secagem do 2.º estágio;
- no plenum superior de secagem (ponto três) - temperatura do ar de secagem do 1.º estágio (ar da fornalha misturado ao ar de exaustão do 2.º estágio);
- na câmara de exaustão inferior (ponto quatro) - temperatura do ar de exaustão do 2.º estágio.

b) Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente

Nos mesmos instantes em que foram determinadas as temperaturas de secagem, também foram determinadas a temperatura e a umidade relativa ambiente, obtidas de um psicrômetro instalado próximo do local do experimento.

3.3.3. *Consumo de Energia*

a) Ventilador, Elevador de cacambas e máquina de limpeza

A energia consumida pelos motores elétricos desses componentes foi obtida pela equação:

$$EM = PM \times t_f \times 2647,8 \quad \text{eq. 1}$$

em que:

EM = energia consumida pelos motores, kJ;

PM = potencia dos motores, cv;

t_f = tempo de funcionamento das motores, h.

b) Combustível

Para o aquecimento do ar de secagem, foi utilizada como combustível a madeira de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).

A lenha foi serrada, apresentando dimensões médias de 0,40 m de comprimento e diâmetro variado. Do lote total de lenha a ser utilizada nos testes, foram retiradas amostras para a determinação do teor de umidade e do poder calorífico.

O teor de umidade foi obtido pelo método da estufa, $103 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 72 horas, enquanto o poder calorífico superior foi determinado por meio da Bomba Calorimétrica de Malher.

Para se determinar o poder calorífico inferior, empregou-se a equação de Tiliman (OSORIO, 1982).

$$PC_i = PC_s (1 - 0,0114 \times UC) \quad \text{eq.2}$$

em que:

PC_i = poder calorífico inferior do combustível,
kJ.kg⁻¹;

PC_s = poder calorífico superior do combustível,
kJ.kg⁻¹;

UC = teor de umidade de combustível, %b.u.

Pelo fato de a fornalha utilizada estar superdimensionada e não ter sido projetada para o secador em estudo, a energia para aquecimento do ar foi determinada por dois métodos:

b.1) Utilizando o poder calorífico inferior da lenha:

$$EPC = QC \times PCi \quad \text{eq.3}$$

em que:

EPC = energia proveniente do combustível, kJ;

QC = quantidade de combustível, kg;

PCi = poder calorífico inferior do combustível, kJ.kg^{-1} .

b.2) Utilizando a equação de balanço de calor sensível:

$$EA = m \times Ca \times \Delta T \quad \text{eq.4}$$

em que:

EA = energia de aquecimento do ar, kJ;

m = massa de ar seco gasto durante a secagem, kg;

Ca = calor específico do ar, $\text{kJ}/(\text{kg}.\text{°C})$;

ΔT = diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de secagem. °C .

A adoção do segundo método, para calcular a energia de aquecimento do ar de secagem, supõe que a fornalha seja ideal e que nenhuma perda de calor ocorreu pela tubulação, ou pelo corpo do secador.

3.3.4. Especificações do Secador

a) Vazão de ar

A vazão de ar total foi regulada próximo de $30 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ durante o decorrer dos testes, por meio de registros do tipo borboleta nas dutos de ar quente. Para sua determinação, foi utilizado um tubo de Pitot conectado

a um micromanômetro diferencial. Foi determinada, também, a vazão de ar em cada duto de ar quente.

b) Capacidade de secagem

Capacidade de secagem é a quantidade de produto úmido secado por hora de funcionamento do secador e por metro quadrado, da seção transversal das câmaras de secagem.

A capacidade de secagem foi calculada por

$$CS = MP / (ts.Sc) \quad \text{eq. 5}$$

em que:

CS = capacidade de secagem de produto úmido, $\text{kg.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$;

MP = massa do produto úmido, kg;

ts = tempo total de operação do secador, h;

Sc = seção transversal ao fluxo de grãos, m^2 .

O tempo total de operação do secador é a soma dos tempos de carregamento, de secagem e de descarregamento.

c) Consumo específico de energia

O consumo específico de energia foi calculado por dois métodos:

c.1) empregando-se a energia proveniente do combustível;

c.2) empregando-se a energia calculada pela equação 4.

Assim, o consumo específico de energia foi calculado pela equação :

$$CEE = \frac{EC}{QA} \quad \text{eq. 6}$$

em que:

CEE = consumo específico de energia, kJ.kg^{-1} ;

EC = energia consumida, kJ;

QA = massa de água evaporada do produto, kg,

Em ambos os casos considerou-se também o consumo de energia elétrica.

3.3.5. Simulação de Secagem

Foi elaborado um programa de computador com base no modelo proposto por THOMPSON et alii (1968). A Figura 2 mostra o esquema do método de solução, utilizado para simular o funcionamento do protótipo em estudo. Os dados de entrada são os seguintes:

- teor de umidade inicial do produto, (X b.u.);
- massa específica do produto, (kg.m^{-3});
- temperatura inicial do produto, ($^{\circ}\text{C}$);
- temperatura ambiente, ($^{\circ}\text{C}$);
- razão de mistura do ar ambiente, (kg.kg^{-1});
- espessura da camada de grãos, (m);
- fluxo de grãos, ($\text{kg.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$);
- temperatura do ar do 1.^o e do 2.^o estádios de secagem e do estádio de resfriamento, ($^{\circ}\text{C}$);
- fluxo de ar do 1.^o e do 2.^o estádios de secagem e do estádio de resfriamento, ($\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$);
- altura da coluna do 1.^o e do 2.^o estádios de secagem e do estádio de resfriamento, (m);
- percentagem de ar reaproveitado do 2.^o estádio de secagem e do estádio de resfriamento (no protótipo estudado, ambas foram de 100%), (%);
- incremento de altura, (m);
- tempo total de secagem. (h).

No programa de simulação, desenvolvido em linguagem Turbo-Pascal, utilizando um microcomputador modelo PC-XT, o leito de grãos foi dividido em cinco camadas, e as equações empregadas foram:

a) teor de umidade de equilíbrio (ARTEGA, 1986):

$$U_e = 1,1282 [-\ln(1-UR_e)/(T_e + 40,535)]^{0,5405}; \quad \text{eq. 7}$$

b) umidade relativa de equilíbrio (ARTEGA, 1986):

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

c) razão de umidade do produto (PEREIRA, 1989):

$$Ru = \exp [-a t_{eq}^b \exp (-c/T_{abs})]; \quad \text{eq. 9}$$

d) tempo equivalente de secagem (SILVA, 1991):

$$t_{eq} = \{-\ln[(U - U_e)/(U_o - U_e)]/[a \exp(-c/T_{abs})]\}^{1/b}; \quad \text{eq. 10}$$

e) entalpia de vaporização (SILVA, 1991):

$$Lv = 3109,4 - 2,38T_{abs} + 0,369T_{abs}^2 U_e^{1,85}[(1-UR_e)/UR_e]; \quad \text{eq. 11}$$

f) entalpia específica (TASCON, 1984):

$$c = 0,4 + 0,6 [U/(1+U)]. \quad \text{eq. 12}$$

Os valores dos coeficientes utilizados nas equações 9 e 10 relativos ao produto, em função do teor de umidade, estão apresentados no Quadro 1:

QUADRO 1 - Valores dos Coeficientes a, b e c Utilizados nas Equações 9 e 10

Teor de Umidade Inicial (decimal b.s.)	Coeficientes		
	a	b	c
Superior a 1,326	149430	0,832825	5631.17
Entre 0,47 e 1,326	173705	0,736810	5533.11
Inferior a 0,47	105.756	0,605640	2751,53

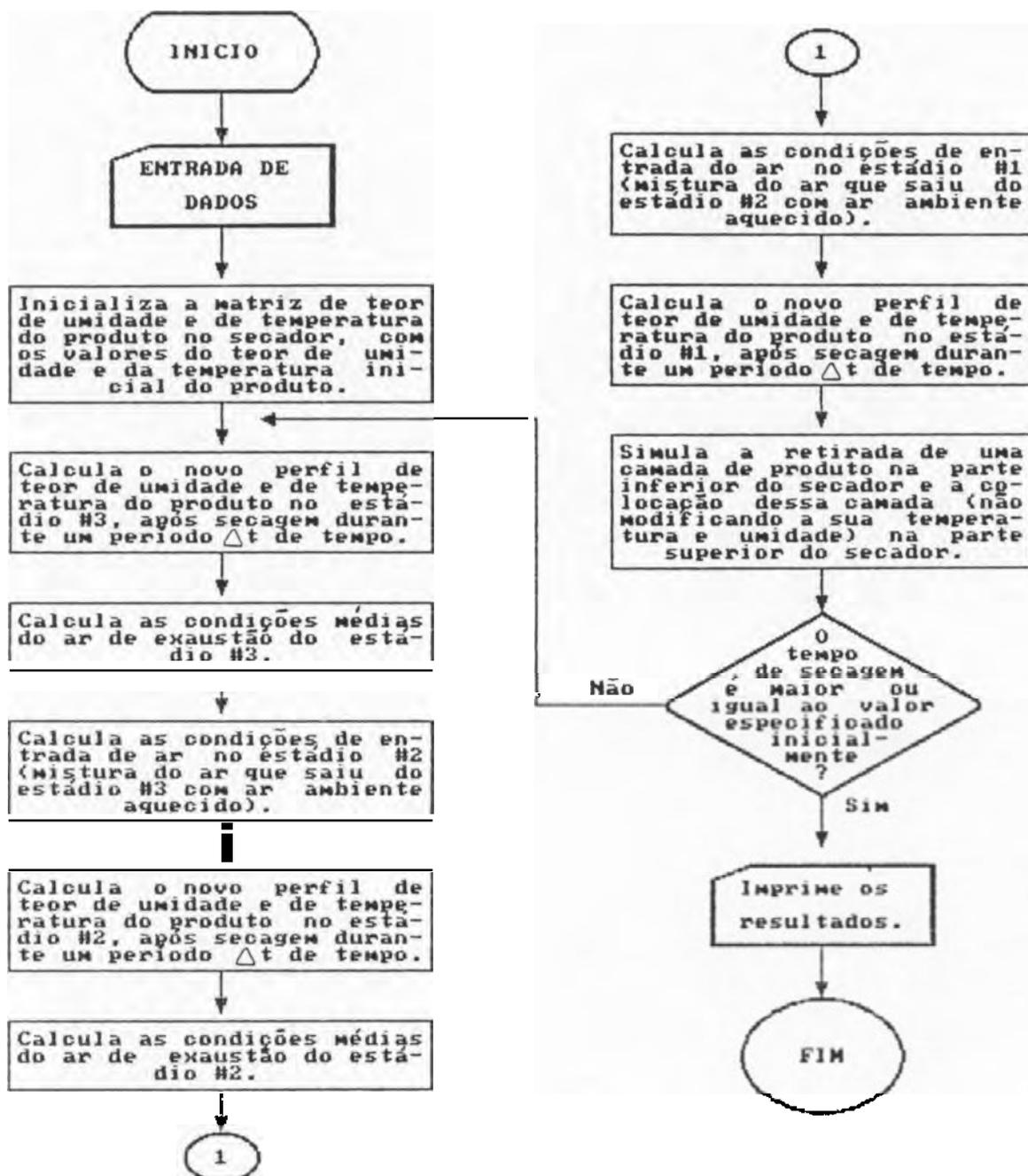


FIGURA 2 - Esquema do Método de Solução para Simular o Secador de Fluxos Cruzados com Reversão de Fluxo de Ar e Reaproveitamento do Ar de Exaustão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização dos testes no período de 26/06 a 01/08/1991, utilizou-se um total de 4.670 kg de café em coco no estágio de meia-seca e foram consumidos 536 kg de lenha.

Os resultados obtidas da avaliação do desempenho do secador, referentes aos parâmetros dos grãos, estão relacionados no Quadro 2 e os referentes aos parâmetros do ar e especificações do secador estão relacionados no Quadro 3.

4.1. Avaliação do Desempenho

4.1.1. Parâmetros Relativos aos Grãos

a) Teor de Umidade

Os teores de umidade iniciais variaram na faixa de $29 \pm 2,8\%$ b.u. e os teores de umidade finais, obtidos de uma amostra média das amostras colhidas na descarga, em

QUADRO 2 - Parâmetros K<erentes aos Grãos

TESTE	Temperatura do ar de Secagem (°C)	Peso do Lote		Massa Específica		Teor de Umidade dos Grãos		Temperatura da Massa de Grãos		Fluxo de Grãos kg/(h.m ²)
		Inicial (kg)	Final (kg)	Inicial (kg/m ³)	Final (kg/m ³)	Inicial (% b.u.)	Final (% b.u.)	Inicial (°C)	Final (°C)	
1	60	317	273	383	399	26,8	15,0	16,6	38,4	4560
2	60	331	284	390	408	27,2	15,1	14,7	37,6	6480
3	60	339	299	405	412	26,2	16,3	18,4	33,2	6480
4	60	340	288	420	422	28,1	15,3	11,7	34,7	6960
5	75	326	279	386	409	26,3	13,7	14,2	48,1	6560
6	75	346	296	389	408	28,1	16,1	13,5	42,7	8440
7	75	369	301	432	427	31,8	16,4	16,6	44,0	5520
8	75	359	292	421	417	30,3	14,2	17,5	44,0	5520
9	90	331	272	384	393	28,9	13,4	18,3	54,0	7200
10	90	330	275	384	401	27,8	13,1	12,1	50,1	4580
11	90	339	290	410	407	27,6	15,4	20,4	49,7	7220
12	90	336	288	406	411,0	26,3	13,6	22,1	49,1	5360

QUADRO 3 - Parâmetros do Ar e Especificações do Secador

TEMPERATURAS	60°C				75°C				90°C			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TESTES												
R? temperatura média ambiente (°C)	19,9	20,5	18,8	18,9	21,4	21,5	19,9	22,3	22,2	22,0	21,5	22,2
umidade relativa média ambiente (%)	65,6	69,6	78,6	67,3	60,3	58,7	71,1	61,0	66,5	61,3	66,3	59,3
ENERGIA CONSUMIDA 1enha	771	772	732	849	601	564	599	658	606	551	465	393
(MJ)	114	129	138	136	86	94	95	102	77	74	71	70
carregamento	30	26	32	30	25	32	30	27	31	26	30	30
secagem	635	735	797	773	480	518	525	570	420	403	380	375
descarregamento	22	20	35	17	17	16	22	20	16	24	22	21
total	687	781	864	920	522	566	577	617	467	453	432	426
Câmara superior	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
(m3/mir/m2)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
CAPACIDADE kg/(h.m2) (úmido)	184	170	163	165	250	244	256	233	282	294	314	317
MÉDIA (ÚMIDO)			171				246				302	
CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA (kJ/kg de agua)												
com eletricidade	20.102	19.086	21.701	19.201	14.432	13.315	10.231	11.282	11.548	10.470	10.952	9.343
Média			20.022				12.315				10.578	
sem eletricidade	17.518	16.351	18.266	16.549	12.617	11.419	8.824	9.764	10.240	9.137	9.493	7.921
Média			17.171				10.656				9.197	

Para os diversos testes, não foi possível a uniformização entre as umidades iniciais e finais, em virtude da dificuldade de se estabelecer com precisão os teores de umidade de modo rápido, durante a pré-secagem. Os dados de teores de umidade iniciais e finais de cada teste estão relacionados no Quadro 2.

b) Temperaturas

Para a realização dos testes, o secador era carregado na parte da tarde e permanecia carregado durante a noite, até o início da secagem na manhã do dia seguinte. Assim, a temperatura inicial da massa de grãos corresponde à temperatura próxima da temperatura de equilíbrio do grãos com o ar ambiente, geralmente frio. Os testes 11 e 12 foram iniciados no período da tarde, explicando-se em parte as temperaturas iniciais mais elevadas.

As temperaturas finais da massa de grãos, apresentadas no Quadro 2, correspondem à temperatura que o grão atingiu no final da secagem, após passar pelo estágio de resfriamento.

No processo de secagem, uma característica da massa de grãos é a sua temperatura aumentar no decorrer do tempo, tendendo a aproximar da temperatura do ar de secagem. Este fato é ilustrado pelas Figuras 3, 4 e 5, que mostram as variações da temperatura da massa de grãos na saída do estadio inferior de secagem e a temperatura do ar de secagem, em relação à umidade do produto.

Como era de se esperar, a temperatura do ar de secagem de 90°C causou à massa de grãos uma elevação na

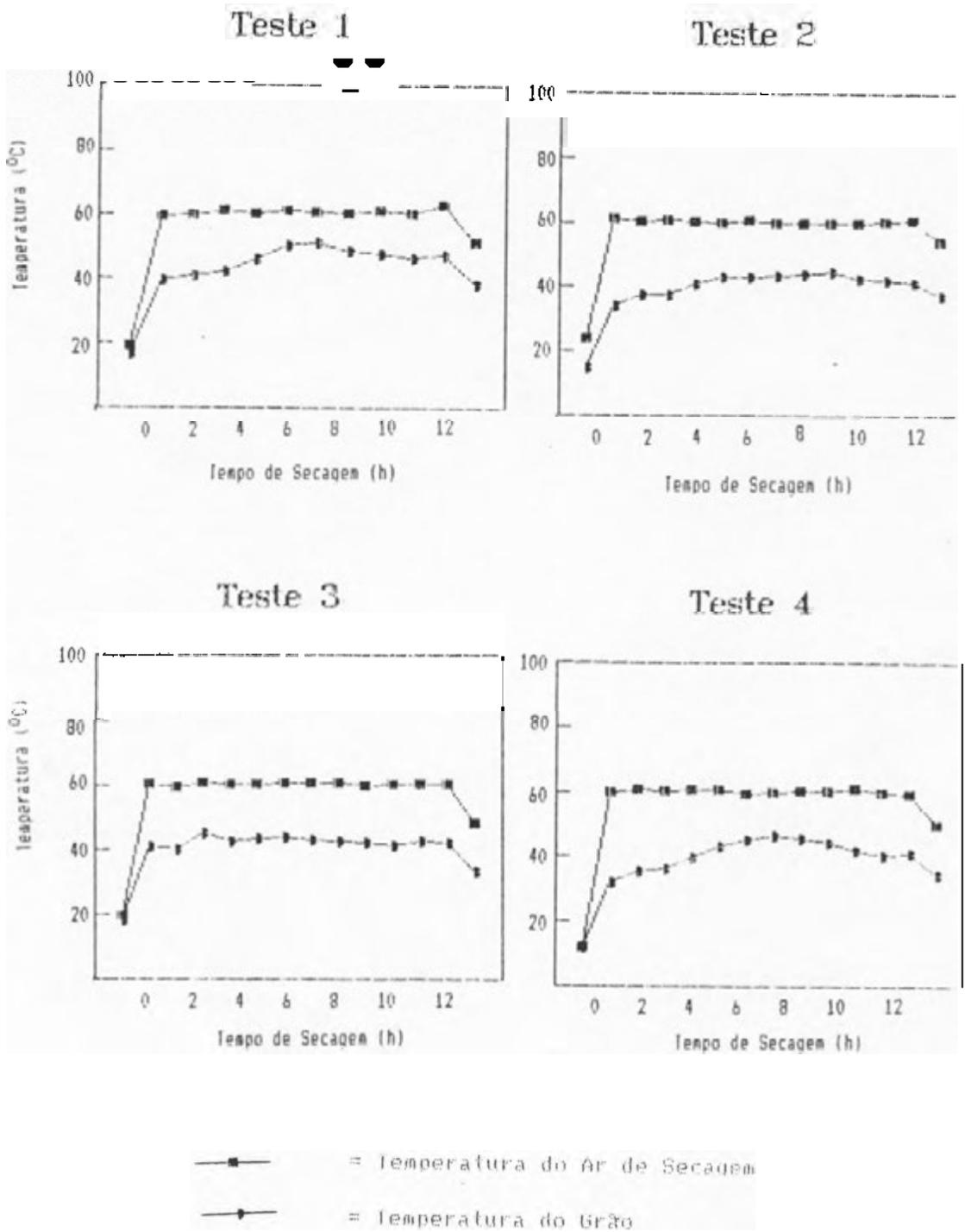
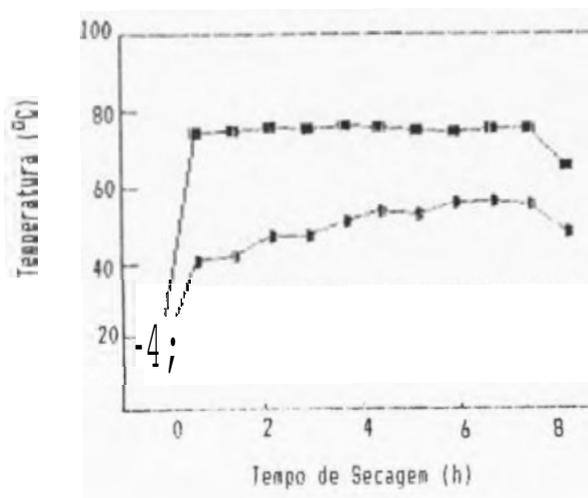
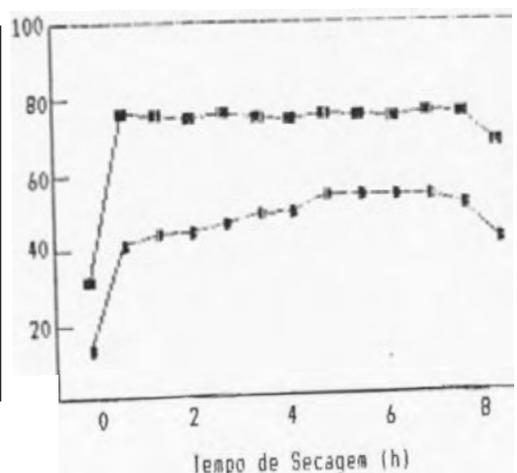


FIGURA 3 - Variação das Temperaturas do Ar de Secagem a 60°C e dos Grãos na Saida do Estadio Inferior de Secagem.

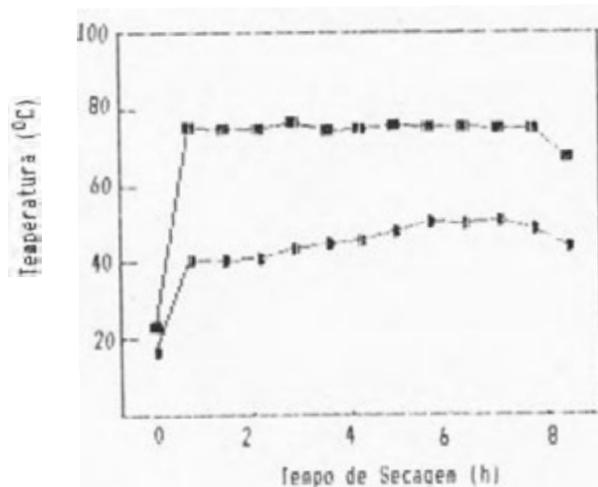
Teste 5



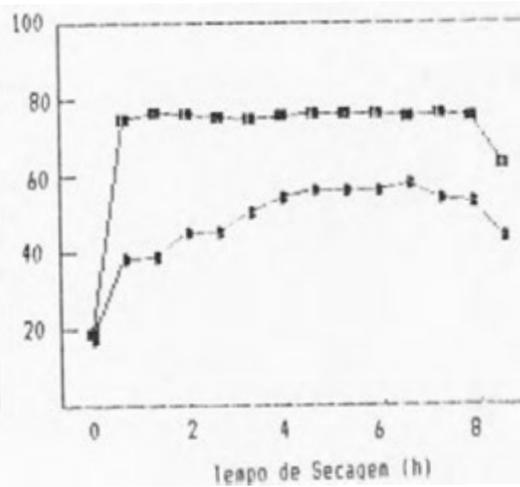
Teste 6



Teste 7



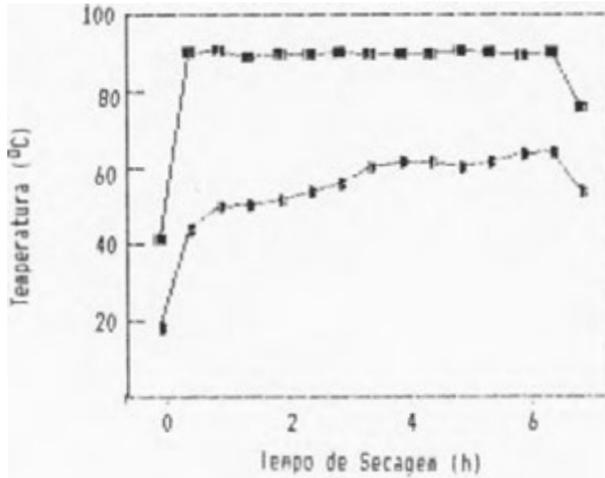
Teste 8



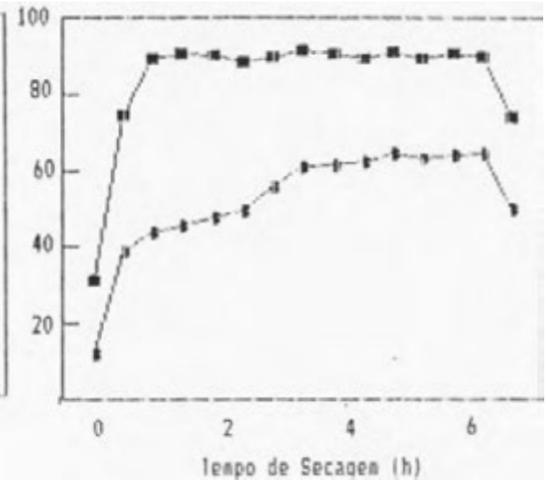
 = Temperatura do Ar de Secagem
 = Temperatura do Grão

FIGURA 4 - Variação das Temperaturas do Ar de Secagem a 75°C e dos Grãos na Saída do Estádio Inferior de Secagem.

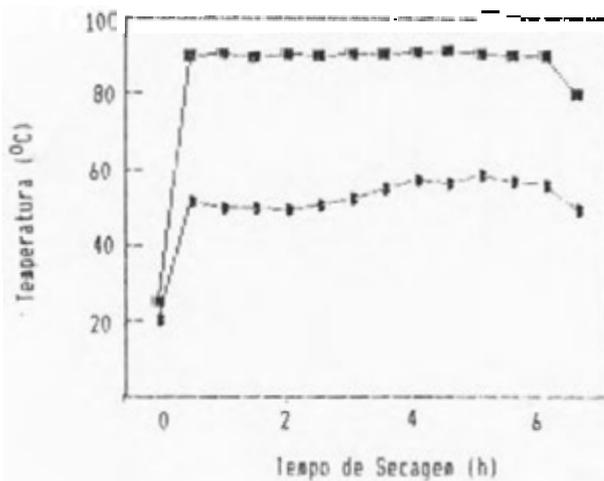
Teste 9



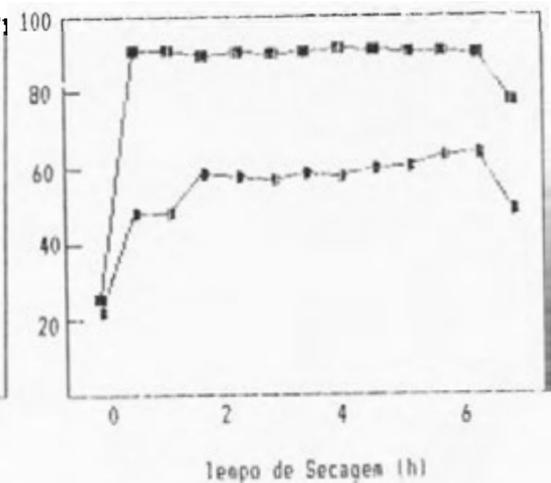
Teste 10



Teste 11



Teste 12



 = Temperatura do Ar de Secagem
 = Temperatura do Grão

FIGURA 5 - Variação das Temperaturas do Ar de Secagem a 90°C e dos Grãos na Saída do Estádio Inferior de Secagem.

temperatura até próximo de 60°C . e abaixo da temperatura crítica para café que é em torno de 70°C como relatou TOSELLO (1956). Assim, para a secador estudado ha a possibilidade de se trabalhar com temperaturas do ar de secagem ainda mais elevadas.

c) Massa Especifica

Com o objetivo de tentar padronizar o máximo possível o produto utilizado nos testes, o cafe proveniente de uma mesma lavoura foi passado por uma peneira com furos de 5 mm de diâmetro, antes de entrar no secador. Mesmo assim, não houve uniformidade entre os valores das massas especificas iniciais, inviabilizando comparações entre as massas especificas globais médias de cada tratamento. Os resultados de massa especifica inicial e final de cada teste estão relacionadas no Quadra 2.

A Figura 6 mostra a variação das massas especificas com o teor de umidade. de uma repetição para cada temperatura. Nota-se que o seu valor cresce até um determinado teor de umidade, voltando a decrescer até às umidades finais estudadas, comportamento semelhante às outras repetições dos testes. Este fato é semelhante a outros produtos agrícolas como arroz e aveia, como pode ser visto em BROOKER et alii (1978).

4.1.2. Especificações do Secador

a) Uso da Energia

A fornalha, utilizando lenha como combustível, foi escolhida para o secador estudado, por ser, no Brasil, a

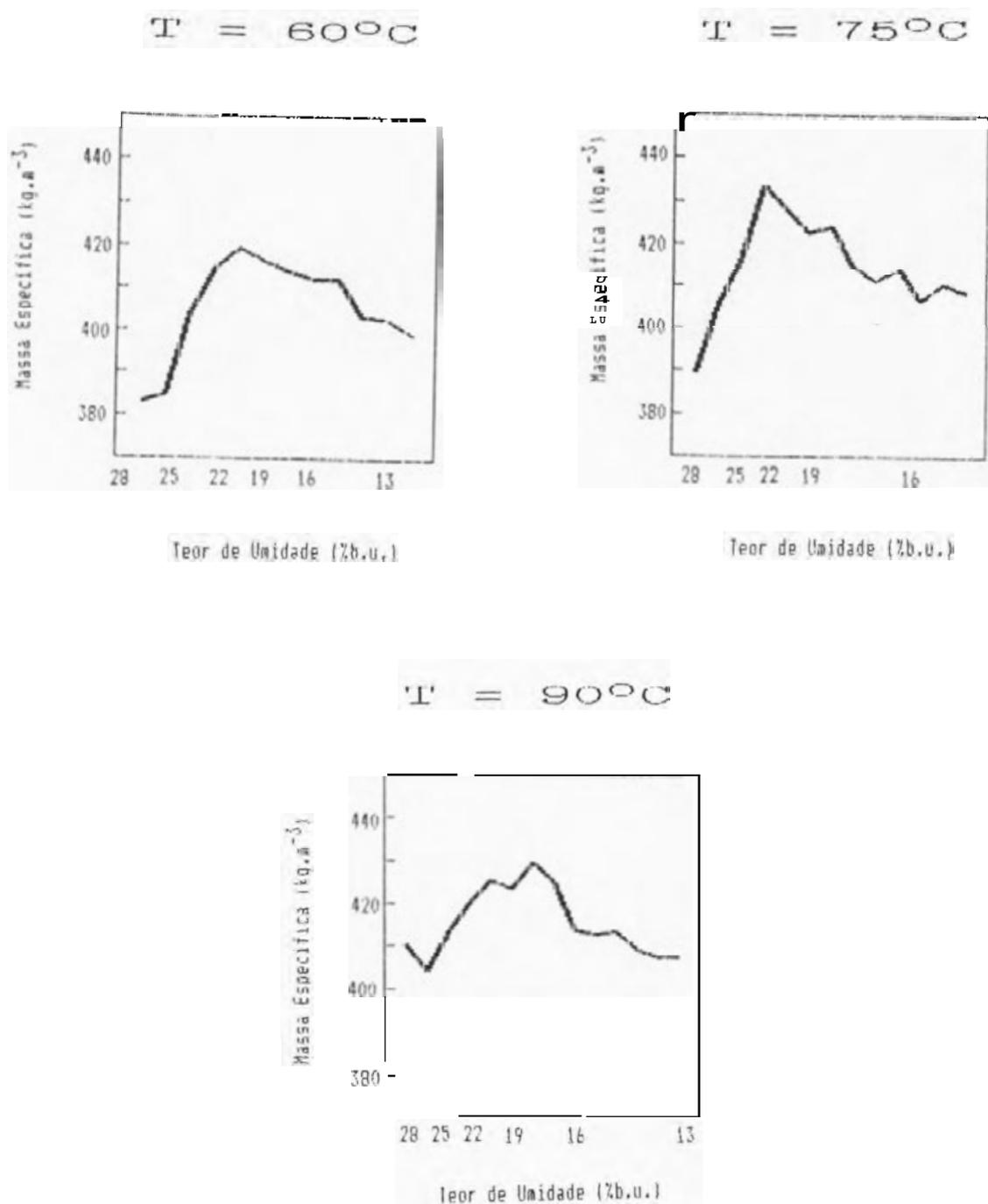


FIGURA 6 - Variação da Massa Especifica com o Teor de Umidade, para as Três Temperaturas do Ar de Secagem Utilizadas.

fonte de aquecimento do ar comumente empregada para a secagem de grãos. Nos testes realizados, a lenha apresentou teor de umidade médio de 14,15 % b.u., com um poder calorífico inferior médio de 16.731 kJ/kg. Para acionar o elevador de caçambas, o ventilador e a máquina de pré-limpeza, foram utilizados motores elétricos. Os valores de energia consumida em cada teste estão mostrados no Quadro 3.

Pelo fato de o secador ser construído de chapas metálicas e não ser revestido com isolante térmico, ocorreram perdas de energia no plenum superior e no inferior. Observou-se também perda de energia através da boca de alimentação da fornalha, que estava superdimensionada para o protótipo em estudo. Para quantificar o total de energia perdida nas paredes do secador e na fonte de aquecimento, a consumo de energia para aquecimento do ar foi calculado pelo balanço de calor sensível (eq. 4). Os valores estão apresentados no Quadro 4.

b) Capacidade de Secagem

A capacidade de secagem variou com a temperatura do ar de secagem, quantidade inicial do produto e as umidades iniciais e finais, como mostra o Quadro 3.

Na Figura 7, que mostra o gráfico da capacidade de secagem, média para cada temperatura do ar de secagem, pode-se observar que os valores médios aumentam com o aumento da temperatura. Assim, mesmo que as diferenças de umidades iniciais e finais inviabilizem uma comparação mais

QUADRO 4 - Energia Consumida, Energia Calculada e Consumo Específico de Energia, Incluindo e Excluindo a Energia Elétrica

TESTE	Energia Consumida (MJ) (1)	CEE s/ eletr. (kJ/kg) (2)	CEE c/ eletr. (kJ/kg) (3)	Energia Aquecim. (MJ) (4)	CEE s/ eletr. (kJ/kg) (5)	CEE c/ eletr. (kJ/kg) (6)	
30°C	1	771	17.518	20.102	392	8.907	11.491
	2	772	16.351	19.086	453	9.601	12.336
	3	732	18.266	21.701	496	12.363	15.797
	4	849	16.545	19.201	500	9.744	12.396
Média	781	17.171	20.022	460	10.155	13.005	
75°C	5	601	12.617	14.432	385	8.098	9.913
	6	564	11.419	13.315	415	8.401	10.296
	7	599	8.824	10.251	433	6.383	7.790
	8	658	9.764	11.282	450	6.677	8.194
Média	605	10.656	12.315	421	7.390	9.048	
90°C	9	606	10.240	11.548	408	6.896	8.204
	10	511	9.137	10.470	392	7.021	8.353
	11	465	9.493	10.952	373	7.612	9.071
	12	393	7.921	9.345	338	6.807	8.228
Média	494	9.197	10.578	378	7.084	8.464	

(1) = Energia consumida para o aquecimento do ar de secagem, calculada pelo consumo de lenha;

(2) = Consumo específico de energia, excluindo-se o gasto de energia elétrica;

(3) = Consumo específico de energia, incluindo-se o gasto de energia elétrica;

(4) = Energia consumida para aquecimento do ar de secagem, calculado pela equação de balanço de calor sensível;

(5) = Consumo específico de energia, calculado a partir da energia de aquecimento (4), excluindo-se o gasto de energia elétrica;

(6) = Consumo específico de energia, calculado a partir da energia de aquecimento, incluindo-se o gasto de energia elétrica.

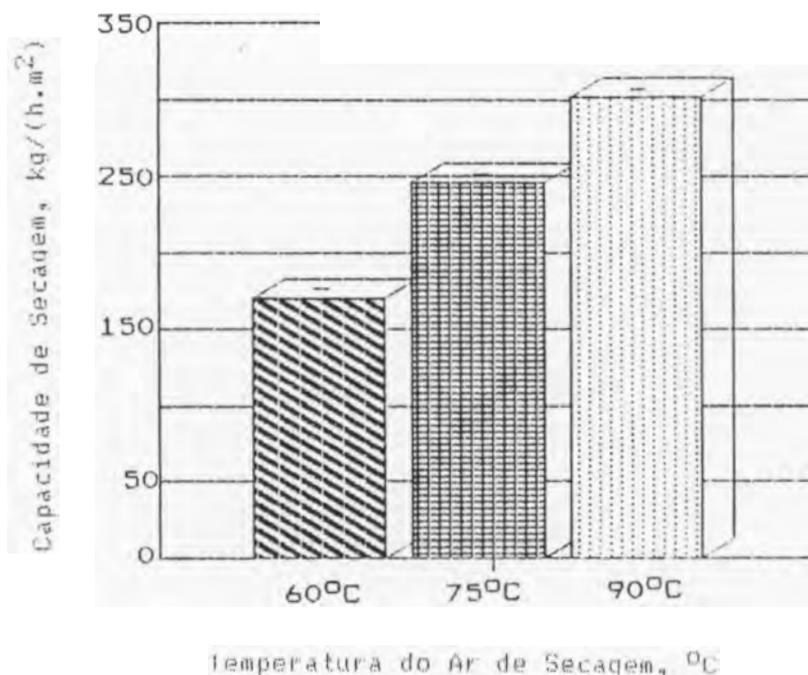


FIGURA 7 - Capacidade de Secagem Média do Protótipo para as Temperaturas do Ar de Secagem de 60, 75 e 90°C.

critérioriosa das capacidades de secagem entre as temperaturas, este comportamento já era esperado, como também encontraram diversos autores, dentre eles SILVA (1991) e SABIONI (1986).

c) Consumo Específico de Energia

Segundo SABIONI (1986), o secador é mais eficiente energeticamente para temperaturas mais elevadas. Este comportamento foi verificado no secador estudado, ocorrendo um maior consumo específico de energia para a temperatura de 60°C e menor consumo específico de energia para a temperatura de 90°C. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.

O consumo específico de energia foi calculado também excluindo-se as perdas de calor nas paredes do secador e na

fonte de aquecimento, empregando a energia calculada para o aquecimento do ar de secagem, como também mostra o Quadro 4. Pelas diferenças encontradas, observa-se que o secador estudado pode ser mais eficiente energeticamente, se forem empregados isolantes térmicos no corpo do secador e se for conseguida uma utilização adequada da fornalha.

A Figura 8 mostra o resultado comparativo do consumo específico de energia experimental e o consumo específico de energia calculado, ambos excluindo-se o consumo de energia elétrica, para as três temperaturas de secagem estudadas. A maior diferença encontrada foi para a temperatura de 60°C, evidenciando uma grande perda de calor pela boca da fornalha, bem como um menor rendimento energético da mesma. Como o fluxo de ar utilizado nos três tratamentos foi o mesmo, para manter uma menor temperatura do ar de secagem foi necessário abrir o registro de ar frio, diminuindo a massa de ar que passava pela câmara de combustão, obtendo-se um menor rendimento térmico da fornalha e, conseqüentemente, um maior consumo específico de energia, o que está de acordo com SILVA (1991).

A energia elétrica, quando levada em consideração no cálculo do consumo específico de energia, teve maior influência nos testes que exigiram maior tempo de secagem, pois para evaporar a mesma quantidade de água do produto, os motores estiveram ligados por um período de tempo maior [Figura 9]. O consumo específico médio de energia com a inclusão da energia elétrica foi 16,6, 15,5 e 15% maior do que o consumo específico médio de energia sem a energia elétrica, para os testes de 60, 75 e 90°C, respectivamente.

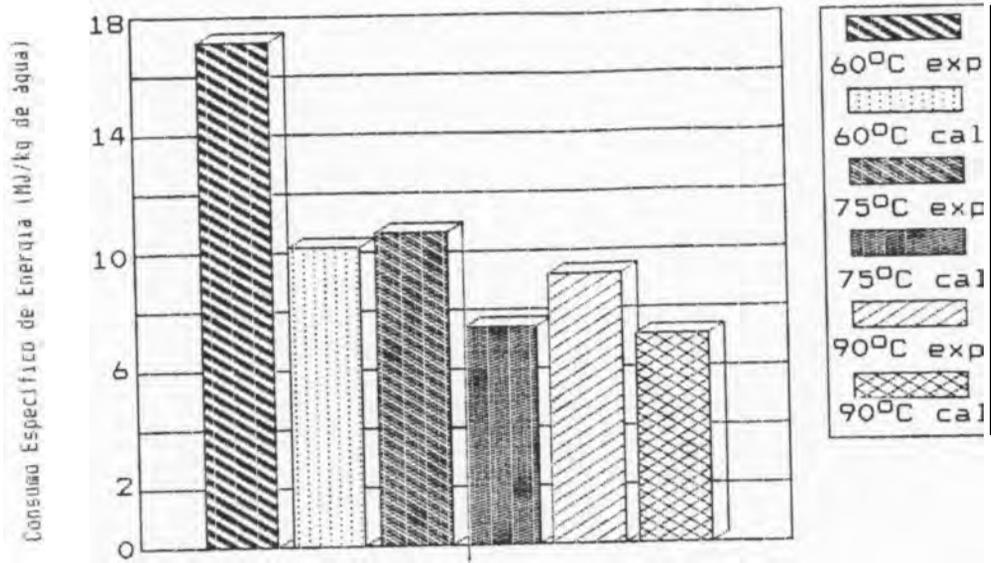


FIGURA 8 - Consumo Específico Médio de Energia, Experimental e Calculado, para as Temperaturas do Ar de Secagem de 60, 75 e 90°C, Excluindo-se a Energia Elétrica em Ambos os Casos.

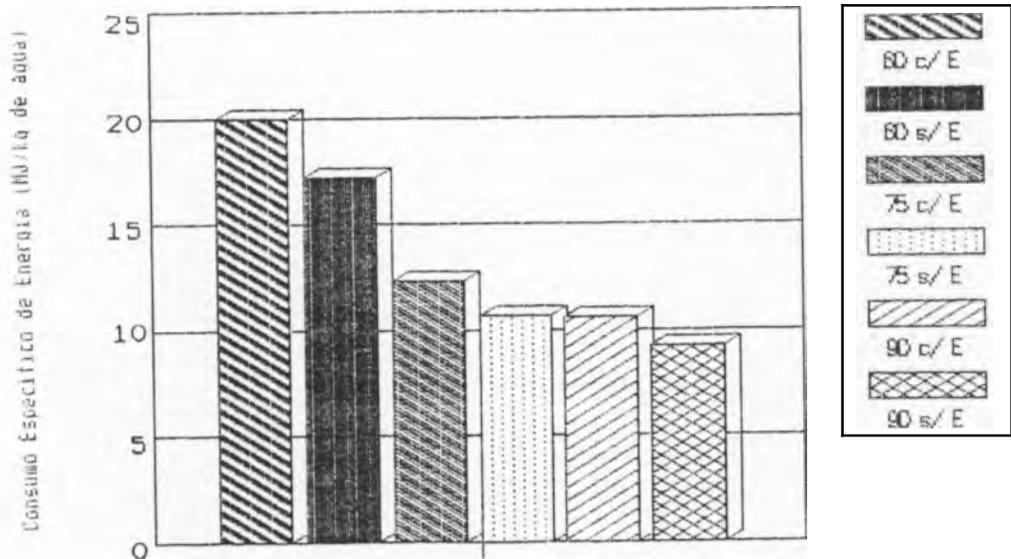


FIGURA 9 - Consumo Específico Médio de Energia Obtido Experimentalmente, para as Temperaturas do Ar de Secagem de 60, 75 e 90°C, Incluindo e Excluindo a Energia Elétrica.

No entanto, estes resultados são apenas ilustrativos, inviabilizando uma comparação mais criteriosa, pelo fato de a capacidade nominal do elevador de caçambas estar bem acima da exigida pelo protótipo, elevando desnecessariamente o consumo total de eletricidade.

4.2 - Simulação de Secagem

O programa de computador, implementado com base no modelo de THOMPSON et alii (19681, para simular a secagem de café no secador em estudo é apresentado no Apêndice A.

As curvas de secagem calculadas por simulação apresentaram valores de teor de umidade próximos aos valores obtidos experimentalmente (Figuras 10, 11 e 12), evidenciando uma boa eficiência do programa para simular o funcionamento do secador.

Apesar da similaridade entre as curvas de secagem simuladas e experimentais, as curvas de secagem calculadas por simulação apresentam um comportamento homogêneo, enquanto nas turvas experimentais observa-se oscilações. Estas oscilações, além de erros experimentais, podem ser explicadas, em parte, pelas reposições de café úmido, que se faziam necessárias no decorrer da secagem em virtude da sua perda de umidade e conseqüente diminuição de volume. Assim, na retirada de amostras para determinação de umidade e massa específica, houve a possibilidade de se amostrar a massa de grãos num ponto onde havia maior concentração de café mais úmido.

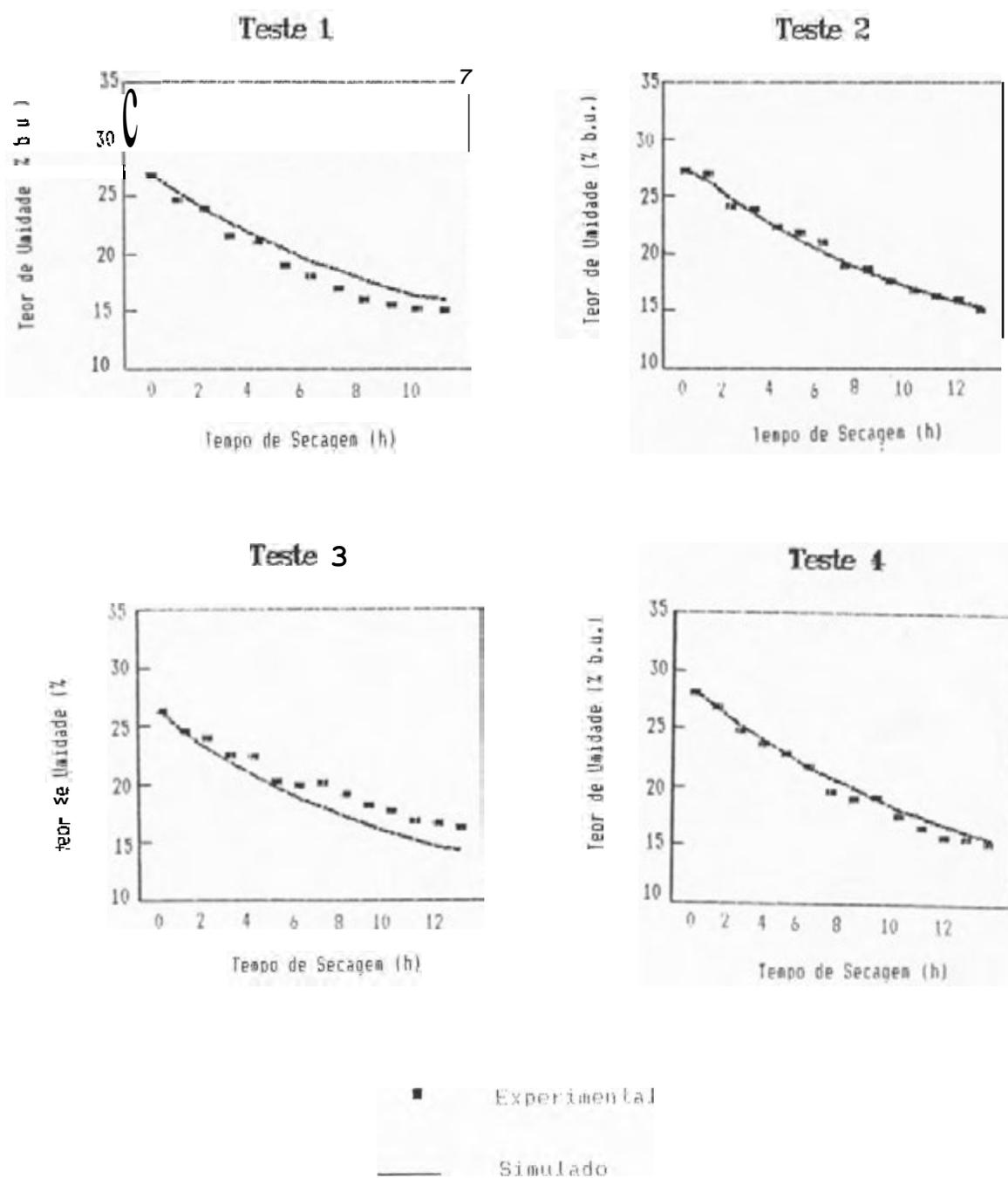


FIGURA 10 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas para os Testes com Temperatura do Ar de Secagem de 60°C.

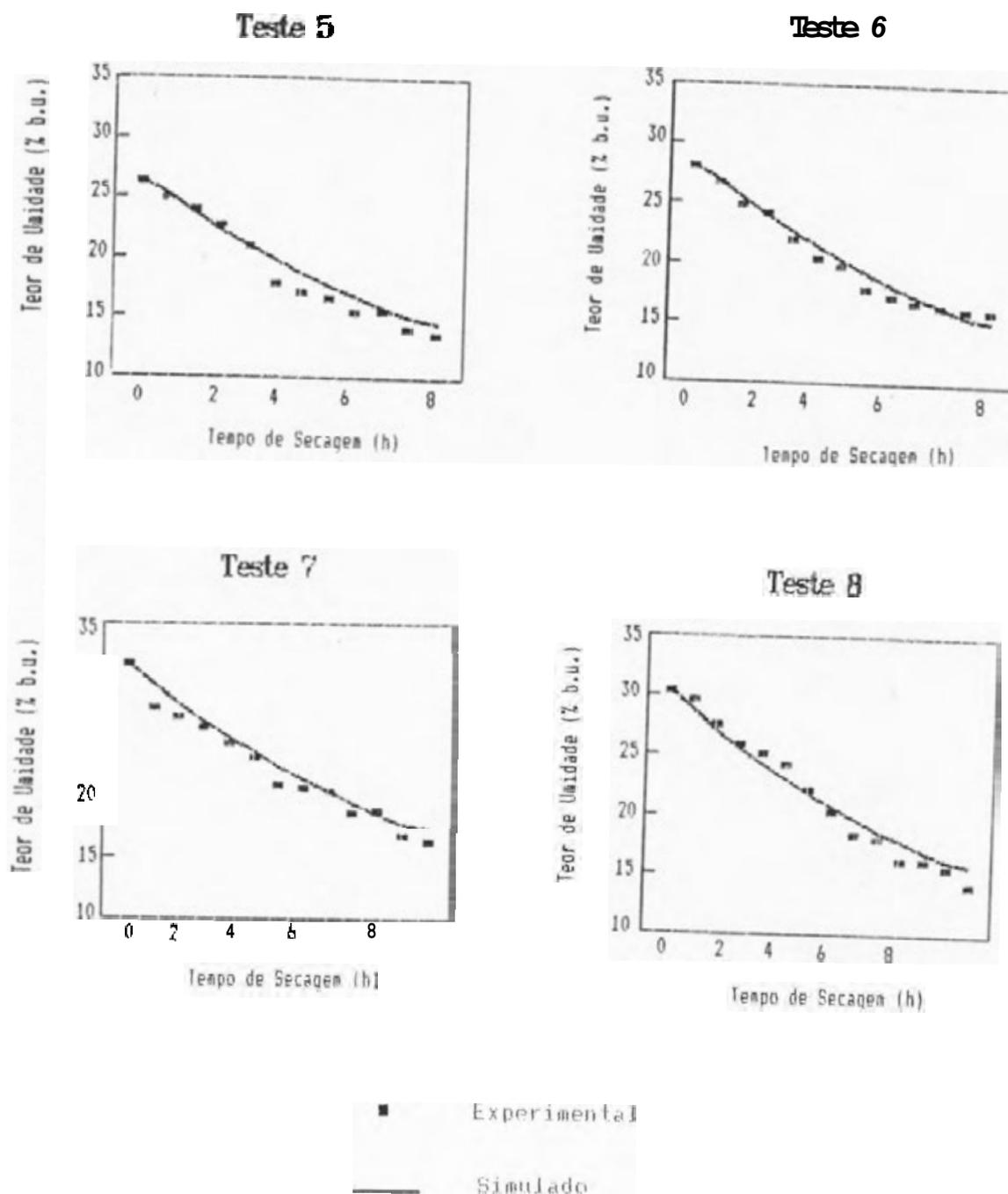


FIGURA 11 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas para os Testes com Temperatura do Ar de Secagem de 75°C.

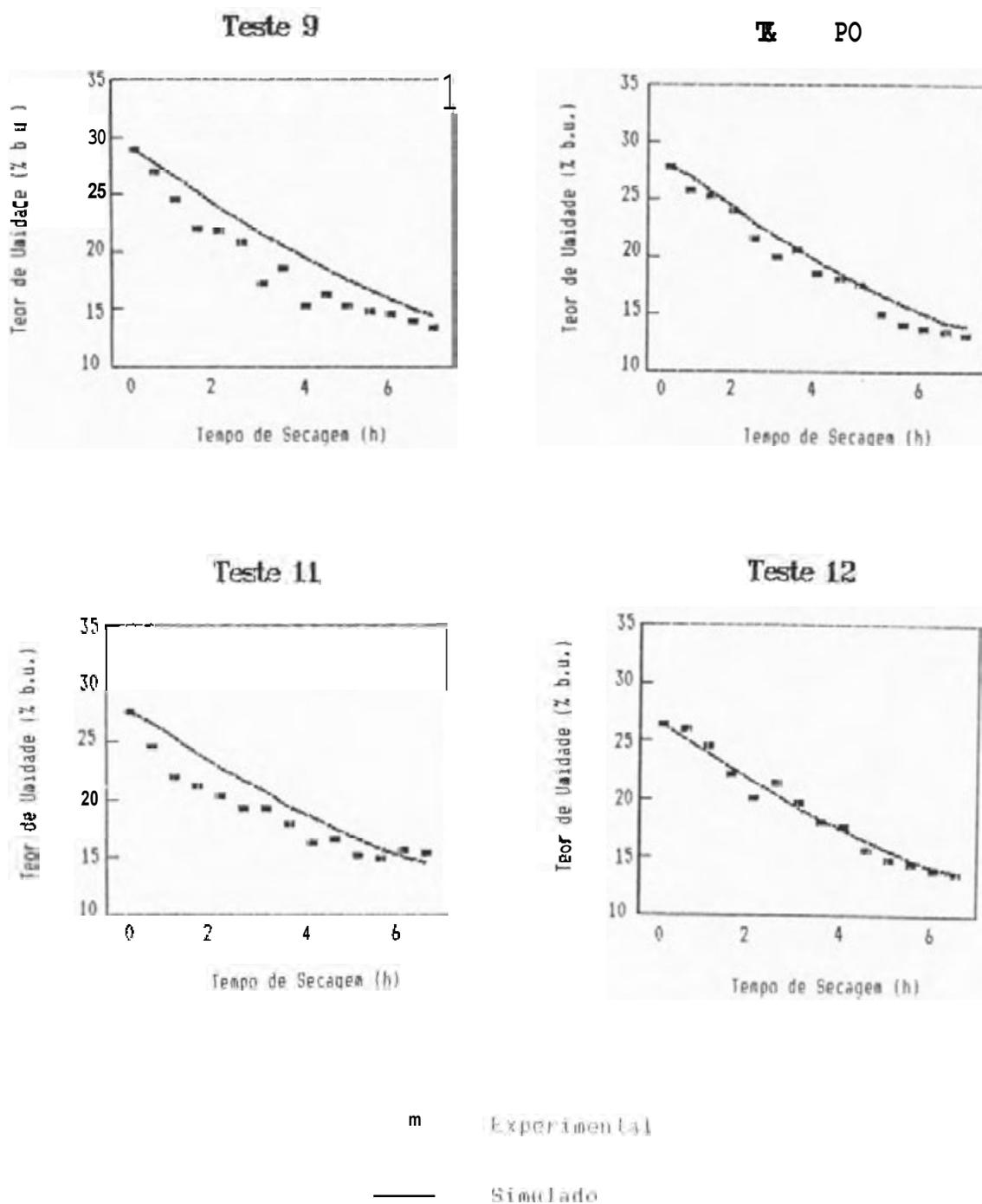


FIGURA 12 - Curvas de Secagem Experimentais e Simuladas para os Testes com Temperatura do Ar de Secagem de 90°C.

As diferenças no comportamento das curvas experimentais e simuladas também podem ser creditadas ao fato de o programa de simulação não prever a diminuição de volume do café com o decréscimo de seu teor de umidade e a reposição de café dentro do secador.

Na Figura 13, vê-se o gráfico de correspondência entre os valores experimentais e simulados para a temperatura final média da massa de grãos na saída do 2.º estágio de secagem. As diferenças absolutas, média e máxima, entre valores experimentais e simulados, foram, respectivamente, de 14,6 e 21,5°C. Nota-se pelo gráfico uma tendência de o modelo superestimar a temperatura da massa de grãos a um nível superior ao encontrado por BERBERT (1991), que foi de 2,8 e 5,1°C para as diferenças absolutas médias e 8,1 e 12,4°C para as diferenças absolutas máximas, trabalhando com temperatura do ar de secagem de 50 e 70°C, respectivamente.

A Figura 14 mostra o consumo específico de energia do protótipo, calculado por simulação, para a temperatura do ar de secagem de 100°C. Comparado com testes experimentais dos secadores de fluxos contracorrentes estudados por SILVA (1991) e de fluxos concorrentes estudado por OSORIO (1982), operados à mesma temperatura, o consumo específico de energia do protótipo estudado foi, respectivamente, 8% e 48% maior.

Com a finalidade de avaliar o benefício da reversão do fluxo de ar na redução dos gradientes de umidade e temperatura, ao longo da espessura da massa de grãos, foram feitas simulações desses gradientes para a temperatura do

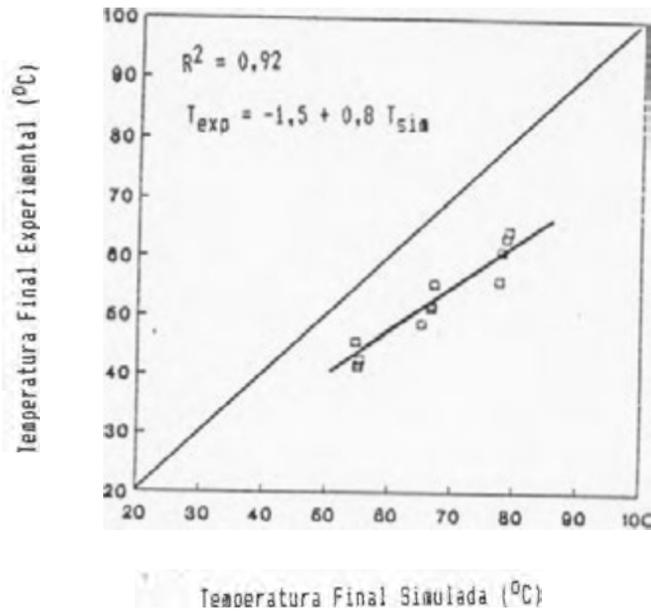


FIGURA 13 - Gráfico de Correspondência entre os Valores de Temperaturas Média Finais da Massa de Grãos, para os Testes com Temperatura do Ar de Secagem de 60, 75 e 90°C.

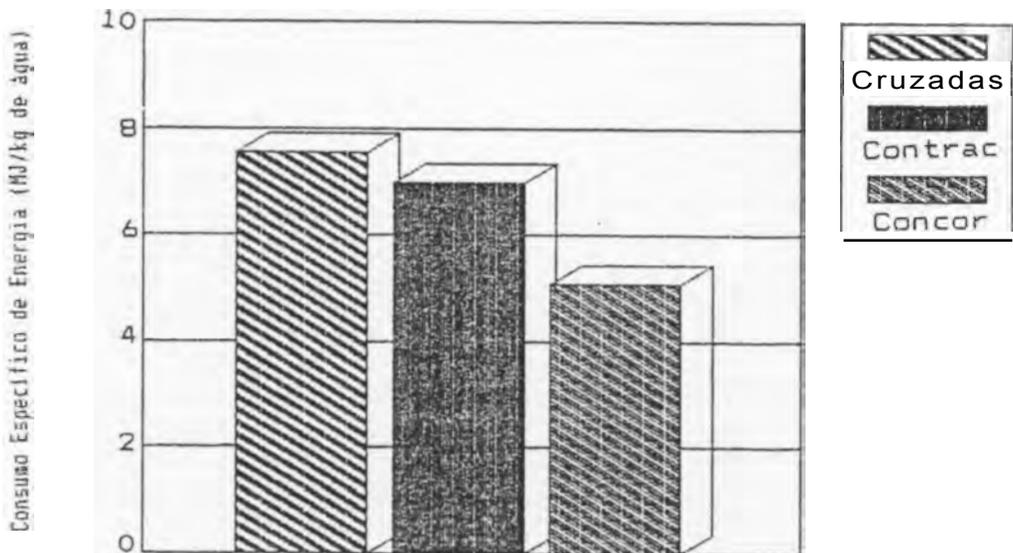


FIGURA 14 - Consumo Específico de Energia Simulado do Protótipo, Comparado com Secadores de Fluxos Contracorrente e Concorrente, com Temperatura do Ar de Secagem de 100°C.

ar de secagem de 90°C . Os dados foram simulados para os produtos em contato com o final das chapas perfuradas à esquerda e à direita da câmara inferior de secagem, ou seja, após terem sido secados com inversão do fluxo de ar.

Observando-se a Figura 15, nota-se que as diferenças de umidade dos grãos são desprezíveis com o decorrer do tempo. Para a diferença de temperatura dos grãos, como esta mostrado na Figura 16, pode-se observar um valor de diferença máximo da ordem de $8,1^{\circ}\text{C}$. Estes resultados mostram que a reversão do fluxo de ar de secagem, no protótipo estudado, foi eficiente na redução de gradientes de umidade e temperatura, quando comparados com resultados obtidos por GUSTAFSON e MOREY (1980), na secagem de milho.

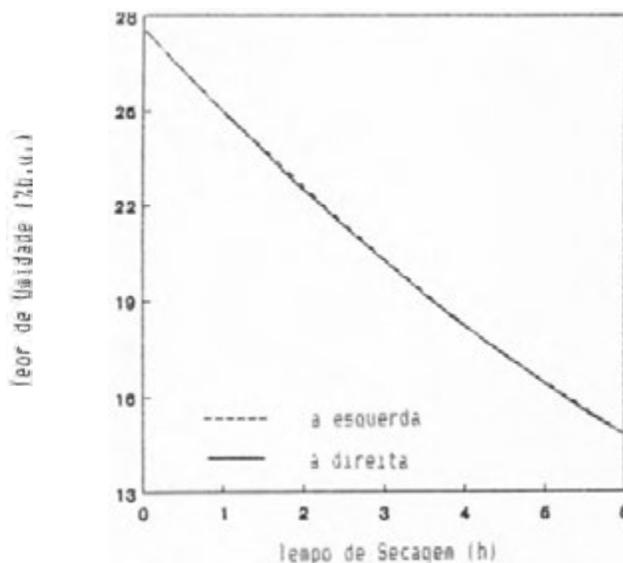


FIGURA 15 - Teor de Umidade dos Grãos Localizados à Direita e à Esquerda da Câmara Inferior de Secagem, após Terem Sido Secados Com Reversão do Fluxo de Ar.

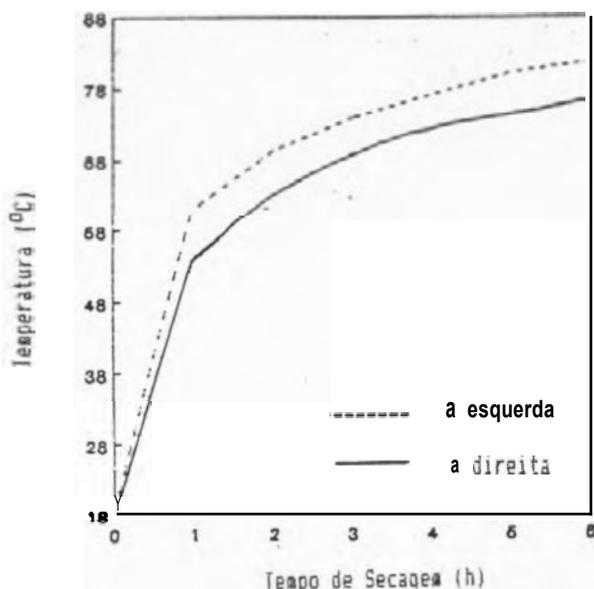


FIGURA 16 - Temperatura dos Grãos Localizados à Direita e à Esquerda da Câmara Inferior de Secagem, após Terem Sido Secados com Reversão do Fluxo de Ar.

Simulações realizadas visando estudar o efeito da temperatura do ar de secagem, da espessura da massa de grãos, do fluxo de ar e da altura das câmaras de secagem foram feitas com o objetivo de se obter informações sobre o funcionamento do secador sob outras condições. Os dados dessas simulações estão mostrados no Quadro 5.

O padrão para as condições simuladas foram:

- teor de umidade inicial = 26 %b.u.;
- massa específica inicial do produto = 425 kg.m^{-3} ;
- temperatura do ar ambiente e do grão = 20°C ;
- razão de umidade do ar ambiente = 0.01 kg.kg^{-1} ;
- espessura da camada de grãos = $0,3 \text{ m}$;
- fluxo de grãos = $6000 \text{ kg.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$;
- fluxo de ar total = $15,90 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$;

Dentre as condições avaliadas, a secagem de 120°C foi a que apresentou menor consumo específico de energia e a maior capacidade de secagem. No entanto, o efeito dessa

temperatura sobre a qualidade dos grãos deve ser avaliado experimentalmente. A secagem com temperatura de 90°C e espessura da camada de grãos de 0,4 m também apresentou um baixo valor de consumo específico de energia, mas sua capacidade de secagem, em virtude do maior volume de produto dentro do secador, diminuiu em comparação à secagem com temperatura de 90°C nas condições padronizadas.

Ao se dobrar o fluxo de ar de secagem, nota-se que a capacidade de secagem aumenta consideravelmente, o mesmo acontecendo com o consumo específico de energia, sempre comparado às condições padronizadas.

Com as câmaras de secagem aumentadas em 50%, mantém-se a capacidade de secagem, e o aumento no consumo específico de energia é desprezível.

Resultados com alto consumo específico de energia e baixa capacidade de secagem são registrados com temperaturas de secagem mais baixas (60 e 75°C).

QUADRO 5 - Resultados das Simulações com Diferentes Valores para a Temperatura do Ar de Secagem, Espessura da Camada de Grãos, Fluxo de Ar e Altura das Câmaras de Secagem e Resfriamento

Temperaturas Simuladas	Modificações nas Condições	Consumo Específico de energia (kJ/kg)	Capacidade de Secagem (kg/(h.m ²))	Umidade Final (% b.u.)	Tempo de Secagem (h)
120°C	Padrão	6578	400	14,5	3,4
90°C	Padrão	7679	235	14,2	5,8
75°C	Padrão	8486	168	14,3	8,1
60°C	Padrão	9571	109	14,3	12,5
90°C	Espessura = 0,4m	6796	200	14,2	6,8
90°C	Fluxo de ar total 31,8 m ³ /(min.m ²)	10.794	340	14,3	4,0
90°C	Altura câmaras de secagem = 1,5m	7743	235	14,3	5,8

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Com a crescente necessidade de estudar novas alternativas para a secagem de café, o presente trabalho consistiu em desenvolver e avaliar um protótipo de secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para café. Este protótipo permitiu estudar alternativas que possam minimizar os problemas apresentados pelos secadores de fluxos cruzados convencionais. Como complemento das avaliações, foi implementado um programa de computador, baseado no modelo proposto por THOMPSON et alii (1968), para simular o funcionamento do mesmo.

Para a avaliação do protótipo, foram realizados 12 testes experimentais com três temperaturas para o ar de secagem (60, 75 e 90°C).

De acordo com os resultados obtidos nas condições avaliadas, concluiu-se que

a) para as temperaturas de secagem e as umidades dos grãos utilizadas nos testes, o secador apresentou

capacidade de secagem na faixa de 163 a 317 $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$;

b) em razão de a temperatura alcançada pelos grãos nos testes com temperatura do ar de secagem de 90°C estar abaixo do limite máximo recomendado para café, o protótipo estudado pode ser operado com temperaturas de secagem mais elevadas;

c) não foi possível achar uma correlação entre o teor de umidade do café com sua massa específica para toda faixa de umidade estudada (30% a 13% b.u.);

d) os consumos de energia nos testes experimentais foram considerados elevados, em relação ao consumo de energia calculado pela equação de balanço de calor sensível, em virtude de:

- a fornalha para o aquecimento do ar de secagem estar superdimensionada para o protótipo em estudo;

- o corpo do secador ser construído em chapas de aço e sem isolamento térmico;

- a capacidade nominal do motor do elevador de caçambas ser maior que o exigido pelo protótipo;

e) os consumos específicos médios, excluindo-se a energia elétrica, para as temperaturas de secagem de 60, 75 e 90°C foram de 17.171, 10.656 e 9.197 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente;

f) o programa de computador, implementado para simular o funcionamento do protótipo estudado, mostrou que o modelo de THOMPSON et alii (1968) é eficiente na simulação do teor de umidade do café, dentro da faixa de teor de umidade inicial e final, temperatura do ar de

secagem e fluxo de grãos e de ar utilizados. Para simular a temperatura do produto, sob as mesmas condições, o modelo de THOMPSON et alii (1968) não se mostrou eficiente;

g) resultados obtidos por simulação comprovaram que a reversão do fluxo de ar foi eficiente, na redução dos gradientes de umidade e de temperatura, ao longo da espessura da camada de grãos;

h) para trabalhos futuros recomendam-se:

- padronizar o máximo possível os teores de umidades iniciais e finais do produto, bem como sua massa específica inicial;

- utilizar equipamentos compatíveis com o tipo e o tamanho do protótipo estudado.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Moisture measurement - unground grain and seeds, In: _____ Standards 1991. 38.ed. St. Joseph, USA, 1991 p.399.
- ARTEGA, M.S. Modelacion del processo de secado. In: SEMINARIO DE SECADO SOLAR, 2, Cusco, Peru, 1986. Lima, Instituto General de Investigación, 1986. p. 51-6.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. Energy and capacity performance evaluation of grain dryers. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 13 p. (ASAE Paper, 78-3523).
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; RODRIGUEZ, J.C.; BROOK, R.C.; HALL, G.E. Grain quality and energy efficiency of commercial grain dryers. Michigan, ASAE, 1981. 15 p. (Paper 81-3019)
- BERBERT, P.A. Secagem de Café (Coffea arabica L.), em Camada Fixa, com inversão de Sentido de Fluxo de Ar. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1991. 83 p. (Tese M.S.).
- BRASIL vende mais café do que em 90. O Estado de Minas, Belo Horizonte, MG, (18384): Set. 1991.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Grain drying systems. In: _____. Drying cereal grain. 2. ed. Westport, Connecticut, The AVI Publishing, 1978. Cap. 7. P. 144.
- CAFÉ: Brasil colheira 18 milhões de sacas. O Estado de Minas, Belo Horizonte, MG, (18519): Fev. 1992.

- CARVALHO, V.D. de & CHALFOUN, S.M. Aspectos qualitativos do café. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 11(126):79-92, 1985.
- DALPASQUALE, V.A. Secagem de grãos em altas temperaturas. Viçosa, MG, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem. CENTREINAR, 1984.
- FIGLIORINI, R. Adaptação do modelo de Thompson para simulação de secagem de raspas de mandioca (Manihot esculenta s.p.). João Pessoa, PB, UFPB, 1982. 95 p. (Tese M.S.).
- GUSTAFSON, R.J. & MOREY, R.V. Moisture and quality variations across the column of a cross flow grain dryer. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1980. 15 p. (ASAE Paper, 80-35513).
- LACERDA FILHO, A.F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do Café (Coffea arabica L.). Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1986. 136 p. (Tese M.S.).
- OSORIO, A.G.S. Projeto e construção de um secador intermitente de fluxos concorrentes e sua avaliação na secagem de café. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1982. 57 p. (Tese M.S.).
- PAULSEN, M.R. & THOMPSON, T.L. Effects of reversing airflow in a cross-flow grain dryer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 16(3):541-545, 1973.
- PEREIRA, J.A.M. [Equações de Page para secagem de café em camada fina], Comunicação pessoal. Viçosa, MG, CENTREINAR, 1989.
- QUEIROZ, D.M.; MELO, E.C.; SILVA, J.S. Comparação entre os modelos de secagem de milho de Thompson e de Hukill em computadores IBM-360 e adaptados para calculadora Texas TI-59. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 11, Brasília, DF, 1981. Anais ... s.n.t.p. 459-473.
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO, E.C. Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos. Viçosa, MG, CENTREINAR, 1986. 54 p. (Apostila).
- QUILAQUEO, A.R.I. Previsão da deterioração do café durante a pré-secagem em barcacas por convecção forçada com o auxílio de coletores solares. Campinas, SP, UNICAMP, 1979. 88 p. (Tese M.S.).
- RODRIGUEZ, J.C. Energy efficiency and grain quality of cross-flow and concurrent-flow dryers. East Lansing, MI, Michigan State University, 1982. 235 p. (Tese Ph.D.).

- SABIONI, P.M. Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar na secagem de milho (Zea mays L.). Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1986. 106 p. (Tese M.S.).
- SILVA, J.S.; GOMES, R.A.R.; HARA T.; CARVALHO PINTO, F. A. Estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto. Engenharia na Agricultura, Série Armazenamento, Viçosa, 1(2):1-15, dez. 1991.
- SILVA, L.C. Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (Coffea arabica L.) intermitente de fluxos contracorrentes. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1991. 74 p. (Tese M.S.).
- SINICIO, R. Simulação de secagem de milho em camadas espessas e baixas temperaturas. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1983. 64 p. (Tese M.S.).
- TASCON, C.E.O. Simulação de secagem de café, em camada fixa, com inversão do sentido de fluxo de ar. Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1984. 64 p. (Tese M.S.).
- THOMPSON, T.L.; FOSTER, G.H.; PEART, R.M. Mathematical simulation of corn drying - A new model. Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI, 11(4):582-586, 1968.
- TOSELLO, A. Ensaio sobre a secagem dos produtos agrícolas (pelo ar quente). Bragantia, Campinas, 6 (2):39-109, 1956.
- XAVIER, M.S.P. Secagem de café (Coffea arabica L.) em leito de jorro. Lavras, MG, ESAL, 1987. 65 p. (Tese M.S.).

APÊNDICES

APÊNDICE A

LISTAGEM DO PROGRAMA DE COMPUTADOR IMPLEMENTADO

Program Revapro; {Este programa simula secagem de café. em fluxos cruzados, intermitente, com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento de parte do ar de resfriamento, segundo o modelo proposto por THOMPSON et alii (1968).}

{Programa elaborado por: Daniel Marçal de Queiroz
Geraldo Luiz Pinto Filho

Departamento de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG - Setembro de 1991 }

uses crt, printer;

{ DESCRICAO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DE DADOS

UIO= TEOR DE UMIDADE INICIAL. PORCENTO B.U.
TGI= TEMPERATURA INICIAL DO GRAU. GRAUS CELSIUS
TAMB= TEMPERATURA AMBIENTE. GRAUS CELSIUS
RUAMB= RAZAO DE MISTURA AMBIENTE. KG H2O/KG DE AR SECO
XTOTAL= ESPESSURA DA CAMADA DE GRAOS. M
YTOTAL= ALTURA DA CAMADA DE GRAOS. M
GPO= FLUXO DE PRODUTO, KG/(H.M2)
UMEDF= TEOR DE UMIDADE FINAL DESEJADO, POR CENTO B.U.}

```

VAR      TGI,UIO,DELTT,DELTX,R,UI,TO,RUO      : REAL;
          TGMIN,UMAX,UMIN,UMED,URF,TF,RUF      : REAL;
          TAMB,RUAMB,TSEC1,TSEC2,TSEC3,GPO     : REAL;
          TGMED,TGMAX,UULT,GA,DELT,ROP        : REAL;
          TTOTAL,XTOTAL,UFATUAL,TREAP         : REAL;
          RUREAP,GA2,GA1,EIN,CEE,WOUT,YYI     : REAL;
          TSECAGEM,PHECTO,DIMP,TIMP           : REAL;
          ICONTADOR,M                          : INTEGER;
          N,IEST,JPOS,ICONT,JJ1,JJ2,JJ3,JLI3  : INTEGER;
          JEST,JLI,JLK,JC,IREPET,MREAP,J,I,K  : INTEGER;

          T,RU,X,Y                             : ARRAY[1..31] OF REAL;
          TG,U                                 : ARRAY[1..3,1..31,1..31] OF REAL;
          EST                                  : ARRAY[1..31,1..10,L..3] OF REAL;
          TSEC,RUSEC,PER                       : ARRAY[1..3] OF REAL;
          GAR,PEST,GARIMP                      : ARRAY[1..3] OF REAL;
          JL                                    : ARRAY[1..3] OF INTEGER;
          TGN,UN                               : ARRAY[1..3,1..50] OF REAL;

```

{FUNCTION QUE CALCULA A PRESSAO DE VAPOR DE SATURACAO (MM HG) COMO FUNCAO DA TEMPERATURA (KELVIN) }

```
FUNCTION PVSF(TABS: real): real;
```

```
var Ai: : real;
```

```
Begin
```

```
  AZ := -7511.52/(TABS)+89.63121+0.02399897*TABS-  
        12.150799 * ln(TABS);
```

```
  AZ := AZ+2.0998405E-11*exp(4*ln(TABS))-1.165455  
        E-5*TABS*TABS;
```

```
  PVSF := EXP(AZ-1.2810336E-8 * EXP(3*LN(TABS)))/0.1333;
```

```
End;
```

```
{FUNCTION QUE CALCULA A RAZAO DE MISTURA DO AR EM FUNCAO DA  
 'TEMPERATURADO AR (GRAUS CELCIUS) E DA UMIDADE RELATIVA  
 (PORCENTO)}
```

```
FUNCTION RMIS(TA,URA: real): real;
```

```
var PV1      :real;
```

```
Begin
```

```
  PV1 := PVSF(TA + 273.16) * URA/100;
```

```
  RMIS := 0.622 * PV1 / (760-PV1);
```

```
End;
```

```
{FUNCTION QUE CALCULA O VOLUME ESPECIFICO DO AR(M3/KG DE  
 AR SECO) COMO FUNCAO DA TEMPERATURA DO AR (GRAUS CELSIUS)  
 E DA RAZAO DE MISTURA( KG DE H2O/KG DE AR SECO)}
```

```
FUNCTION VESP (TA,RMA: real): real;
```

```
var PV      :real;
```

```
Begin
```

```
  PV := RMA * 101325 / (0.622 + RMA);
```

```
  VESP := 287 * (TA + 273.16) / (101325-PV);
```

```
End;
```

```
IFUNCTION QUE CALCULA A UMIDADE RELATIVA (PORCENTAGEM) EM  
 FUNCAO DA TEMPERATURA DO AR (GRAUS CELSIUS) E DA RAZAO DE  
 MISTURA}
```

```
FUNCTION UREL(TA,RMA1: real): real;
```

```
var PV3      : real;
```

```
Begin
```

```
  PV3 := RMA1 * 760 / (0.622 + RMA1);
```

```
  UREL := PV3 / PVSF(TA + 273.16) * 100;
```

```
End;
```

{SUBROTINA QUE SIMULA A CONDENSACAO DE UMIDADE, QUANDO O PONTO DE ESTADO CALCULADO POR MEIO DOS BALANCOS DE ENERGIA E DE MASSA NAO E FACTIVEL. }

```
PROCEDURE CONDEN(VAR TF,RUF,UF,TGF,CP,R : real);
```

```
var T1, RM1, H1, PV9, RM2, T2, UR1, UR2, T3, RM3, UR3      : real;
    nvezes, jflag                                          : integer;
```

```
begin
```

```
  t1:=tf; rml:=ruf; h1:=0.24*t1+rml*(588.0+0.45*t1);
  nvezes:=0;   pv9:=pvaf(t1+273.16);
  rm2:=0.622*pv9/(760.0-pv9);
  t2:=(h1+(rm2-rml)*t1+cp*r*(1+uf)*t1-rm2*588)/(0.24+rm2*
    0.45+cp*r*(1+uf));
  ur1:=urel(t1,rml);  ur2:=urel(t2,rm2);
  repeat
    nvezes := nvezes+1;
    t3 := t1-(ur1-100)/(ur1-ur2)*(t1-t2);
    rm3 := (h1-rml*t1+cp*r*(1+uf)*(t1-t3)-0.24*t3)/(-t1+
      588+0.45*t3);
    ur3 := urel(t3,rm3);  jflag := 1;
    if(ur3>100.0001) then
      begin
        ur1:=ur3; h1:=0.24*t3+(588.0+0.45*t3)*rm3;
        rml:=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 );
  uf:=uf-(rm3-ruf)/r; tf:=t3; tgf:=t3; ruf:=rm3;
```

```
end;
```

```
PROCEDURE DELGA(te,u0,ui,cp,r,ru0 :real;
               var uf,ruf,tf,tgf,ur:real);
```

```
var ue,xmr,duu,dxmr,teq,dhfg,a1,a2,a3,teabs,ativ : real;
begin
  ue:=1.1282*exp(0.5405*ln(-ln(1-0.01*ur)/(te+40.535)));
  xmr:=(u0-ue)/(ui-ue);
  if(ui>1.326 ) then
    begin
      a1:=0.832825;a2:=149430; a3:=5631.17;
    end;
  if((ui <= 1.326) and (ui > 0.47)) then
    begin
      a1:=0.73681; a2:=173705; a3:=5533.11;
    end;
  if (ui <= 0.47) then
    begin
      a1:=0.605604; a2:=105.756; a3:=2751.53;
    end;
  duu := 0.0;
  if (xmr > 1 ) then
```

```

begin
  xmr:=1; duu:=u0-ui;
end;
if(xmr > U ) 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:=ui+duu;
  if teq > 0 then uf:=(ui+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 PREPARAR;

```

var XI,TGO,UO,CP,TE,TGF,UF,UR,UE,A,B,           : real;
DUDT ,DHFG,XMR,DUU,DXMR,TEQ                   : real;
I                                               : integer;

```

Begin

```

TO := TSEC[IEST];  RUO := RUSEC[IEST];  XI := 0 :
UMIN := 99999.9;   UMAX := 0;   UMED := 0;
TGMIN := 99999.9;  TGMAX := 0;   TGMED := 0;
I := JJ1;
REPEAT
  XI := XI + DELTX;  X[I] := XI;
  TGO := TG[IEST,JPOS,I];
  UO := U[IEST,JPOS,I] ;CP:=0.4+0.6*UO/(1.0+UO);
  TE := ((0.24 + 0.45 * RUO) * TO + CP * H *(1 + UO) x
    TGO) / (0.24 + 0.45 * RUO + CP * R *(1 + UO));
  TGF := TE;  TF := TE;  RUF := RUO ;  UF := UO ;
  UR := UREL(TF,RUF);
  IF UR < 100 THEN delga(TE,UO,UI,CP,R,RUO,UF,RUF,TF,
    TGF,UR);
  IF UR > 100 THEN CONDEN(TF,RUF,UF,TGF,CP,R);
  TG[IEST,JPOS,I] := TGF ;
  U[IEST,JPOS,I] := UF ;
  TO := TF;  RUO := RUF;  UMED := UMED+100*UF/(1+UF);
  IF UF < UMIN THEN UMIN := UF;
  IF UF > UMAX THEN UMAX := UF;
  TGMED := TGMED + TGF ;
  IF TGF < TGMIN THEN TGMIN := TGF;
  IF TGF > TGMAX THEN TGMAX := TGF;
  I:=I+JJ3;
UNTIL I = (JJ2+JJ3);

```

```

    TGMED := TGMED/N;      UMED := UMED/N;
    UMAX := 100*UMAX/(1+UMAX);    UMIN := 100*UMIN/(1+UMIN);
    URF := UREL(TF,RUF);
End;

```

PROCEDURE PULAR;

```

var YI,TPAR,TMIN      : real;
    IMK                : INTEGER;

```

Begin

```

    ICONT := 0;  YI := 0;  JPOS := 0;  TPAR := 0;  TMIN := 0;

```

Repeat

```

    TPAR := TPAR+DELTT;  JPOS := JPOS+1;  TMIN := TPAR*60;
    ICONT := ICONT+1;  TGMED := 0;  UMAX := 0;
    TGMIN := 1000;  UMIN := 1000;  TGMED := 0;  UMED := 0;
    FOR IMK:=1 TO N DO

```

BEGIN

```

    IF TGMED < TG[3,JPOS,IMK] THEN TGMED:=TG[3,JPOS,IMK];
    IF TGMIN > TG[3,JPOS,IMK] THEN TGMIN:=TG[3,JPOS,IMK];
    IF UMAX < U[3,JPOS,IMK] THEN UMAX:=U[3,JPOS,IMK];
    IF UMIN > U[3,JPOS,IMK] THEN UMIN:=U[3,JPOS,IMK];
    UMED := UMED+U[3,JPOS,IMK]/N;
    TGMED := TGMED+TG[3,JPOS,IMK]/N;

```

END;

```

    UMAX:=UMAX*100/(1+UMAX);UMED:=UMED*100/(1+UMED);

```

```

    UMIN:=UMIN*100/(1+UMIN);

```

```

    EST[ICONT,1,IEST] := TPAR;
    EST[ICONT,2,IEST] := TGMED ;
    EST[ICONT,3,IEST] := TGMIN ;
    EST[ICONT,4,IEST] := UMAX ;
    EST[ICONT,5,IEST] := UMED ;
    EST[ICONT,6,IEST] := UMIN ;
    EST[ICONT,7,IEST] := TF ;
    EST[ICONT,8,IEST] := URF ;
    EST[ICONT,9,IEST] := RUF ;
    EST[ICONT,10,IEST] := RUF ;

```

```

    Until JPOS >= JL[IEST] ;

```

```

End;

```

PROCEDURE ARMAZENAR ;

```

var YI,TPAR,TMIN      : real;

```

Begin

```

    ICONT := 0;  YI := 0;  JPOS := 0;  TPAR := 0;  TMIN := 0;

```

Repeat

```

    TPAR := TPAR + DELTT;  JPOS := JPOS + 1 ;

```

```

    TMIN := TPAR * 60;

```

PREPARAR;

```

    ICONT := ICONT + 1 ;
    EST[ICONT,1,IEST] := TPAR;
    EST[ICONT,2,IEST] := TGMED ;
    EST[ICONT,3,IEST] := TGMIN ;
    EST[ICONT,4,IEST] := UMAX ;

```

```

EST[ICONT,5,IEST] := UMAX ;
EST[ICONT,6,IEST] := UMED ;
EST[ICONT,7,IEST] := UMIN ;
EST[ICONT,8,IEST] := TF ;
EST[ICONT,9,IEST] := URF ;
EST[ICONT,10,IEST] := RUF ;
Until JPOS >= JL[IEST] ;
End;

```

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

{Entrada de dados}

BEGIN

```

CLRSCR ;
WRITELN('SIMULACAO DE SECAGEM DE CAFE EM SECADOR DE ');
WRITELN(' FLUXOS CRUZADOS COM REVERSAO DO FLUXO DE ');
WRITELN(' AR E REAPROVEITAMENTO DE PARTE DO AR DE'?);
WRITELN(' RESFRIAMENTO (MODELO DE THOMPSON)');
WRITELN;WRITELN;
WRITE('TEOR DE UMIDADE INICIAL (% B.U.) .....: ');
READLN(UIO);
WRITE('PESO ESPECIFICO DO PRODUTO (KGF/M3) .....: ');
READLN(PHECTO);
WRITE('TEMPERATURA INICIAL DO PRODUTO (.C) .....: ');
READLN(TGI);
WRITE('TEMPERATURA AMBIENTE (.C) .....: ');
READLN(TAMB);
WRITE('RAZAO DE UMIDADE DO AR (KG/KG) .....: ');
READLN(RUAMB);
WRITE('ESPESSURA DA CAMADA DE GRAOS (M) .....: ');
READLN(XTOTAL);
WRITE('FLUXO BE GRAOS (KG/H/M2) .....: ');
READLN(GPO);
WRITELN;
WRITE('TEMPERATURA DE SECAGEM DO ESTAGIO #1 (.C) ...: ');
READLN(TSEC1);
WRITE('FLUXO DE AR DO ESTAGIO #1 (M3/MIN/M2) .....: ');
READLN(GAR[1]);
WRITE('ALTURA DA COLUNA DO ESTAGIO #1 (M) .....: ');
READLN(Y[1]);
WRITELN;
WRITE('TEMPERATURA DE SECAGEM DO ESTAGIO #2 (.C) ...: ');
READLN(TSEC2);
WRITE('FLUXO DE AR DO ESTAGIO #2 (M3/MIN/M2) ...: ');
READLN(GAR[2]);
WRITE('ALTURA DA COLUNA DO ESTAGIO #2 (M) .....: ');
READLN(Y[2]);
WRITE('AR QUE SERA REAPROVEITADO (%) .....: ');
READLN(PER[2]);
WRITELN;
WRITE('TEMPERATURA DO AR FRIO (.C) .....: ');
READLN(TSEC3);
WRITE('FLUXO DE AR DO ESTAGIO #3 (M3/MIN/M3) .....: ');
READLN(GAR[3]);
WRITE('ALTURA DA COLUNA DO ESTAGIO #3 (M) .....: ');
READLN(Y[3]);

```

```

WRITE('AR QUE SERA REAPROVEITADO I%).....: ');
READLN(PER[3]);
WRITELN;
WRITE('INCREMENTO DE ALTURA (M) .....: ');
READLN(DELTU);
WRITE('TEMPO TOTAL DE SECAGEM (H) .....: ');
READLN(TTOTAL);
WRITE('INCREMENTO TEMPO PARA SAIDA RESULTADOS (H) .: ');
READLN(DIMP);
WRITELN;

```

```

ROP:=PHECTO*(1-UIO/100);
N := 5; UI := UIO / (100 - UIO);    UULT := UIO ;
DELTT := DELTU / (GPO / PHECTO);
DELTX := XTOTAL / N ;
For JEST := 1 TO 3 DO
Begin
  JL [JEST] := TRUNC (Y[JEST] / DELTU + 0.5);
  JLI := JL[JEST] ;
  FOR JLK := 1 TO JLI DO
  Begin
    FOR JC := 1 TO N DO
    Begin
      TG[JEST,JLK,JC] := TGI ;
      U[JEST,JLK,JC] := UI ;
    End;
  End;
End;
IREPET:=0;
UFATUAL:=UIO+1; TSECAGEM:=0; TIMP:=0;
WHILE (TSECAGEM <= (TTOTAL-0.5*DELTT)) DO
Begin
  TSECAGEM:=TSECAGEM+DELTT; TIMP:=TIMP+DELTT;
  IREPET:=IREPET+1; IEST := 3 ;
  GA := GAR[3] * 60 / VESP(TAMB,RUAMB);
  IF GA > U THEN
  BEGIN
    R := ROP * DELTX / GA / DELTT ;
    JJ1 := 1; JJ2 := N; JJ3 := 1;
    TSEC[IEST] := TSEC3; RUSEC[IEST] := RUAMB;
    ARMAZENAR;
    MREAP := TRUNC(JL[3] * PER[3] / 100.0 + 0.5);
    TREAP := 0; RUREAP := 0;
    IF MREAP <> 0 Then
    Begin
      FOR J := 1 TO MREAP DO
      Begin
        TREAP := TREAP + EST[J,8,IEST];
        RUREAP := RUREAP + EST[J,10,IEST];
      End;
    End ;
    TREAP := TREAP / MREAP; RUREAP := RUREAP / MREAP;
    GA2 := GAR[2] * 60 / VESP(TAMB,RUAMB);
    IEST := 2;
    TSEC[IEST] := (TREAP*Y[3]/Y[2]*GA*PER[3]/100+TSEC2*
      GA2)/(GA2+GA*Y[3]/Y[2]*PER[3]/100);
    RUSEC[IEST] := (RUREAP*Y[3]/Y[2]*GA*PER[3]/100+

```

```

RUAMB*GA2)/(GA2+GA*Y[3]/Y[2]*PER[3]/100);
GA := GA2+GA*Y[3]/Y[2]*PER[3]/100;
END;
IF GA < 0 THEN
BEGIN
PULAR;
IEST:=2; GA := GAR[2] * 60 / VESP(TAMB,RUAMB);
TSEC[IEST]:=TSEC2; RUSEC[IEST]:=RUAMB;
END;
R := ROP * DELTX / GA / DELTT;
JJ1 := N; JJ2 := 1; JJ3 := -1;
ARMAZENAR;
TREP := 0; RUREAP := 0;
FOR J := 1 TO ICONT DO
Begin
TREP := TREP + EST[J,8,IEST];
RUREAP := RUREAP + EST[J,10,IEST];
End;
TREP := TREP / ICONT; RUREAP := RUREAP / ICONT;
GA1 := GAR[1] * 60 / VESP(TAMB,RUAMB); IEST := 1;
TSEC[IEST] := (TSEC1*GA1+TREP*GA*Y[2]/Y[1]* PER[2]/
100)/(GA*Y[2]/Y[1]*PER[2]/100+GA1);
RUSEC[IEST] := (RUAMB*GA1+RUREAP*GA*Y[2]/Y[1]*PER[2]/
100)/(GA*Y[2]/Y[1]*PER[2]/100+GA1);
GA := GA1 + GA * Y[2] / Y[1] * PER[2] / 100;
R := ROP * DELTX / GA / DELTT;
JJ1 := 1; JJ2 := N; JJ3 := 1;
ARMAZENAR;
FOR I := 3 TO 3 DO
Begin
FOR K := 1 TO N DO
Begin
JLI := JL[I]; UN[I,K] := U[I,JLI,K];
TGN[I,K] := TG[I,JLI,K];
End;
End;
FOR I := 1 TO 3 DO
Begin
JLI := JL[I];
FOR J := 2 TO JLI DO
Begin
FOR K := 1 TO N Do
Begin
TG[I,JLI-J+2,K]:=TG[I,JLI-J+1,K];
U[I,JLI-J+2,K]:=U[I,JLI-J+1,K];
End;
End;
End;
FOR K := 1 TO N DO
Begin
JLI:=JL[3];
UMED:=EST[JLI,6,3];UMED:=UMED/(100-UMED);
U[1,1,K] := UMED; TG[1,1,K] := EST[JLI,3,3];
U[2,1,K] := UN[1,K]; TG[2,1,K] := TGN[1,K];
U[3,1,K] := UN[2,K]; TG[3,1,K] := TGN[2,K];
End;
JLI3 := JL[3];

```

```

IF (TIMP >= (DIMP-0.5*DELTT)) THEN
BEGIN
  WRITELN;
  WRITELN;
  WRITELN(' R E S U L T A D O S      P A R C I A I S ' ) ;
  GARIMP[2] := GAR[2]+GAR[3]*PER[3]/100*Y[3]/Y[2];
  GRIMP[1] := GAR[1]+GAR[2]*PER[2]/100*Y[2]/Y[1];
  GARIMP[3] := GAR[3];
  POR IEST:= 1 TO 3 DO
  BEGIN
    WRITELN;
    WRITELN('CONDICOES DE SECAGEM DO ESTAGIO #',IEST:1);
    WRITELN;
    IF GAR[IEST] > 0 THEN
    BEGIN
      WRITELN('TEMPERATURA DO AR (.C)');
      WRITELN('..... : ',TSEC[IEST]:9:4);
      WRITELN('RAZAO DE MISTURA DO AR (KG/KG)');
      WRITELN('..... : ',RUSEC[IEST]:9:4);
      WRITELN('FLUXO DE AR RESULTANTE');
      WRITELN('(M3/MIN/M2) : ',GARIMP[IEST]:9:4);
      WRITELN;
      WRITELN('posicao umidade do grao(%)' );
      WRITE ('      temperatura do grao(C)');
      WRITELN('      (m)   min. med. max. ');
      WRITE ('      min. med. max. ');
      WRITELN('      condicoes ar exautao');
      WRITELN('      T( C )   UR( % )');
      JLI:=JL[IEST];
      FOR I:=1 TO JLI DO
      BEGIN
        YYI:=EST[I,1,IEST]*GPO/PHECT
        WRITELN(YYI:6:2,EST[I,7,IEST]:8:2,
        EST[I,6,IEST]:7:2,EST[I,5,IEST]:7:2,
        EST[I,4,IEST]:8:2,EST[I,3,IEST]:8:2,
        EST[I,2,IEST]:8:2,EST[I,8,IEST]:10:2,
        EST[I,9,IEST]:9:2);
      END;
    END;
  IF GAR[IEST] = 0 THEN
  BEGIN
    WRITELN('FLUXO DE AR RESULTANTE');
    WRITELN('(M3/MIN/M2) : ',GAR[IEST]:9:4);
    WRITELN;
    WRITELN('posicao umidade do grao(%)' );
    WRITE ('      temperatura do grao(C)');
    WRITELN('      (m)   min. med. max. ');
    WRITE ('      min. med. max. ');
    JLI:=JL[IEST];
    FOR I:=1 TO JLI DO
    BEGIN
      YYI:=EST[I,1,IEST]*GPO/PHECTO;
      WRITELN(YYI:6:2,EST[I,7,IEST]:8:2,
      EST[I,6,IEST]:7:2,EST[I,5,IEST]:7:2,
      EST[I,4,IEST]:8:2,EST[I,3,IEST]:8:2,
      EST[I,2,IEST]:8:2);
    END;
  END;

```

```

    END;
  END;
  JLI:=JL[3];
  WRITELN;
  WRITELN('NUMERO DE ITERACOES REALIZADAS');
  WRITELN('..... : ',IREPET:9);
  WRITELN('TEMPO DE SECAGEM (H)');
  WRITELN('..... : ',TSECAGEM:5:2);
  WRITELN('TEOR DE UMIDADE FINAL (% B.U.)');
  WRITELN('..... : ',EST[JLI,6,3]:9:4);
  WRITELN('TEMPERATURA FINAL DO PRODUTO (.C)');
  WRITELN('..... : ',EST[JLI,3,3]:9:4);
  TIMP:=TIMP-DIMP;
  END;
  UULT:=UFATUAL;
  UFATUAL:=EST[JLI3,6,3];
End;
umed:=0; icontador:=0;
FOR I := 1 TO 3 DO
Begin
  FOR K := 1 TO N DO
  Begin
    JLI := JL[I];
    for m:=1 to jli do
    begin
      icontador:=icontador+1;
      umed:=umed+u[i,m,k];
    end;
  End;
End;
umed:=umed/icontador;   umed:=umed*100/(1+umed);
EIN := (GAR[1]*(TSEC1-TAMB)*Y[1]+GAR[2]*(TSEC[2]-TAMB)*Y[2]+
GAR[3]*(TSEC3-TAMB)*Y[3])*60.29*TSECAGEM/VESP(TAMB,RUAMB);
WOUT :=(Y[1]+Y[2]+Y[3])*XTOTAL*PHECTO*(UIO-umed)/(100-umed);
CEE := EIN / WOUT;
GAR[2] := GAR[2] + GAR[3] * PER[3] / 100 * Y[3] / Y[2];
GAR[1] := GAR[1] + GAR[2] * PER[2] / 100 * Y[2] / Y[1];
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN('                R E S U L T A D O S                F I N A I S');
FOR IEST:= 1 TO 3 DO
BEGIN
  WRITELN;WRITELN;WRITELN;
  WRITELN('CONDICOES DE SECAGEM DO ESTAGIO #',IEST:1);
  WRITELN;WRITELN;
  IF GAR[IEST] > 0 THEN
  BEGIN
    WRITELN('TEMPERATURA DO AR (.C)');
    WRITELN('..... : ',TSEC[IEST]:9:4);
    WRITELN('RAZAO DE MISTURA DO AR (KG/KG)');
    WRITELN('..... : ',RUSEC[IEST]:9:4);
    WRITELN('FLUXO DE AR RESULTANTE (M3/MIN/M2)');
    WRITELN('..... : ',GAR[IEST]:9:4);
    WRITELN;
    WRITELN('posicao   umidade do grao(%)');
    WRITE ('      temperatura do grao(C)');
    WRITELN('      (m)   min.   med.   max. ');
  END;
END;

```

```

WRITE ( '          min.    med.    max.  ');
WRITELN( 'condicoes ar exautao');
WRITELN( 'T( C )    UR( % )');
JLI:=JL[IEST];
FOR I:=1 TO JLI DO
BEGIN
  YYI:=EST[I,1,IEST]*GPO/PHECTO;
  WRITELN(YYI:6:2,EST[I,7,IEST]:8:2,EST[I,6,IEST]:7:2,
          EST[I,5,IEST]:7:2,EST[I,4,IEST]:8:2,
          EST[I,3,IEST]:8:2,EST[I,2,IEST]:8:2,EST[I,8,
          IEST]:10:2,EST[I,9,IEST]:9:2);
  END;
END;
IF GAR[IEST] = 0 THEN
BEGIN
  WRITELN( 'FLUXO DE AR RESULTANTE (M3/MIN/M2)');
  WRITELN( ' ..... : ',GAR[IEST]:9:4);
  WRITELN;
  WRITELN( 'posicao    umidade do grao(%)');
  WRITE ( -      temperatura do grao(C)');
  WRITELN( '    (m)    min.    med.    max. ');
  WRITE ( '      min.    med.    max. ');
  JLI:=JL[IEST];
  FOR I:=1 TO JLI DO
  BEGIN
    YYI:=EST[I,1,IEST]*GPO/PHECTO;
    WRITELN(YYI:6:2,EST[I,7,IEST]:8:2,EST[I,6,
    IEST]:7:2,EST[I,5,IEST]:7:2,EST[I,4,IEST]:8:2,
    EST[I,3,IEST]:8:2,EST[I,2,IEST]:8:2);
    END;
  END;
END;
JLI:=JL[3];
WRITELN;WRITELN;WRITELN;
WRITELN( 'NUMERO DE ITERACOES REALIZADAS');
WRITELN( ' ..... : ',IREPET:9);
WRITELN( 'TEMPO TOTAL DE SECAGEM (H)');
WRITELN( ' ..... : ',TSECAGEM:6:2);
WRITELN( 'TEOR DE UMIDADE FINAL (% B.U.)');
WRITELN( ' ..... : ',EST[JLI,6,3]:9:4);
WRITELN( 'TEMPERATURA FINAL DO PRODUTO (.C)');
WRITELN( ' ..... : ',EST[JLI,3,3]:9:4);
WRITELN( 'CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGIA (KJ/KG)');
WRITELN( ' ..... : ',CEE:9:4);
END.

```

APENDICE B

QUADRO 1B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 1

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:00	19.3	17	18.5	18	19.3	16.6	17.5	73	26.8	383.3
8:05	19.5	34.7	21.2	21.5	18.6	16.9	17.5			
8:10	24.4	42.8	35.3	23.9	23.7	17.8	18.3			
8:15	24.5	46	39.2	23.9	23	26.3	18.2			
8:20	25.8	48.8	42	27.7	26.3	27.2	17.5			
8:25	26.3	55.1	44.6	28.8	25	31.9	17.8			
8:30	27.8	61	50.5	32.9	26.6	34.4	17.9			
9:00	31.5	59.3	56.3	40.7	31.3	39.6	19	68	24.7	384.8
10:00	34.1	59.9	58.8	45.3	33.8	41.2	19.1	66	23.9	403.7
11:00	36.2	61	58.5	46.5	35.8	42.4	21.4	59	21.6	414.5
12:00	40.4	60.2	61	51.4	37.2	46.2	21.6	58	21.1	419.4
13:00	41.1	61.1	60.2	54	38.2	50.5	22.4	60	19	416
14:00	42.7	60.5	63.2	55	40.6	51.3	24.7	65	18.1	413.7
15:00	42	60.4	64	53.4	39.9	48.8	23.7	66	17	412
16:00	40.1	61	55.2	48.1	39.9	48	23	60	16	411.9
17:00	39.2	60.4	52.8	47.5	37.1	46.5	21.4	67	15.5	403.1
18:00	39.1	62.7	53.2	46.5	36.2	47.4	19	72	15.2	402.8
18:35	39.5	60.2	53.2	45.5	38.4	45.5	18.4	74	15	399.2

QUADRO 2B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 2

HORA (H)	T E M P E R A T U R A S							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
7:45	16.6	23.8	20.4	16.9	16.8	14.7	14.8	89	27.2	389.9
7:50	21.7	40.5	29.8	20.6	19.3	15.4	15.7			
7:55	25.6	55.2	40.2	24.8	21.3	20.6	15.6			
8:00	26.9	61.2	45.1	28.1	21.7	26	15.9			
8:30	29.1	61	48.3	33.4	25.6	34	15.6	84	26.9	390.5
9:30	30.3	60.4	51.7	37.9	29.5	37.6	16.9	70	24.1	411.5
10:30	33	60.6	52.2	40.6	32.5	37.5	20.1	64	23.8	423.3
11:30	36.6	60.2	58.8	45.1	36.1	41.2	24.1	59	22.3	429.4
12:30	38	60	60.9	46.5	37.2	43.3	25.2	56	21.8	425.7
13:30	39.7	60.9	60.6	46.9	36.5	43.2	25.8	54	20.9	422.4
14:30	40.8	60	60.6	50.5	40.9	43.6	22.9	58	18.9	417.3
15:30	40.6	59.8	61.8	50.7	40.3	43.9	21.4	66	18.7	418.5
16:30	41	60	59.9	50.4	41.2	45	22.2	70	17.6	412.5
17:30	39.5	59.8	53.7	46.4	38.8	42.7	22	73	16.7	411.8
18:30	39.1	60.1	57.9	47.5	38.4	42.2	20.2	73	16.3	407.6
19:30	38.5	60.8	54.4	46.3	38	41.6	18	78	16	409
20:00	38.1	60.9	53.7	45.6	37.6	41.6	17.7	81	15.1	408.5

QUADRO 3B - Horário de Tomada de Dados. Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 3

HORA (H)	T E M P E R A T U R A S							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
7:45	19.3	19.4	20	19.7	19	18.4	16.8	88	26.2	404.7
7:50	22.2	38.2	29.1	22.1	21.9	18.7	17.1			
7:55	24	46.8	35.6	24.7	22.6	23.5	16.6			
8:00	24	51.6	39.4	27.3	23.2	30.1	16.2			
8:05	27.3	57.5	43.3	29.7	25.2	32.3	16.4			
8:10	26.2	60	45.6	31.1	27.3	34.6	16.6			
8:30	28.4	61	48.7	37.4	29.5	41	11			
9:00	30.9	60.2	46.6	38.1	31.5	40.9	17.3	21	24.6	403.9
10:00	32.9	57.4	49.4	39.8	32.7	40.1	18.2	82	23.9	424.5
11:00	33.6	60.8	58.2	46.8	32.2	45.5	20	74	22.5	435.5
12:00	36.2	60.4	53.3	45.7	36	42.9	20	73	22.4	433
13:00	36.4	60.1	47.1	44	36.5	43.6	21.6	68	20.2	437.5
14:00	38.4	60.7	54.1	46.2	39.6	44.2	23.8	70	19.9	437.6
15:00	37.7	60.6	53.2	45.6	37.6	43.2	22.4	75	20.1	441.7
16:00	37.7	60.9	51.6	44.4	36.6	42.7	17.8	74	19.1	427.4
17:00	37.8	59.9	51.9	45	35.6	42.2	18.8	78	18.2	425.2
18:00	38.2	60.4	55.6	46.8	36.5	41.4	17.2	88	17.7	421
19:00	38.4	60.2	55.1	47.3	36.2	42.6	16.7	a4	16.9	415
20:00	37.4	60.2	52.6	45.5	35.5	42.4	15	86	16.6	411
20:30	37	52	49.1	45	33.2	41	15	87	16.3	412.5

QUADRO 4B - Horário de Turnada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 4

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (X b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	14	T5	tb	Ta			
7:45	10.6	11.7	11.8	13.4	9.6	11.7	10.5	84	28.1	419.8
7:50	14	28.5	21.6	15.7	13.4	12.3	9.7			
7:55	18.8	44	32.1	19.2	16.3	18.4	10.5			
8:00	19.9	50	37	22.5	17.2	22.3	11			
8:05	22.1	56.4	41.4	24.9	19.3	25	11.5			
8:10	23.7	61.5	45.2	27.6	21.5	28.1	11.5			
8:30	24.3	62	46.2	30.6	23.5	31.2	11.5			
9:00	25	60	48.3	32.9	24.2	31.9	12.8	79	26.8	420.2
10:00	28.7	60.8	48.6	38	29.2	35.6	17.5	73	24.8	434.2
11:00	31.5	60.3	47.1	38.6	31.1	36.2	19.2	65	23.7	456.5
12:00	34.5	60.8	52.8	43.5	34.7	39.6	20.9	61	22.9	452.1
13:00	36.7	60.6	56.2	46.3	37.6	43.3	23.7	56	21.8	453.2
14:00	39.8	59.5	58.2	50	40.7	45.5	23.4	55	19.6	446.1
15:00	39.5	59.8	59.5	50.3	41	46.7	23.1	53	19	441.3
16:00	40.2	60.3	61.9	52.4	41.7	45.8	24.3	56	19.1	435.5
17:00	41.4	60.4	61.2	51.6	40.3	44.5	21.2	61	17.6	432.9
18:00	38.6	61	58.1	48.6	37.7	41.7	19.8	70	16.6	437.2
19:00	37.6	59.7	55.6	47	36.6	40.5	16.2	72	15.8	430.3
20:00	36.6	59.5	51.3	44.5	35.6	41.2	15.2	77	15.6	427.1
20:35	36.2	50.1	48.2	43.9	34.7	40.8	15	81	15.3	422.2

QUADRO 5B - Horário de Tornado de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 5

HORA (H)	T E M P E R A T U R A S							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:45	15.5	17.9	17.4	15.2	15.8	14.2	14.2	79	26.3	386.4
8:50	22.4	46.8	34.3	21.8	20.9	14.3	14.6			
8:55	25.5	54.3	41.1	24.5	20.6	17.6	14.5			
9:00	26	63.7	47.3	29.1	21.6	30.7	14.7			
9:05	26.7	69.7	51.5	32.2	23.4	34.1	15			
9:10	27.3	73.6	53.4	34.9	26.2	37.2	15.1			
9:30	30.3	74.5	54.4	39.4	29.9	41.1	16.7	73	25	386.8
10:15	33.5	75	60.9	44.6	33.8	42.2	18.8	68	24.1	403.8
11:00	37.4	75.8	61.3	48.8	36.7	47.6	20.7	62	22.7	421.8
11:45	39.2	75.1	63.4	50.8	38.1	47.6	22.4	54	21	425.1
12:30	41.9	76.3	70	55.5	40.8	51.3	24	48	17.9	420
13:15	44.2	75.8	78	60.2	43.7	53.8	24.9	48	17.2	412.4
14:00	46.3	74.9	77.7	60.5	44.6	52.9	25.4	47	16.7	408.9
14:45	46.4	74.5	75.4	58.9	47.4	56.2	25.5	48	15.5	408.9
15:30	49.8	75.2	81.7	66.6	49	56.5	22.2	57	15.6	408
16:15	49.7	75.4	77.6	64.7	48.8	55.4	22.2	67	14.2	402.3
16:46	49.7	69.4	67.4	64.7	48.1	53.9	20.5	73	13.7	408.9

QUADRO 6B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 6

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Unidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:45	15.7	31.8	22.3	14.2	14.9	13.5	14.8	86	28.1	389.4
8:50	19.2	44.1	29.9	17.6	16.3	13.7	15.1			
8:55	25.5	62.2	44.4	24.4	23.1	15.4	15.2			
9:00	29.1	76.5	55.9	28.7	24.9	24.4	15.5			
9:15	30.5	75.2	57.8	37.4	25.7	40.9	16			
9:30	31.8	76.1	61.8	40.1	29.8	41.3	17.6	63	26.7	404.5
10:15	34.4	75.5	67.6	46.5	34.2	44.4	18.7	57	24.9	415.8
11:00	38.2	75	65.1	49.9	37.2	44.9	20.6	54	24.2	433.4
11:45	39.6	75.9	70.1	53.4	39.5	47.2	21.1	53	22	428.1
12:30	42.4	74.9	71.6	54.7	41.5	49.4	23	52	20.5	422.7
13:15	43.7	74.5	73.8	55.9	43.9	49.8	23.3	48	19.9	423.9
14:00	47.3	75.7	79.9	62.4	47.7	54.1	25.4	47	17.9	414.5
14:45	46.1	75.1	71.5	64.7	49.4	54.2	28.8	47	17.3	411.1
15:30	46.2	75	64.5	55.5	46.6	54.2	25	50	16.8	414
16:15	47.4	76.2	68.6	58.1	47.4	54.4	22.3	59	16.5	406.5
17:00	45.7	75.5	64.8	55.1	43.8	51.8	19.6	73	16.3	410.2
17:20	43.8	67.8	54.4	53	42.7	49.6	19	74	16.1	408.5

QUADRO 78 - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador. Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 7

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:55	17.3	22.9	20.8	17.7	18.4	16.6	16.2	82	31.8	431.8
9:00	22.8	46.9	34.2	20.9	21.6	17.8	16.5			
9:05	26.7	58.9	44.2	27	22.9	23.8	16.3			
9:10	28.9	68.5	50.6	30.4	25	27.6	16.8			
9:15	29.5	75.6	54.6	32.5	26.6	32.3	16.8			
10:00	31.3	75.3	57.6	38.8	29.4	40.4	17.8	78	27.7	433
10:45	32.8	74.7	58	43.2	32.7	40.4	18.6	74	27	450.3
11:30	35.3	74.8	61.2	46.1	35.4	40.8	19	69	26.1	464.8
12:15	38.3	76.4	62.9	49.2	38.4	43.4	21.9	60	24.8	460.6
13:00	39.8	74.4	64.4	50	39.2	45	21.8	56	23.6	454
13:45	41.5	75	67.3	53.1	42.2	45.8	22.7	56	21.3	455
14:30	42.5	75.5	69	54.8	42.5	47.7	21	64	21	448.6
15:15	44.1	75.1	76	59.4	44.8	50.3	23.3	71	20.8	440.8
16:00	44.8	75.4	74.5	59.5	45.5	49.8	19.8	74	19	433.8
16:45	45.2	74.7	73.2	59.3	45.1	50.7	19	76	19.2	428.8
17:30	44.5	74.9	69.5	56.8	44.3	48.5	18.7	82	16.8	430.3
17:50	43.1	68.2	52	53.4	44	45.3	18.5	82	16.4	427.5

QUADRO 83 - Horário de Tornado de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 8

HORA (H)	T E M P E R A T U R A S							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:45	18.9	17.9	19.7	18.9	18	17.5	18.5	73	30.3	421.2
8:50	21.9	44.4	33.6	19.6	21.2	17.9	18.7			
8:55	26.1	56.9	44	24.2	22	21	19.2			
9:00	30.9	71	54.7	30.9	25.3	26.2	19			
9:05	32.2	75.5	57.9	32.9	24.8	30.4	19.2			
9:15	30.5	74.6	56	35.5	28.4	35.4	19.6			
9:45	31.1	75	57.9	37.8	30	38.4	20.8	66	29.6	416.8
10:30	33.2	76.6	58.2	40.3	32.8	38.8	21.7	64	27.6	426.5
11:15	33.9	75.9	60.5	46	33.6	45.5	21.4	61	25.9	439
12:00	36.9	75.1	61.6	48.1	36.8	45.2	22.2	58	25.2	452.1
12:45	39.6	74.9	64.2	51.8	39.8	50.3	22.7	55	24.2	453.6
13:30	42.6	75.6	65.1	54.5	43.3	54.4	24.9	55	22.2	451.6
14:15	44.6	76.1	66.6	56.6	45.2	55.8	25.3	50	20.3	439.5
15:00	45.2	75.9	66.9	57.6	46.2	56	27.2	49	18.4	437.9
15:45	45.3	76.2	72.2	60.8	45.9	55.8	26.2	50	18.1	430.2
16:30	48.2	75.2	73.4	62.5	47	57.9	22.9	59	16.2	428.5
17:15	47.6	76.1	70	60.1	45.4	53.7	21.3	71	16.2	424.2
18:00	46.2	75.3	71.2	58.7	43.9	52.8	19.4	70	15.6	418
18:45	45.5	75.8	67.4	57.5	44	51.3	17.9	73	14.2	417.2

QUADRO 9B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos da Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 9

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Unidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
9:00	20.3	41.6	30.0	22.7	23.4	18.3	17.2	81.0	28.9	384.3
9:05	26.6	55.0	37.2	28.1	24.6	18.2	18.0			
9:10	28.0	68.4	44.4	30.8	25.0	30.5	19.2			
9:15	29.1	77.1	49.3	32.8	26.5	35.1	18.6			
9:20	31.2	83.5	52.0	34.7	28.6	37.9	18.6			
9:25	32.4	90.3	56.2	37.3	30.2	41.1	18.9			
9:30	33.1	90.1	57.3	39.3	30.2	44.2	19.5	80.0	27.0	388.0
10:00	35.6	90.7	67.2	44.4	33.8	50.1	20.3	76.0	24.5	394.2
10:30	36.7	89.0	67.8	48.7	36.7	50.3	19.6	75.0	22.0	396.1
11:00	39.4	89.9	72.5	52.6	40.3	51.8	20.6	68.0	21.8	421.1
11:30	42.0	89.8	73.1	55.5	40.7	53.8	21.3	70.0	20.8	414.4
12:00	43.6	90.2	78.3	57.7	43.8	55.8	22.0	67.0	17.2	411.2
12:30	46.0	90.0	81.3	62.9	46.5	60.2	23.2	62.0	18.5	416.3
13:00	47.7	90.0	80.8	63.6	48.7	61.4	24.9	61.0	15.3	414.1
13:30	49.6	89.8	82.6	66.0	49.8	61.4	24.3	60.0	16.3	411.2
14:00	50.0	90.5	82.0	65.8	50.7	60.1	23.6	58.0	15.3	410.1
14:30	51.9	90.3	81.6	66.9	51.0	61.6	25.7	59.0	14.8	408.7
15:00	50.7	89.5	86.1	68.4	51.4	63.5	25.0	56.0	14.5	402.3
15:30	52.8	90.2	85.6	69.1	53.4	64.0	24.5	57.0	13.9	395.2
16:00	52.9	89.9	78.9	67.8	54.0	63.3	22.3	68.0	13.4	393.1

QUADRO 10B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa da Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 10

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
9:00	16.2	31	22.6	14.8	16.3	12.1	14.5	79	27.8	384.5
9:05	21.5	49.4	36.5	19.6	19.3	15.6	14.5			
9:10	23.4	57.6	43.6	24.6	20.8	24.3	14.8			
9:15	24.7	64	48.9	29.9	23.2	32.3	16.4			
9:20	26.2	68.5	52.4	33.2	24.4	34.8	16.7			
9:25	27.5	72.5	55.5	35.9	25.7	36.4	16.8			
9:30	28	74.2	56.9	37.8	26.5	38.7	16.9	73	25.8	392.3
10:00	33.5	89.3	63.2	43.9	33.3	44.2	18.5	70	25.3	407.2
10:30	36.9	90.5	71.2	48.5	36.1	45.9	18.9	67	23.9	413.3
11:00	38.5	90.4	69.1	50.7	39.8	47.8	19.8	61	21.6	418.2
11:30	41.5	88.4	73.2	55.6	41.8	49.4	21.5	60	20	423.9
12:00	43.4	90	74.3	57.4	43.1	56	23	58	20.6	427.5
12:30	44.5	91.6	75.6	60.8	42.6	61.2	25.2	55	18.5	413
13:00	47.8	90.8	75.8	60.3	44.9	61.7	26.3	53	18.1	413.3
13:30	48	89.2	71.5	60.5	45.4	62.4	26.2	50	17.6	410.7
14:00	51.8	91.1	79.7	65.3	46.2	64.6	26.7	47	15.1	412.9
14:30	53.9	89.4	78.7	66.3	49.4	63.4	26.5	52	14.1	402.3
15:00	53.8	90.8	79.4	65.4	50.6	64	23	60	13.7	405.1
15:30	52.4	89.9	81.5	66.9	50.1	64.6	22.2	67	13.5	400.1
15:43	49.9	74	65.8	66.4	----	59.5	21.5	67	13.1	401.3

QUADRO 11B - Horário de Tomada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Hídrico e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 11

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
8:55	18.1	25.3	23.9	19.3	19.6	20.4	17.3	83.0	27.6	410.2
9:00	23.4	50.3	36.6	22.5	22.5	20.2	18.0			
9:05	26.1	59.4	44.5	26.5	24.2	23.9	17.3			
9:10	28.1	69.6	51.5	31.0	25.3	32.7	17.9			
9:15	29.4	76.8	56.7	35.1	26.7	39.3	18.3			
9:20	30.6	82.6	60.8	38.2	30.0	42.2	18.9			
9:25	31.7	85.1	62.8	40.1	31.4	44.1	19.0			
9:30	32.3	88.4	65.3	42.7	31.8	46.3	19.2			
10:00	36.9	89.9	67.1	47.4	36.8	51.7	19.4	76.0	24.6	404.2
10:30	38.0	90.3	70.2	49.3	37.9	50.2	18.9	68.0	21.9	413.0
11:00	39.5	89.5	65.8	50.0	39.9	49.9	18.4	67.0	21.2	420.0
11:30	41.2	90.3	70.7	53.3	40.9	49.4	20.0	67.0	20.3	423.3
12:00	43.2	90.0	73.1	55.6	42.7	51.0	19.9	60.0	19.3	423.3
12:30	44.8	90.3	71.5	56.1	46.5	52.5	22.8	58.0	19.3	429.6
13:00	47.0	90.3	75.3	59.5	47.4	55.2	23.2	56.0	17.9	424.8
13:30	48.3	90.5	75.1	60.5	48.5	57.2	25.0	56.0	16.2	413.6
14:00	49.8	91.3	78.7	62.6	49.9	56.4	24.8	58.0	16.6	412.8
14:30	50.9	90.4	76.4	63.5	50.5	58.6	25.1	67.0	15.2	415.2
15:00	51.0	89.8	79.5	64.0	50.8	57.0	23.3	69.0	14.9	409.0
15:30	50.5	89.9	73.9	61.2	50.0	56.0	21.8	71.0	15.6	407.5
15:45	49.6	79.7	61.7	59.8	49.7	53.9	20.6	72.0	15.4	407.3

QUADRO 12B - Horário de Tornada de Dados, Temperaturas nos Diversos Pontos do Secador, Temperatura e Umidade Relativa do Ar Ambiente, Teores de Umidade e Massas Específicas dos Grãos para as Condições do Teste 12

HORA (H)	TEMPERATURAS							UR (%)	Umidade (% b.u.)	PH (kg/m ³)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Ta			
11:00	25.7	21.8	25	24.6	21.4	22.1	21.5	59	26.3	405.7
11:05	25.2	49.3	37.8	23.7	22.9	24.2	21			
11:10	26.7	61.2	46.6	28.9	24.9	31.8	22.2			
11:15	28.3	74.6	55	33.8	27.2	37.8	21.9			
11:20	29	82	59.9	37.6	29.4	42.6	22.7			
11:25	30.7	89.6	64.7	41	31.8	43.9	21.4			
11:30	32.5	90.7	66.1	45.1	33.6	48.2	22	56	26	409.3
12:00	37.1	90.7	71.7	48.6	36.1	48.1	21.5	56	24.6	425
12:30	40.4	89.3	70.9	55.6	38.3	58.4	23.4	54	22.2	434
13:00	40.8	90.3	69.8	54.7	39.9	57.5	23.3	55	20.1	435.7
13:30	41.8	89.7	68.9	54.6	41.2	56.9	23.6	59	21.4	431.2
14:00	44.3	90.2	71.6	58.8	42.7	58.7	23.7	59	19.7	432.9
14:30	47.3	90.9	75.3	61.1	44.9	57.8	23.1	59	18.1	429.6
15:00	48	90.8	75.1	61.1	46.7	59.9	22.8	56	17.7	429
15:30	48.2	90.3	75.6	61.6	44.7	60.3	20.5	57	15.6	422.3
16:00	50.4	90.1	76.9	64.6	50.1	63.1	21.2	59	14.8	422.6
16:30	50.4	89.7	76.8	64.7	49.8	63.6	21	60	14.4	422.9
17:00	51.6	90.5	74.2	64	49.1	60.9	22	64	13.9	413.3