

FRANCISCO DE ASSIS DE CARVALHO PINTO

PROJETO DE UM SECADOR DE FLUXOS
CONTRACORRENTES/CONCORRENTES E ANALISE DE SEU DESEMPENHO
NA 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
JULHO - 1993

*A vocês, que me ensinaram a Amar,
dedico este trabalho:
Meus pais, Domingos e Solange,
Minha esposa, Alessandra,
Minha filha, Maria Clara.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela paz, fé e vida.

Aos meus pais, Domingos e Solange, pelo exemplo de vida.

À minha esposa, Alessandra Aparecida Gouveia Martino, pela paciência, compreensão e carinho.

À Universidade Federal de Viçosa, à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e ao grupo A Mundial, pela oportunidade de realizar este curso e pelo suporte financeiro que possibilitou a concretização deste trabalho.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva, pela amizade, orientação e participação ativa e direta neste trabalho.

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela amizade e colaboração.

Ao professor José Helvecio Martins, pelos conselhos apresentados.

Ao funcionário do CENTREINAR, Francisco Carlos Alves Neto, pelo auxílio prestado na construção do secador.

Ao funcionário do DEA, Lamantino Pinto de Miranda, pela construção da fornalha.

Ao Engenheiro Agrícola, Cristiano Egnaldo Zinato, pela colaboração na obtenção dos dados.

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Santo Antônio, pela colaboração durante a montagem e execução do experimento.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

FRANCISCO DE ASSIS DE CARVALHO PINTO, filho de Domingos Sávio Guedes Pinto e Solange de Carvalho Pinto, nasceu na cidade do Rio de Janeiro, Estado do Rio de Janeiro, no dia 4 de julho de 1964.

Em agosto de 1990, graduou-se em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal de Viçosa.

Em setembro de 1990, ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Em abril de 1992, foi contratado como professor auxiliar do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em dezembro de 1992, submeteu-se à defesa de tese, logrando aprovação.

1.1.1. Temperaturas e Umidades Relativas do Ar de	
Exsustão	31
1.2. Teor da Umidade e Massa Específica do Pro-	
duto	31
1.3. Energia	35
1.4. Simulação de Secagem	36
1.5. Análise do Secador	42
2. RESULTADOS E CONCLUSÕES	47

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Secagem	4
2.2. Secadores de Fluxos Contracorrentes	5
2.3. Secadores de Fluxos Concorrentes	7
2.4. Avaliação de Secadores	9
2.5. Simulação de Secagem	10
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Protótipo	13
3.2. Avaliação de Desempenho do Secador	14
3.3. Simulação de Secagem	18
3.4. Consumo de Energia	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Temperaturas e Umidades Relativas	23
4.1.1. Temperatura do Ar de Secagem	23
4.1.2. Temperatura do Ar nos Pontos A e B	26

4.1.3. Temperaturas e Umidades Relativas do Ar de Exaustão	31
4.2. Teor de Umidade e Massa Específica do Pro- duto	31
4.3. Energia	35
4.4. Simulação de Secagem	36
4.5. Análise do Secador	43
5. RESUMO E CONCLUSÕES	47
BIBLIOGRAFIA	49
APÊNDICES	53

Universidade de Viçosa, julho de 1993. Projeto de um Secador
destinado à Secagem de Café (*Coffea arabica* L.).
Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Professores
Assessores: Daniel Marçal de Queiroz e José Helvécio
Santos.

Com a finalidade de possibilitar a utilização de dois
tipos de secadores e reduzir o uso de energia em
ambos os processos, foi projetado, construído e
operado um protótipo de secador intermitente de fluxo
contínuo, destinado à secagem de café.

Este protótipo de secador foi implementado
utilizando-se recursos computacionais para simular o processo de secagem,
baseado no modelo proposto por THOMPSON et alii (1968).

O café foi previamente seco até o estágio de moia seca
em um forno de secagem de leito fixo. A complementação
da secagem foi realizada com o protótipo de secador
desenvolvido, utilizando-se temperaturas de secagem de 100 e

EXTRATO

PINTO, Francisco de Assis de Carvalho, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1993. Projeto de um Secador de Fluxos Contracorrentes/Concorrentes e Análise de Seu Desempenho na Secagem de Café (Coffea arabica L.). Professor Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Professores Conselheiros: Daniel Marçal de Queiroz e José Helvecio Martins.

Com a finalidade de introduzir a utilização de dois sistemas de secagem em um único secador e reduzir o uso de energia na secagem de café, foi projetado, construído e avaliado um protótipo de secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes, destinado à secagem de café.

Para auxiliar na avaliação do secador, foi implementado um programa computacional para simular o processo de secagem, com base no modelo proposto por THOMPSON et alii (1968).

O café foi previamente seco até o estágio de meia seca (30% bu) em terreiro ou secador de leito fixo. A complementação da secagem foi executada com o protótipo de secador desenvolvido, utilizando-se temperaturas de secagem de 100 e

120 °C, vazão de ar de, aproximadamente, 46 m³.min⁻¹ e velocidade do produto de 0,024 m.min⁻¹.

As diferenças entre os resultados experimentais e os simulados pelo programa foram consideradas dentro dos limites aceitáveis e o programa foi validado; o que permitiu a obtenção dos seguintes resultados para redução do teor de umidade de 30 para 12% bu: consumo específico de energia de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ, por kg de água evaporada; capacidade de secagem de 200, 287 e 358 kg de café úmido por hora e tempos de secagem de 22,5, 15,7 e 12,6 h, para as temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C, respectivamente.

Considerando a pequena diferença entre os consumos específicos de energia para as temperaturas estudadas, recomenda-se a utilização da temperatura de secagem de 80 °C para a operação do secador.

1. INTRODUÇÃO

A produção anual média de café beneficiado no Brasil, na década de 80, foi da ordem de 24,2 milhões de sacas, sendo 31% desse total destinados ao consumo interno e 69% destinados às exportações. Entretanto, a baixa qualidade do café do Brasil e o alto custo de produção têm limitado sua competição no mercado internacional; principalmente após a extinção do Acordo Internacional do Café, em 1989, que garantia ao País uma quota de 30 % do mercado mundial (CAIXETA, 1989).

Um dos parâmetros que influencia o custo da produção do café é o gasto com energia, principalmente, na etapa de secagem do produto, já que, nesta fase, esse gasto pode superar a 50% do total de energia consumida em todo o processo produtivo (SILVA, 1980).

Quanto à qualidade, LACERDA FILHO (1986) afirma que a secagem é uma das mais importantes etapas no processamento de café, tanto no que diz respeito ao consumo de energia como na influência que essa operação tem sobre a qualidade final do produto.

A secagem de produtos agrícolas pode ocorrer naturalmente (na planta), ou artificialmente, por meio da movimentação forçada do ar de secagem (secadores), ou sem movimentação forçada de ar (terreiros).

A utilização de secadores apresenta diversas vantagens em relação a outros sistemas; porém, a construção de secadores energeticamente mais eficientes, que forneçam um produto final de boa qualidade, deve ser vista como um grande esforço tecnológico para aumentar a competitividade do café do Brasil no mercado internacional.

O café apresenta dificuldade de escoamento no interior do secador, principalmente, quando se encontra muito úmido, em virtude da eliminação da mucilagem existente entre o grão e a casca durante o processo de secagem. Essa característica limita a utilização de altas temperaturas na secagem de café em secadores de fluxos concorrentes. Nesses secadores, ocorrem elevadas taxas de evaporação de água do produto próximo à região de entrada do ar de secagem, quando o ar quente encontra o produto frio e úmido (SILVA et alii, 1992). Entretanto, esses secadores apresentam altas eficiências térmicas por utilizarem altas temperaturas. Em vista disso, supõe-se que a entrada na câmara de secagem de um produto menos úmido e mais quente minimizaria a dificuldade de escoamento, permitindo a utilização de temperaturas mais elevadas. Conjetura-se que isso possa ser alcançado com a utilização de uma câmara de secagem de fluxos contracorrentes antes da câmara de fluxos concorrentes.

De acordo com a literatura, não se conhece secadores que utilizem os dois tipos de sistemas de secagem do produto. Por outro lado, no desenvolvimento de um secador, além da construção de protótipos, fazem-se testes de campo, acompanhados por um programa computacional que simule a secagem no secador em estudo (BAKKER-ARKEMA et alii, 1978).

Em virtude dos problemas enumerados, este trabalho tem os seguintes objetivos:

- projetar um secador de fluxos contracorrentes/concorrentes e avaliar seu desempenho na secagem de café;

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

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Secagem

O processo mais utilizado para auxiliar a preservação de alimentos é a secagem, por ser de baixo custo e de simples operação, quando comparado com a refrigeração, o enlatamento, os tratamentos químicos e a irradiação.

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

Segundo HALL (1971), a secagem artificial oferece as seguintes vantagens:

- permite antecipar a colheita, reduzindo as perdas no campo;
- permite planejar o calendário de colheita, a fim de se poder usar o tempo mais racionalmente;
- o produto pode ser colhido quando as condições naturais de secagem forem desfavoráveis.

BROOKER et alii (1978) descrevem cinco tipos básicos de secadores, que são classificados quanto aos sentidos de

movimentação do ar e dos grãos: secadores de fluxos cruzados, secadores de fluxos concorrentes, secadores de fluxos contracorrentes, secadores de fluxos mistos (tipo cascata) e secadores de camada fixa.

Conforme BROOKER et alii (1978), os sistemas de secagem de grãos utilizados desde 1950 são mais evolutivos que revolucionários. Nesse sentido, esforços têm sido feitos para adaptar esses tipos de secadores à realidade sócio-econômica dos produtores brasileiros (CORDEIRO, 1982; OSÓRIO, 1982; SILVA e LACERDA FILHO, 1984; SABIONI, 1986 e SILVA, 1991).

2.2. Secadores de Fluxos Contracorrentes

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

Nos Estados Unidos da América do Norte, a secagem em fluxos contracorrentes é realizada em silos secadores (Figura 1). À medida que ocorre a secagem, o produto seco é conduzido para o centro do silo por um transportador helicoidal que varre toda sua seção transversal (SILVA, 1980).

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

Segundo Evans, citado por SILVA (1980), os secadores de fluxos contracorrentes são os menos eficientes no uso da

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

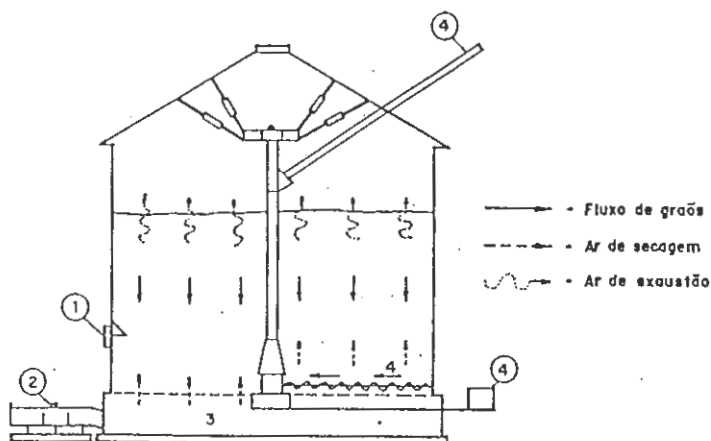


FIGURA 1 - Esquema de um Silo Secador em Fluxos Contracorrentes (SILVA, 1980).

energia do ar de secagem, pois parte da energia é utilizada para o aquecimento dos grãos, reduzindo-se a disponibilidade de energia para a realização da secagem. Entretanto, segundo BROOKER et alii (1978), se a espessura da camada de grãos for suficiente para absorver o potencial de secagem do ar, o consumo de energia, nesses secadores, torna-se relativamente baixo, podendo apresentar um consumo específico de energia entre 3.500 a 4.600 kJ, por kg de água evaporada.

SILVA (1991), com o objetivo de promover a adaptação da tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes à realidade brasileira, propôs um modelo de secador a ser utilizado na secagem de café. Na avaliação do modelo, o autor utilizou

temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C, tendo obtido um consumo específico de energia de 8.300, 7.547 e 6.442 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. Nesse trabalho, verificou-se que não houve efeito da temperatura sobre a qualidade da bebida do produto.

2.3. Secadores de Fluxos Concorrentes

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

As trocas intensas e simultâneas de energia e massa, na entrada do secador entre o ar e o produto, causam rápida redução da temperatura inicial do ar, assim como no teor de umidade do produto (Figura 2). Em razão disso, a temperatura do produto permanece consideravelmente abaixo da temperatura do ar (SILVA et alii, 1992).

BAKKER-ARKEMA et alii (1981), comparando a eficiência energética de secadores de fluxos cruzados e de fluxos concorrentes (de três estádios), na secagem de milho, concluíram que os secadores de fluxos concorrentes apresentavam uma eficiência energética 25% superior à dos fluxos cruzados, para as mesmas condições de secagem.

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

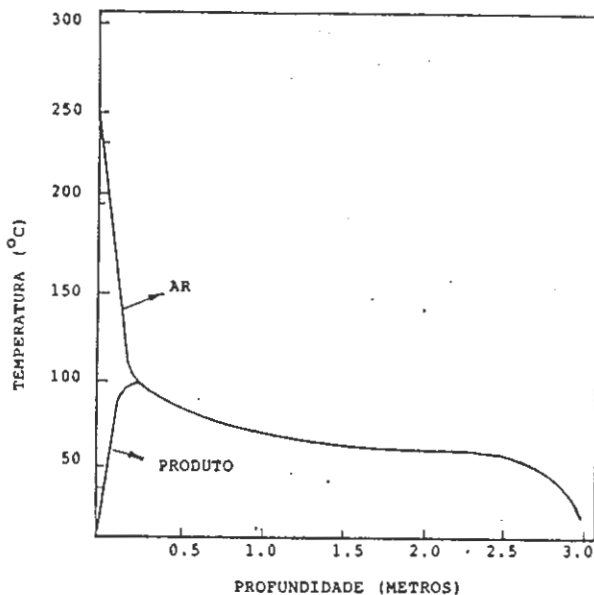


FIGURA 2 - Temperatura do Ar de Secagem em Função da Profundidade, em uma Passagem pela Câmara de Secagem de um Secador de Fluxos Concorrentes (SILVA et alii, 1992).

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

DALPASQUALE et alii (1979) estudaram a secagem de soja em secadores de fluxos concorrentes e de fluxos cruzados e concluíram que, em todos os testes realizados, o consumo específico de energia dos primeiros (entre 3.500 e 4.500 kJ por kg de água evaporada) foi em média 28,8% inferior ao valor encontrado para os últimos (5.620,3 kJ por kg de água evaporada).

LACERDA FILHO (1986), comparando diversos sistemas de secagem de café, verificou que a meia seca do produto,

realizada em secador de leito fixo, e a complementação da secagem, em secador de fluxos concorrentes, utilizando a temperatura de secagem de 90 °C, apresentou o menor consumo específico de energia. Com essa temperatura, não houve comprometimento da qualidade da bebida do produto.

Com o objetivo de atender a uma grande parcela de pequenos e médios produtores de café, OSÓRIO (1982) desenvolveu e analisou um secador intermitente de fluxos concorrentes, utilizando temperaturas de 80, 100 e 120 °C, tendo obtido valores de consumo específico médio de energia de aproximadamente 5.700, 4.870 e 4.760 kJ por kg de água evaporada, respectivamente, e não observou influência da temperatura na qualidade da bebida do produto.

2.4. Avaliação de Secadores

O desempenho de secadores varia de acordo com uma série de fatores como: teor de umidade inicial e final do produto, propriedades físicas do produto, temperatura de secagem, resistência oferecida ao fluxo de ar, condições ambientais (temperatura e umidade relativa), tipo de fonte de energia, sistema de carga e tipo de ventilador (SILVA et alii, 1992).

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

SABIONI (1986), entretanto, verificou que as condições padronizadas, nessa metodologia, não apresentam as condições da realidade brasileira.

OSÓRIO (1982) e SILVA (1991) adaptaram a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et alii (1978) para a avaliação do desempenho de secadores de café. Porém, tiveram dificuldades em fixar alguns parâmetros para a padronização dos testes, principalmente, os que dizem respeito ao produto, como teor de umidade inicial e homogeneização de maturação.

2.5. Simulação de Secagem

A utilização de modelos matemáticos para a simulação de secagem tem auxiliado muito no projeto, no desenvolvimento, na avaliação e otimização de secadores (QUEIROZ et alii, 1992).

THOMPSON et alii (1968) apresentaram um modelo para a simulação de secagem de milho em secadores contínuos. Esse modelo, considerado semi-empírico, simula o processo de secagem por meio de um conjunto de equações, baseadas nas leis de transferência de energia e massa e de uma equação empírica de secagem.

No modelo de Thompson, o processo de secagem é dividido em vários subprocessos. Assim, o leito de grãos passa a ser composto por várias camadas de espessura reduzida, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do produto, em cada camada, são calculadas com base em pequenos incrementos de tempo (QUEIROZ et alii, 1992). Essa troca de

energia e massa entre o produto e o ar está esquematizada na Figura 3.

Na simulação de secagem em secadores de fluxos contracorrentes e concorrentes, pelo modelo de THOMPSON et alii (1968), o ponto fundamental é a escolha do incremento de tempo, que deve ser igual à espessura da camada, dividida pela velocidade de deslocamento do grão no secador (QUEIROZ et alii, 1992).

Trabalhos de validação, realizados por QUEIROZ et alii (1981), FIOREZE (1982), SINÍCIO (1983), SABIONI (1986), MARTIN (1988) 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 as vantagens de ser de fácil solução, consumir pouco tempo de computação e apresentar solução mais estável, quando comparado com outros modelos mais complexos.

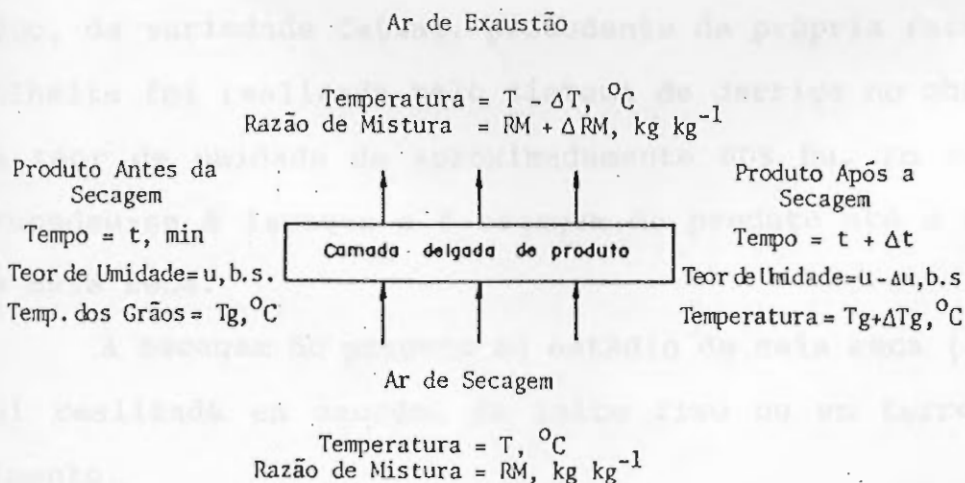


FIGURA 3 - Esquema das Variações que Ocorrem na Secagem de uma Camada Fina de Grãos, Durante um Intervalo de Tempo, Δt , Segundo Modelo de THOMPSON et alii (1968).

3.MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na Fazenda Santo Antônio, situada no município de Araponga, Minas Gerais, conforme convênio firmado entre a Universidade Federal de Viçosa, o grupo A Mundial, ambos de Viçosa, Minas Gerais, e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

O produto utilizado foi o café (*Coffea arabica* L.), em côco, da variedade Catuaí, procedente da própria fazenda. A colheita foi realizada pelo sistema de derriça no chão, com um teor de umidade de aproximadamente 60% bu. Em seguida, procedeu-se à lavagem e à secagem do produto até o estágio de meia seca.

A secagem do produto ao estágio de meia seca (30% bu) foi realizada em secador de leito fixo ou em terreiro de cimento.

Para complementação da secagem, foi utilizado um protótipo de secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes.

3.1. Protótipo

O secador projetado e construído tem uma seção transversal de $2,25 \text{ m}^2$, cujas vistas laterais estão ilustradas na Figura 4, e possui uma capacidade estática de, aproximadamente, 11 m^3 . Essa capacidade corresponde a, aproximadamente, 4.500 kg de café de meia seca.

Nesse secador, o produto entra, primeiramente, em uma câmara de secagem de fluxos contracorrentes; logo após, em uma câmara de secagem de fluxos concorrentes. Na parte superior do secador, existe uma câmara de descanso, já que a forma de operação do secador é intermitente, sendo movimentado $0,05 \text{ m}^3$ de produto por minuto.

Basicamente, o secador é composto das seguintes partes:

- Câmara de descanso superior (3 - Figura 4) - tem a finalidade de homogeneizar o teor de umidade da massa de grãos e fornecer resistência ao fluxo de ar para que o mesmo tenha uma distribuição homogênea na câmara de secagem contracorrentes ($4,0 \text{ m}^3$ de volume e altura de 1,8 m);

- Câmara de descanso inferior (Figura 4) - é constituída de 4 pequenas moegas que descarregam o produto em uma moega central, que o encaminha para o sistema de movimentação de produto, carga e descarga do secador, com $2,0 \text{ m}^3$ de volume, e tem os objetivos de obstruir o fluxo de ar e favorecer a movimentação homogênea da massa de grãos;

- Câmara de secagem superior, de fluxos contracorrentes (Figura 4) - com o volume de $2,5 \text{ m}^3$ e altura de 1,1 m;

- Câmara de secagem inferior, de fluxos concorrentes (Figura 4) - com o volume de $2,5 \text{ m}^3$ e altura de 1,1 m;

- Moega de recepção (Figura 4) - com a finalidade de receber o produto, por ocasião da sua recirculação e carga do secador;

- Sistema de movimentação de grãos - constituído do elevador de caneca (Figura 4) e máquina de pré-limpeza (Figura 4) - com a finalidade de promover a limpeza, a carga, a descarga e a recirculação do produto;

- Difusor de ar (Figura 4) - tem o objetivo de reduzir a perda de pressão do fluxo de ar;

- Ventilador (Figura 4) - é do tipo centrífugo de pás retas, acionado por motor elétrico de 3 CV a 1.750 rpm, cuja finalidade é succionar o ar aquecido e promover a sua injeção na câmara de secagem;

- Fornalha (Figura 4) - é do tipo fogo direto e fluxos descendentes (SILVA, 1982).

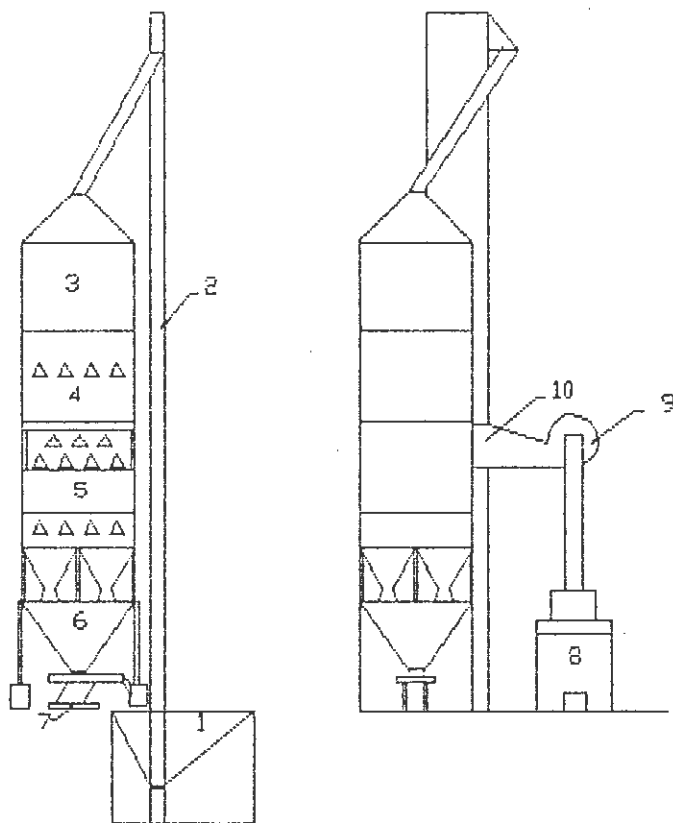
Com exceção da fornalha, todas as partes do secador foram construídas com chapas e perfis metálicos.

3.2. Avaliação de Desempenho do Secador

Foram realizados 4 testes, sendo três utilizando temperatura de secagem de 120 °C e um de 100 °C.

A avaliação do desempenho do secador estudado foi feita segundo metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et alii (1978); porém, só foram utilizados os parâmetros mais importantes, segundo OSÓRIO (1982):

- temperatura da massa de grãos;
- umidade relativa e temperatura do ar ambiente e de exaustão do secador;



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1 - Moega de recepção | 6 - Câmara de descanso inferior |
| 2 - Elevador de canecas | 7 - Peneira transportadora |
| 3 - Câmara de descanso superior | 8 - Fornalha |
| 4 - Câmara de secagem contracorrentes | 9 - Ventilador |
| 5 - Câmara de secagem concorrentes | 10 - Difusor de ar |

FIGURA 4 - Vistas Laterais do Secador.

- teor de umidade inicial e final do café;
- vazão de ar;
- tempo de secagem;
- poder calorífico do combustível;
- velocidade do produto no interior do secador.

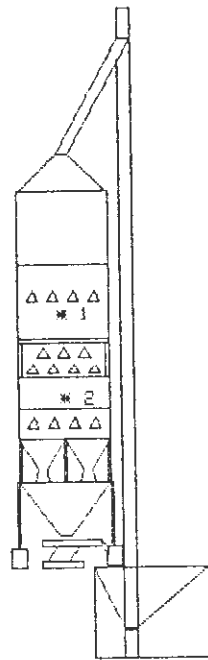
A temperatura do ar de secagem foi obtida por meio de um potenciômetro digital (precisão de $\pm 0,1$ °C), conectado a uma sonda termoelétrica em 3 pontos de medições, conforme ilustra a Figura 5. O ponto A situa-se a 0,40 m abaixo dos dutos de exaustão da câmara de secagem de fluxos contracorrentes. O ponto B situa-se a 0,40 m acima dos dutos de exaustão da câmara de secagem de fluxos concorrentes. O ponto C situa-se no difusor de ar.

As condições do ar ambiente e de exaustão foram determinadas com auxílio de um psicrômetro.

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

Os teores de umidade do produto foram obtidos pelo método de estufa, 103 ± 1 °C por 72 horas, com três repetições.

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



1 - Ponto A

2 - Ponto B

FIGURA 5 - Localização dos Pontos A e B de Medição da Temperatura do Ar.

Todas as medições de acompanhamento dos testes foram realizadas a cada 60 minutos.

A massa do produto foi determinada antes do carregamento do secador, numa balança de plataforma (precisão de 0,2 kg), obtendo-se a massa inicial do produto.

A massa final foi obtida indiretamente, pela relação entre a massa inicial e os teores de umidade final e inicial.

A vazão do ar de secagem foi determinada nos dutos de exaustão do secador, através de um velômetro digital de pás rotativas.

O combustível utilizado nos 3 testes a 120 °C, foi madeira proveniente da receita de café (*Coffea robusta* L.). No teste a 100 °C, foi utilizada madeira proveniente de eucalipto (*Eucalyptus grandis*).

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

Foram retiradas amostras de lenha para determinação do teor de umidade e do poder calorífico. O teor de umidade foi obtido pelo método de estufa, 103 ± 1 °C por 72 horas, enquanto que o poder calorífico superior (Pcs) foi determinado através da Bomba Calorimétrica de Malher (MELO, 1987).

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

$$Pci = Pcs (1 - 0,0114.U), \quad \text{eq. 01}$$

em que:

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

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

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

A vazão mássica do produto no interior do secador foi medida diretamente no ponto de descarga da peneira transportadora. A partir dessa vazão, da massa específica do produto e da área transversal da câmara de secagem, determinou-se a velocidade de descida do produto dentro do secador.

3.3. Simulação de secagem

Foi desenvolvido um programa de computação para simular o comportamento do secador, com base no modelo de simulação

de secagem proposto por THOMPSON et alii (1968). A linguagem utilizada foi Turbo Pascal, em virtude de sua simplicidade e crescente utilização em microcomputadores.

As equações de camada delgada, teor de umidade de equilíbrio, entalpia específica do café e entalpia específica de vaporização utilizadas no programa, foram as utilizadas por SILVA (1991):

- Razão de Umidade do Produto

$$RU = e^{-a \cdot t} e^{\frac{b}{(-c/T)}}, \quad \text{eq. 02}$$

em que:

RU = razão de umidade, decimal;

t = tempo equivalente, min;

T = temperatura de equilíbrio, K;

a, b, c = constantes.

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

$$a = 173,705;$$

$$b = 0,73681;$$

$$c = 5.533,11.$$

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

$$a = 105,756;$$

$$b = 0,60564;$$

$$c = 2.751,51.$$

- Teor de Umidade de Equilíbrio

$$Ue = 1,1298 \frac{-\ln(1 - URe)}{Te + 40,535}, \quad \text{eq. 03}$$

em que:

U_e = teor de umidade de equilíbrio, decimal;

U_{Re} = umidade relativa nas condições de equilíbrio, decimal;

T_e = temperatura de equilíbrio, °C.

- Entalpia Específica do Café

$$C_p = 1,674 + 2,51 \frac{u}{u + 1}, \quad \text{eq. 04}$$

em que:

C_p = entalpia específica do produto, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;

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

- Entalpia Específica de Vaporização (kJ.kg^{-1})

$$L_v = 3.109,4 - 2,38 T_e + 0,369 T_e^2 U_e^{1,85} \frac{1 - U_{Re}}{U_{Re}} \quad \text{eq. 05}$$

Para efeito de simulação, a massa de produto foi dividida em 50 camadas com espessura de 0,1 m cada, sendo que, instantaneamente, 28 das camadas estariam em descanso e as outras em contato com o ar de secagem, 11 para cada câmara de secagem (de fluxos contracorrentes e concorrentes).

O teor de umidade de cada camada, no estágio de descanso, foi considerada constante e igual ao valor que a mesma tinha ao sair da câmara de secagem concorrente (câmara inferior).

O fluxograma simplificado do programa, utilizado para simular o comportamento do secador estudado, encontra-se no Apêndice A e a listagem em linguagem Turbo Pascal no Apêndice B.

3.4. Consumo de Energia

O consumo específico de energia foi obtido de duas maneiras:

a - conhecendo-se o poder calorífico da lenha (teórico):

$$E = \frac{Pci.c.t.(100 - uf)}{M. (ui - uf)} \quad \text{eq. 06}$$

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

$$E = \frac{Q.ca.(Ts-Ta).t.(100-uf).60}{ve.M.(ui - uf)} \quad \text{,} \quad \text{eq. 07}$$

em que:

Pci = poder calorífico inferior da lenha, kJ.kg^{-1} ;

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

t = tempo total de secagem, h;

M = massa inicial do produto, kg;

ui = teor de umidade inicial do produto, %bu;

uf = teor de umidade final do produto, %bu;

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

ca = calor específico do ar ambiente,

$1,0048 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;

Ts = temperatura do ar de secagem, °C;

Ta = temperatura do ar ambiente, °C;

ve = volume específico do ar ambiente, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ de ar

seco.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

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

A velocidade do produto no interior do secador foi de $0,024 \text{ m}.\text{min}^{-1}$.

4.1.Temperaturas e Umidades Relativas

Os valores médios das temperaturas ambiente, do ar de secagem, de exaustão e nos pontos A e B, e das umidades relativas ambiente e de exaustão, encontram-se no Quadro 2. A representação gráfica das temperaturas em função do tempo de secagem encontra-se nas Figuras 6, 7, 8 e 9.

4.1.1. Temperatura do Ar de Secagem

Observa-se no Quadro 2, que não foi possível fixar as temperaturas do ar de secagem em 120 e $100 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo obtidos valores médios de 122 ; 119 ; 121 e $101 \text{ }^\circ\text{C}$ para os testes de

QUADRO 1 - Parâmetros Relativos às Temperaturas do Ar de Secagem Fixadas, Pesos dos Lotes, Massa Específica, Teor de Umidade do Produto e Tempo de Secagem

Teste (Nº)	Temperatura do Ar de Secagem Fixada (°C)	Peso do Lote		Massa Específica		Teor de Umidade dos Grãos		Tempo de Secagem (hora)
		Inicial (kg)	Final (kg)	Inicial (kg.m ⁻³)	Final (kg.m ⁻³)	Inicial (%bu)	Final (%bu)	
01	120	5.286	4.459	458	436	39,6	28,4	9,5
02	120	4.459	3.695	416	392	28,4	13,6	12,0
03	120	4.697	3.390	460	398	37,2	13,0	17,5
04	100	4.965	4.137	446	434	33,5	20,2	15,0

QUADRO 2 - Parâmetros Relativos às Temperaturas Médias do Ar de Secagem, de Exaustão e Ambiente, Umidades Relativas Médias do Ambiente e da Exaustão, Temperaturas Médias dos Grãos no Ponto A e no Ponto B

Teste (Nº)	Temperaturas Médias do Ar			Umidades Relativas Médias do Ar				Temperaturas Médias dos Grãos	
	Secagem (°C)	Exaustão Conc. (°C)	Exaustão Cont. (°C)	Ambiente (°C)	Ambiente (%)	Exaustão Conc. (%)	Exaustão Cont. (%)	Ponto A (°C)	Ponto B (°C)
01	122	41	35	23	63	91	84	38	52
02	119	43	38	16	80	73	68	38	65
03	121	44	42	22	73	75	76	38	64
04	101	39	38	24	63	75	72	36	48

01 a 04, respectivamente, em consequência das características operacionais da fornalha.

Na representação gráfica (Figuras 6 a 9), nota-se que, logo no início de cada teste, a temperatura de secagem atingiu um valor próximo ao da temperatura pré-fixada.

4.1.2. Temperatura do Ar nos Pontos A e B

As Figuras de 6 a 9 mostram que o ar, na câmara de secagem de fluxos contracorrentes (Ponto A), atingiu uma temperatura bastante inferior à temperatura do ar de secagem, atingindo valores máximos de 42, 42, 44 e 40 °C, para os testes de 01 a 04, respectivamente.

O ar, na câmara de secagem de fluxos concorrentes (Ponto B) apresentou-se com temperatura superior ao da câmara de secagem de fluxos contracorrentes, atingindo os valores máximos de 63, 80, 92 e 63 °C para os testes 01 a 04, respectivamente. Isso se deve ao aquecimento e à secagem que o produto experimentou na câmara de fluxos contracorrentes, chegando na de fluxos concorrentes com menor quantidade de água superficial, diminuindo, assim, a taxa de resfriamento evaporativo.

No teste 01 (Figura 6), o produto atingiu temperatura inferior à dos demais testes, devido ao fato desse teste ter sido interrompido com o produto ainda muito úmido (28,4% b.u.). Nesse teste, ocorreu, nas primeiras horas, aumento brusco da temperatura do produto, provavelmente, por causa da baixa fluidez do café quando úmido, ocorrendo, nesse ponto, uma interrupção no escoamento do produto.

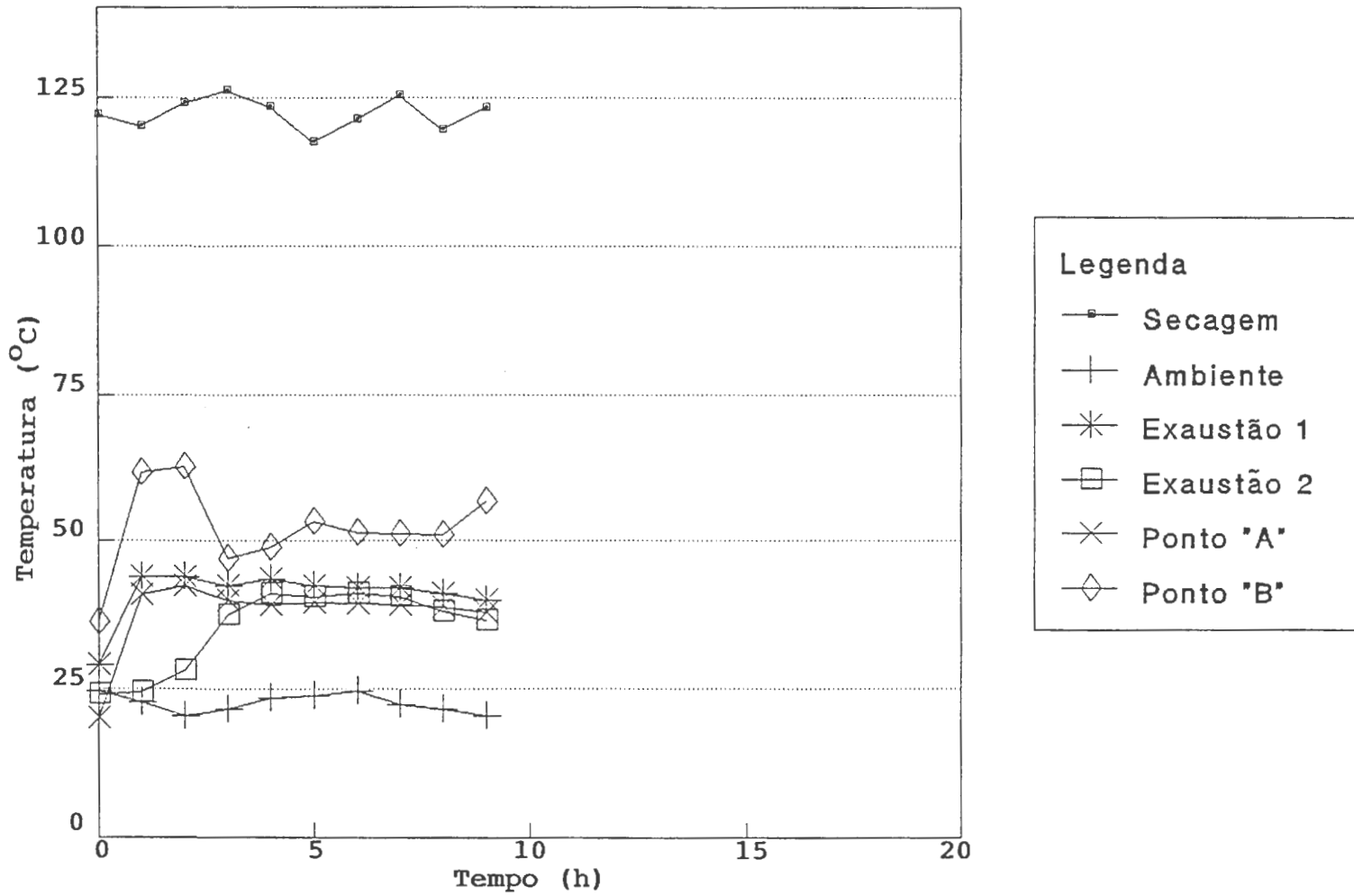


FIGURA 6 - Variação das Temperaturas Ambiente, Secagem, Exaustão 1, Exaustão 2, Ponto A e Ponto B, em Função do Tempo (Teste 1).

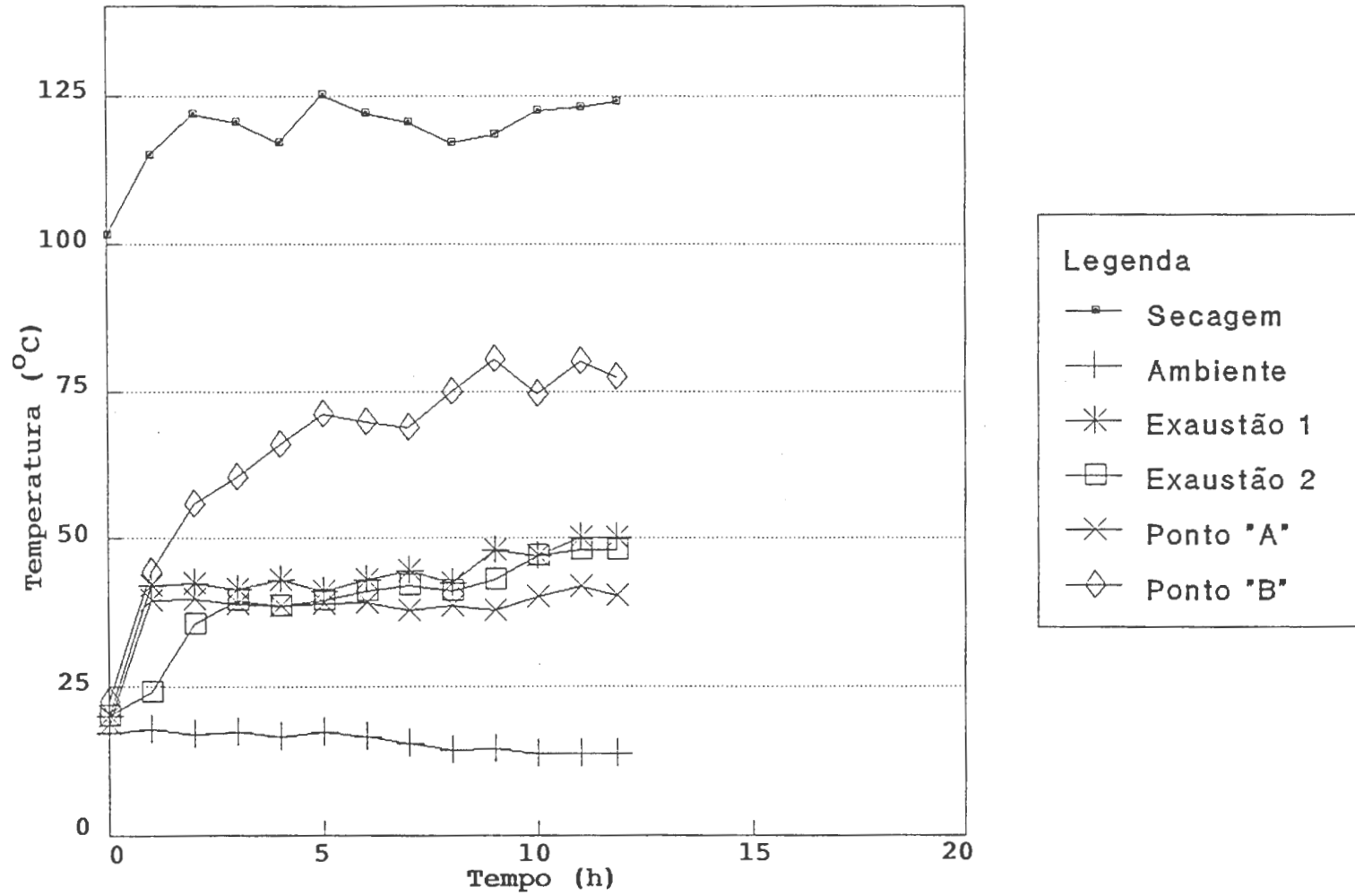


FIGURA 7 - Variação das Temperaturas Ambiente, Secagem, Exaustão 1, Exaustão 2, Ponto A e Ponto B, em Função do Tempo (Teste 2).

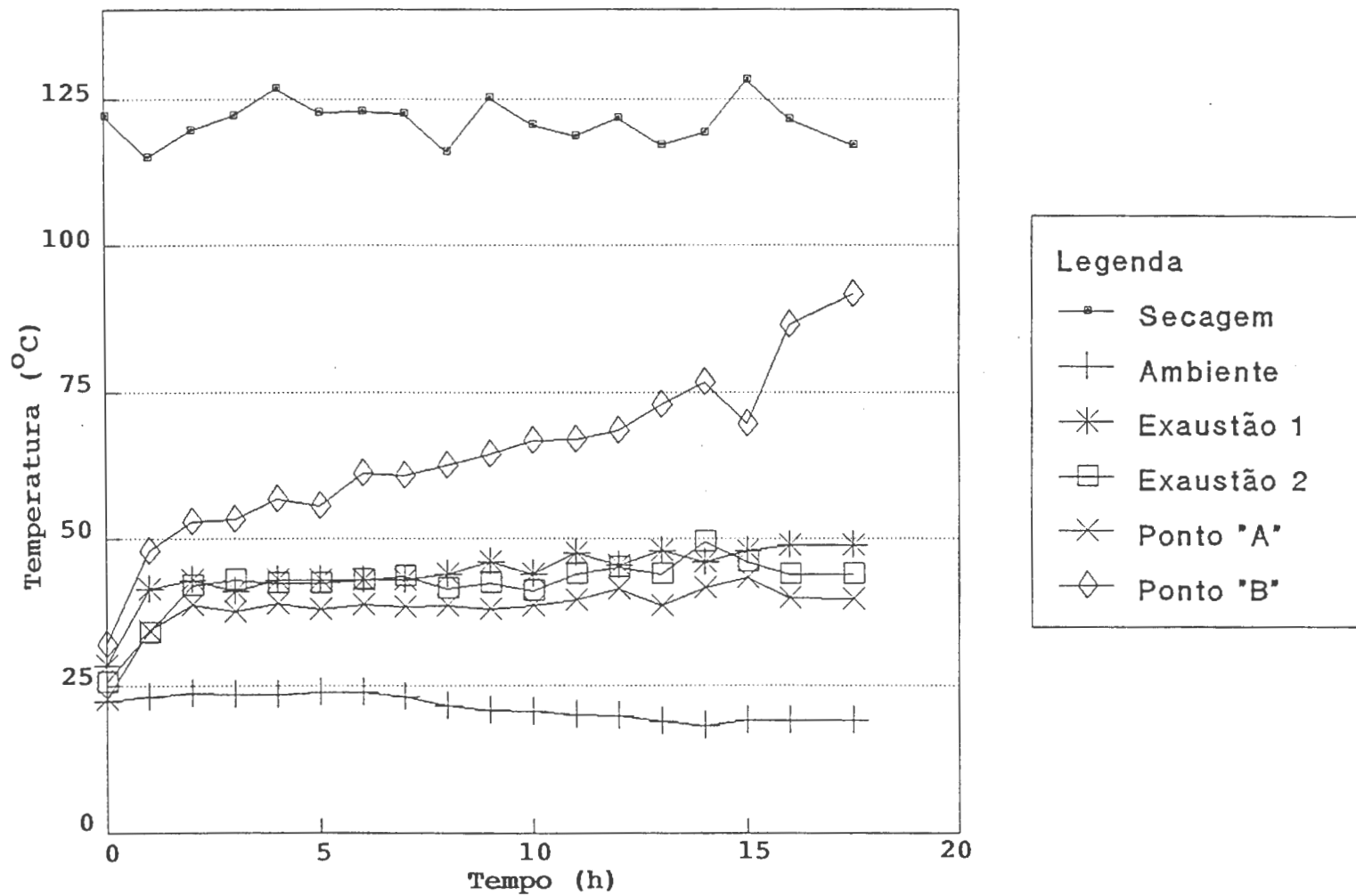


FIGURA 8 - Variação das Temperaturas Ambiente, Secagem, Exaustão 1, Exaustão 2, Ponto A e Ponto B, em Função do Tempo (Teste 3).

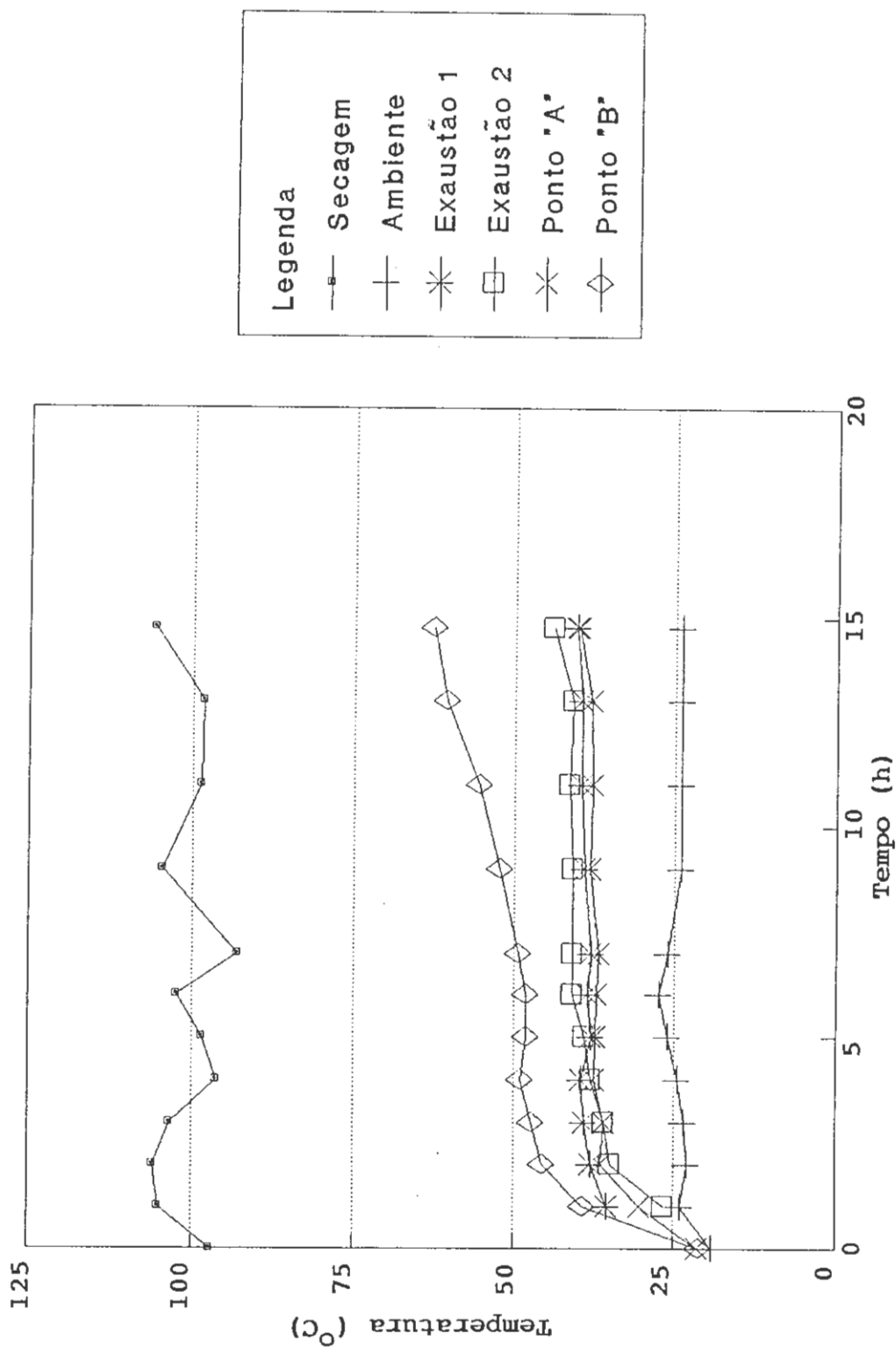


FIGURA 9 - Variação das Temperaturas Ambiente, Secagem, Exaustão 1, Exaustão 2, Ponto A e Ponto B, em Função do Tempo (Teste 4).

4.1.3. Temperaturas e Umidades Relativas do Ar de Exaustão

As Figuras de 6 a 9 mostram que o ar de exaustão da câmara de fluxos concorrentes (Exaustão 1) apresentou-se com uma temperatura ligeiramente superior à da exaustão da câmara de fluxos contracorrentes (Exaustão 2). Pode-se observar também, nessas figuras, que o ar, a 40 cm da exaustão da câmara de fluxos contracorrentes (Ponto A), já está com uma temperatura com valor próximo ao da exaustão dessa câmara (Exaustão 2). Isso, provavelmente, foi devido ao fato de que nesse ponto já tenha ocorrido um equilíbrio entre o ar e o grão.

As Figuras 10, 11, 12 e 13 mostram a variação da umidade relativa do ar de exaustão das duas câmaras (Exaustão 1 e 2), em função do tempo. Observa-se que, em todos os testes, o ar de exaustão apresentou-se bem próximo da saturação durante o processo de secagem, perdendo essa condição no final do processo, quando o produto encontrava-se com baixo teor de umidade. Isso só não ocorreu no teste 01 (Figura 10), pois, nesse teste, o produto encontrava-se com alto teor de umidade, durante todo o tempo de secagem.

4.2. Teor de Umidade e Massa Específica do Produto

Em virtude da necessidade de duas cargas do secador de leite fixo para cada teste, e ainda, por problemas na obtenção de amostras para se determinar o teor de umidade no secador de leite fixo e no terreiro, e pelas dificuldades de se determinar com exatidão o teor de umidade do produto em

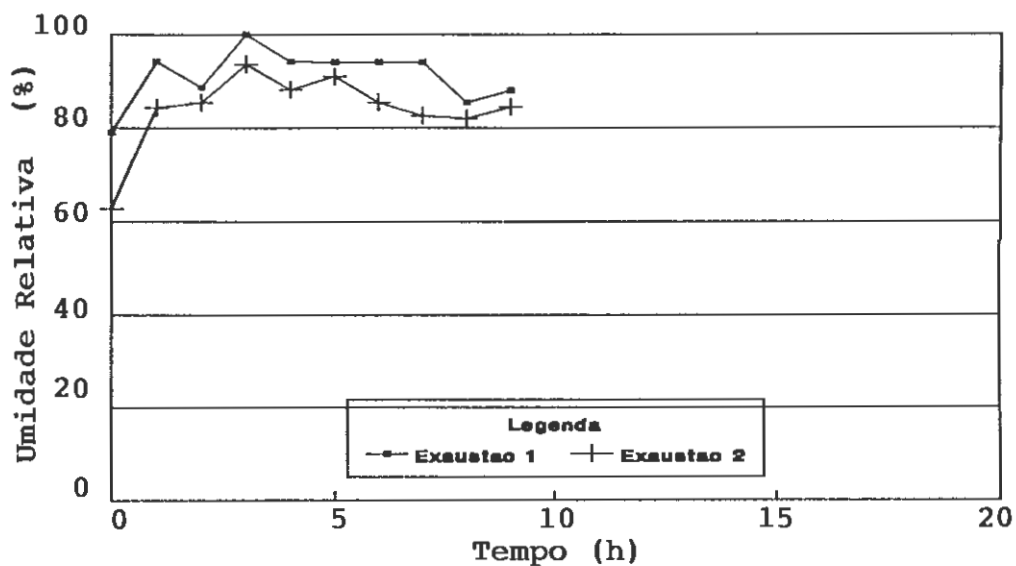


FIGURA 10 - Variação das Umidades Relativas do Ar de Exaustão nos Pontos 1 e 2, em Função do Tempo de Secagem (Teste 1).

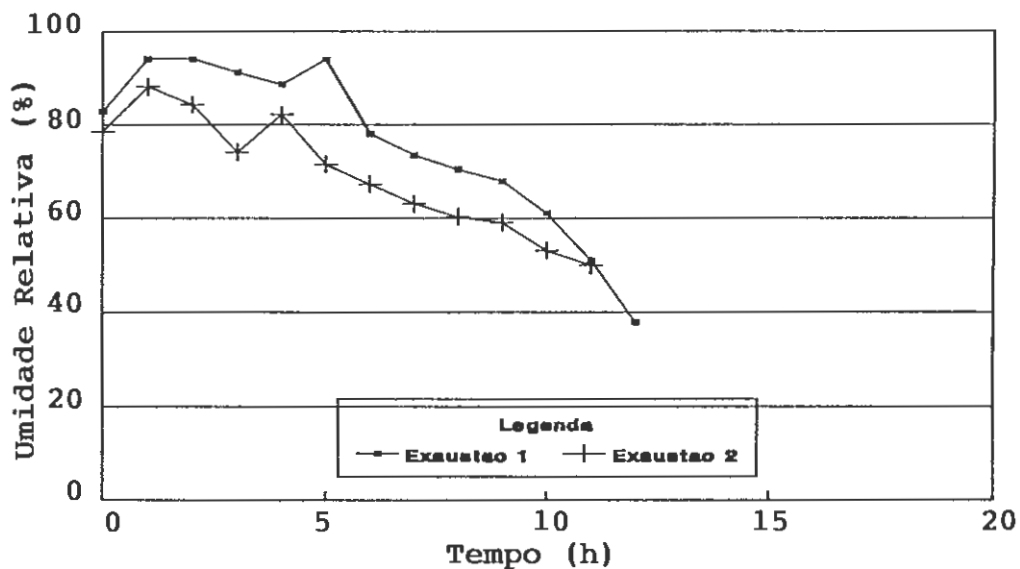


FIGURA 11 - Variação das Umidades Relativas do Ar de Exaustão nos Pontos 1 e 2, em Função do Tempo de Secagem (Teste 2).

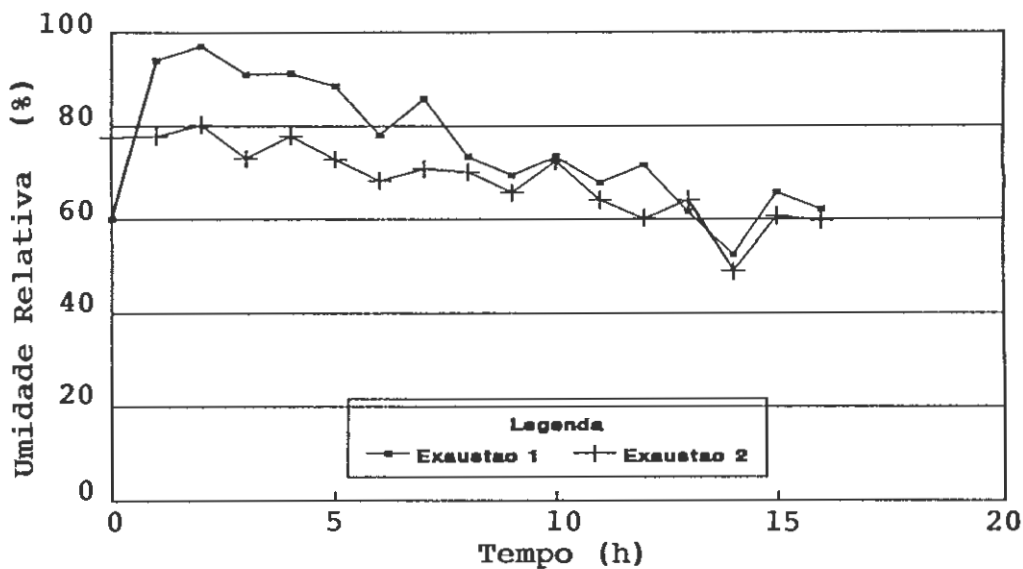


FIGURA 12 - Variação das Umidades Relativas do Ar de Exaustão nos Pontos 1 e 2, em Função do Tempo de Secagem (Teste 3).

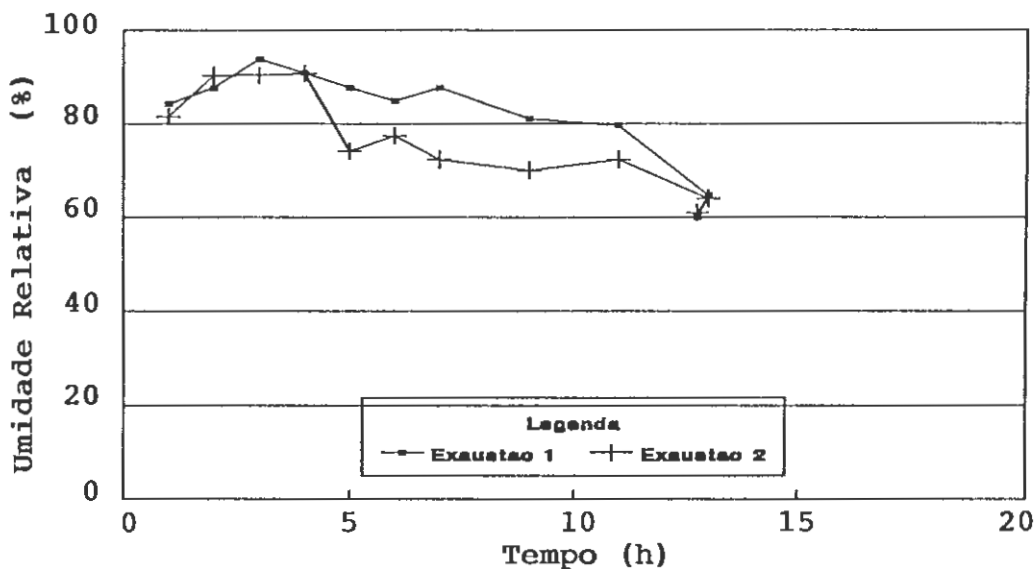


FIGURA 13 - Variação das Umidades Relativas do Ar de Exaustão nos Pontos 1 e 2, em Função do Tempo de Secagem (Teste 4).

condições de campo, inviabilizou-se a padronização dos teores de umidade inicial e final do produto (Quadro 1).

No Quadro 1, observa-se que os Testes 01 e 04 foram interrompidos com teores de umidade do produto ainda elevados, 28,4 e 20,2% b.u., respectivamente. Isso foi devido à intensa chuva e ao secador não se encontrar com cobertura.

Como não se padronizou o produto utilizado para a determinação do peso hectolítrico, optou-se por estudar a variação da massa específica, expressa em matéria seca, em função do teor de umidade do produto. A equação 08, obtida por meio de regressão, foi a que melhor ajustou-se aos dados de teor de umidade, tendo um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,83.

$$MS = 350,26 - 110,86 u , \quad \text{eq. 08}$$

em que:

MS = massa específica do produto, kg de matéria seca. m^{-3} ;

u = teor de umidade dos grãos, decimal bs.

A Equação 08 foi utilizada no programa de simulação de secagem para se estimar a variação da quantidade de matéria seca, nas camadas de produto para as quais estava sendo simulada a secagem.

4.3. Energia

No Quadro 3, estão apresentados os valores de teores de umidade, poder calorífico inferior e consumo horário de lenha, consumo específico de energia, teórico e real (equações 6 e 7), e eficiência da fornalha.

Os valores de consumo específico de energia, apresentados nesse quadro, não podem ser comparados um com os outros, em virtude desse parâmetro depender de fatores como: teores de umidade inicial e final, temperatura do ar de secagem, tempo de secagem e condições climáticas. E conforme os Quadros 1 e 2, esses parâmetros apresentaram variações de um teste para o outro.

QUADRO 3 - Resultados de Poder Calorífico Inferior (PCI), Teor de Umidade e Consumo de Combustível, Consumo Específico de Energia do Secador e Eficiência da Fornalha

Teste (N ^o)	Tipo de Lenha *	PCI (kJ.kg ⁻¹)	Teor de Umidade (%bu)	Consumo de Lenha (kg.h ⁻¹)	Consumo Específico de Energia (kJ.kg ⁻¹)		Eficiência da Fornalha (%)
					Teórico	Real	
01	C	15.269	17,7	30	3.758	5.144	73
02	C	15.269	17,7	27	5.371	6.573	82
03	C	14.924	19,7	27	4.372	5.457	80
04	E	11.405	24,0	25	4.508	5.161	87

* C - Lenha de Café

E - Lenha de Eucalipto

4.4. Simulação de Secagem

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

- valores médios de temperatura de secagem, temperatura ambiente, temperatura inicial do grão e umidade relativa (Quadro 2);

- valores iniciais da massa específica e teor de umidade do produto (Quadro 1).

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17, comparam-se as curvas de secagem simuladas e experimentais para os testes 01, 02, 03 e 04, respectivamente. Os valores correspondem aos teores de umidade do produto na saída da máquina de pré-limpeza (câmara de descanso inferior); por isso, obteve-se uma curva simulada em forma de escada.

O Quadro 4 compara os valores experimentais finais dos teores de umidade do produto com os simulados na saída da máquina de pré-limpeza. O desvio absoluto médio foi de $1,9 \pm 1,0\%$ bu. Observa-se que todos os valores simulados apresentaram-se abaixo dos experimentais. Ao se considerarem os valores médios dos teores de umidade da massa de grãos no interior do secador, o desvio absoluto médio passa a ser $1,5 \pm 1,4\%$ bu (Quadro 5).

Nas Figuras 18, 19, 20 e 21 têm-se as curvas de temperaturas do ar nos pontos A e B, experimentais e simuladas, em função do tempo. Observa-se que, no Ponto A, os valores simulados ficaram abaixo dos experimentais durante a secagem, tendendo a se aproximarem dos valores experimentais no final

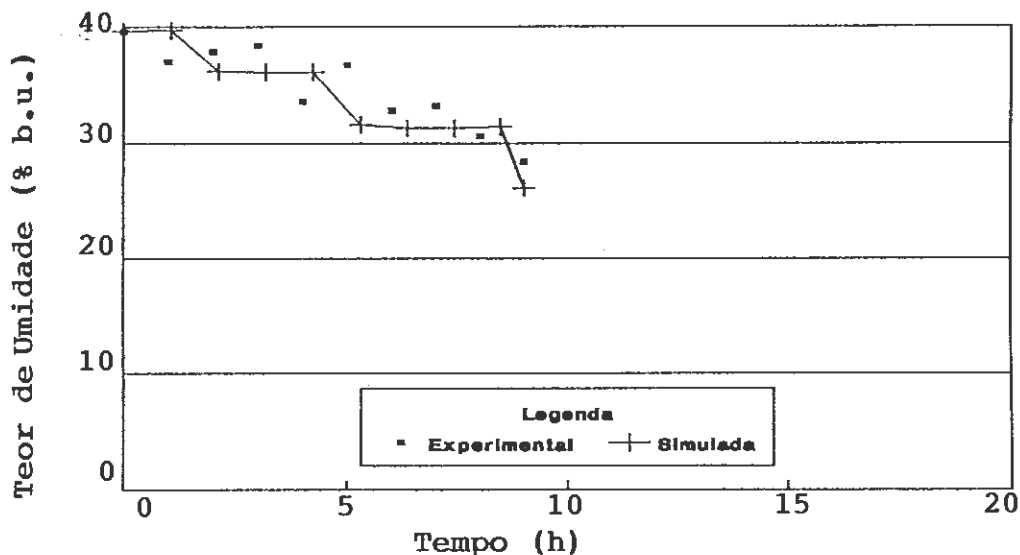


FIGURA 14 - Variação do Teor de Umidade Experimental e Simulada, Correspondentes ao Produto na Saída da Peneira Transportadora, em Função do Tempo (Teste 1).

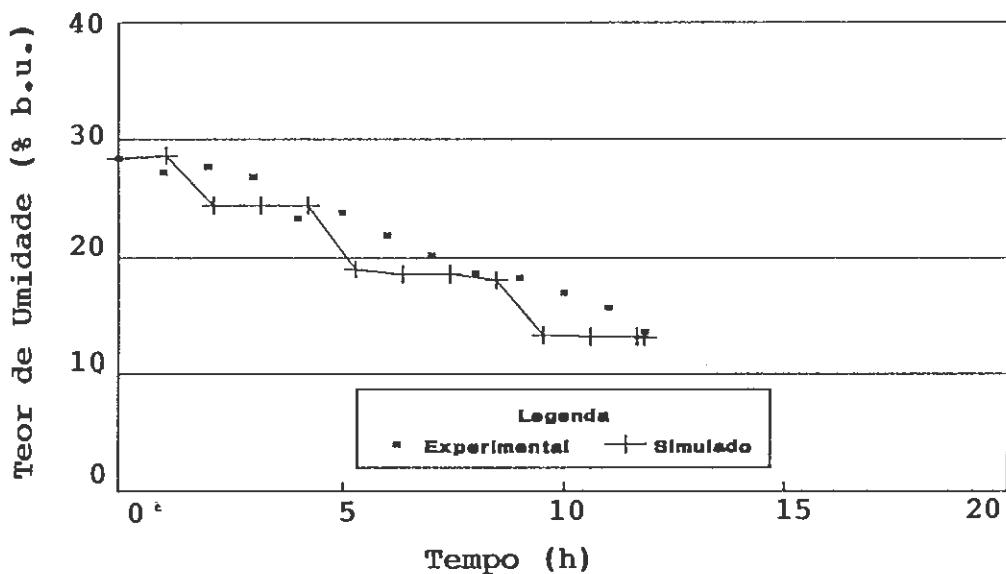


FIGURA 15 - Variação do Teor de Umidade Experimental e Simulada, Correspondentes ao Produto na Saída da Peneira Transportadora, em Função do Tempo (Teste 2).

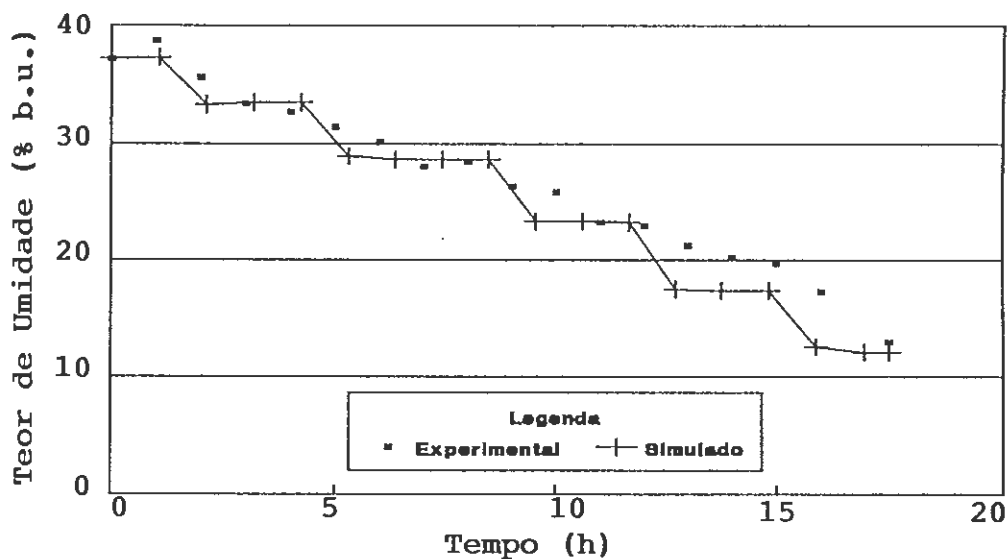


FIGURA 16 - Variação do Teor de Umidade Experimental e Simulada, Correspondentes ao Produto na Saída da Peneira Transportadora, em Função do Tempo (Teste 3).

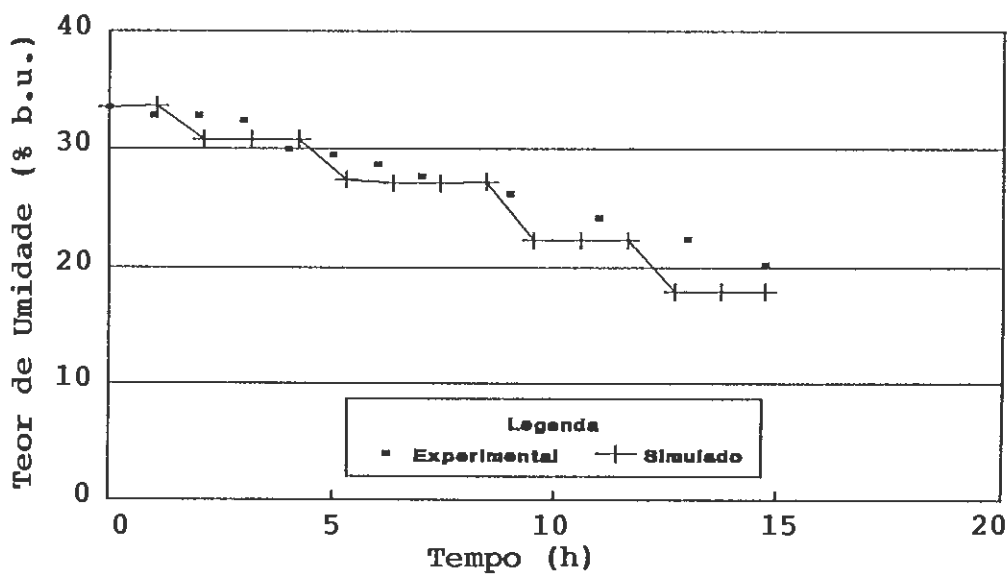


FIGURA 17 - Variação do Teor de Umidade Experimental e Simulada, Correspondentes ao Produto na Saída da Peneira Transportadora, em Função do Tempo (Teste 4).

QUADRO 4 - Comparação entre os Valores dos Teores de Umidade Final Experimentais e Simulados e os Respectiveos Desvios Absolutos, na Saída da Peneira Transportadora

Teste (N ^o)	Teor de Umidade		Desvio Absoluto (%bu)
	Experimental (%bu)	Simulado (%bu)	
01	28,6	26,2	2,4
02	13,5	13,1	0,4
03	14,5	12,1	2,4
04	20,2	17,9	2,3
Desvio Absoluto Médio (%bu)			1,9

QUADRO 5 - Comparação entre os Valores Médios da Massa de Grãos dos Teores de Umidade Final Experimentais e Simulados e os Respectiveos Desvios Absolutos

Teste (N ^o)	Teor de Umidade		Desvio Absoluto (%bu)
	Experimental (%bu)	Simulado (%bu)	
01	28,4	28,5	0,1
02	13,6	11,5	2,1
03	13,0	12,3	0,7
04	20,2	17,1	3,1
Desvio Absoluto Médio (%bu)			1,5

do processo. Entretanto, no Ponto B, não se observou nenhuma tendência.

No Quadro 6, tem-se a comparação das temperaturas finais da massa de grãos (Pontos A e B) simuladas e experimentais. Os desvios absolutos médios foram de $4,2 \pm 3,1$ °C e $5,8 \pm 6,9$ °C, para os pontos A e B, respectivamente.

Com esses valores de desvios absolutos, para o teor de umidade e temperatura, apresentados, em termos de projetos, pode-se considerar o programa implementado como uma ferramenta de grande utilidade.

A Figura 22 mostra a temperatura do ar no ponto B, simulada para diferentes velocidades do produto, com a temperatura de secagem de 120°C. Quando se aumenta a

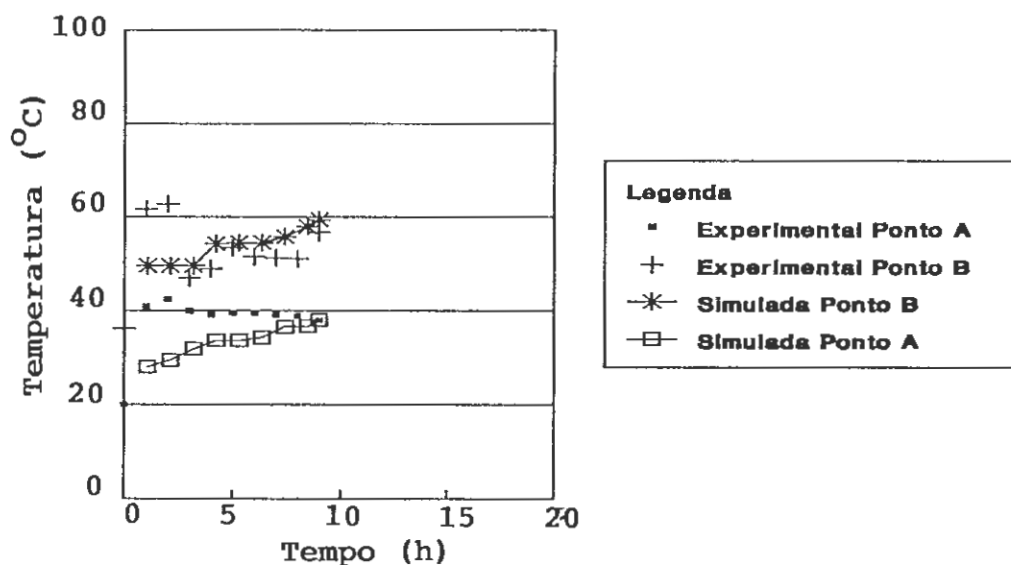


FIGURA 18 - Variação das Temperaturas do Ar nos Pontos A e B Experimentais e Simuladas, em Função do Tempo (Teste 1).

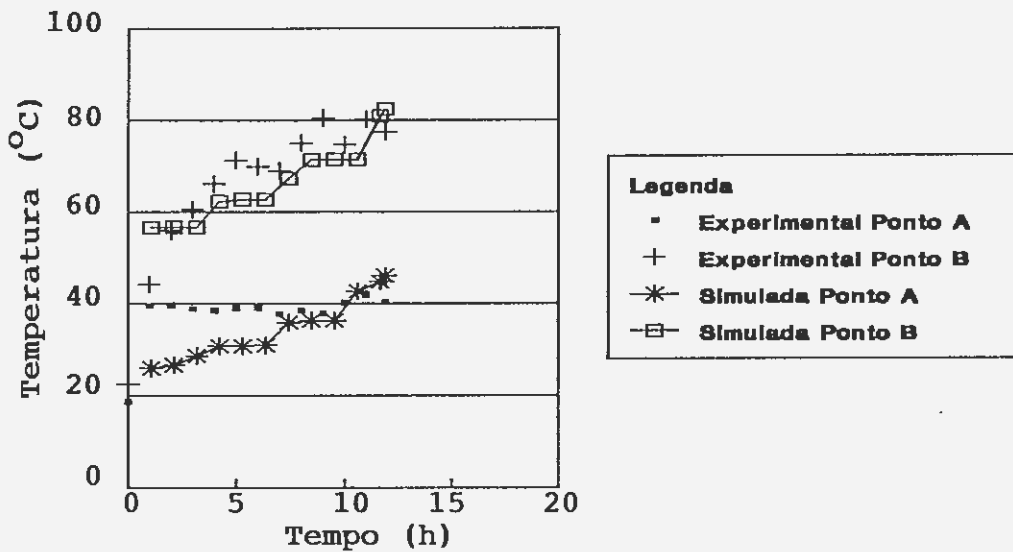


FIGURA 19 - Variação das Temperaturas do Ar nos Pontos A e B Experimentais e Simuladas, em Função do Tempo (Teste 2).

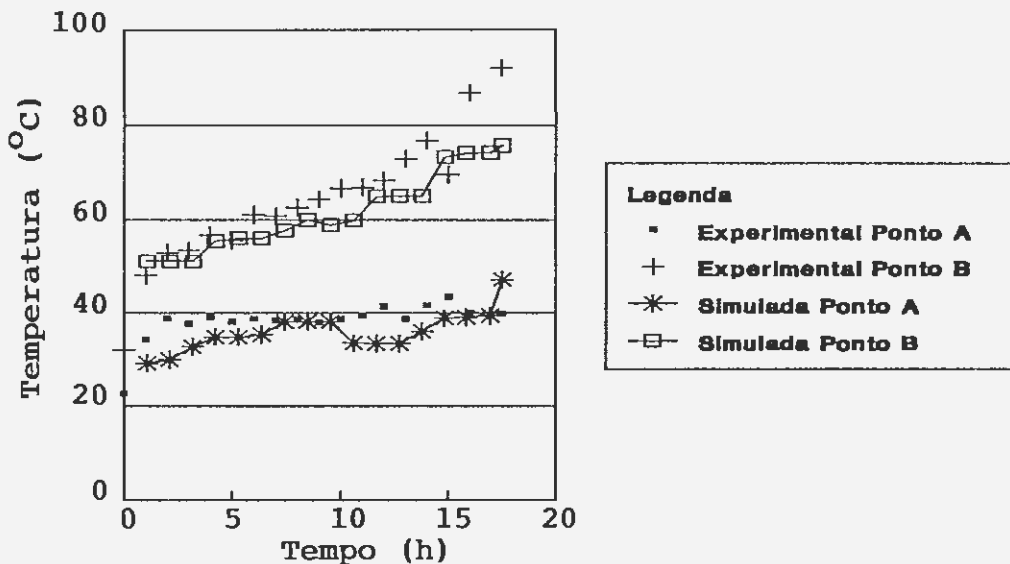


FIGURA 20 - Variação das Temperaturas do Ar nos Pontos A e B Experimentais e Simuladas, em Função do Tempo (Teste 3).

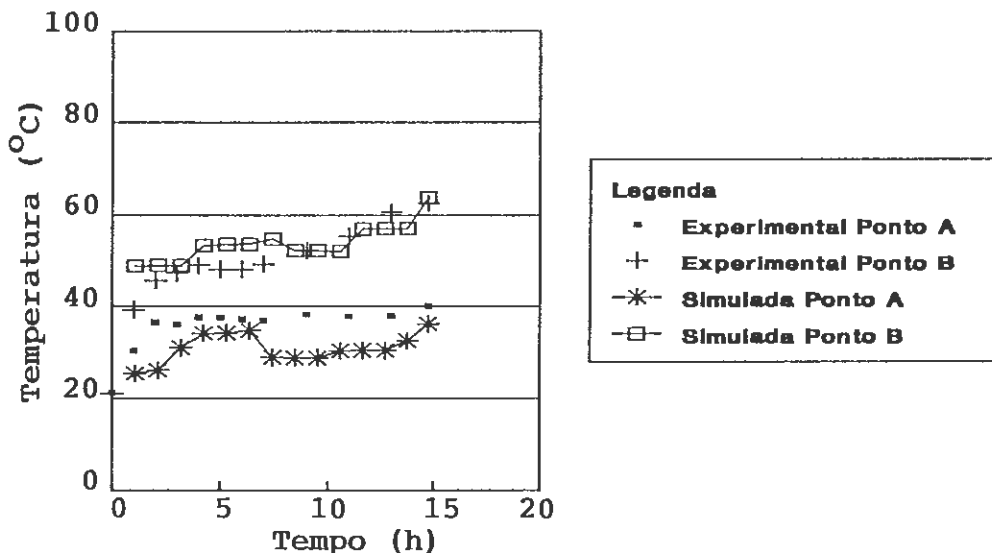


FIGURA 21 - Variação das Temperaturas do Ar nos Pontos A e B Experimentais e Simuladas, em Função do Tempo (Teste 4).

QUADRO 6 - Comparação entre os Valores das Temperaturas Finais da Massa de Grãos (Ponto A e B) Experimentais e Simulados e os Respectivos Desvios Absolutos

Teste (N ^o)	Temperatura da Massa de Grãos				Desvio Absoluto	
	Ponto A		Ponto B		Ponto A (°C)	Ponto B (°C)
	Exper. (°C)	Simul. (°C)	Exper. (°C)	Simul. (°C)		
01	38	38	57	59	0	2
02	40	46	78	82	6	4
03	40	47	92	76	7	16
04	40	36	63	64	4	1
Desvio Absoluto Médio (°C)					4,2	5,8

velocidade de 0,024 para 0,048 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, tem-se diminuição de 11 °C na temperatura do ar e, praticamente, o mesmo tempo de secagem. Com isso, pode-se controlar a temperatura da massa de grãos com a sua velocidade de deslocamento, não comprometendo a qualidade do produto.

4.5. Análise do Secador

Em virtude das dificuldades de se padronizar as propriedades físicas do produto utilizado, a avaliação do desempenho do protótipo foi realizada utilizando-se o programa de simulação implementado. Os valores utilizados, nessa avaliação, estão apresentados no Quadro 7.

Na Figura 23, têm-se as curvas de secagem para as temperaturas do ar de 80, 100 e 120 °C, simuladas segundo as

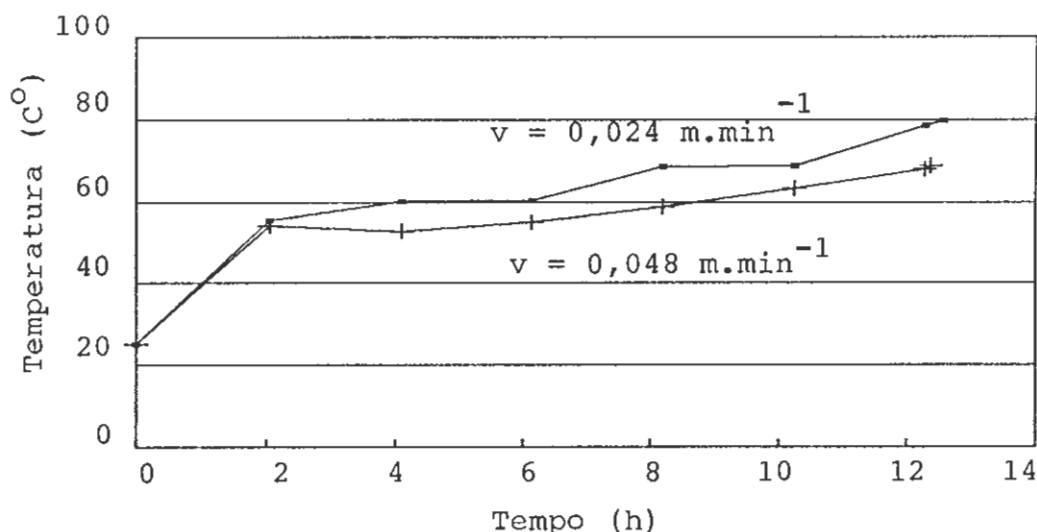


FIGURA 22 - Temperatura do Ar no Ponto B para as Velocidades do Produto de 0,024 e 0,048 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

QUADRO 7 - Condições Estabelecidas para Avaliação de Desempenho do Protótipo por meio do Programa de Simulação

* PRODUTO		
- teor de umidade inicial		30 % bu
- teor de umidade final		12 % bu
- massa específica		415 kg.m ⁻³
* AR AMBIENTE		
- umidade relativa		70 %
- temperatura		21 °C
* AR DE SECAGEM		
- vazão		46 m ³ .min ⁻¹
* SECADOR		
- carga		4.500 kg
* FORNALHA		
- eficiência		77 %

condições estabelecidas (Quadro 7). Os valores correspondem ao teor de umidade médio no interior do secador.

Apesar de se ter validado o programa para as temperaturas de 100 e 120 °C, na avaliação do secador, utilizou-se, também, a temperatura de 80 °C devido a SILVA (1991) ter validado as equações utilizadas também para essa temperatura.

No Quadro 8, são apresentados os parâmetros relativos ao desempenho do secador. Observa-se que a elevação da temperatura de secagem de 80 para 120 °C reduz o tempo de secagem e o consumo específico de energia em 44,2% e 6,3%, respectivamente, enquanto que a capacidade de secagem aumenta

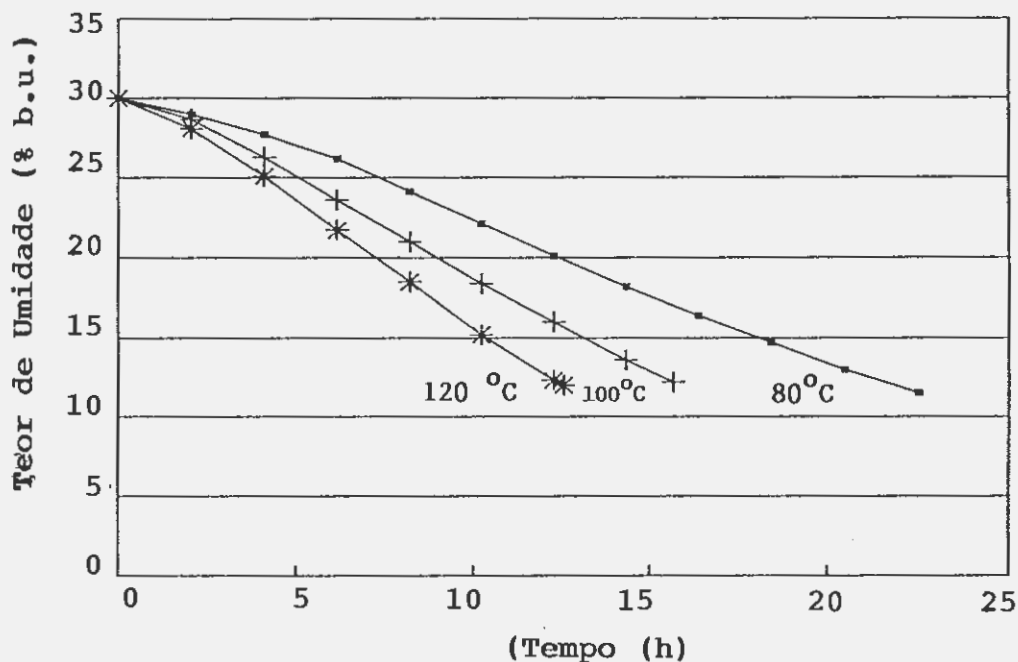


FIGURA 23 - Variações dos Teores Médios de Umidade Simulados, em Função do Tempo, para as Temperaturas de Secagem de 80, 100 e 120 °C.

QUADRO 8 - Avaliação de Desempenho do Secador, por meio de Simulação, para Três Temperaturas de Secagem, Considerando-se as Condições Estabelecidas no Quadro 7

Temperatura do Ar de Secagem (°C)	Tempo de Secagem (h)	Cosumo Específico de Energia (kJ.kg ⁻¹)	Capacidade de Secagem (kg.h ⁻¹)
80	22,53	6.068	199,7
100	15,68	5.657	287,0
120	12,57	5.684	358,0

de 79,3%. A baixa diferença no consumo específico de energia, é, provavelmente, em consequência da umidade relativa do ar de secagem estar tendendo a zero com o aumento da temperatura. Essa hipótese é reforçada quando se compara o valor do consumo específico de energia, quando se eleva a temperatura de secagem de 100 para 120 °C. Observa-se que houve um aumento nesse parâmetro, quando o esperado era o inverso.

Apesar de não ter sido feito teste de qualidade, todos os lotes de café utilizados no experimento foram comercializados como de boa qualidade de bebida. Porém, o produto referente à temperatura de secagem de 120 °C apresentou-se, visualmente, como um tipo inferior.

Considerando a pequena diferença entre os consumos específicos de energia e a qualidade do produto para as temperaturas estudadas, recomenda-se a utilização da temperatura de secagem de 80 °C para a operação do secador.

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

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Com o objetivo de introduzir a tecnologia de secagem, utilizando-se dois tipos de sistemas, e reduzir o gasto de energia na secagem de café, foi projetado, construído e analisado um modelo de secador intermitente de fluxos contracorrentes/concorrentes na secagem de café.

O protótipo do secador estudado foi construído e analisado na Fazenda Santo Antônio, no município de Araponga, Minas Gerais, com capacidade estática de 11 m^3 , tendo como principais características o baixo consumo específico de energia, a simplicidade de fabricação e a facilidade de operação e manutenção.

A vazão de ar utilizada foi de $46 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e a velocidade de deslocamento do produto, no interior do secador, foi de $0,024 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Para avaliação do secador, foram realizados 4 testes, sendo que 3 para a temperatura de secagem de $120 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 para a de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Para auxiliar a avaliação do secador, foi implementado um programa computacional para simulação de

secagem no secador proposto, com base no modelo de THOMPSON et alii (1968).

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

- o programa implementado foi considerado validado;
- o programa simulou com mais precisão a temperatura do ar na câmara de secagem de fluxos contracorrentes que na de fluxos concorrentes;
- a temperatura final do produto é inversamente proporcional à sua velocidade no interior do secador;
- para a redução do teor de umidade de 30% para 12%, utilizando-se temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C, os consumos específicos de energia foram de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ por kg de água evaporada, respectivamente;
- tendo em vista a pequena diferença entre os consumos específicos de energia para as temperaturas de secagem de 80 e 120 °C e a qualidade final do produto, recomenda-se, para a secagem de café no secador estudado, a utilização da temperatura de 80 °C.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

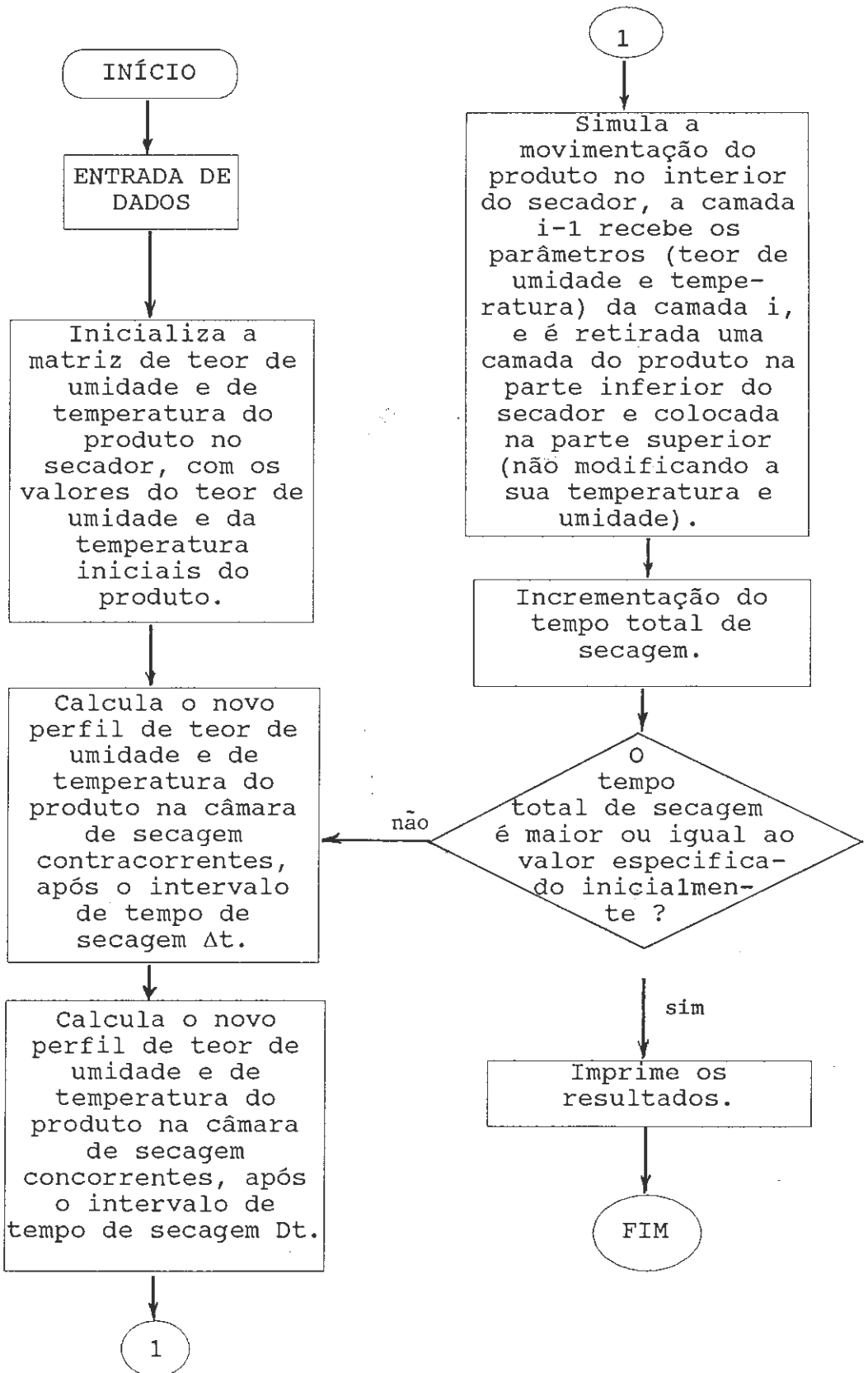
- BAKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. Energy and capacity performance avaluation of grain dryers. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 13p. (Paper 78-3523)
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; RODRIGUES, J.C.; BROOK, R.C.; HALL, G.E. Grain quality and energy efficiency of commercial grain dryers. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1981. 15p. (Paper 81-3019)
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; SILVA, J.S.; MWARA, E.N. Testing of the shivers in-bin counterflow dryer - special report. East Lansing, Michigan, Michigan State University, 1980. 18p.
- BEGAZO, J.C.E.O. Colheita e processamento do café. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 19p. (Boletim de Extensão, 15)
- BROOKER, D.B.; MCKENZIE, B.A.; JOHNSON, H.K. The present status of on-farm grain drying. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 22p. (Paper 78-3007)
- CAIXETA, G.Z.T. A conveniência do acordo internacional do café para o Brasil. Economia Rural. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, (1): 8-10, 1989.
- CORDEIRO, J.A.B. Influência da temperatura e do tempo de repouso na secagem de café (Coffea arábica L.) em camadas fixas. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1982. 60p. (Tese M.S.)
- DALPASQUALE, V.A.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOK, R.C. Concurrent flow and crossflow drying of soybeans. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1979. 7p. (Paper 79-3561)

- FIGLIANO, R. Adaptação do modelo de Thompson para simulação de secagem de raspas de mandioca (*Manihot esculenta* L.). João Pessoa, PB, UFPB, 1982. 95p. (Tese M.S.)
- HALL, C.W. Drying farm crops. Michigan, Edward Brothers, 1971. 336p.
- HAWK, A.L.; NOYES, R.T.; WESTELAKEN, C.M.; POSTER, C.H.; BAKKER-ARKEMA, F.W. The present status of commercial grain drying. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 30p. (Paper 78-3008)
- LACERDA FILHO, A.F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (*Coffea arabica* L.). Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1986. 136p. (Tese M.S.)
- MARTINS, J.H. Thin-layer drying rates of corn hybrids related to performance of high-speed, high temperature batch dryer. West Lafayette, Purdue University, 1988. 340p. (Ph.D. Dissertation)
- OSÓRIO, A.G.S. Projeto e construção de um secador intermitente de fluxos concorrentes e sua avaliação na secagem de café. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1982. 57p. (Tese M.S.)
- PUZZI, D. Abastecimento e armazenamento de grãos. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603p.
- 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.459-73.
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO, E.C. Simulação de Secagem de Grãos - Modelo de Thompson. Engenharia na Agricultura. Série: Caderno Didático. Viçosa, MG, 2(2):1-12, 1992.
- ROA, G. Secagem e armazenamento dos principais alimentos brasileiros, usando ar natural, coletores solares, sistemas armazenadores e gasogênio. Viçosa, MG, CENTREINAR, 1979. 75p.
- SABIONI, P.M. Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão de ar na secagem de milho (*Zea mays* L.). Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1986. 106p. (Tese M.S.)
- SILVA, L.C. Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1991. 74p. (Tese M.S.)

- SILVA, J.S. An engineering economic comparison of five drying techniques for shelled corn on Michigan farms. East Lansing, Michigan State University, 1980. (Ph.D. Dissertation)
- SILVA, J.S. Adaptação da fornalha de fogo direto na secagem de grãos. Informe Agropecuário, EPAMIG, Belo Horizonte, MG, 2(99):12-17, 1983.
- SILVA, J.S. & LACERDA FILHO, A.F. Construção de secador para produtos agrícolas. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 17p. (Informe Técnico, 41)
- SILVA, J.S.; SABIONI, P.M.; AFONSO, A.D.L.; PINTO, F.A.C. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. Engenharia na Agricultura. Série: Armazenamento. Viçosa, MG, 2(2):1-19, 1992.
- SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; GUIMARÃES, A.C.; BIAGGIONI, M.A.M. Análise dos sistemas de secagem. Engenharia na Agricultura. Série: Caderno Didático. Viçosa, MG, 2(5):1-31, 1992.
- SINÍCIO, R. Simulação de secagem de milho em camadas espessas e baixas temperaturas. Viçosa, MG, UFV, Impr. Univ., 1983. 64p. (Tese M.S.)
- THOMPSON, T.L.; FOSTER, G.H.; PEART, R.M. Mathematical simulation of corn drying - A new model. Transaction of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 11(4):582-586, 1968.
- TOSELLO, A.; RIGITANO, A.; SOUZA, O.F.; GARRUTI, R.S.; JORGE, J.F. Influência das altas temperaturas de secamento sobre a formação do gosto do óleo do café. Bragantia, Campinas, SP, 22(66): 799-805, 1963.

APÊNDICES

APÊNDICE A
FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROGRAMA IMPLEMENTADO



APÊNDICE B

LISTAGEM DO PROGRAMA IMPLEMENTADO - LINGUAGEM TURBO PASCAL
5.5

{SN+}

```

PROGRAM Modelo_Thompson_Secagem_Contracorrente_Concorrente;
USES CRT, PRINTER;
CONST   Max = 50;
TYPE   Matriz = ARRAY [1..max] OF REAL;
VAR
    Fim      : BOOLEAN;      (* finalizador da simulacao *)
    nct,     (* numero de camadas na canara contracorrente *)
    ncc,     (* numero de camadas na camara concorrente *)
    i,       (* variavel de controle da camada i *)
    nTotal,  (* numero total de camadas no secador *)
    nr: BYTE; (* numero de camadas na camara de repouso *)
    Ui,      (* umidade inicial do grao, bu *)
    UminFbu, (* umidade minima final do grao, bu *)
    Umed,    (* umidade media do grao *)
    UTroca,
    UiTroca,
    mTotal,  (* massa total de produto, kg *)
    Tig,     (* temperatura inicial do grao *)
    Tamb,    (* temperatura ambiente *)
    Tsec,    (* temperatura de secagem *)
    Ti,      (* temperatura inicial da camada i, "C *)
    TgTroca,
    Peig,    (* peso especifico inicial do grao, kgf/m3 *)
    URamb,   (* umidade relativa ambiente, % *)
    Vazao,   (* vazao do ar de secagem, m3/min *)
    Velg,    (* velocidade do grao, m/min *)
    Area,    (* area transversal de secagem, m2 *)
    Deltax,  (* espessura da camada de simulacao, m *)
    Tmaxsec, (* tempo maximo de simulacao, h *)

```



```

DImp,          (* intervalo de impressao, min *)
Incsim,        (* incremento de tempo para a simulacao, h *)
Conts,         (* contador do tempo de secagem, h *)
ContImp,       (* contador do tempo de impressao, min *)
R,             (* massa de materia seca/massa de ar seco *)
RMi,           (* razao de mistura inicial da camada i, ? *)
Eff,Efic,
RMamb: REAL;   (* razao de mistura ambiente, ? *)
Ubs,          (* umidade atual da camada i, bs *)
Uinbs,        (* umidade inicial da camada i, bs *)
RM,           (* razao de mistura do ar que sai da camada i, ? *)
Tar,          (* temperatura do ar que sai da camada i, "C *)
URar,
Tg: Matriz;    (* temperatura do grao na camada i, "C *)
Imp : CHAR;    (* tipo de periferico de saida *)

```

```

FUNCTION Vesp (ta,rma: REAL): REAL; {Calcula volume especifico.
                                     Entrada: temperatura e razao
                                     de mistura}

```

```

VAR   pv      : REAL;
BEGIN
  pv:=rma*101325.0/(0.622+rma);
  vesp:=287*(ta+273.16)/(101325.0-pv);
END;

```

```

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

```

```

VAR   x      : REAL;
BEGIN
  x:=-7511.52/(tabs)+89.63121+0.02399897*tabs-12.150799*LN(tabs);
  x:=x+2.0998405E-11*EXP(4*LN(tabs))-1.1654551E-5*tabs*tabs;
  PVsf:=EXP(x-1.2810336E-8*EXP(3*LN(tabs)))/0.1333;
END;

```

```

FUNCTION Rmis(ta,ura: REAL): REAL; {Calcula razao de mistura. Entrada:
                                     temperatura e umidade relativa}
VAR  pv1      : REAL;
BEGIN
    pv1:=PVsf(ta+273.16)*ura/100;
    Rmis:=0.622*pv1/(760-pv1);
END;

FUNCTION UREL(ta,rmb: REAL): REAL; {Calcula a umidade relativa. Entrada:
                                     temperatura e razao de mistura}
VAR  pv3      : REAL;
BEGIN
    pv3:=rmb*760.0/(0.622+rmb);
    urel:=pv3/PVSF(ta+273.16)*100.0;
END;

PROCEDURE TelaInicial;
BEGIN
    CLRSCR;
    WRITELN;
    WRITELN ('Teor de umidade inicial (% bu).....');
    WRITELN ('Temperatura inicial do grao ("C).....');
    WRITELN ('Peso especifico do grao (kgf/m3).....');
    WRITELN ('Temperatura ambiente ("C).....');
    WRITELN ('Umidade Relativa ambiente (% ).....');
    WRITELN ('Temperatura de secagem ("C).....');
    WRITELN ('Vazao de ar (m3/min).....');
    WRITELN ('Velocidade do produto (m/min).....');
    WRITELN ('Massa total do produto (kg).....');
    WRITELN ('Espessura da camada i (m).....');
    WRITELN ('No. de divisoes da camara contra. ....');
    WRITELN ('No. de divisoes da camara conco. ....');
    WRITELN ('No. de divisoes da camada de repouso ...');
    WRITELN ('Area transversal de secagem (m2).....');

```

```

WRITELN ('Tempo de secagem (h).....');
WRITELN ('Intervalo para impressao (min).....');
WRITELN ('Saida (V)ideo ou (I)mpressora ?.....' );
END;          (* tela inicial *)

```

```

PROCEDURE EntradaDeDados (VAR nct, ncc, nr:BYTE; VAR Ui, Tig, Peig,
Tamb, URamb, Tsec, Vazao, Velg, DeltX, TmaxSec,
DImp, UminFbu, Area, mTotal: REAL; VAR Imp: CHAR);

```

```

BEGIN

```

```

  TelaInicial;

```

```

  GOTOXY (41,2); READ (Ui);

```

```

  GOTOXY (41,3); READ (Tig);

```

```

  GOTOXY (41,4); READ (Peig);

```

```

  GOTOXY (41,5); READ (Tamb);

```

```

  GOTOXY (41,6); READ (URamb);

```

```

  GOTOXY (41,7); READ (Tsec);

```

```

  GOTOXY (41,8); READ (Vazao);Vazao:=Vazao/2;

```

```

  GOTOXY (41,9); READ (Velg);

```

```

  GOTOXY (41,10);READ (mTotal);

```

```

  GOTOXY (41,11);READ (DeltaX);

```

```

  GOTOXY (41,12);READ (nct);

```

```

  GOTOXY (41,13);READ (ncc);

```

```

  GOTOXY (41,14);READ (nr);

```

```

  GOTOXY (41,15);READ (Area);

```

```

  GOTOXY (41,16);READ (TmaxSec);

```

```

  IF TmaxSec = 0 THEN

```

```

    BEGIN

```

```

      GOTOXY (1,16);WRITE ('Teor de umidade final (% bu).....');

```

```

      READ (UminFbu);

```

```

    END;

```

```

  GOTOXY (41,17);READ (DImp);

```

```

  GOTOXY (41,18);Imp:=READKEY; Imp := UPCASE(Imp);

```

```

END;          (* entrada de dados *)

```

```

PROCEDURE Imprime1;      (* imprime dados de entrada *)
VAR
  URsec, Fluxo, Hct, Hcc, Hr: REAL;
PROCEDURE Videol;      (* saida dos dados de entrada no video *)
BEGIN
  WRITELN ('***** SIMULACAO DE SECAGEM PELO METODO DE THOMPSON *****');
  WRITELN ('SECADOR DE FLUXOS DUPLO (Concorrente e Contracorrente) ');
  WRITELN; WRITELN;
  WRITELN ('***** DADOS RELATIVOS AO GRAO *****');
  WRITELN ('Teor de Umidade Inicial (%bu).....', Ui:5:2);
  WRITELN ('Temperatra Inicial ("C).....', Tig:5:2);
  WRITELN ('Peso especifico (kgf/m3).....', Peig:5:2);
  WRITELN ('Velocidade (m/min).....', Velg:5:2);
  IF TmaxSec = 0 THEN
  WRITELN ('Teor de Umidade Final (%bu).....', UminFbu:5:2);
  WRITELN;
  WRITELN ('***** DADOS RELATIVOS AO AMBIENTE *****');
  WRITELN ('Temperatura ("C).....', Tamb:5:2);
  WRITELN ('Umidade Relativa (%).....', URamb:5:2);
  WRITELN;
  WRITELN ('***** DADOS RELATIVOS AO AR DE SECAGEM *****');
  WRITELN ('Temperatura ("C).....', TSec:5:2);
  WRITELN ('Umidade Relativa (%).....', URsec:5:2);
  WRITELN ('Fluxo de Ar (m3/min/m2).....', Fluxo:5:2);
  WRITELN ('Vazao de Ar (m3/min).....', Vazao*2:5:2);
  WRITELN;
  WRITELN ('***** DADOS RELATIVOS DO SECADOR *****');
  WRITELN ('Area Transversal de Secagem (m2).....', Area:5:2);
  WRITELN ('Altura da Camara Contracorrente (m).....', Hct:5:2);
  WRITELN ('Altura da Camara Concorrente (m).....', Hcc:5:2);
  WRITELN ('Altura da Camara de Repouso (m).....', Hr:5:2);
  WRITELN;
  WRITELN ('***** DADOS RELATIVOS A SIMULACAO *****');
  WRITELN ('Espessura da Camada i (m).....', DeltaX:5:2);

```

```

WRITELN ('Incremento de Simulacao (h).....', IncSim:5:2);
WRITELN ('No de Divisoes da Camara Contracorrente.....', nct:5);
WRITELN ('No de Divisoes da Camara Concorrente.....', ncc:5);
WRITELN ('No de Divisoes da Camara de Repouso.....', nr:5);
IF Tmaxsec <> 0 THEN
WRITELN ('Tempo Maximo de Simulacao (h).....', Tmaxsec:5:2);
END;      (* Videol *)

PROCEDURE Impressora1;      (* saida dos dados de entrada na impressora *)
BEGIN
WRITELN (LST);
WRITELN (LST, '**** SIMULACAO DE SECAGEM PELO METODO DE THOMPSON ***');
WRITELN(LST, 'SECADOR DE FLUXOS DUPLO(Concorrente e Contracorrente)');
WRITELN (LST); WRITELN (LST);
WRITELN (LST, '***** DADOS RELATIVOS AO GRAO *****');
WRITELN (LST, 'Teor de Umidade Inicial (%bu).....', Ui:5:2);
WRITELN (LST, 'Temperatra Inicial ("C).....', Tig:5:2);
WRITELN (LST, 'Peso especifico (kgf/m3).....', Peig:5:2);
WRITELN (LST, 'Velocidade (m/min).....', Velg:5:2);
IF TmaxSec = 0 THEN
WRITELN(LST, 'Teor de Umidade Final (%bu).....', UminFbu:5:2);
WRITELN (LST);
WRITELN (LST, '***** DADOS RELATIVOS AO AMBIENTE *****');
WRITELN (LST, 'Temperatura ("C).....', Tamb:5:2);
WRITELN (LST, 'Umidade Relativa (%).....', URamb:5:2);
WRITELN (LST);
WRITELN (LST, '***** DADOS RELATIVOS AO AR DE SECAGEM *****');
WRITELN (LST, 'Temperatura ("C).....', Tsec:5:2);
WRITELN (LST, 'Umidade Relativa (%).....', URsec:5:2);
WRITELN (LST, 'Fluxo de Ar (m3/min/m2).....', Fluxo:5:2);
WRITELN (LST, 'Vazao de Ar (m3/min).....', Vazao:5:2);
WRITELN (LST);
WRITELN (LST, '***** DADOS RELATIVOS DO SECADOR *****');

```

```

WRITELN (LST,'Area Transversal de Secagem (m2).....', Area:5:2);
WRITELN (LST,'Altura da Camara Contracorrente (m).....', Hct:5:2);
WRITELN (LST,'Altura da Camara Concorrente (m).....', Hcc:5:2);
WRITELN (LST,'Altura da Camara de Repouso (m).....',Hr:5:2);
WRITELN(LST);
WRITELN (LST,'***** DADOS RELATIVOS A SIMULACAO *****');
WRITELN (LST,'Espessura da Camada i (m).....', DeltaX:5:2);
WRITELN (LST,'Incremento de Simulacao (min).....', IncSim*60:5:2);
WRITELN (LST,'No de Divisoes da Camara Contracorrente.....',nct:5);
WRITELN (LST,'No de Divisoes da Camara Concorrente.....', ncc:5);
WRITELN (LST,'No de Divisoes da Camara de Repouso.....', nr:5);
IF Tmaxsec <> 0 THEN
WRITELN (LST,'Tempo Maximo de Simulacao (h).....', Tmaxsec:5:2);
END;      (* Impressoral *)

```

```
BEGIN
```

```

URsec := UREL (TSec,RMamb);
Fluxo := Vazao/Area;
Hct := nct*DeltaX;
Hcc := ncc*DeltaX;
Hr := nr*DeltaX;
IF Imp = 'V' THEN Videol
      ELSE Impressoral;
END;      (* Imprime 1 *)

```

```
PROCEDURE Camada;
```

```
VAR
```

```

TempE,          (* temperatura de equilibrio, "C *)
Cp,             (* entalpia especifica do produto, ? *)
URE,           (* umidade relativa de equilibrio, % *)
Tf,            (* temperatura fina do grao na camada i *)
               (* apos incremento de tempo *)
RMf,           (* razao de mistura do ar apos a camada i *)

```

```

Uf : REAL;          (* umidade final do grao na camada i *)
                    (* apos incremento de tempo *)

PROCEDURE Delgada;

VAR

  Ue,                (* umidade de equilibrio do grao *)
  RU,                (* razao de umidade do produto *)
  b, a, c,          (* constantes da equacao de camada delgada *)
  duu,
  Teq,              (* tempo equivalente, h *)
  Aux1, Aux2: REAL; (* variaveis de auxilio *)

BEGIN

  Ue := 1.282*EXP(0.5405*LN(-LN(1-0.01*URE)/(TempE+40.535)));
  RU := (Ubs[i] - Ue)/(Uinbs[i] - Ue);
  IF (Uinbs[i] > 0.38889) THEN
    BEGIN
      b := 0.73681; a := 173705; c := 5533.11;
    END ELSE
      BEGIN
        b := 0.605604; a := 105.756; c := 2751.53;
      END;
  duu := 0.0;
  IF (RU > 1) THEN
    BEGIN
      RU := 1; duu := Ubs[i]-Uinbs[i];
    END;
  IF (RU > 0) THEN
    BEGIN
      IF (RU < 1) THEN
        Teq := EXP((1/b)*LN(-LN(RU)/(a*EXP(-c/(TempE+273.16)))))/60
      ELSE Teq := 0.0;
      Teq := Teq + IncSim;
    END;
  END;

```

```

IF (Teq = 0) THEN Uf := Uinbs[i]
      ELSE
          Uf := (Uinbs[i]+duu-Ue)*EXP(-a*EXP(b*LN(60*Teq))
              *EXP(-c/(TempE+273.16)))+Ue;
END ELSE Uf := Ubs[i];
RMf := Rmi + R*(Ubs[i] - Uf);
Aux1 := 1-EXP(-0.8*(TempE+40.535)*EXP(1.85*LN(Ubs[i])));
Aux2 := 0.088*(TempE+273.16)*(TempE+273.16)
      *EXP(1.85*LN(Ubs[i]))*(-1+1/Aux1);
Tf := (0.24+0.45*RMi)*TempE-(RMf-RMi)
      *(588+Aux2-TempE)+Cp*R*(1+Ubs[i])*TempE;
Tf := Tf/(0.24+0.45*RMf+Cp*R*(1+Ubs[i]));
URE:=UREL(Tf, RMf);
END;      (* delgada *)
PROCEDURE Corrige;
VAR
    h1, T1, T2, RM1, RM2, RM3, UR1, UR2, UR3: REAL;
    nVezes: INTEGER;
    Controle: BOOLEAN;
BEGIN
    h1 := 0.24*Tf+RMf*(588.0+0.45*Tf);
    nVezes := 0;
    RM1 := 0.622*PVSF(Tf+273.16)/(760.0-PVSF(Tf+273.16));
    T1 := (h1 + (RM1-RMf)*Tf + Cp*R*(1+Uf)*Tf - RM1*588);
    T1 := T1/(0.24 + RM1*0.45 + Cp*R*(1+Uf));
    UR1 := UREL (Tf, RMf);
    UR2 := UREL (T1, RM1);
    RM3 := RMf;
    REPEAT
        nVezes := NVezes + 1;
        T2 := Tf - (UR1-100)/(UR1-UR2)*(Tf-T1);
        RM2 := (h1 - RM3*Tf + Cp*R*(1+Uf)*(Tf-T2) - 0.24*T2);
        RM2 := RM2/(-Tf+588+0.45*T2);
        UR3 := UREL (T2, RM2);

```



```

Controle := TRUE;
IF (UR3 > 100) THEN
BEGIN
    UR1 := UR3;
    h1 := 0.24*T2 + (588 + 0.45*T2)*RM2;
    RM3 := RM2; Tf := T2;
    Controle := FALSE;
END;
IF (UR3 < 99) THEN
BEGIN
    UR2 := UR3; RM1 := RM2; T1 := T2;
    Controle := FALSE;
END;
UNTIL Controle OR (nVezes > 100);
Uf := Uf - (RM2-RMf)/R;
RMf := RM2;
TF :=T2;
URE:=UR3;
END;      (* corrige *)
BEGIN      (* camada *)
    Cp := 0.4 + 0.6*Ubs[i]/(1 + Ubs[i]);
    TemPE := ((0.24+0.45*RMi)*Ti+Cp*R*Tg[i]
              *(1+Ubs[i]))/(0.24+0.45*RMi+Cp*R*(1+Ubs[i]));
    URE := URel (Tempe,RMi);
    Tf := Tempe;
    Uf := Ubs[i];
    RMf:=RMi;
    IF URE <= 99.99 THEN Delgada;
    IF URE > 99.99 THEN Corrige;
    Tg[i] := Tf;
    Ubs[i] := Uf;
    Tar[i] := Tf;
    Ti := Tf;
    RMi := RMf;

```

```

    URar[i] := URel (Tf,RMf);
END;      (* camada *)

PROCEDURE Imprime2;

VAR

    Hora : BYTE;

    Minuto : REAL;

PROCEDURE Video2;

VAR j : BYTE;

BEGIN

    WRITELN; WRITELN;

    WRITE('      T E M P O   D E   S E C A G E M: ',Hora:2);
    WRITELN(' horas e ',Minuto:2:0,' minutos'); WRITELN;
    FOR j:=1 TO 20 DO WRITE('*');
    WRITE(' R E S U L T A D O S ');
    FOR j:=1 TO 20 DO WRITE('*');
    WRITELN;

    WRITELN('posicao      umidade do grao      temperatura do grao      temp. do
ar      umid. rel. ');
    WRITELN('      (m)              (% b.u.)              ("C
(%)' );

    FOR j := 1 TO (nct + ncc) DO
        WRITELN(DeltaX*j:5:2,Ubs[j]*100/(1+Ubs[j]):14:1,Tg[j]:19:1,
Tar[j]:20:1,URar[j]:12:2);
    FOR j := (nct + ncc) TO nTotal DO
        WRITELN(DeltaX*j:5:2,Ubs[j]*100/(1+Ubs[j]):14:1,Tg[j]:19:1,
'          -          -');
    WRITELN;
    WRITE(' ***** UMIDADE FINAL MEDIA (% b.u.) ');
    WRITELN('.....: ',Umed:9:2);
END;      (* video2 *)

```

```

PROCEDURE Impressora2;
VAR    j : BYTE;
      posicao: REAL;
BEGIN
  WRITELN(LST); WRITELN (LST);
  WRITE(LST,'          T E M P O   D E   S E C A G E M:  ',Hora:2);
  WRITELN(LST,' horas e ',Minuto:2:0,' minutos');
WRITELN (LST);
  FOR j:=1 TO 20 DO WRITE(LST,'*');
  WRITE(LST,' R E S U L T A D O S ');
  FOR j:=1 TO 20 DO WRITE(LST,'*');
  WRITELN(LST);WRITELN(LST);
  WRITELN(LST,'posicao   umidade do grao   temperatura do grao   temp.
do ar   umid. rel. ');
  WRITELN(LST,'   (m)           (% b.u.)           ("C)
(%) ');
  posicao:=0;
  WRITELN(LST,'concor. ');
  FOR j := ncc DOWNT0 1 DO
  BEGIN
    posicao := posicao + DeltaX;
    WRITELN(LST,posicao:5:2,Ubs[j]*100/(1+Ubs[j]):14:1,Tg[j]:19:1,
Tar[j]:20:1,URar[j]:12:2);
  END;
  posicao:=0;
  WRITELN(LST,'contra. ');
  FOR j := (ncc + 1 ) TO (ncc + nct) DO
  BEGIN
    posicao := posicao + DeltaX;
    WRITELN(LST,posicao:5:2,Ubs[j]*100/(1+Ubs[j]):14:1,Tg[j]:19:1,
Tar[j]:20:1,URar[j]:12:2);
  END;
  WRITELN(LST,'repouso ');

```

```

FOR j := (nct + ncc + 1) TO nTotal DO
BEGIN
    posicao := posicao + DeltaX;
    WRITELN(LST,DeltaX*j:5:2,Ubs[j]*100/(1+Ubs[j]):14:1,Tg[j]:19:1,
    '
        -
        -');
END;
WRITELN(LST);
WRITE(LST,' ***** UMIDADE FINAL MEDIA (% b.u.) ');
WRITELN(LST,' .....: ',Umed:9:2);
END; (* impressora2 *)
BEGIN
    Hora:=trunc(ContS);
    Minuto:=(ContS - Hora)*60;
    IF Imp = 'V' THEN Video2
        ELSE Impressora2;
    ContImp := 0;
END; (* imprime2 *)
BEGIN (* Programa Inicial *)
    EntradaDeDados (nct, ncc, nr, Ui, Tig, Peig, Tamb, URamb,
        Tsec, Vazao, Velg, DeltaX, TmaxSec, DImp,
        UminFbu, Area, mTotal, Imp);
    nTotal := nct + ncc + nr;
    RMamb := Rmis (Tamb,URamb);
    IncSim := DeltaX/(Velg*60);
    Imprime1;
    Ui := Ui/(100 - Ui);
    FOR i := 1 TO nTotal DO
    BEGIN
        Ubs[i] := Ui;
        Tg[i] := Tig;
        Uinbs[i] := Ui;
    END;
    ContS := 0;
    ContImp := 0;

```

```

Fim := FALSE;
R := (Peig*Vesp(Tamb, RMamb)*Area*DeltaX)/(Vazao*IncSim*60*(1+Ui));
Ui := 100*Ui/(1+Ui);
Eff := Vazao/Vesp(Tamb, RMamb)*1.0048*(Tsec-Tamb)/(mTotal);
REPEAT
    ContS := ContS + IncSim;
    ContImp := ContImp + IncSim*60;
    Ti := TSec; Rmi := RMamb;
    FOR i := (ncc+1) TO (nct + ncc) DO Camada;
    Ti := TSec; Rmi := RMamb;
    FOR i := ncc DOWNTO 1 DO Camada;
    Umed := 0;
    FOR i := 1 TO nTotal DO Umed := Umed + Ubs[i]/nTotal;
    Umed := 100*Umed/(1 + Umed);
    IF ContImp = DImp THEN Imprime2;
    TgTroca := Tg[1];
    UTroca := Ubs[1];
    UiTroca := Ubs[1];
    FOR i:=1 TO (nTotal - 1) DO
    BEGIN
        Ubs[i]:=Ubs[i+1];
        Tg[i]:=Tg[i+1];
        Uinbs[i]:=Uinbs[i+1];
    END;
    Ubs[nTotal] := UTroca; Tg[nTotal] := TgTroca;
    Uinbs[nTotal] := UiTroca;
    IF ((TmaxSec = 0) AND (Umed UminFbu)) OR ((TmaxSec 0) AND
        (ContS = TmaxSec)) THEN Fim := TRUE;
UNTIL Fim;
Imprime2;
Efic := Eff*Conts*(100-Umed)/(Ui-Umed)*2*60;
WRITE(LST, ' ***** CONSUMO ESPECIFICO DE');
WRITELN(LST, ' ENERGIA (kJ/kg de agua) .....: ', Efic:10:2);
END.

```

APÊNDICE C

QUADRO 1C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidades Relativas, Teor de Umidade e Massa Específica. (Teste 1)

Tempo (h)	Temperatura (oC)						Umidade Relativa (%)			Teor de Umidade (%bu)	Massa Es- pecífica (kg.m ⁻³)
	Seca- gem	Ambi- ente	Ponto A	Ponto B	Exaus- tão 1	Exaus- tão 2	Ambi- ente	Exaus- tão 1	Exaus- tão 2		
0	122,0	24,7	20,0	36,2	29,0	24,0	53,3	79,0	62,7	39,6	458,1
1	120,2	22,6	40,8	61,7	44,0	24,5	61,8	94,2	84,4	37,0	452,6
2	123,9	20,4	42,4	62,8	44,0	28,0	66,6	88,7	85,5	37,9	448,2
3	126,1	21,5	39,9	47,0	42,5	37,5	71,5	100,0	93,7	38,4	461,0
4	123,4	23,4	39,1	49,0	43,5	41,0	56,0	94,2	88,2	33,6	442,7
5	117,5	23,8	39,5	53,4	42,5	40,5	56,5	94,1	91,0	36,7	450,2
6	121,3	24,6	39,4	51,5	42,0	41,0	53,3	94,1	85,5	32,8	442,9
7	125,3	22,4	39,1	51,3	42,0	40,5	57,9	94,1	82,6	33,2	447,2
8	119,5	21,5	38,8	51,1	41,0	38,0	60,9	85,5	82,0	30,6	438,8
9	123,3	20,4	37,9	56,7	40,0	36,5	67,0	88,1	84,5	28,6	435,8

Massa Inicial = 5.286 kg

Teor de Umidade Final = 28,4% b.u.

QUADRO 2C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidades Relativas, Teor de Umidade e Massa Específica. (Teste 2)

Tempo (h)	Temperatura (°C)						Umidade Relativa (%)			Teor de Umidade (%bu)	Massa Específica (kg.m ⁻³)
	Secagem	Ambiente	Ponto A	Ponto B	Exaustão 1	Exaustão 2	Ambiente	Exaustão 1	Exaustão 2		
0	101,6	17,1	18,7	22,5	20,0	20,0	81,8	82,7	78,5	28,4	416,0
1	115,0	17,8	39,6	44,3	42,0	24,0	81,8	94,1	88,1	27,2	407,4
2	121,8	16,9	39,7	55,9	42,5	35,5	85,8	94,1	84,2	27,7	409,3
3	120,5	17,4	38,9	60,5	41,5	39,0	90,5	91,2	74,1	26,8	409,5
4	117,1	16,5	38,5	66,0	43,0	38,5	81,2	88,6	82,1	23,3	397,9
5	125,1	17,0	39,0	71,2	41,0	39,0	81,2	94,0	71,5	23,8	498,3
6	122,0	16,6	39,1	69,8	43,0	41,0	85,4	78,0	67,3	21,9	402,2
7	120,6	15,5	37,8	68,9	44,5	42,0	76,1	73,5	63,1	20,2	403,1
8	117,1	14,2	38,5	75,0	42,5	41,0	75,4	70,4	60,3	18,7	383,7
9	118,5	14,1	37,9	80,5	48,0	43,0	79,5	67,9	59,1	18,3	392,4
10	122,5	13,6	40,2	74,6	47,0	47,0	79,9	61,1	53,1	17,0	393,3
11	123,1	-	41,9	80,2	50,0	48,0	70,7	51,0	49,9	15,7	390,9
12	124,0	13,6	40,3	77,5	50,0	-	-	37,8	-	13,5	392,1

Massa Inicial = 4.459 kg

Teor de Umidade Final = 13,6% b.u.

QUADRO 3C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidades Relativas, Teor de Umidade e Massa Específica. (Teste 3)

Tempo (h)	Temperatura (oC)						Umidade Relativa (%)			Teor de Umidade (%bu)	Massa Específica (kg.m ⁻³)
	Secagem	Ambiente	Ponto A	Ponto B	Exaustão 1	Exaustão 2	Ambiente	Exaustão 1	Exaustão 2		
0	122,0	22,4	22,7	32,1	28,5	22,5	58,8	60,0	77,5	37,2	459,7
1	115,0	23,1	34,3	48,0	41,5	30,5	56,0	94,1	77,8	38,7	473,9
2	119,5	23,7	38,8	52,9	43,0	42,0	56,5	97,1	80,3	35,6	449,9
3	122,1	23,4	37,7	53,4	41,0	43,0	62,7	91,1	73,0	33,4	451,5
4	126,7	23,4	39,0	56,8	43,0	42,5	59,3	91,3	77,8	32,7	448,9
5	122,7	23,8	38,1	55,6	43,0	42,5	59,3	88,6	72,8	31,4	443,3
6	122,8	23,8	38,7	61,1	43,0	43,0	59,3	78,0	68,2	30,1	443,1
7	122,4	23,1	38,4	60,8	43,0	43,5	61,4	85,8	70,7	28,0	434,6
8	116,0	21,6	38,5	62,6	44,0	41,5	60,4	73,3	70,0	28,4	441,0
9	125,1	20,7	38,0	64,4	46,0	42,5	59,9	69,3	65,6	26,3	430,9
10	120,5	20,5	38,6	66,7	44,0	41,0	67,0	73,3	72,3	25,8	430,2
11	118,6	20,0	39,5	66,9	47,5	44,0	70,8	67,7	64,0	23,2	430,1
12	121,7	19,9	41,4	68,4	45,5	45,0	66,6	71,5	60,1	22,9	421,1
13	117,1	18,8	38,6	72,9	48,0	44,0	74,1	61,5	64,0	21,2	419,9
14	119,1	18,1	41,6	76,7	46,0	49,5	73,8	52,5	49,0	20,2	405,3
15	128,1	19,0	43,4	69,6	48,0	46,0	73,8	65,7	60,6	19,7	405,5
16	121,5	-	40,0	86,5	49,0	44,0	82,2	62,0	59,6	17,3	401,4
17,5	117,0	-	39,8	91,7	-	-	-	-	76,0	14,5	397,8

Massa Inicial = 4.697 kg

Teor de Umidade Final = 13,0% b.u.

QUADRO 4C - Tempo de Secagem, Temperaturas, Umidades Relativas, Teor de Umidade e Massa Específica. (Teste 4)

Tempo (h)	Temperatura (oC)						Umidade Relativa (%)			Teor de Umidade (%bu)	Massa Específica (kg.m ⁻³)
	Secagem	Ambiente	Ponto A	Ponto B	Exaustão 1	Exaustão 2	Ambiente	Exaustão 1	Exaustão 2		
0	97,0	19,0	21,3	21,1	-	-	82,2	-	-	33,5	446,1
1	105,0	24,0	30,3	39,2	35,5	26,5	69,6	84,2	81,5	32,8	446,5
2	105,9	23,0	36,5	45,6	38,0	35,0	68,9	87,7	90,3	32,8	463,0
3	103,3	23,5	36,0	47,3	39,0	36,0	69,2	93,8	90,4	32,4	451,6
4	96,1	24,5	37,6	49,0	39,5	38,0	63,1	90,9	90,7	30,0	448,4
5	98,3	26,0	37,5	48,1	38,0	39,0	61,0	87,7	74,1	29,5	457,0
6	102,3	27,5	37,1	48,1	38,5	41,0	53,2	84,9	77,4	28,7	456,5
7	92,9	26,0	36,9	49,3	38,0	41,0	54,8	87,7	72,3	27,7	454,2
9	104,5	24,0	38,2	52,3	-	-	66,1	-	-	26,2	451,0
11	98,5	24,0	37,8	55,4	39,5	41,5	62,7	81,0	70,0	24,2	448,0
13	98,2	24,0	38,0	60,6	39,5	41,0	62,7	79,6	72,3	22,4	440,7
14,75	105,8	24,0	40,1	62,6	40,5	44,0	62,7	64,7	64,0	20,2	433,7

Massa Inicial = 4.965 kg

Teor de Umidade Final = 20,2% b.u.