

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG.QUÍMICA

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SÉCADOR
CONVECTIVO DE BANDEJAS PARA A SECAGEM DE
BANANA: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS
OPERACIONAIS**

GIANNA CAVALCANTI VILLAR

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

1999

GIANNA CAVALCANTI VILLAR

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR
CONVECTIVO DE BANDEJAS PARA A SECAGEM DE
BANANA: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS
OPERACIONAIS**

*Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Grau de Mestre.*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADORA: Prof^ª ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA

Campina Grande - Paraíba



V719e Villar, Gianna Cavalcanti.
Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de banana : análise da influência das variáveis operacionais / Gianna Cavalcanti Villar. - Campina Grande, 1999.
117 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.
"Orientação : Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina".
Referências.

1. Secagem. 2. Secador Conectivo de Bandejas. 3. Variáveis Operacionais - Análise. 4. Dissertação - Engenharia Química. I. Alsina, Odelsia Leonor Sánchez de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 66.047(043)

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR
CONVECTIVO DE BANDEJAS PARA A SECAGEM DE
BANANA: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS
OPERACIONAIS**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM¹⁵..... /¹²..... / 1999



.....
Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
Orientadora



.....
Antonio Gilson Barbosa de Lima
Examinador



.....
Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
Examinador

Dezembro - 1999

DEDICATÓRIA

Ao meu grande Deus.

Aos meus queridos pais, Hélio (in memoriam) e Cinele.

Ao meu esposo Porfírio.

Às minhas irmãs (Ivana e Geila), meus cunhados (Ziano e Ricardo), minha avó (Maria) e minha sobrinha (Amanda).

À meu querido irmão Hélio Filho (in memoriam), que deixou inesquecíveis lembranças de alegria, dignidade e amor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado força e persistência para atingir este objetivo.

Aos meus pais, por todo o amor e dedicação sempre.

À Porfírio, pela paciência, dedicação, cumplicidade e amor, não só no decorrer deste mestrado, como em todos os momentos da minha vida.

À minha Orientadora Prof^a Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina pela paciência e orientação no desenvolvimento deste trabalho. Seus ensinamentos foram de fundamental importância. Muito obrigado.

Ao Professor Antonio Gilson Barbosa de Lima e Normanda Melo, pela ajuda prestada no fornecimento de material bibliográfico.

À Coordenação de Pós-Graduação, em especial a Maria José Bezerra e Maricé Pereira da Silva, pelos serviços prestados.

À minha turma do mestrado: Micheline, Normanda, Veruscka, Josy, Luciana e Tânia, pela amizade e companheirismo; e ao meu amigo Magnus, pela atenção dedicada.

Aos colegas do Laboratório de Eng. Química, em especial a Ana Paula pelas experiências realizadas em conjunto.

Aos professores e funcionários do Departamento de Eng. Química.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Muitas frutas e vegetais contêm mais que 80% de água e são altamente perecíveis. Devido ao alto índice de perdas pós-colheita, é muito grande a necessidade de se estudar formas de reduzi-las. Estudos realizados apontam a secagem de frutas como um dos métodos de conservação mais econômicos e eficientes, quando comparado com outros métodos: congelamento, enlatados, etc. Neste trabalho foi realizado um estudo experimental da secagem de rodela de banana, num secador convectivo de bandejas, com o objetivo de analisar o efeito das variáveis operacionais, como temperatura e velocidade do ar de secagem sobre o desempenho do secador, estudar o efeito da espessura da camada de banana sobre as bandejas e analisar o desempenho do secador através de dois critérios: índice de saturação do ar de secagem e eficiência energética global do secador. As faixas operacionais utilizadas foram: temperatura de entrada do ar entre 50 e 80°C; velocidade do ar entre 0,2 e 2,2m/s e espessura da camada de rodela de banana entre 0,6 e 2,0cm. Os resultados obtidos para avaliação do desempenho do secador mostraram que se obteve melhor aproveitamento do ar e maior eficiência energética quando se opera com velocidade baixa do ar de secagem e em outras condições como maior espessura da camada de banana sobre as bandejas. Esses resultados indicariam que o ar sai do secador longe das condições de saturação, sendo possível aumentar a carga e/ou o número de bandejas para melhorar a eficiência e obter um melhor aproveitamento do potencial de secagem do ar. Os dados experimentais foram utilizados num programa simulador de um secador convectivo de bandejas desenvolvido por Cavalcante (1999) para comparação dos resultados. O modelo de secagem empregado foi proposto por Sokhansanj (1984). A cinética de secagem foi simulada utilizando-se a equação de Kiranoudis *et alii* (1997) com os coeficientes empíricos para o cálculo da constante de secagem. O modelo e o simulador utilizados representaram adequadamente o comportamento observado experimentalmente, tanto na predição da evolução da umidade da fruta, como da temperatura e umidade do ar.

ABSTRACT

Many kinds of fruits and vegetables are composed of more than 80% of water and are highly perishable. Thus, due to the great deal of losses after harvests, it is very important to study ways of reducing these losses. Studies indicate fruit drying as one of the most economical and efficient conservation methods, when compared to other methods: freezing, canning, and so on. In this work, we made an experimental study of drying bananas slices in a convective tray drier, in order to analyze the effects of operational variables (such as temperature and air drying speed) over the performance of the drier; study the effect of the banana slice thickness above the tray; and analyze the performance of the drier through two criteria: drying air saturation level and global energetic efficiency of the drier. The operational bands used were: input air temperature between 50 and 80° C; air speed between 0,2 and 2,2 m/s; and banana slice layer thickness between 0,6 and 2,0 cm. The evaluation results showed a better utilization of the air and improved energetic efficiency not only when operated with low air drying speed but also in other conditions, such as with thicker banana slice layers over the trays. These results indicate that the air goes out of the drier far from the saturation conditions, making it possible to increase the load and/or the number of trays, in order to have a better efficiency and a better use of the air drying potential. The experimental data were used in a simulator program of a convective tray drier developed by Cavalcante (1999) for comparison of results. The drying model employed was proposed by Sokhansanj (1984). The drying kinetic was simulated using Kiranoudis et alii (1997) equation with empiric coefficients for the estimate of the drying constant. The model and the simulator used correctly represent the experimental behavior observed, not only in predicting fruit moisture evolution, but also air temperature and air humidity.

SIMBOLOGIA

a	Área específica da rodela de banana (m^2/m^3)
A	Área da partícula (m^2)
c_a	Calor específico do ar (J.kg/K)
c_1	Calor específico da água (J.kg/K)
c_p	Calor específico da fruta (J.kg/K)
c_v	Calor específico do vapor (J.kg/K)
D_p	Diâmetro da partícula (m)
E	Espessura da camada de banana sobre as bandejas (cm)
g_a	Vazão mássica do ar (g/min)
G_a	Velocidade mássica do ar seco (kg/min.m ²)
h	Coefficiente de transmissão de calor [J/(min.m ² .K)]
h_{LV}	Calor latente de vaporização (J/kg)
H_0	Razão de umidade do ar na entrada do secador (kg/kg)
H_j	Razão de umidade do ar na saída da bandeja j, com j = 1, ..., 4 (kg/kg)
k	Condutividade térmica [J/(min.m.K)]
K	Constante de secagem (l/min)
m_i	Massa inicial da amostra (g)
m_f	Massa final da amostra após a secagem em estufa (g)
m_{ss}	Massa de sólido seco (g)
$m_{am(t)}$	Massa da amostra a cada intervalo de tempo (g)
Nu	Número de Nusselt (adimensional)
p_0	Parâmetro empírico da equação de Kiranoudis (l/min)
p_1, p_2, p_3 e p_4	Parâmetros empíricos da equação de Kiranoudis (l/min)
Pr	Número de Prandtl (adimensional)
Q_a	Energia total fornecida ao secador (kJ/kg de material seco)
Q_{ab}	Calor latente (kJ/kg de material seco)
Q_s	Energia total carregada pela corrente de ar na saída do secador (kJ/kg de material seco)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
r_m	Taxa de secagem (kg/min.m ³)
\bar{T}_{amb}	Temperatura ambiente média (°C)

T_0	Temperatura na entrada do secador ($^{\circ}\text{C}$)
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)
T_{gs}	Temperatura do gás na saída do secador ($^{\circ}\text{C}$)
T_r	Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$)
t_m	Tempo para medição de massa (min)
t_t	Tempo para medição de temperatura (min)
U (b.s)	Umidade da fruta em base seca (adimensional)
U_i	Umidade inicial da fruta (adimensional)
$U_{(t)}$	Umidade da fruta a cada intervalo de tempo (adimensional)
U_{EQ}	Umidade de equilíbrio (adimensional)
U_M	Umidade de monocamada (adimensional)
U_R	Umidade relativa (adimensional)
$\bar{U}.R_{amb}$	Umidade relativa ambiente média (%)
V	Velocidade do ar (m/s)
V_p	Volume da partícula (m^3)
$W_{s,j}$	Taxa de evaporação real na saída da bandeja j, com $j = 1, \dots, 4$
$W_{sat,j}$	Taxa de evaporação de água que se teria se o ar saísse saturado da bandeja j, com $j = 1, \dots, 4$
x	Distância (m)

Letras gregas

θ	Temperatura da fruta ($^{\circ}\text{C}$)
Φ	Índice de saturação (%)
η_G	Eficiência energética global do secador (%)
ε	Porosidade do leito (adimensional)
κ	Constante de Van't Hoff (adimensional)
μ	Viscosidade dinâmica (kg/min.m)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/min)
ρ_p	Densidade da partícula (kg/m^3)

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1- Secagem.....	4
2.2- Transferência de calor por convecção.....	4
2.3- Banana: características da fruta.....	6
2.3.1- A banana-passa.....	9
2.4- Alguns trabalhos relativos à cinética de secagem.....	10
2.5- Secador de bandejas.....	12
2.6- Desempenho de um secador.....	14
2.7- Eficiência energética.....	14
2.8- Teoria da modelagem e simulação do processo de secagem.....	16
2.8.1- Suposições usadas para simplificar um modelo geral de secagem.....	17
2.8.2- Simulação.....	17
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1- Materiais.....	20
3.2- Equipamentos utilizados.....	20
3.2.1- Equipamentos básicos.....	21
3.2.2- Equipamentos auxiliares.....	23
3.3- Métodos.....	23
3.3.1- Preparação da banana.....	23
3.3.2- Determinação da umidade inicial.....	24
3.3.3- O processo de secagem.....	24
3.3.3.1- Determinação da temperatura interna da banana.....	25
3.3.4- Determinação das propriedades psicrométricas do ar de secagem.....	25
3.3.5- Determinação da razão de umidade do ar e da taxa de evaporação que se teria se o ar saísse saturado.....	25
3.3.6- Determinação da umidade inicial em base úmida e base seca.....	26
3.3.7- Índice de saturação do ar de secagem.....	27
3.3.8- Índice de saturação médio do ar de secagem.....	27
3.3.9- Eficiência energética global do secador.....	27

3.3.10- Eficiência energética global média do secador.....	28
3.3.11- Propriedades físicas e características geométricas da fruta (banana)...	28
3.3.12- Metodologia numérica utilizada.....	29
3.3.13- Metodologia numérica para simulação do processo de secagem.....	30
3.3.14- Condições experimentais.....	31
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1- Introdução.....	32
4.2- Reprodutibilidade experimental.....	32
4.3- Curvas de secagem.....	35
4.4- Temperatura interna da banana durante a secagem.....	38
4.5- Efeito da velocidade do ar de secagem.....	39
4.6- Efeito da temperatura do ar de secagem.....	41
4.7- Efeito da espessura da camada de banana sobre as bandejas.....	44
4.8- Perfis de temperatura do ar de secagem.....	46
4.9- Análise do desempenho do secador.....	49
4.9.1- Índice de saturação do ar de secagem.....	50
4.9.1.1- Índice de saturação médio do ar de secagem.....	53
4.9.2- Eficiência energética global do secador.....	54
4.9.2.2- Eficiência energética global média do secador.....	57
4.10- Comparação dos resultados experimentais e simulados.....	58
5- CONCLUSÕES.....	68
6- SUGESTÕES.....	69
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
Apêndice A- Tabelas de dados obtidos na câmara de secagem.....	74
Apêndice B- Gráficos das curvas de secagem X tempo e seus respectivos gráficos das derivadas; para vários experimentos.....	98
Apêndice C- Gráficos dos perfis de temperatura do ar de secagem X tempo e seus respectivos gráficos de alisamento, para vários experimentos.....	105
Apêndice D- Programa fortran para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar de secagem.....	112

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1- Escala de maturação de banana, segundo o aspecto e os teores de amido e de açúcar.....	7
TABELA 2.2- Composição da banana madura.....	8
TABELA 2.3- Teor mineral da banana madura.....	8
TABELA 2.4- Vitaminas existentes na banana madura.....	9
TABELA 2.5- Equações utilizadas nos modelos matemáticos.....	16
TABELA 3.1- Propriedades físicas e parâmetros geométricos das rodela de banana seca.....	29
TABELA 3.2- Condições experimentais.....	31
TABELA 4.1- Índice de saturação médio do ar de secagem.....	54
TABELA 4.2- Eficiência energética global média do secador.....	57
TABELA 4.3- Parâmetros experimentais do ar e da banana para cada teste de secagem realizado e usados para avaliação da simulação.....	58
TABELA A1- Parâmetros utilizados: $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	75
TABELA A2- Parâmetros utilizados: $V=1,0\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	77
TABELA A3- Parâmetros utilizados: $V=0,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	79
TABELA A4- Parâmetros utilizados: $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	81
TABELA A5- Parâmetros utilizados: $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	83
TABELA A6- Parâmetros utilizados: $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=60^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	85
TABELA A7- Parâmetros utilizados: $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	87
TABELA A8- Parâmetros utilizados: $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=80^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	89
TABELA A9- Parâmetros utilizados: $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$	91
TABELA A10- Parâmetros utilizados: $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=2,0\text{cm}$	93
TABELA A11- Parâmetros utilizados: $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=68^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	95
TABELA A12- Parâmetros utilizados (experimento reproduzido): $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1- Curvas de secagem típicas. Secagem convectiva, condições externas constantes.....	5
FIGURA 3.1- Diagrama esquemático do equipamento.....	21
FIGURA 3.2- Suporte de material (cesta).....	22
FIGURA 3.3- Esquema do secador convectivo.....	30
FIGURA 4.1- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T_0=70^{\circ}\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 1.....	33
FIGURA 4.2- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T_0=70^{\circ}\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 2.....	33
FIGURA 4.3- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T_0=70^{\circ}\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 3.....	34
FIGURA 4.4- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T_0=70^{\circ}\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 4.....	34
FIGURA 4.5- Curvas de secagem de banana, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$...	35
FIGURA 4.5.1- Derivada das curvas de secagem em função do tempo, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	36
FIGURA 4.6- Curvas de secagem de banana, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$...	36
FIGURA 4.6.1- Derivada das curvas de secagem em função do tempo, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	37
FIGURA 4.7- Evolução da temperatura interna da banana.....	38
FIGURA 4.8- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 1, para $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	39
FIGURA 4.9- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 2, para $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	40
FIGURA 4.10- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 3, para $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	40
FIGURA 4.11- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 4, para $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	41
FIGURA 4.12- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 1, para $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$	42
FIGURA 4.13- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 2, para $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$	42

FIGURA 4.14- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 3, para $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$	43
FIGURA 4.15- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 4, para $V=2,2\text{m/s}$ e $E=0,6\text{cm}$	43
FIGURA 4.16- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 1, para $V=1,5\text{m/s}$ e $T_0=70^{\circ}\text{C}$	44
FIGURA 4.17- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 2, para $V=1,5\text{m/s}$ e $T_0=70^{\circ}\text{C}$	45
FIGURA 4.18- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 3, para $V=1,5\text{m/s}$ e $T_0=70^{\circ}\text{C}$	45
FIGURA 4.19- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 4, para $V=1,5\text{m/s}$ e $T_0=70^{\circ}\text{C}$	46
FIGURA 4.20- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	47
FIGURA 4.21- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	47
FIGURA 4.22- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	48
FIGURA 4.23- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	49
FIGURA 4.24- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas 1, 2, 3 e 4, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	51
FIGURA 4.25- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas 1, 2, 3 e 4, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	51
FIGURA 4.26- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas 1, 2, 3 e 4, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=2,0\text{cm}$	52
FIGURA 4.27- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas 1, 2, 3 e 4, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	52
FIGURA 4.28- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	55
FIGURA 4.29- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V=0,2\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	55
FIGURA 4.30- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^{\circ}\text{C}$ e $E=2,0\text{cm}$	56

FIGURA 4.31- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	56
FIGURA 4.32- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T_0=70^\circ\text{C}$, $V=0,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	59
FIGURA 4.33- Comparação dos dados simulados e experimentais para a temperatura e umidade do ar, com $T_0=70^\circ\text{C}$, $V=0,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	61
FIGURA 4.34- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T_0=70^\circ\text{C}$, $V=1,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	62
FIGURA 4.35- Comparação dos dados simulados e experimentais para a temperatura e umidade do ar, com $T_0=70^\circ\text{C}$, $V=1,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	64
FIGURA 4.36- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T_0=50^\circ\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	65
FIGURA 4.37- Comparação dos dados simulados e experimentais para a temperatura e umidade do ar, com $T_0=50^\circ\text{C}$, $V=2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$	67
FIGURA 4.38- Curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	99
FIGURA 4.38.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	99
FIGURA 4.39- Curvas de secagem, para $V=1,0\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	99
FIGURA 4.39.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=1,0\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	100
FIGURA 4.40- Curvas de secagem, para $V=0,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	100
FIGURA 4.40.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=0,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	100
FIGURA 4.41- Curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=60^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	101
FIGURA 4.41.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=60^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	101
FIGURA 4.42- Curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	101
FIGURA 4.42.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	102
FIGURA 4.43- Curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=80^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	102
FIGURA 4.43.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=80^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	102
FIGURA 4.44- Curvas de secagem, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$	103

FIGURA 4.44.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$	103
FIGURA 4.45- Curvas de secagem, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=2,0\text{cm}$	103
FIGURA 4.45.1- Derivada das curvas de secagem, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=2,0\text{cm}$	104
FIGURA 4.46- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,0\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	106
FIGURA 4.46.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,0\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	106
FIGURA 4.47- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=0,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	106
FIGURA 4.47.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=0,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	107
FIGURA 4.48- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	107
FIGURA 4.48.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	107
FIGURA 4.49- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=60^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	108
FIGURA 4.49.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=60^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	108
FIGURA 4.50- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	108
FIGURA 4.50.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=50^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	109
FIGURA 4.51- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=80^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	109
FIGURA 4.51.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=2,2\text{m/s}$, $T_0=80^\circ\text{C}$ e $E=0,6\text{cm}$	109
FIGURA 4.52- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$	110
FIGURA 4.52.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$	110

FIGURA 4.53- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$110

FIGURA 4.53.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V=1,5\text{m/s}$, $T_0=70^\circ\text{C}$ e $E=1,2\text{cm}$111

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Muitas frutas e vegetais contêm mais que 80% de água e são altamente perecíveis. A perda de água e a deterioração são responsáveis por muitas de suas perdas, que são estimadas em mais de 30 a 40% nos países desenvolvidos e nos trópicos e sub-trópicos, devido a manuseio, transporte e armazenagem inadequadas (Jayaraman & Das Gupta, 1995).

Através dos tempos o homem tem utilizado o sol como fonte natural de calor para a secagem das frutas. A energia solar é a fonte de calor mais barata para remover a água, mas a secagem ao sol está sujeita a algumas desvantagens, como: são necessárias grandes áreas; possibilidade de degradação da qualidade do material por meio de infestações de pássaros e insetos; poluição atmosférica e mudanças drásticas do clima. Daí a importância de se substituir a secagem natural pela secagem artificial e desenvolver tecnologia para projeto e construção de vários tipos de secadores (Imre & Palaniappan, 1996). A secagem artificial proporciona meios para secar as frutas rapidamente na época da colheita, não dependendo das condições do tempo.

A secagem tem por objetivo assegurar a conservação da fruta por meio da redução do seu teor de água, e é realizada por um processo que utiliza energia térmica para remover parte ou quase a totalidade da água das frutas, sob condições de temperatura, umidade e velocidade do ar cuidadosamente controladas.

O Brasil é um grande produtor e consumidor mundial de bananas. Segundo o Interpa-PB (1996), o Brasil produz em torno de 500.000 toneladas de bananas anualmente. Entretanto, conforme Travaglini *et alii* (1993), pouca participação tem no mercado internacional de banana-passa. Além do seu consumo "in natura", vários são os produtos obtidos a partir da banana, tais como polpa (usada para a fabricação de sorvetes e alimentos infantis), vitaminas e produtos secos (farinha, flocos e banana-passa).

A banana-passa é obtida da secagem da banana madura. Trata-se de um produto industrializado em pequena escala, com volume e comercialização a nível de mercado interno desconhecido. Ainda de acordo com Travaglini *et alii* (1993), no Brasil, a secagem de banana é praticada de forma quase artesanal ou semi-industrial, resultando em grandes perdas de energia e de produto ocasionadas principalmente pelas instalações precárias e má operação dos equipamentos. Ainda assim, esta tecnologia constitui uma alternativa para a conservação da fruta, com o intuito de minimizar perdas após a colheita.

O projeto de secadores visa a economia de energia e também a preservação do material a ser seco. Diversos tipos de secadores tem sido estudados com a finalidade de melhor viabilizar a obtenção de um produto de alta qualidade pós-secagem segundo a variedade de materiais existentes.

Dentre os diversos tipos de equipamentos de secagem, o mais simples é o secador de bandejas, no qual o material a ser seco é colocado sobre bandejas, no interior de câmaras semelhantes a uma estufa (Bennet, 1978). Este tipo de secador é muito utilizado para a secagem de frutas, legumes e hortaliças. É uma unidade de operação descontínua, usada para operações em pequena escala. Possibilita maior flexibilidade operacional conforme a maior ou menor disponibilidade das diferentes matérias-primas (Travaglini *et alii*, 1993).

O secador de leito fixo do Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulados da UFPB, Campus II, tem apresentado resultados satisfatórios em pesquisas desenvolvidas relacionadas ao beneficiamento de frutas, e portanto, este trabalho é parte de um projeto em desenvolvimento em parceria com a Universidade Estadual da Paraíba, que propõem uma unidade de processamento de frutas tropicais.

A proposta deste trabalho consiste em realizar um estudo experimental, com o objetivo de estudar o desempenho deste secador convectivo de bandejas para a secagem de rodela de banana.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- analisar o efeito das variáveis operacionais, como temperatura e velocidade do ar de secagem, sobre o desempenho do secador;
- estudar o efeito da espessura da camada de banana sobre as bandejas;
- analisar o desempenho do secador;

- estimar parâmetros experimentais do ar e da banana para alguns testes de secagem realizados e utilizá-los num programa simulador de um secador convectivo de bandejas, desenvolvido por Cavalcante (1999), para validação do modelo e do simulador.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Secagem

A secagem refere-se, em geral, à remoção de um líquido de um sólido por evaporação (Perry & Chilton, 1980). Ou seja, à transferência de um líquido, que está num sólido úmido para uma fase gasosa não saturada (Foust *et alii*, 1980). Na prática, a energia necessária para evaporar o líquido é utilizada na forma de calor (Nonhebel & Moss, 1979).

Quando um produto seca ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: (1) há transferência de calor para evaporar o líquido; (2) há transferência de massa na forma de líquido e/ou de vapor dentro do produto e na de vapor a partir da superfície. Os fatores que governam as velocidades destes processos determinam a velocidade de secagem.

A investigação sobre a forma de secagem de um sólido pode basear-se no mecanismo interno do escoamento do líquido ou na influência das condições externas, tais como, temperatura, umidade, escoamento do ar, estado de subdivisão do sólido, agitação do sólido, método de suportar o sólido e o contato entre as superfícies calefadoras e o sólido úmido. Contudo na resolução de um problema de secagem não é obrigatória a presença de todas estas variáveis (Perry & Chilton, 1980).

O tratamento teórico da secagem de sólidos depende do mecanismo predominante, segundo seja, transferência de calor ao sólido por convecção, condução e/ou radiação. Na prática, o mecanismo predominante é a convecção, utilizada em secadores diretos onde o material é seco por contato direto com uma corrente de gás quente que passa através ou sobre ele (Nonhebel & Moss, 1979).

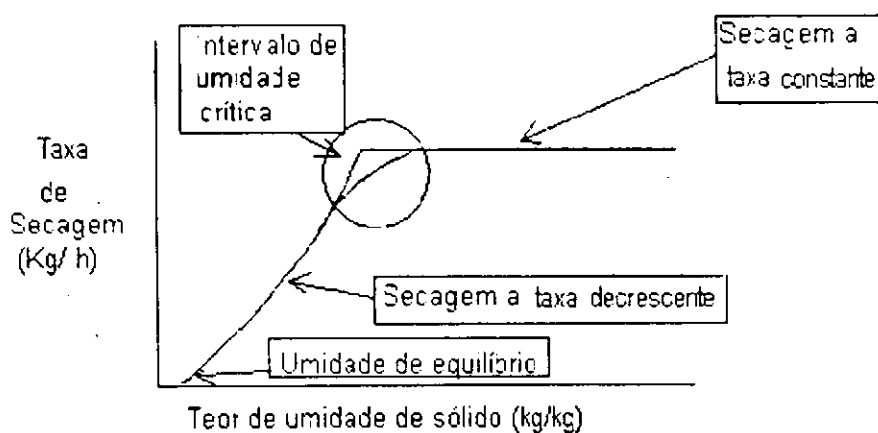
2.2- Transferência de calor por convecção

Neste processo, o sólido úmido se seca ao passar sobre ele uma corrente de gás quente. O gás quente serve para transferir calor ao sólido e para retirar o

vapor formado na superfície do mesmo. Se o gás quente a temperatura e umidade constante é adicionado ao sistema, se observa que o processo de secagem pode ocorrer em duas etapas diferentes. Inicialmente, a taxa de secagem de um produto é constante e quando este alcança um certo valor de umidade a sua taxa começa a diminuir progressivamente até ser nula, quando o material estiver em equilíbrio com o meio.

O teor de umidade a partir do qual a taxa de secagem deixa de ser constante e começa a diminuir se conhece como umidade crítica, mas geralmente a mudança tende a ocorrer de forma gradual, dentro de um intervalo de umidade, como se indica nas curvas típicas de secagem da Figura 2.1.

(a)



(b)

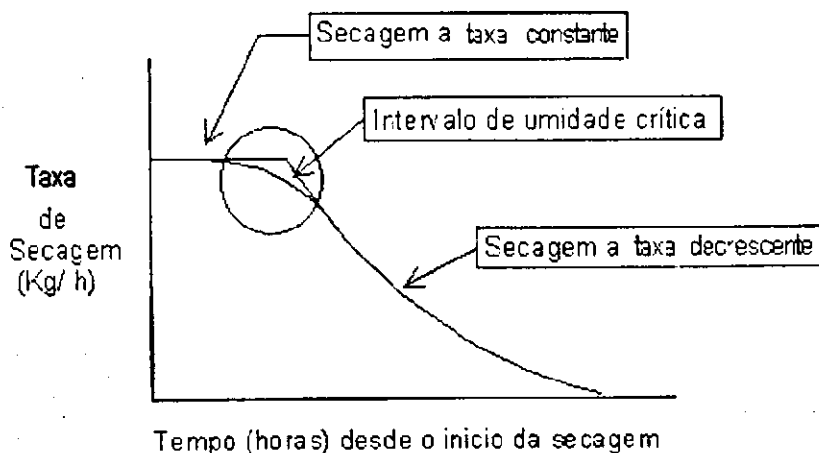


FIGURA 2.1- Curvas de secagem típicas. Secagem convectiva, condições externas constantes.

Em alguns casos, o teor de umidade inicial pode estar abaixo do teor de umidade crítico e a secagem transcorrerá a taxa decrescente. As curvas a taxa decrescente podem ser côncavas, convexas ou aproximar-se de uma linha reta; podem apresentar um ponto de inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco.

O período de taxa constante de secagem corresponde ao caso em que a superfície do sólido está molhada. Neste caso, para cada sistema a taxa de secagem é controlada pelas condições de secagem, que, no caso de convecção pura, são a velocidade, temperatura e a umidade do gás de secagem. Se estas condições são constantes, a taxa de secagem é constante, e a velocidade de migração de líquido do interior do sólido para a superfície, na qual ocorre a evaporação, não é um fenômeno que limita o processo. No período de taxa decrescente de secagem, a velocidade de migração do líquido para a superfície diminui, e por isso, este fenômeno controla a velocidade de secagem. Neste momento a superfície do produto não está totalmente molhada e a velocidade de migração produz uma diminuição do efeito das condições externas, e a taxa de secagem é somente um reflexo da falta de uniformidade na velocidade de migração de líquido para a superfície. O valor do teor de umidade crítico corresponde ao momento em que a velocidade de migração de líquido para a superfície é igual a da velocidade de evaporação superficial (Nonhebel & Moss, 1979).

2.3- Banana: características da fruta

Conforme Lima (1999): "A origem da bananeira é incerta. Atualmente, admite-se que seja originária do Oriente, Sul da China ou Indochina. Há informações da sua presença na Índia, Malásia ou Filipinas, há mais de 4000 anos. No Brasil ela existe desde antes do seu descobrimento".

As bananas constituem-se em fonte importante na alimentação humana pelo valor calorífico, energético e principalmente pelo conteúdo mineral e vitamínico que apresentam. Esta fruta madura apresenta entre 16,5 a 19,5% de açúcares e 1 a 4% de amido.

O estágio de maturação ideal para o processamento da banana-passa se situa ao nível 7 da Tabela 01, em que a fruta apresenta um mínimo de amido e um máximo de açúcares, sem, porém, apresentar manchas pardas na polpa, como é o caso do estágio correspondente ao nível 8, que resulta em produto seco manchado e pouco atrativo (Travaglini *et alii*, 1993).

TABELA 2.1- Escala de maturação de banana, segundo o aspecto e os teores de amido e de açúcar.

Aspecto da fruta	Amido (%)	Açúcar (%)
1 – Fruta verde	21,5 a 19,50	0,1 a 2,0
2 – Fruta verde com traços amarelos	19,5 a 16,5	2,0 a 5,0
3 - Fruta mais verde que amarela	18,0 a 14,5	3,5 a 7,0
4 – Fruta mais amarela que verde	15,0 a 9,0	6,0 a 12,0
5 – Fruta amarela, extremidade verde	10,5 a 2,5	10,0 a 18,0
6 – Fruta inteiramente amarela	4,0 a 1,0	16,5 a 19,5
7 – Fruta amarela com pequenas manchas pardas	2,5 a 1,0	17,5 a 19,0
8 – Fruta amarela com grandes manchas pardas	1,5 a 1,0	18,5 a 19,0

Fonte: Travaglini *et alii* (1993)

A banana é basicamente composta de: água (70%); proteína (1,2%); carboidrato rico em fósforo (27%), sais minerais (cálcio, ferro, cobre, zinco, iodo, manganês e cobalto) e vitaminas (vitamina A, tiamina, riboflavina, niacina e vitamina C) (Simão, 1971 citado por Lima, 1999). As Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 apresentam respectivamente, a composição, os teores de vitaminas e minerais aproximados da banana madura, segundo vários autores reportados na literatura (Lima, 1999).

TABELA 2.2- Composição da banana madura

Constituinte	Referência					
	Jacobs (1951) (%)		Mohsenin (1986) (%)	Moreira (1987)** (g/100g)	Macrae et alii (1993) (g/100g)	Potter e Hotchkiss (1995) (%)
	Fresca	Seca	(%)	(g/100g)	(g/100g)	(%)
Proteína	1,2	3,6	1,6	1,1	1,1	1,3
Gordura	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4
Fibra	0,6	1,7	0,50	0,3	3,4	---
Cinza	0,84	2,5	0,90	1	---	0,8
Amido	---	---	3,0	1	3,0	---
Açúcar	19,2	---	20,2	---	16,2	---
Sacarose	---	---	---	0,0122	---	---
Glicose	---	---	---	0,0046	---	---
Frutose	---	---	---	0,0035	---	---
Sólido	---	---	27,54	---	---	---
Sucrose	---	---	8,27	---	---	---
Ácidos	0,39*	1,4*	0,41	---	---	---
Água	74,8	23,0	---	74,3	70,7	73,5
Carboidrato	23,0	70,6	---	23,5	---	24,0
Nitrogênio	---	---	---	---	0,18	---

* Ácido málico; ** "Nanica"

TABELA 2.3- Teor mineral da banana madura

Teor mineral	Referência		
	Jacobs (1951) (mg/100g)	Moreira (1987)* (mg/100g)	Macrae et alii (1993) (mg/100g)
Sódio	---	1,0	1,0
Potássio	---	881,0	350,0
Cálcio	8,8	29,0	7,0
Magnésio	---	31,0	42,0
Fósforo	28	29,0	28,0
Ferro	0,6	0,89	0,4
Cobre	---	0,10	0,16
Zinco	---	0,19	0,2
Enxofre	---	10,0	13,0
Cloro	---	118,0	79,0
Manganês	---	0,99	---

* "Nanica"

TABELA 2.4- Vitaminas existentes na banana madura

Vitaminas	Referência		
	Jacobs (1951) (mg/100g)	Moreira (1987)* (mg/100g)	Macrae <i>et alli</i> (1993) (mg/100g)
Carotene (A)	430 U.I	540-500 U.I**	0,200
Tiamina (B ₁)	0,09	0,04-0,06	0,040
Riboflavina (B ₂)	0,06	0,06-0,08	0,070
Ácido nicotínico	---	---	0,600
Ácido ascórbico (C)	10,0	0,10-0,11**	10,000
Vitamina E	---	---	0,200
Vitamina B ₆	---	---	0,510
Folato	---	---	0,022
Pantotenato	---	---	0,260
Niacina	0,6	---	---

* "Nanica" **Casca amarela

O processamento de bananas para obtenção de produtos elaborados tem sido direcionado para farinha, cremes, flocos, banana-passa, bananada, balas, purê, geleia, rapadura, etc.

2.3.1- A banana-passa

A banana seca ou banana-passa, é obtida da secagem da banana madura. Geralmente é obtida da banana nanica ou nanição, apresentando coloração bem escura, consistência firme e sabor pouco persistente de banana.

A banana seca ou banana-passa caracteriza-se por um elevado teor de açúcares. Pode ser classificada entre os produtos de elevado valor alimentício, facilmente assimilável e constituindo uma fonte de energia ativa. Seu valor energético pode ser comparado ao das tâmaras (316cal/100g) e ao dos figos (300cal/100g), sendo que 125g de banana seca, por dia, bastariam para cobrir um quarto das necessidades alimentícias de um menino de dez anos, em valor energético, glicídeos, magnésio e vitamina PP, prótidos de origem vegetal, potássio, ferro e magnésio. Cobriria, aproximadamente, um oitavo das necessidades em fósforo, cloro, zinco e vitamina C.

A banana seca pode ser armazenada satisfatoriamente por mais de alguns anos sem adição de conservantes. Presume-se ser devido ao elevado teor de

açúcares, que excede 50%. A utilização de técnicas adequadas de secagem pode levar à obtenção de um produto de coloração clara, consistência macia e de sabor e aroma agradáveis (Travaglini *et alii*, 1993).

2.4- Alguns trabalhos relativos à cinética de secagem de banana

Altemani (1976) citado por Lima (1999) reporta um estudo experimental de coletores solares planos de convecção natural. O sistema desenvolvido foi aplicado para secagem de frutas, particularmente bananas inteiras, em metades cortadas longitudinalmente e em rodela (1cm de espessura). Testes experimentais foram realizados com temperaturas do ar na entrada da câmara variando de 30 a 67^oC. Segundo o autor, a influência da geometria na taxa de secagem é nitida, sendo que as bananas cortadas apresentaram uma taxa de secagem sensivelmente maior do que às apresentadas para as bananas inteiras.

Schirmer *et alii* (1996) investigaram experimentalmente o desempenho do secador solar tipo túnel para secagem de bananas. Segundo os autores, a temperatura do ar de secagem do coletor solar variou de 40 a 65^oC durante a secagem, dependendo das condições climáticas e da hora do dia, sendo que o processo demorou de 3 a 5 dias em comparação aos 5 a 7 dias necessários para a secagem solar com ar natural. Aliado a esta vantagem, o produto apresentou alta qualidade em sabor, cor e textura.

Queiroz & Nebra (1995) abordaram a modelagem do processo de secagem de bananas *Musa Acuminata* sub grupo Cavendish, baseada na teoria da difusão líquida, com ênfase ao tipo de condição de contorno considerada para a superfície da fruta. Eles desenvolveram um estudo teórico e experimental para investigar os mecanismos de transferência de umidade durante a secagem de banana. Os dados foram obtidos de testes experimentais sob condições controladas tais como temperatura do ar e umidade relativa. As bananas foram representadas por um cilindro infinito e o coeficiente de difusão foi considerado constante. Duas condições de contorno foram investigadas para a superfície da fruta: conteúdo de umidade de equilíbrio e condição de contorno convectiva. Os resultados mostraram que o modelo convectivo descreveu muito bem a cinética de secagem experimental.

Num outro trabalho, Queiroz & Nebra (1996) estudaram a secagem de bananas inteiras, variedade " nanicão ", na faixa de temperatura entre 29,9°C e 68,9°C, propondo um modelo cinético que inclui o efeito do encolhimento.

Alsina *et alii* (1997) estudaram a cinética de secagem de fatias de banana, em camada delgada, analisando os efeitos da temperatura e velocidade do ar. Um modelo exponencial simples foi proposto para representar a cinética de secagem de fatias de banana apresentando bom ajuste com os dados experimentais.

Kiranoudis *et alii* (1997) estudaram a cinética de secagem de quatro frutas (maça, pera, kiwi e banana) pela introdução de um parâmetro empírico no modelo de transferência de massa, envolvendo um parâmetro característico (constante de secagem), como uma função das variáveis do processo. O modelo foi testado com dados produzidos num secador de laboratório, usando uma análise de regressão não linear. Experimentos para determinar a influência das variáveis do processo sobre a cinética de secagem foram realizados. As variáveis levadas em consideração foram as dimensões características das amostras e a temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Os experimentos foram conduzidos em três níveis de dimensões características das amostras (10, 20 e 28mm), em três níveis de temperatura do ar (50, 60 e 70°C), em três níveis de velocidade do ar (1, 2 e 4,5m/s) e em dois níveis de umidade relativa do ar (15 e 40%). Neste trabalho foram apresentados resultados do teor de umidade de equilíbrio para várias condições de secagem, bem como parâmetros da equação de GAB, que foram ajustados a partir de dados experimentais.

Krokida *et alii* (1998) estudaram a cinética de secagem e as variações de cor de algumas frutas e vegetais durante o processo. Neste trabalho, um estudo minucioso sobre o efeito das condições e métodos de secagem nas variações de cor da maçã, banana, cenoura e batata foram investigados.

Lima (1999) desenvolveu vários modelos matemáticos bidimensionais analíticos e numéricos para simular o fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos, os quais foram aplicados para a secagem de banana, variedade nanicão. Na formulação numérica, o método de volumes finitos, usando uma malha regular, é explorado para discretizar a equação de difusão, considerando o fenômeno com ou sem encolhimento, com ou sem têmpera, com ou sem transporte simultâneos de umidade e calor. O conjunto de equações lineares é

resolvido iterativamente pelo método de Gauss-Seidel, usando condição de fronteira de equilíbrio ou convectiva e coeficiente de difusão constante ou variável.

2.5- Secador de bandejas

O grupo de secadores de bandejas é caracterizado pela simplicidade de sua construção e operação e pelo baixo custo de manutenção. Eles são largamente usados nas pequena e média fazendas na secagem de frutas e vegetais (Khatab, 1996).

O secador de bandejas constitui uma família importante de secadores convectivos, onde o meio de secagem é o ar quente ou gases de combustão vindos de um forno. O secador é adaptável à secagem de quase qualquer material que pode ser posto em uma bandeja (Kiranoudis, 1998).

O secador pode ter espaço para várias bandejas. As bandejas podem ter o fundo inteiriço, com o ar circulando entre o topo de uma bandeja e o fundo da que fica em cima, ou podem ter o fundo telado, com a circulação de ar controlada de modo que o escoamento se faça através das bandejas e dos sólidos nelas contidos (Foust *et alii*, 1980). O escoamento apropriado do ar nas bandejas depende da capacidade dos ventiladores, do esquema da tubulação (que promove mudanças bruscas de direção do ar) e da colocação apropriada das chicanas. A desuniformidade do fluxo de ar é um dos mais sérios problemas num secador de bandejas (Perry & Chilton, 1980).

Uma das dificuldades no uso desses secadores é que, a temperatura e a umidade do ar de secagem estão mudando continuamente quando o ar passa pelas bandejas conduzindo vapor do produto. Essas mudanças podem afetar as taxas de secagem dos produtos nas bandejas que estão nos diferentes níveis. Como consequência, o conteúdo de umidade não uniforme será encontrado no produto final tomado de várias bandejas, e conseqüentemente, o produto seco é de péssima qualidade (Khatab, 1996).

A operação satisfatória dos secadores de bandejas depende da manutenção uniforme da temperatura e da velocidade do ar de secagem sobre todo o material que está sendo seco (Perry & Chilton, 1980).

Quando as condições externas controláveis (temperatura, umidade, velocidade do ar, etc) são constantes, as condições de secagem serão constantes

em qualquer bandeja com os sólidos úmidos. As bandejas mais próximas da entrada de ar, no entanto, estarão sujeitas a condições que são nitidamente diferentes daquelas nas quais se encontram as bandejas localizadas no final da trajetória da corrente de ar. Por isso, o material em algumas bandejas são secas com maior rapidez que a média, enquanto em outras o material seca menos rapidamente que a média (Foust *et alii*, 1980).

Segundo Khattab (1996), é possível ter uma umidade e temperatura do ar razoavelmente uniformes dentro do secador, que pode ser obtida com uma grande quantidade de fluxo de ar ambiente aquecido. Contudo este método tem o inconveniente de apresentar uma grande quantidade de energia de aquecimento perdida no ar que sai do secador.

Ainda de acordo com Khattab (1996), um método alternativo sugerido para conseguir uma secagem mais uniforme nas diferentes bandejas é distribuir o produto de tal forma que tenham iguais taxas de secagem. Isto pode ser feito pela redução gradual da carga sobre as bandejas subsequentes, utilizando uma relação adequada conforme as condições de entrada do ar para cada bandeja. O número máximo de bandejas é determinado pela condição de saturação do ar.

Para projetar um secador que satisfaça as exigências acima, o desempenho do secador deve ser analisado para uma larga faixa de condições de operação. O trabalho experimental é caro e algumas vezes não é possível, assim um modelo matemático é uma valiosa ferramenta para ajudar projetistas em prever e otimizar o desempenho do secador. Grande parte da literatura de secadores descontínuos revelam que modelos matemáticos tem sido estudados por Steinfeld & Segal (1986), Guzman *et alii* (1987), Elsayed (1990), Gorg & Sharma (1990), Ben Mabrouk *et alii* (1990), Belahmidi *et alii* (1992), Sharma *et alii* (1992), Diamante & Mounro (1993) e Khattab (1996), que desenvolveu um método analítico para obter o melhor modelo de carregamento em secadores descontínuos de bandejas, que garanta uma secagem homogênea e eficiente do produto.

2.6- Desempenho de um secador

O sucesso de qualquer sistema de secagem pode ser atribuído à sua simplicidade e custo. Ele é também medido pela qualidade e rendimento dos produtos secos, assim como da produtividade do seu sistema (Khattab, 1996).

Em geral os dados mínimos a serem obtidos para calcular o desempenho de um secador são:

- teores de umidade do material na entrada e na saída;
- temperaturas do gás afluente e efluente;
- temperaturas do material na entrada e na saída;
- taxa de alimentação;
- velocidade do gás;
- umidades do gás na entrada e na saída;
- tempo de retenção ou tempo de residência no secador;
- consumo de combustível.

Sempre que possível, os teores de umidade e as temperaturas devem ser medidos em vários pontos no interior do secador (Perry & Chilton, 1980).

Prasertsan e Saen-saby (1998) realizaram experimentos de secagem de alguns materiais agrícolas, como serragem de madeira de seringueira e bananas. Para isto, utilizaram um protótipo de um secador com bomba de calor na temperatura de aproximadamente 50°C. Num dos experimentos realizados, os teores de umidade inicial e final da banana decresceram de 254,0% (b.s) para 26,6% (b.s) num período de tempo de 50 horas. O desempenho do secador com bomba de calor foi apresentado e definido com respeito a alguns aspectos energéticos.

2.7- Eficiência energética

Segundo Calçada *et alii* (1996), os secadores convectivos tem seu aproveitamento energético fortemente influenciado pelas variáveis temperatura e velocidade mássica do ar de secagem, uma vez que estas afetam diretamente as taxas de transferência de massa, e conseqüentemente, de energia. A eficiência

do secador, é então definida pela razão entre a energia absorvida pelo leite, calor sensível e calor latente, e a energia alimentada ao secador.

$$\text{Desta forma: } \eta = \frac{Q_{ab}}{Q_a} \quad (2.1)$$

Onde Q_{ab} é o calor latente necessário para evaporar a água mais o calor sensível consumido no processo para elevar a temperatura do sólido e Q_a é a energia total fornecida ao secador. O termo de calor sensível é considerado na equação (2.1) uma vez que a vaporização da água ocorre após o aquecimento da fase sólida, devido ao calor sensível cedido pela fase gasosa.

A energia absorvida pelo leite pode ser obtida pela equação:

$$Q_{ab} = Q_a - Q_s \quad (2.2)$$

onde Q_s é a energia total carregada pela corrente de ar na saída do secador. A equação (2.1) pode ser escrita na forma:

$$\eta = 1 - \frac{Q_s}{Q_a} \quad (2.3)$$

onde

$$Q_s = g_a \cdot c_{pg} \int_0^{\tau} (T_{gs}(t) - T_r) dt \quad (2.4)$$

$$Q_a = g_a \cdot c_{pg} (T_o - T_r) \Delta t \quad (2.5)$$

portanto

$$\eta = 1 - \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\tau} T^*(t) dt \quad (2.6)$$

$$\text{com } T^*(t) = \frac{T_{gs}(t) - T_r}{T_o - T_r} \quad (2.7)$$

A eficiência instantânea global é definida por:

$$\eta_G = 1 - T^*(t) \quad (2.8)$$

onde

T_{gs} → Temperatura do gás na saída do secador

T_o → Temperatura do gás na entrada do secador

T_r → Temperatura de referência, sendo igual a 0°C

Calçada *et alii* (1996) estudaram a otimização do consumo de energia em secadores convectivos do tipo leito fixo e leito deslizante com fluxos cruzados. As variáveis operacionais temperatura e velocidade mássica do ar alimentado no

secador foram escolhidas de forma que a energia consumida no processo de secagem fosse mínima. O programa desenvolvido objetivou estabelecer condições ótimas de operação, definida as dimensões do secador e a produção desejada, visando um melhor aproveitamento da energia fornecida ao secador. Para ambos os casos, secador de leito fixo e secador de leito deslizante com fluxos cruzados, o método de otimização foi aplicado com sucesso.

2.8- Teoria da modelagem e simulação do processo de secagem

Muitos pesquisadores têm estudado o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem.

Um modelo matemático, de acordo com Satyro *et alii* (1986), é aquele que reproduz o sistema abstratamente, ou seja, representa a realidade por meio de equações matemáticas. As equações utilizadas na elaboração de modelos matemáticos são mostradas na Tabela 2.5:

TABELA 2.5- Equações utilizadas nos modelos matemáticos

Equação	Descrição
Transporte	São as equações que descrevem as taxas de transporte de energia, massa e momento.
Termodinâmica	São as equações derivadas da termodinâmica clássica (entalpia, entropia, calores de reação, equilíbrio de fases, etc.).
Balanço	São as equações que descrevem os balanços de massa e de energia de um determinado sistema.
Cinética	São as equações que representam o comportamento cinético de um sistema químico reativo. Normalmente são equações com coeficientes a serem determinados empiricamente, ajustados ao comportamento de uma determinada reação química.
Empírica	São as equações baseadas em observações experimentais (equações para representação de propriedades).
Semi-empírica	São as equações deduzidas a partir da teoria, mas contém coeficientes ajustados empiricamente por um procedimento estatístico qualquer.

Fonte: Satyro *et alii* (1986)

Numerosos modelos têm sido propostos para descrever a perda de diminuição da taxa de umidade durante a secagem de produtos agrícolas, podendo ser divididos em grandes grupos:

- modelos empíricos e semi-empíricos;
- modelos difusivos;
- modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Os modelos difusivos geralmente baseiam-se na difusão de líquido e / ou vapor dentro do produto. Estes modelos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem e consideram as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna.

2.8.1- Suposições usadas para simplificar um modelo geral de secagem

O desenvolvimento de uma teoria apropriada do processo de secagem é dificultado devido aos fenômenos interrelacionados que o constitui. Algumas suposições que tem por finalidade simplificar o modelo de secagem são citadas abaixo:

- volume da estrutura do sólido é constante ao longo do secador e conseqüentemente a fração de vazios é constante;
- gradiente de temperatura no interior do sólido é desprezível. A temperatura do mesmo é equivalente à temperatura da superfície;
- fluxo de gás através do leito de sólidos é uniforme;
- a seção transversal do secador é constante;
- a perda de calor nas paredes do secador é desprezível;
- sistema se comporta de maneira ideal no ponto de vista termodinâmico e a equação de estado dos gases ideais é válida;
- processo é isobárico.

2.8.2- Simulação

A simulação é a utilização de modelos matemáticos de maneira que os mesmos reproduzam o comportamento real do sistema. É essencial em sistemas que necessitem de um conjunto muito grande de equações para a sua descrição.

Cavalcante (1999), utilizou o modelo de secagem proposto por Sokhansanj (1984), que obteve um conjunto de equações representando os balanços de massa e energia em leito fixo. A cinética de secagem foi simulada utilizando-se a

equação reportada por Kiranoudis et alii (1997), com os coeficientes empíricos para o cálculo da constante de secagem, da qual fez-se uso da equação de Brooker et alii (1974).

As equações foram obtidas a partir do modelo geral de secagem:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{r_m}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{-r_m}{G_s} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{h \cdot a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (T - \theta) - c_l \cdot r_m \cdot (\theta - 100)}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (c_p + c_l \cdot U)} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{r_m \cdot [c_v \cdot (T - 100) + h_{lv}] - h \cdot a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (T - \theta)}{g_s \cdot c_s + G_s \cdot H \cdot c_v} \quad (2.12)$$

A equação de camada fina foi obtida mediante ajuste, conforme a equação cinética utilizando dados de Coutinho et alii (1997), para a avaliação da constante de secagem.

$$\frac{dU}{dt} = -K \cdot (U - U_{Eq}) \quad (2.13)$$

A constante de secagem (K) utilizada no simulador é uma equação empírica proposta por Kiranoudis et alii (1997):

$$K = p_0 \cdot E^{p_1} \cdot T^{p_2} \cdot V^{p_3} \cdot U_R^{p_4} \quad (2.14)$$

Os parâmetros p_i , $i = 0, \dots, 4$ foram obtidos através do ajuste do modelo aos dados coletados experimentalmente por Coutinho et alii (1997), pelo método dos mínimos quadrados não lineares, usando o algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt.

Para o cálculo da umidade de equilíbrio, utilizou-se a equação obtida por Coutinho *et alii* (1997), estimada a partir dos dados citados por Queiroz & Nebra (1996):

$$\kappa = 9,4165 \cdot 10^{-7} \cdot \exp\left(\frac{4636,7}{T}\right) \quad (2.15)$$

$$U_{EO} = U_M \left(\frac{U_R \cdot \kappa}{1 + U_R \cdot \kappa} \right) \quad (2.16)$$

O coeficiente de transmissão de calor para um leito de partículas é dado por (Whitaker, 1972):

$$Nu = \left(0,4 Re^{1/2} + 0,2 Re^{2/3} \right) \cdot Pr^{0,4} \quad (2.17)$$

onde: $Nu = \frac{h \cdot D_p}{k} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)$, $Re = \frac{D_p \cdot V}{\nu \cdot (1 - \varepsilon)}$, $Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{K}$ e $D_p = 6 \cdot \frac{V_p}{A}$

Os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl, assim como o coeficiente de transmissão de calor 'h' foram determinados pelas subrotinas do programa, usando as propriedades físicas do ar (Cavalcante, 1999).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1- Materiais

Foram utilizadas bananas da variedade "prata" (*Musa acuminata*), com as seguintes características:

- grau de maturação (banana madura);
- forma aproximadamente cilíndrica, com seção uniforme;
- boa aparência, identificada pela casca amarelada, e sem apresentar manchas verdes e / ou escuras;
- umidade inicial em torno de 70%.

3.2- Equipamentos Utilizados

O equipamento utilizado foi um secador de leito fixo, constituído por: (A) um compressor radial, para impulsionar o ar; (B) um rotâmetro, para medir a vazão do ar de secagem; (C) resistências elétricas, para aquecer o ar de secagem; (D,E) válvulas para especificar a vazão na linha de alimentação; (F) uma câmara de secagem; (G) termopares do tipo chromel-alumel; (H) uma cesta, com 4 bandejas para secar o material; (I) um controlador de temperatura, para manter constante a temperatura de entrada do ar de secagem; (J) um milivoltímetro, composto de (K) chave seletora, que seleciona as temperaturas lidas no milivoltímetro.

A instalação completa do equipamento é mostrada na Figura 3.1:

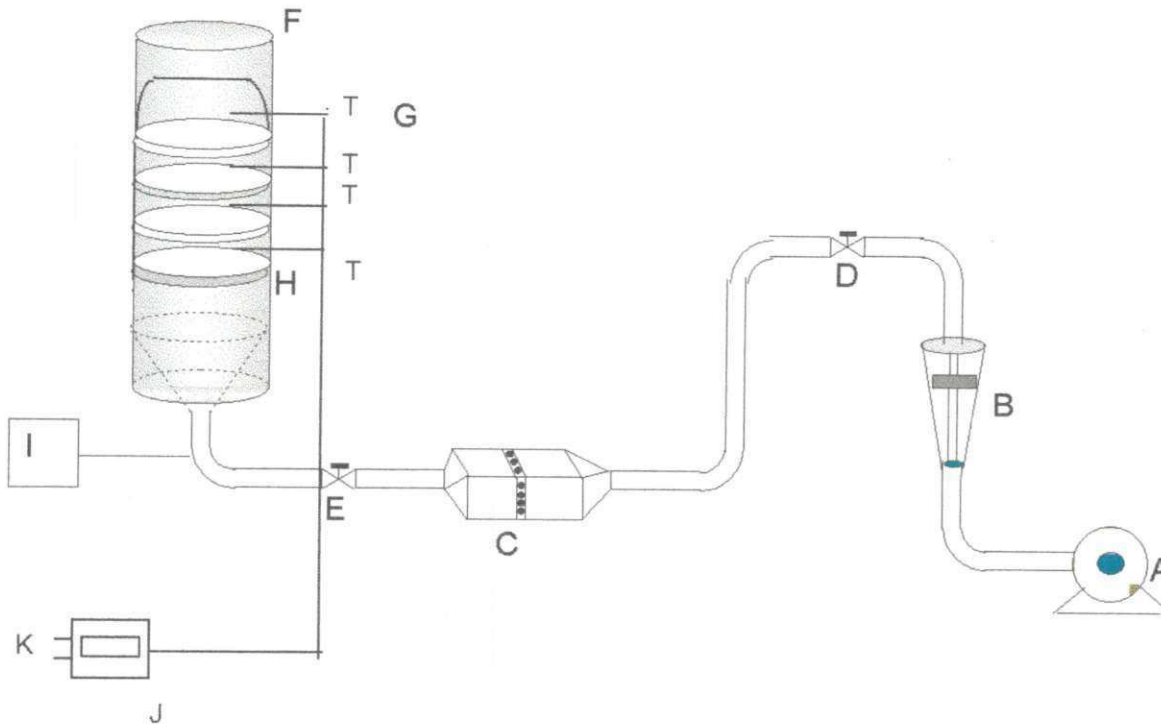


FIGURA 3.1- Diagrama Esquemático do Equipamento

LEGENDA:

- A) compressor radial
- B) rotâmetro
- C) resistências elétricas
- D,E) válvulas
- F) câmara de secagem
- G) termopares
- H) suporte de material (cesta)
- I) controlador de temperatura
- J) milivoltímetro
- K) chave seletora

3.2.1- Equipamentos Básicos

- Câmara de secagem

A câmara de secagem do secador de leito fixo foi formada por uma coluna cilíndrica de 17,80cm de diâmetro e 60cm de altura. Possui uma seção inferior tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar onde foram colocadas esferas de vidro de tamanho uniforme, empilhados aleatoriamente, que permitiam

a uniformidade do ar de secagem em todo o leito. A câmara foi isolada nas laterais com cordão de amianto. A coluna possui 6 furos, 3 em cada lado, distanciados por 8cm cada, onde foram colocados os termopares.

- Suporte de material (cesta)

A cesta foi composta de 4 bandejas, cada uma com 16cm de diâmetro, espaçadas 10cm, dispostas em forma de marmitta para secar o material. A cesta foi feita de alumínio; sendo as bandejas com o fundo telado. O esquema está ilustrado na Figura 3.2:

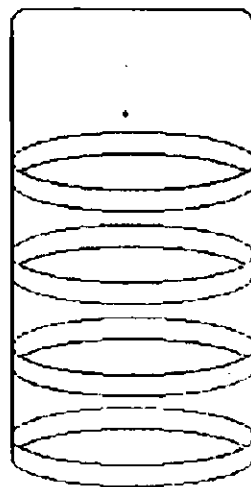


FIGURA 3.2- Suporte de material (cesta)

- Aquecedor de ar, tipo RM 2560.9 com 22,5KW, fabricado pela PALLEY- Ind. Brasileira;
- Compressor radial, tipo exportação, fabricado pela Lavagem Americana Garantia, dotado de motor assíncrono trifásico, tipo S100L2, com 4 CV e 2920 RPM, fabricado pela Metalúrgica Abramo Eberle S/A- Caxias do Sul- Ind. Brasileira;
- Controlador de temperatura proporcional, tipo P300, faixa de operação entre 20 – 200^oC, fabricado pela EURO-CONTROL AUT. Ind. Ltda;
- Milivoltímetro, tipo MD – 045, fabricado pela EQUIPAMENTO CIÊNTÍFICO DO BRASIL – Ind. Brasileira;
- Rotâmetro, tipo R2 – V.C HASTE, capacidade de 400m³/h, fabricado pela OMEL / AS – Ind. Brasileira;

- Válvulas, tipo Globo.
- Termopares, tipo Chromel-Alumel;

3.2.2- Equipamentos auxiliares

- Anemômetro de Pás Digital, tipo AM – 4201, fabricado pela Homis Controle e Instrumentação Ltda – Ind. Brasileira;
- Balança Mettler PC 440, capacidade de 420g, com precisão de leitura de 0,001g, fabricado pela Mettler Instrument AG – SUÍÇA;
- Cronômetro, marca POCKET TIMER – Made in Switzerland;
- Estufa de Secagem e Esterilização, modelo 315 SE, fabricado pela FANEM – São Paulo – In. Brasileira;
- Fatiador de bananas;
- Umidímetro Digital, tipo HT-3003 com medidores de umidade relativa entre 10-95%, fabricado pela Homis Controle e Instrumentação Ltda- Ind. Brasileira;
- Paquímetro – fabricado pela MAUB – STAINLESS, made in Poland;
- Termômetro Químico ARBA, faixa (-10 a +100⁰C) divisão de 0,5⁰C, enchimento de mercúrio, fabricado pela ARBA- Termômetros Brasil Ltda.

3.3- Métodos

3.3.1- Preparação da banana

As bananas selecionadas com o mesmo grau de amadurecimento, foram descascadas manualmente e cortadas em rodela com espessura de 0,6cm. Para agilizar o corte, utilizou-se o fatiador de bananas. As rodela de banana foram arrumadas sobre as bandejas de maneira que ficassem bem próximas umas das outras. Foram feitos experimentos em monocamada (0,6cm) e camada espessa (1,2 e 2,0cm).

3.3.2- Determinação da umidade inicial

Para determinar o teor de umidade inicial das bananas, foi utilizado o método da estufa. Retirava-se algumas amostras de rodela de banana a serem submetidas à secagem, pesava-se estas amostras na balança Mettler PC 440, e colocava-se todas as amostras na estufa, previamente regulada à temperatura de 70^oC, durante 24 horas. Depois deste tempo, as amostras eram novamente pesadas, para então calcular-se a umidade inicial das bananas.

3.3.3- O processo de secagem

Uma série de experiências foram realizadas com o equipamento ilustrado no item 3.2, Figura 3.1, conforme o seguinte procedimento:

- Determinava-se primeiramente a umidade inicial das amostras de banana, segundo o método descrito no item 3.3.2;
- Ajustava-se o equipamento na temperatura e velocidade desejadas para cada experimento. A velocidade do ar de secagem era medida através do anemômetro, em vários pontos na saída da coluna e tomava-se seu valor médio;
- Após atingir as condições pré-fixadas de temperatura e velocidade do ar de secagem, distribuía-se a amostra (rodela de banana) nas bandejas que eram então pesadas; imediatamente eram colocadas na câmara de secagem, e em seguida acionado o cronômetro para iniciar a secagem;
- Em intervalos de tempo pré-estabelecidos eram feitas medições de massa e temperatura de bulbo seco do ar de secagem, que levava um tempo em torno de 2 a 3 minutos. Realizava-se ao mesmo tempo as leituras da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente;
- Ao final da secagem, que levava em média 5 horas, colocava-se a amostra na estufa (70^oC por 24 horas) para posterior determinação da massa de sólidos secos.

3.3.3.1- Determinação da temperatura interna da banana

Para um único experimento foi feito o seguinte procedimento: um termopar foi inserido no fundo da seção cônica para se obter a temperatura do ar de secagem na entrada do secador e o outro termopar foi inserido no centro de uma rodela de banana, abaixo da cesta, com uma única bandeja, para medir a evolução da temperatura interna da banana, nos intervalos de tempo pré-estabelecidos.

3.3.4- Determinação das propriedades psicrométricas do ar de secagem

A partir de dados obtidos como temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar ambiente determinou-se através do programa em Fortran denominado Psychro, que se encontra no apêndice D, a razão de umidade do ar na entrada do secador. Mediante um balanço de massa, foi calculada a razão de umidade do ar ao longo das bandejas. Com os dados de temperatura de bulbo seco e razão de umidade do ar também foi possível calcular a razão de umidade que se teria na saturação ao longo das bandejas, através do programa computacional Psychro.

No apêndice A se encontram as tabelas com os valores dos resultados obtidos na câmara de secagem, como também as condições de entrada do ar no secador.

3.3.5- Determinação da razão da umidade do ar e da taxa de evaporação da água que se teria se o ar saísse saturado

Essas determinações foram realizadas através dos seguintes balanços de massa, na saída de cada bandeja e a cada tempo de secagem:

$$(1) g_a[H_1 - H_0] = W_{S,1} \quad (3.1)$$

$$(2) g_a[H_2 - H_1] = W_{S,2} \quad (3.2)$$

$$(3) g_a[H_3 - H_2] = W_{S,3} \quad (3.3)$$

$$(4) g_a[H_4 - H_3] = W_{S,4} \quad (3.4)$$

$$(5) \quad g_a [H_{\text{Sat},1} - H_0] = W_{\text{Sat},1} \quad (3.5)$$

$$(6) \quad g_a [H_{\text{Sat},2} - H_1] = W_{\text{Sat},2} \quad (3.6)$$

$$(7) \quad g_a [H_{\text{Sat},3} - H_2] = W_{\text{Sat},3} \quad (3.7)$$

$$(8) \quad g_a [H_{\text{Sat},4} - H_3] = W_{\text{Sat},4} \quad (3.8)$$

onde: H_j = razão de umidade do ar na saída da bandeja j , com $j = 1, \dots, 4$

H_0 = razão de umidade do ar na entrada do secador

$W_{s,j}$ = taxa de evaporação real na saída da bandeja j , com $j = 1, \dots, 4$

$W_{\text{sat},j}$ = taxa de evaporação de água que se teria se o ar saísse saturado na saída da bandeja j , com $j = 1, \dots, 4$

3.3.6- Determinação do teor de umidade inicial em base úmida e base seca

O teor de umidade inicial pode ser calculado em base úmida ou base seca mediante as equações abaixo:

$$U_i(\text{b.u}) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \quad (3.9)$$

$$U_i(\text{b.s}) = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} \quad (3.10)$$

em que:

m_f = massa final da amostra após a secagem em estufa (g)

m_i = massa inicial da amostra (g)

m_{ss} = massa de sólido seco (g)

$m_{am(t)}$ = massa da amostra a cada intervalo de tempo (g)

U_i = umidade inicial (adimensional)

Em qualquer tempo a umidade em base seca é calculada pela equação:

$$U_{(t)} = \frac{(m_{am(t)} - m_{ss})}{m_{ss}} \quad (3.10.a)$$

onde:

$U_{(t)}$ = umidade a cada intervalo de tempo em base seca (adimensional)

3.3.7- Índice de saturação do ar de secagem

Este índice indica o grau de aproveitamento do ar de secagem, ou seja, o quanto o ar se encontra longe da saturação.

O índice de saturação (Φ) foi determinado através da equação:

$$\Phi = \frac{W_s}{W_{sat}} \quad (3.11)$$

$$\text{onde, } W_s = -m_{ss} \cdot \frac{du}{dt} \quad (3.12)$$

W_s → taxa de evaporação real

W_{sat} → taxa de evaporação que se teria se o ar saísse saturado

Φ é determinado para cada bandeja, a cada tempo de secagem, em %.

3.3.8- Índice de saturação médio do ar de secagem

O índice de saturação médio ($\bar{\Phi}$) foi determinado através da equação:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{t_{0,1}} \Phi dt \quad (3.13)$$

com o método de integração realizado pelo programa Origin 4.1, onde:

$t_{0,1}$ → tempo necessário para atingir 10% da umidade normalizada com a umidade inicial, em base seca

3.3.9- Eficiência energética global do secador

Como citado em 2.7, Calçada *et alii* (1996), determinaram a eficiência energética instantânea global do secador (η_G) através da equação:

$$\eta_G = 1 - \frac{T_{gs}}{T_o} \quad (2.8)$$

onde,

T_{gs} → temperatura do gás na saída da 4ª bandeja

T_o → temperatura do gás na entrada do secador

3.3.10- Eficiência energética global média do secador

A eficiência energética global média do secador ($\bar{\eta}_G$) foi determinada através da equação:

$$\bar{\eta}_G = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{t_{0,1}} \eta_G dt \quad (3.14)$$

com o método de integração realizado pelo programa Origin 4.1, onde:

$t_{0,1}$ → tempo necessário para atingir 10% da umidade normalizada com a umidade inicial, em base seca.

3.3.11- Propriedades físicas e características geométricas da fruta (banana)

Para o cálculo das propriedades físicas e das características geométricas da fruta, desenvolvidos por Cavalcante (1999), foram tomadas aleatoriamente 10 (dez) rodela de banana e colocadas numa estufa a 70°C durante 24 horas. Após este tempo, determinou-se:

- diâmetro e espessura: medidos com o auxílio de um paquímetro;
- massa: obtida com o auxílio de uma balança.

De posse destes dados, calculou-se:

- área específica: determinada pela razão entre a área da rodela da banana seca e o seu volume;
- densidade aparente: determinada pela razão entre a massa da rodela da banana seca e o seu volume;
- calor específico: esta variável foi determinada pela equação generalizada para frutas, proposta por Alvarado & Moreno (1986) e está em função da umidade na base úmida (U(b.u)).

$$c_p = 26,6369U(b.u)+ 1193,7201 \quad (3.11)$$

Neste trabalho, assim como sugerido por Cavalcante (1999), estas propriedades foram consideradas constantes durante a simulação, incluindo o calor específico que foi determinado para a fruta totalmente seca, tendo em vista que todos os balanços são realizados na base seca. O resumo destas propriedades e dos parâmetros geométricos determinados são mostrados na Tabela 3.1:

TABELA 3.1- Propriedades físicas e parâmetros geométricos das rodela de banana seca

Diâmetro (m)	0,0275
Espessura (m)	0,00365
Massa (kg)	0,00154
Área específica (m ² /m ³)	543
Densidade aparente (kg/ m ³)	709,6
Porosidade	0,4

3.3.12- Metodologia numérica utilizada

Conforme Cavalcante (1999), este trabalho foi dividido em duas etapas:

- obtenção dos parâmetros empíricos da constante de secagem (K).
- resolução do sistema que descreve o modelo de secagem.

Utilizou-se para a descrição do modelo de secagem dois métodos: diferenças finitas (para resolver o sistema de equações diferenciais e espaciais) e a subrotina IVPAG (para resolver o sistema de equações diferenciais temporais). Duas classes de métodos lineares implícitos estão disponíveis na subrotina IVPAG: os métodos de Adams-Moulton (até ordem doze) e Gear's BDF (até ordem cinco). Estes métodos são ditos de múltiplos pontos pois procuram aumentar a ordem de aproximação através de informações obtidas em pontos anteriores. Para maiores detalhes consultar (Cavalcante, 1999).

3.3.13- Metodologia numérica para simulação do processo de secagem

O esquema simulado consiste de um secador convectivo de leito fixo contendo quatro bandejas, através das quais ocorre um fluxo constante de ar quente. A Figura 3.3 mostra este esquema:

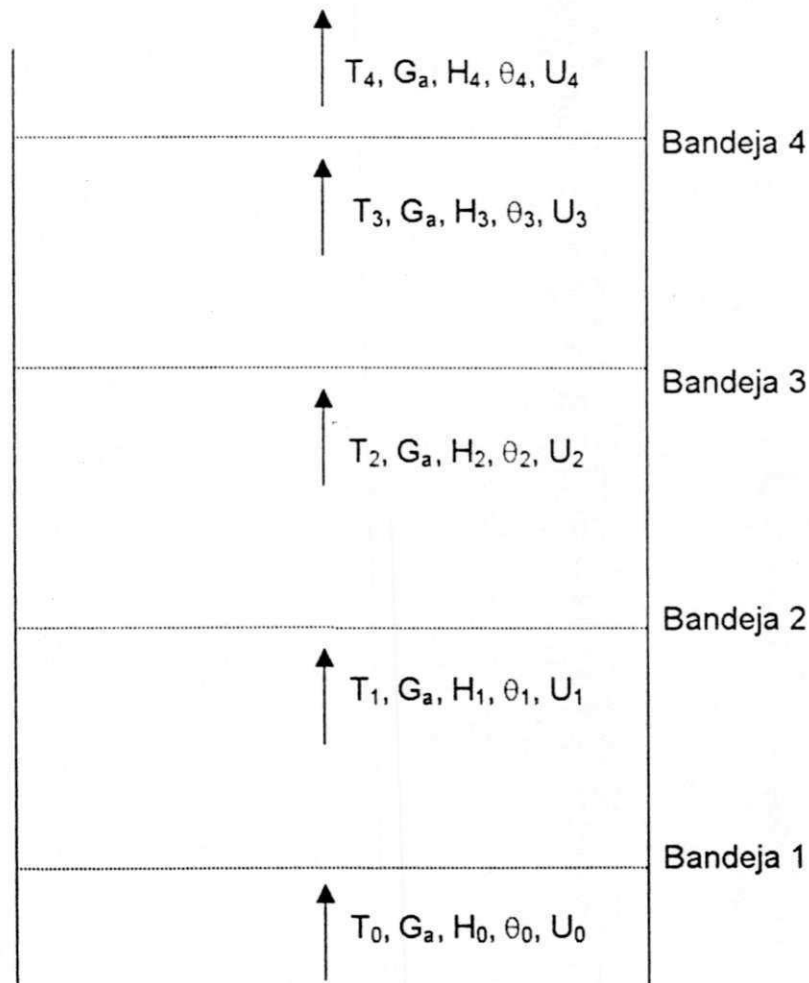


FIGURA 3.3- Esquema do secador convectivo

3.3.14- Condições experimentais

Foram realizados um total de 12 experimentos para a secagem de rodela de banana. Na Tabela 3.2 são listadas as condições experimentais utilizadas.

TABELA 3.2- Condições experimentais utilizadas

Experimento	Espessura da camada de banana (cm)	Condições do ar na entrada do secador		
		V (m/s)	T ₀ (°C)	H ₀ (Kg/Kg)
01	0,6	2,2	70	0,014 ± 0,003
02	0,6	1,0	70	0,0134± 0,001
03	0,6	0,5	70	0,016 ± 0,001
04	0,6	1,5	70	0,0163± 0,001
05	0,6	0,2	70	0,0134± 0,002
06	0,6	2,2	60	0,0157± 0,002
07	0,6	2,2	50	0,0166±0,002
08	0,6	2,2	80	0,0164± 0,002
09	1,2	1,5	70	0,0172± 0,002
10	2,0	1,5	70	0,0115± 0,001
11	0,6	1,5	68	0,0147± 0,001
12	0,6	2,2	70	0,0117± 0,002

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Introdução

Neste capítulo serão analisados os resultados experimentais obtidos da secagem de rodela de banana, através do secador de bandejas, e discutidos a partir de alguns parâmetros envolvidos na secagem, tais como: temperatura e velocidade do ar de secagem, e espessura da camada de banana. Será analisado ainda o desempenho do secador, através de uma avaliação energética global do secador e do índice de saturação, que permite-lhe dizer o grau de aproveitamento do ar de secagem. Finalmente, serão comparados os resultados da simulação com dados experimentais como meio de validação do modelo utilizado e verificação do desempenho do simulador.

4.2- Reprodutibilidade experimental

Será discutido, inicialmente, a reprodutibilidade de um experimento, para verificar o grau de confiabilidade.

Para um experimento realizado a $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$, foi feita a sua reprodução utilizando as mesmas condições de temperatura, velocidade do ar e espessura da camada de banana, representados nas figuras a seguir:

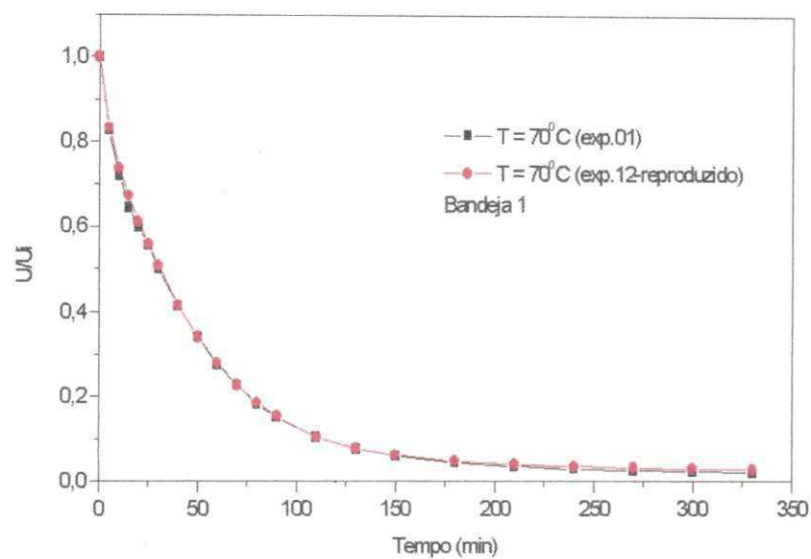


FIGURA 4.1- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 1

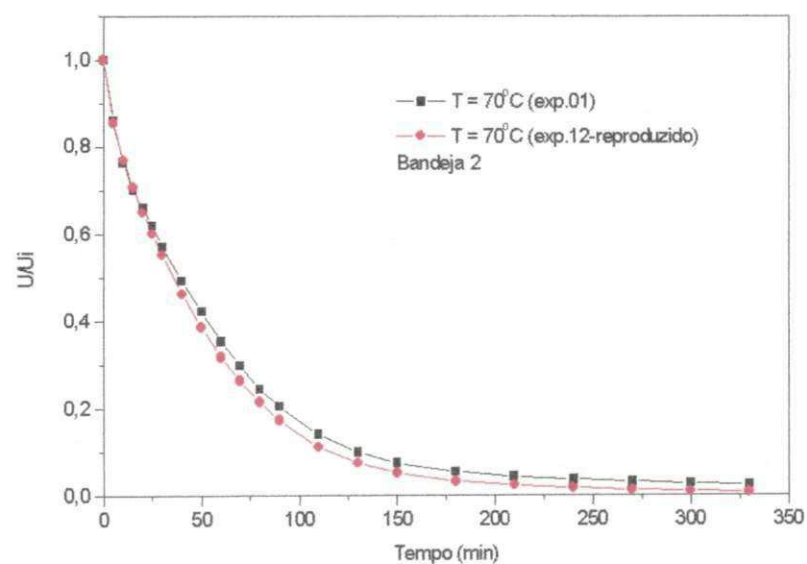


FIGURA 4.2- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 2

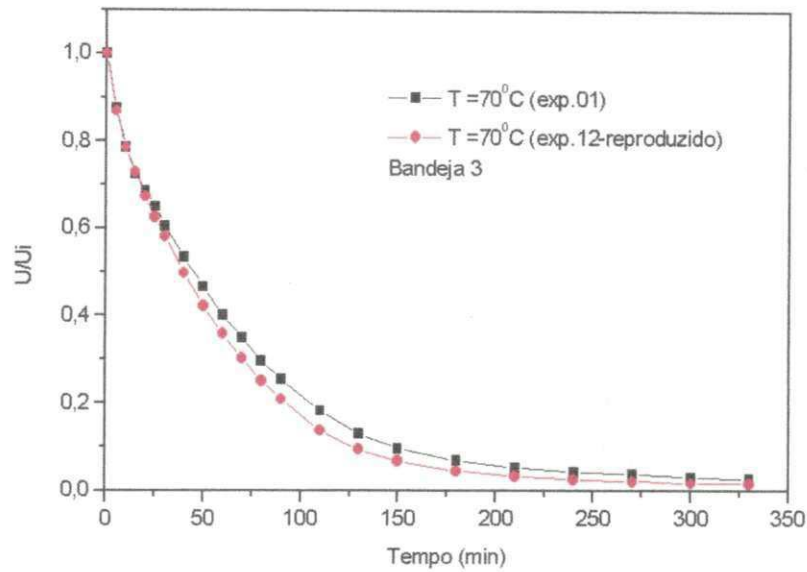


FIGURA 4.3- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 3

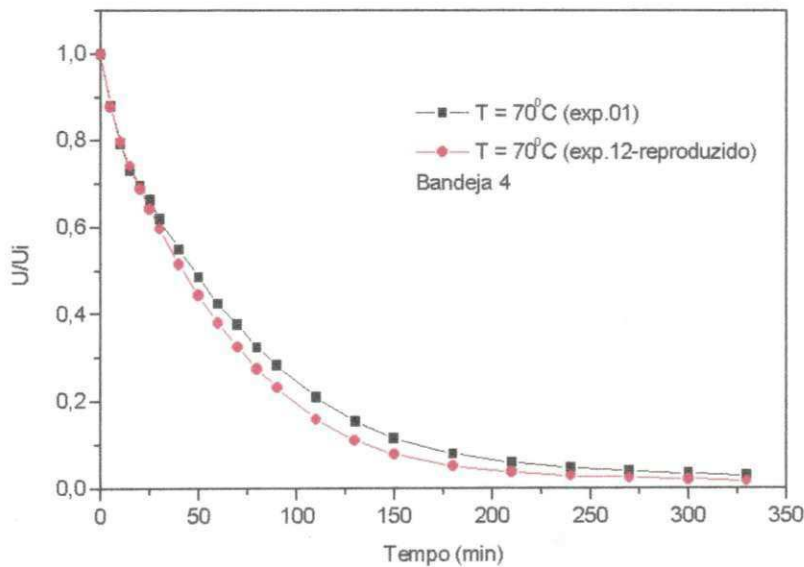


FIGURA 4.4- Reprodutibilidade experimental das curvas de secagem para as mesmas condições de $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$, sobre a bandeja 4

Observa-se de maneira geral, que a reprodutibilidade do experimento é confiável e bem aceita, pois percebe-se que na bandeja 1, as curvas são

totalmente coincidentes e nas demais bandejas são praticamente coincidentes, havendo um pequeno afastamento. Esse pequeno afastamento pode ser atribuído à impossibilidade de reproduzir exatamente as mesmas condições experimentais e principalmente no que se refere ao material utilizado (grau de maturação, diâmetro das rodela de banana, etc.).

4.3- Curvas de secagem

As Figuras 4.5, 4.5.1, e 4.6, 4.6.1 indicam o comportamento das curvas de secagem de banana com suas respectivas derivadas, de dois experimentos selecionados um com velocidade baixa ($V = 0,2\text{m/s}$) e o outro com velocidade alta ($V = 1,5\text{m/s}$) do ar de secagem.

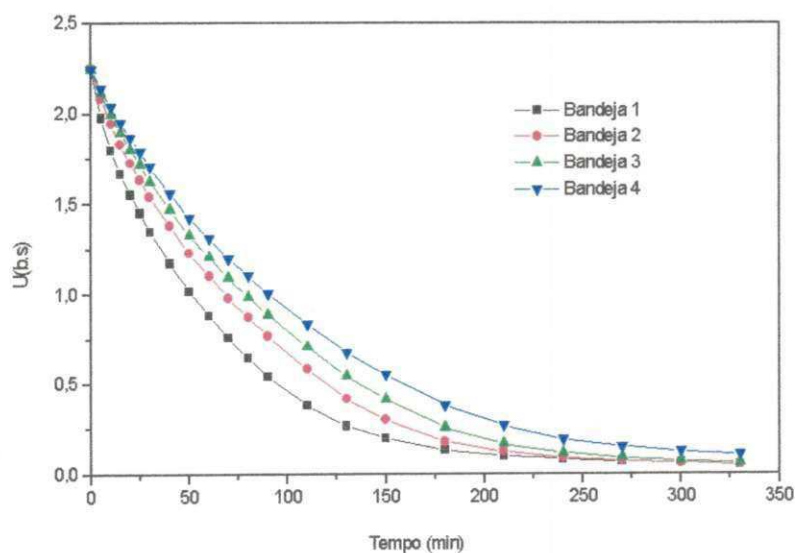


FIGURA 4.5- Curvas de secagem de banana, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

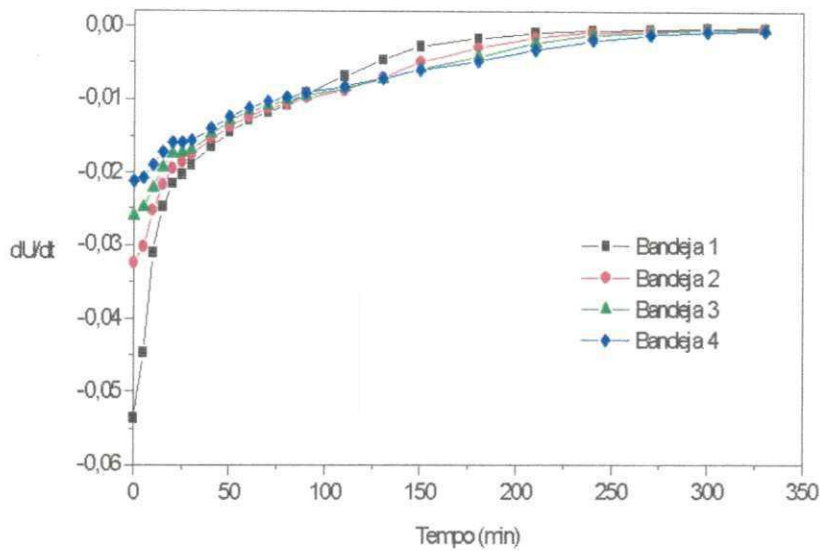


FIGURA 4.5.1- Derivada das curvas de secagem em função do tempo, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

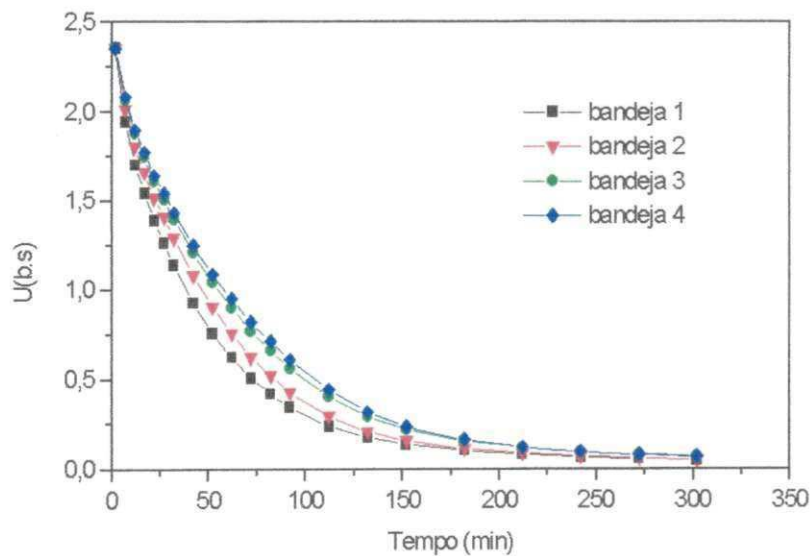


FIGURA 4.6- Curvas de secagem de banana, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

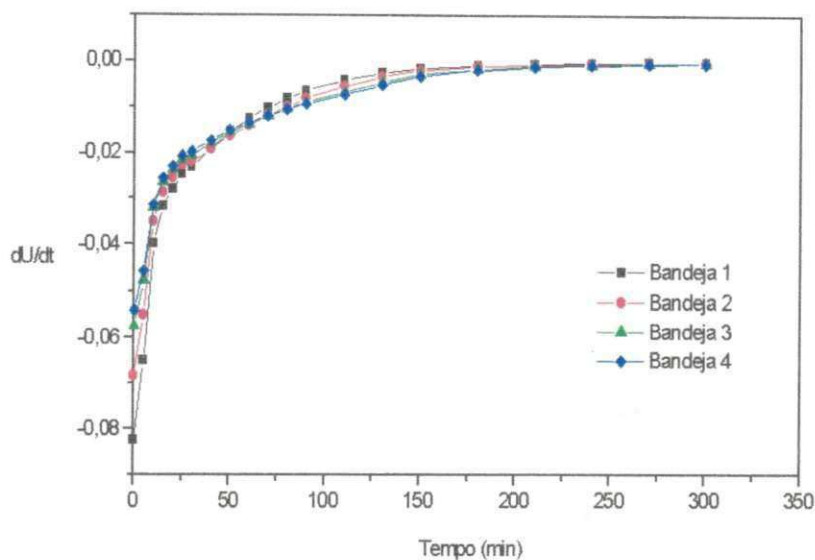


FIGURA 4.6.1- Derivada das curvas de secagem em função do tempo, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Observa-se que, a secagem torna-se mais lenta na medida em que se avança ao longo do secador, ou seja, o material na 1ª bandeja seca mais rápido que na 2ª, que por sua vez seca mais rápido que na 3ª bandeja, e assim sucessivamente até a 4ª bandeja, isto porque o ar na entrada do secador está mais seco e mais quente e à medida que percorre a coluna de secagem passando pelas bandejas, se torna mais frio e úmido.

É interessante notar que com uma velocidade de ar maior é possível obter uma distribuição mais uniforme de umidade da fruta ao longo do secador, como se desprende da comparação das Figuras 4.5 e 4.6. Pode-se observar também que a taxa específica de secagem torna-se inferior a $0,01\text{kg}$ de água/(min.kg de sólido seco) a partir de 100 min de operação, o que tornaria a operação pouco eficiente para tempos longos. Entretanto, como se verifica na Figura 4.6, nesse tempo a fruta atingiu uma umidade média, em decimal, base seca, de aproximadamente $0,4\text{kg/kg}$, o que corresponde a $0,28$ em base úmida, no caso de velocidade mais alta.

Obs: a taxa específica de secagem é proporcional a $(-dU/dt)$.

Através da derivada das curvas de secagem, pode-se constatar a ausência do período de taxa constante de secagem, e perceber-se a

predominância do período a taxa decrescente. Pode-se ainda verificar que na bandeja 1 a taxa de secagem no início é maior que nas demais bandejas, e que há uma rápida diminuição da taxa de secagem em todas as bandejas até aproximadamente 25 minutos do tempo de secagem.

Para os demais experimentos realizados percebem-se o mesmo comportamento das derivadas das curvas de secagem, os quais se encontram no apêndice B.

4.4- Temperatura interna da banana durante a secagem

A temperatura interna da banana evolui rapidamente durante os primeiros 25 minutos, se aproximando a partir desse tempo da temperatura do ar, tornando-se a secagem praticamente isotérmica após uns 150 minutos, como pode ser observado na Figura 4.7 abaixo:

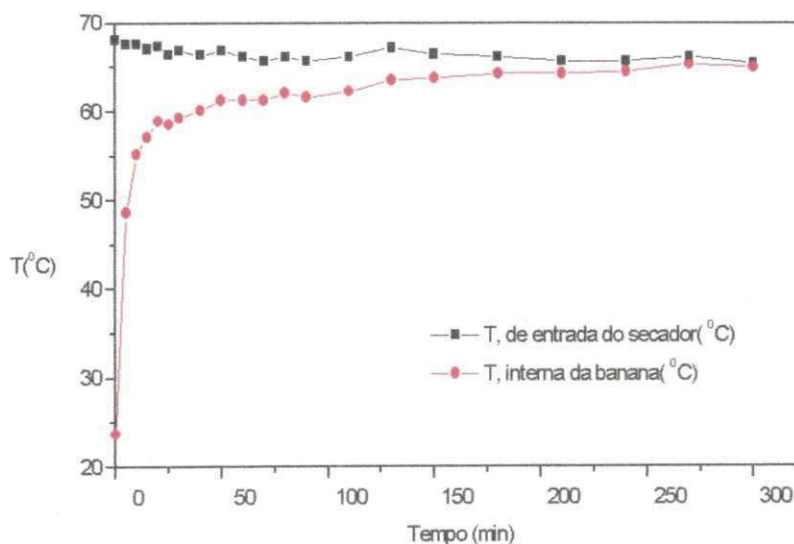


FIGURA 4.7- Evolução da temperatura interna da banana, para $T_0 = 68^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,5\text{m/s}$

Comparando a Figura 4.7 com as Figuras 4.5.1 e 4.6.1, observa-se que o período de aquecimento rápido, corresponde a um primeiro período em que a taxa de secagem decresce rapidamente.

4.5- Efeito da velocidade do ar de secagem

Para analisar o efeito da velocidade do ar de secagem ao longo das bandejas, comparou-se 5 experimentos realizados na mesma temperatura do ar de secagem (70°C) e mesma espessura da camada de banana ($0,6\text{cm}$) sobre as bandejas, variando apenas a velocidade do ar de secagem.

Nas Figuras 4.8 a 4.11 são mostradas as curvas de secagem nas 4 bandejas para velocidades do ar entre $0,2$ e $2,2\text{m/s}$.

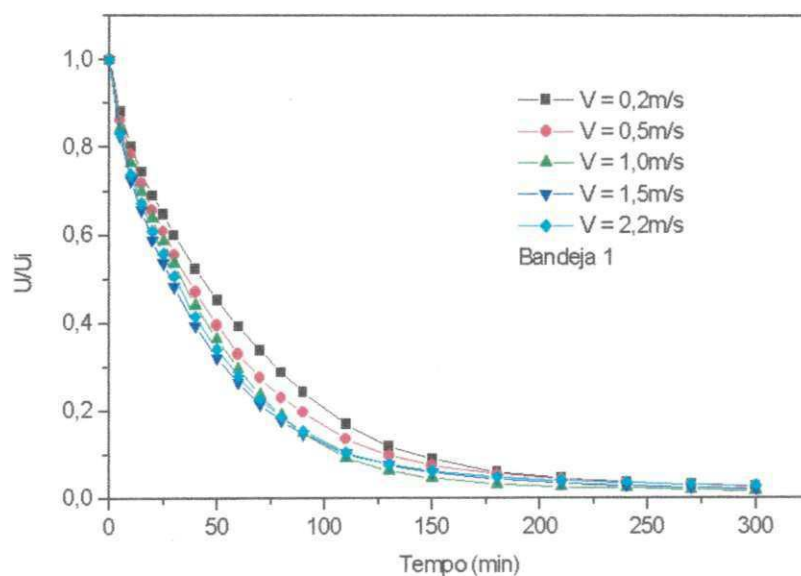


FIGURA 4.8- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 1, para $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

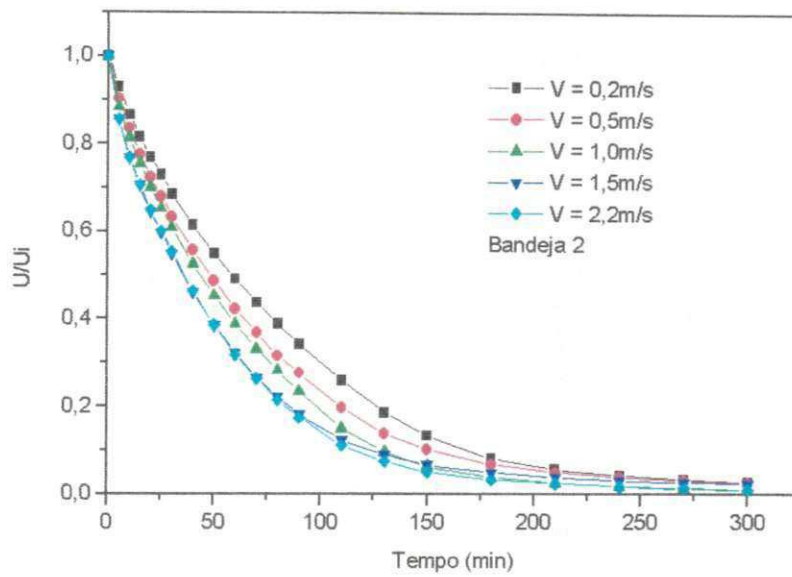


FIGURA 4.9- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 2, para $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

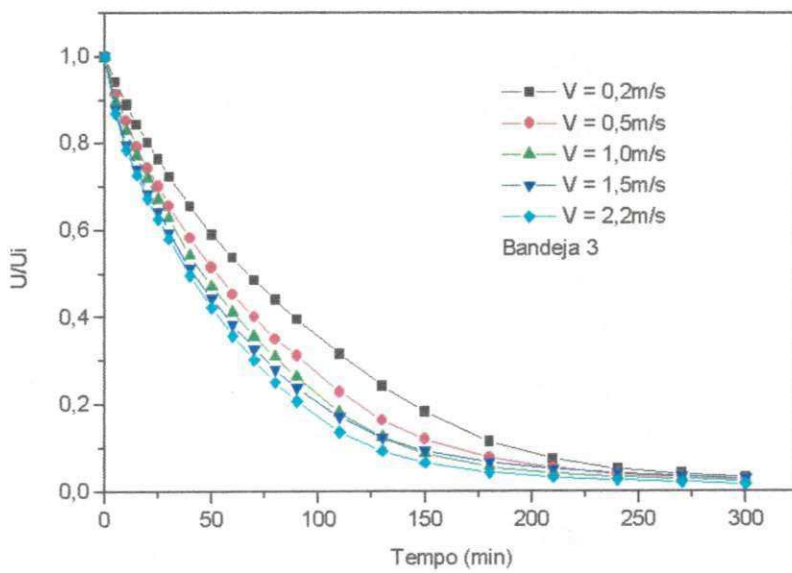


FIGURA 4.10- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 3, para $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

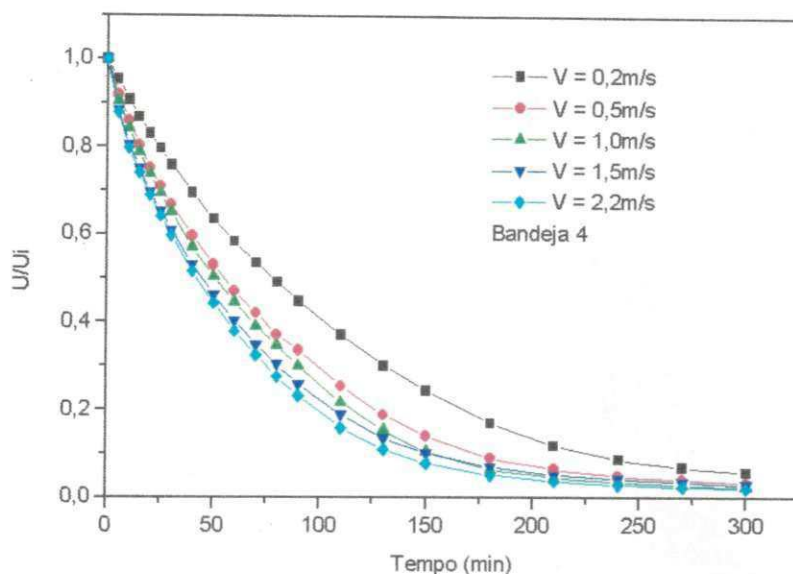


FIGURA 4.11- Curvas de secagem: influência da velocidade do ar de secagem sobre a bandeja 4, para $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Observando o comportamento destas curvas, verifica-se que o aumento da velocidade do ar de secagem determina um aumento da taxa de secagem. Esta influência da velocidade do ar na taxa de secagem indica que a resistência externa controla o processo. Isto pode ser percebido a partir das menores velocidades, como 0,2 e 0,5m/s.

Para velocidades do ar de secagem acima de 0,5m/s a influência desta variável tende a ser menos significativa. Esta evidência experimental indicaria que, nestas condições operacionais, para a velocidade do ar acima de 0,5m/s, a resistência externa torna-se muito menor que a interna, podendo-se postular que o controle é praticamente governado pela transferência difusional no interior das frutas.

Observa-se também que o efeito da velocidade é mais evidente nas bandejas superiores.

4.6- Efeito da temperatura do ar de secagem

Para analisar o efeito da temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, comparou-se 4 experimentos realizados na mesma velocidade do ar

de secagem (2,2m/s) e mesma espessura da camada de banana (0,6cm) sobre as bandejas, variando apenas a temperatura do ar de secagem.

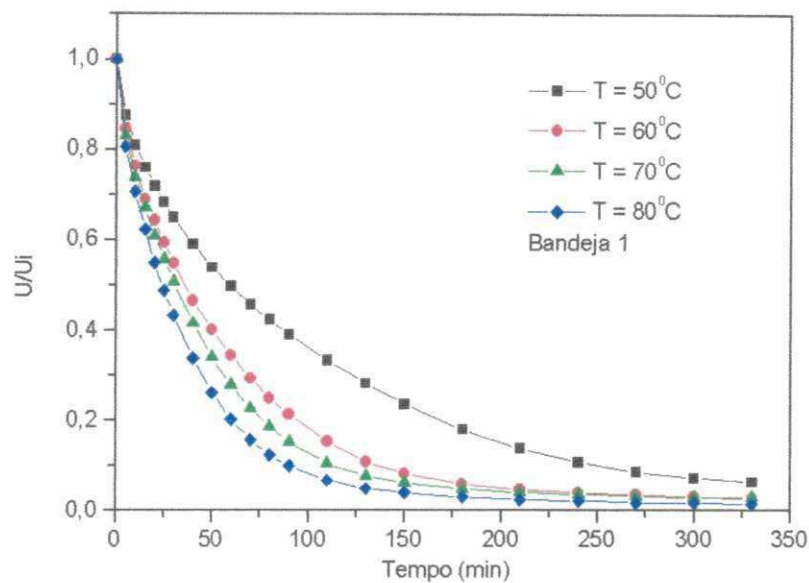


FIGURA 4.12- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 1, para $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

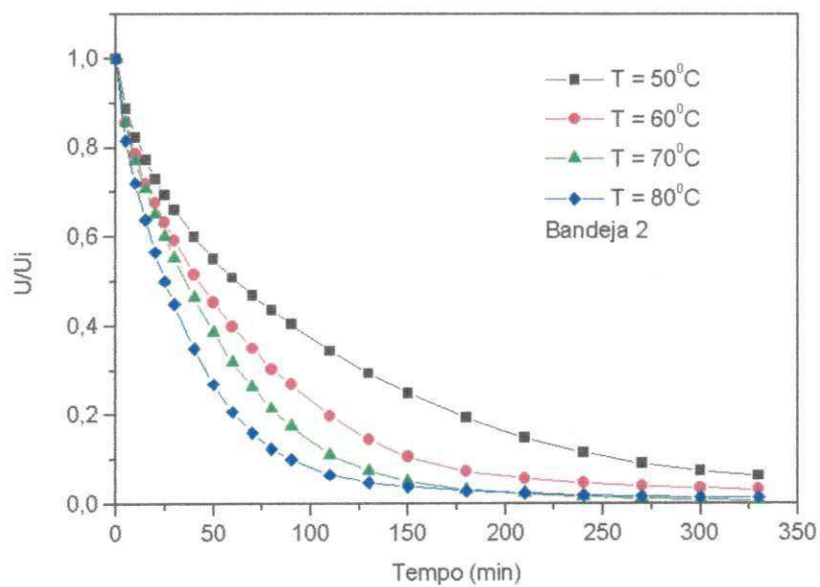


FIGURA 4.13- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 2, para $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

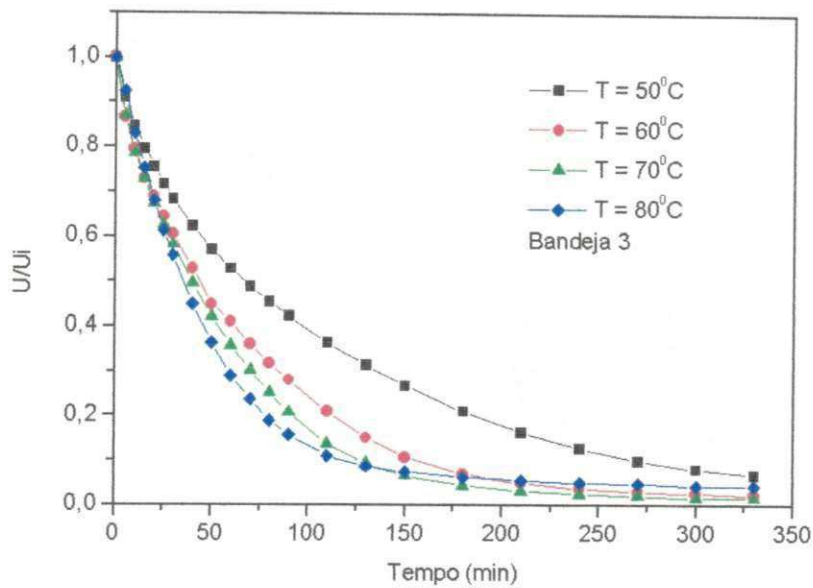


FIGURA 4.14- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 3, para $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

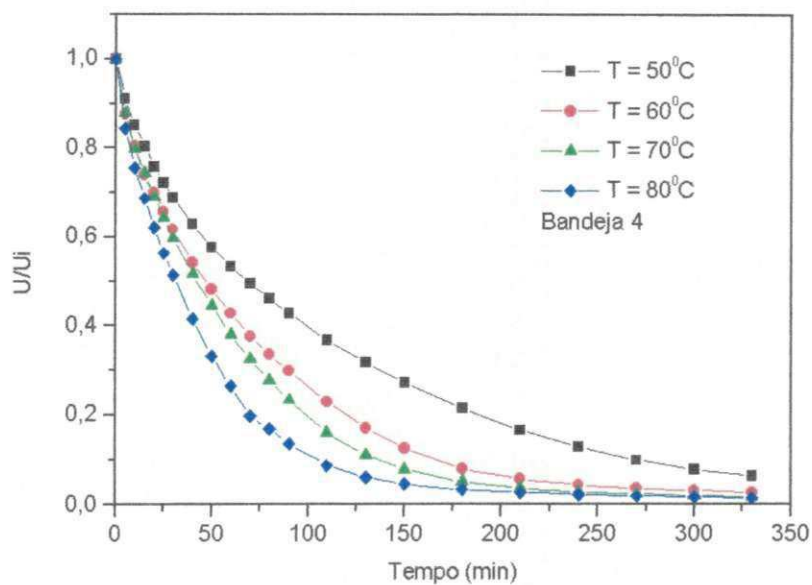


FIGURA 4.15- Curvas de secagem: influência da temperatura do ar de secagem sobre a bandeja 4, para $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Observando-se as Figuras 4.12 a 4.15 é possível analisar o comportamento das curvas de secagem, relacionando a posição das bandejas com as temperaturas do ar de secagem estudadas.

Verifica-se nas figuras citadas anteriormente, que a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura. Nota-se que a curva referente a 50°C possui taxa de secagem muito lenta e a partir de 60°C essas taxas de secagem tornam-se mais rápida. Entretanto, pode-se dizer que esse efeito tende a diminuir a partir de 60°C .

Para tempos longos, em torno de 250 minutos de secagem, constata-se que o equilíbrio é atingido mais rapidamente na 1ª bandeja do que nas outras, porém todas as bandejas tendem ao equilíbrio no final da secagem.

4.7- Efeito da espessura da camada de banana sobre as bandejas

Para analisar o efeito da espessura da camada de banana, comparou-se 3 experimentos realizados na mesma temperatura (70°C) e velocidade do ar de secagem ($1,5\text{m/s}$), variando apenas a espessura da camada de banana.

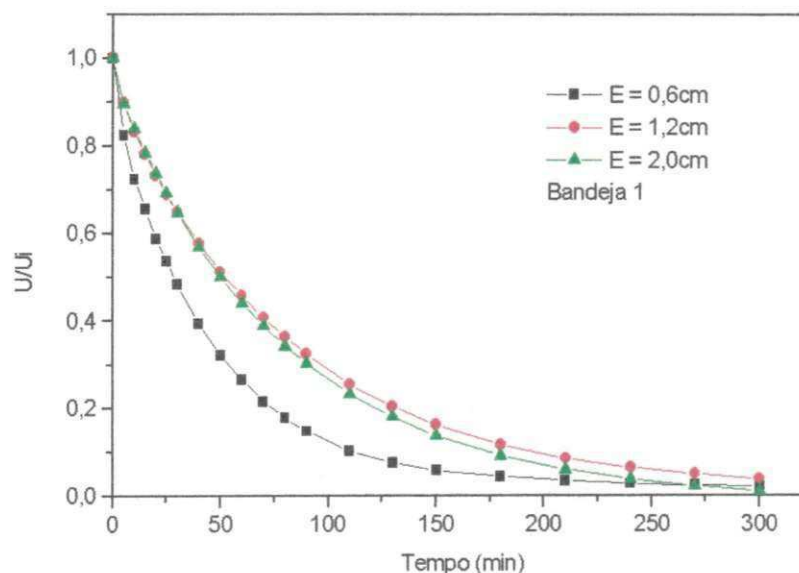


FIGURA 4.16- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 1, para $V = 1,5\text{m/s}$ e $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$

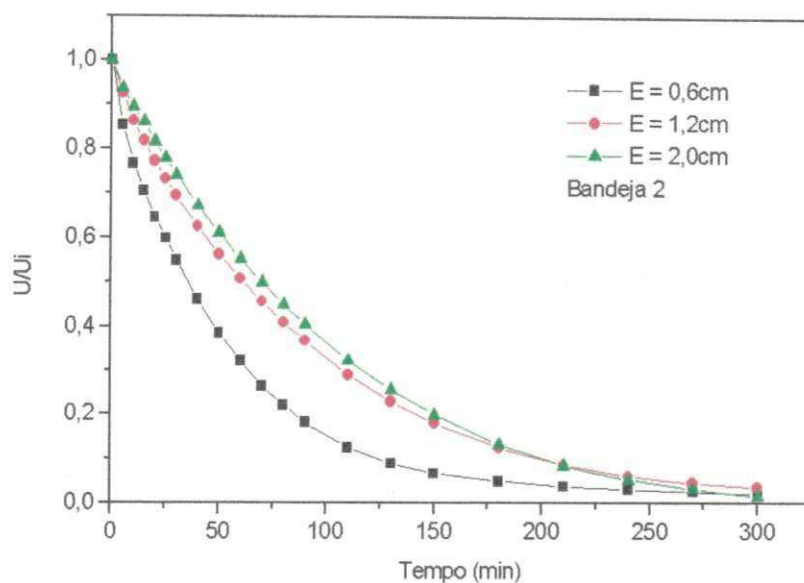


FIGURA 4.17- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 2, para $V = 1,5\text{m/s}$ e $T_0 = 70^\circ\text{C}$

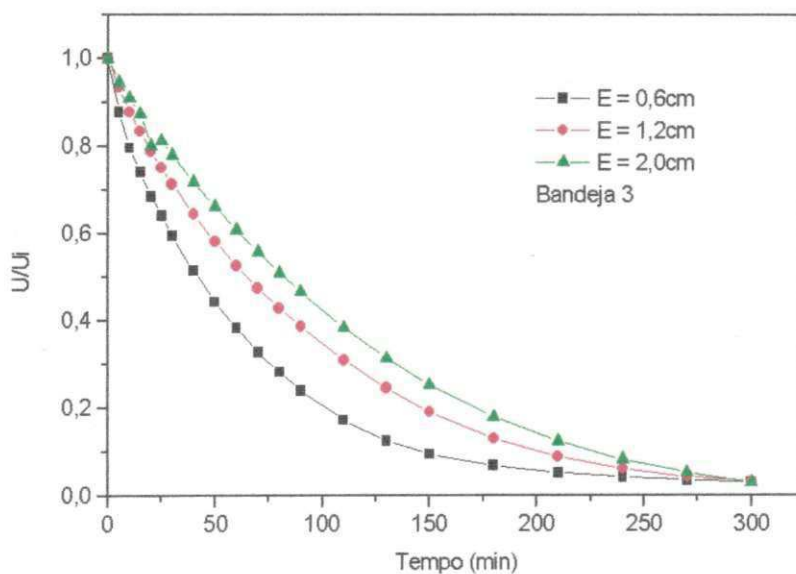


FIGURA 4.18- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 3, para $V = 1,5\text{m/s}$ e $T_0 = 70^\circ\text{C}$

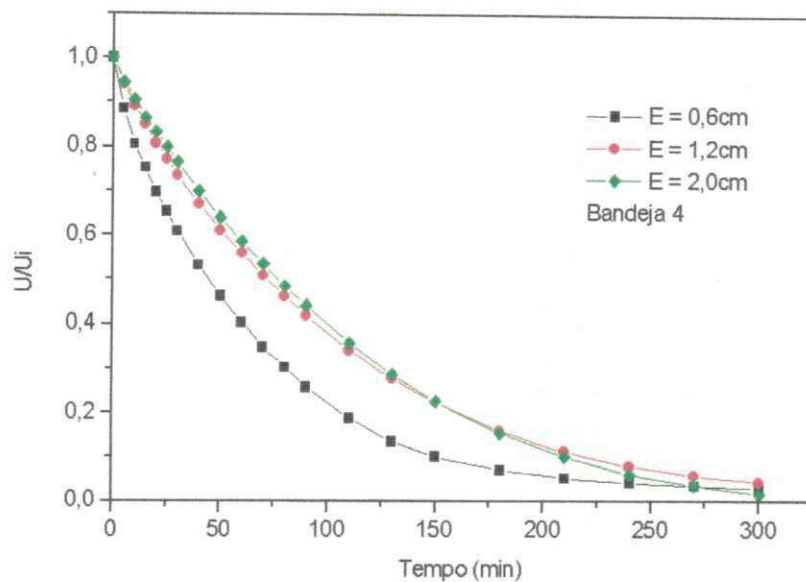


FIGURA 4.19- Curvas de secagem: influência da espessura da camada de banana sobre a bandeja 4, para $V = 1,5\text{m/s}$ e $T_0 = 70^\circ\text{C}$

Observando-se as Figuras 4.16 a 4.19, verifica-se que, em geral, a relação de umidade é maior quanto maior for a espessura da camada de banana. Isto quer dizer que, como esperado, a taxa de secagem diminui com o aumento da carga nas bandejas. Nota-se, entretanto, que as curvas correspondentes às espessuras de 1,2 e 2,0cm estão muito próximas, salvo na bandeja 3, podendo-se dizer que, em geral, a taxa específica de secagem tende a não ser influenciada para espessuras entre 1,2 e 2,0cm. Contudo essa diferença de comportamento pode estar associada ao fato de que na bandeja 3 a carga foi ligeiramente superior (ver Tabela A10 no apêndice A).

4.8- Perfis de temperatura do ar de secagem

Para analisar os perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, comparou-se 2 experimentos realizados a baixa velocidade do ar de secagem (0,2m/s) e a alta velocidade (2,2m/s) do ar de secagem.

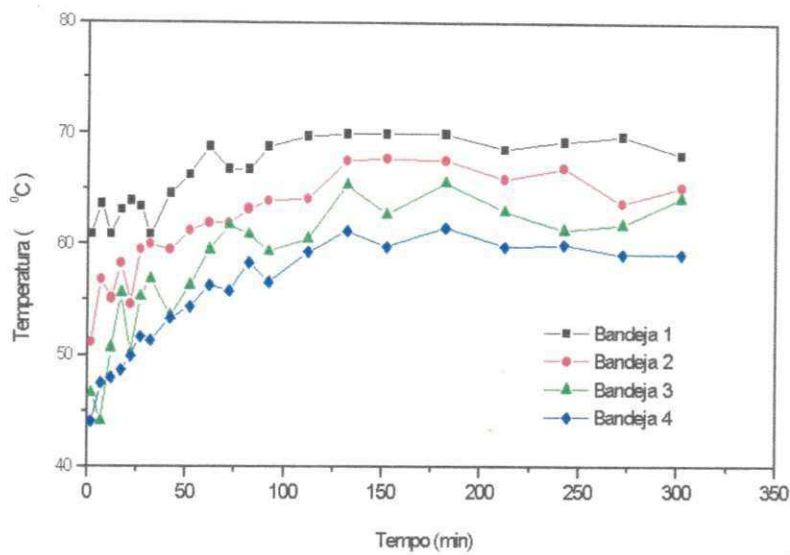


FIGURA 4.20- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

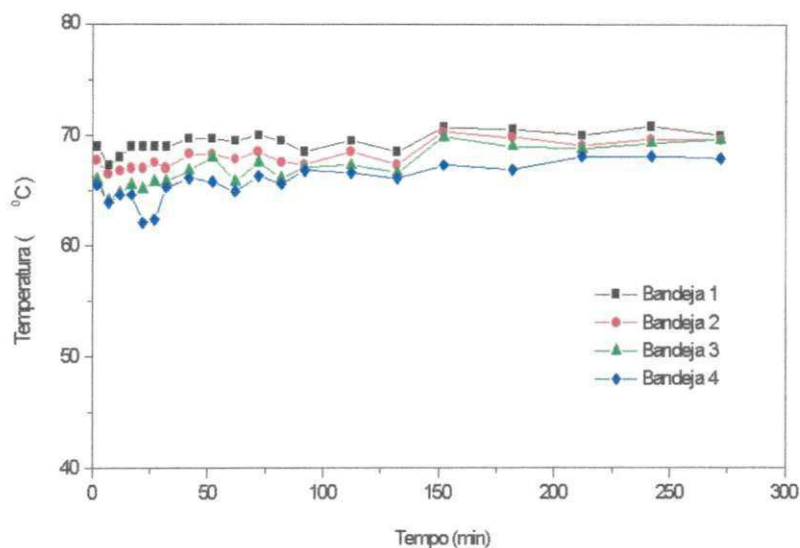


FIGURA 4.21- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Observando-se as Figuras 4.20 e 4.21, constata-se a existência de alguns picos de temperatura sobre as bandejas, que podem ser explicados pela precária estabilização feita pelo controlador de temperatura. Percebe-se

que tais picos são acentuados no início da secagem, e com o decorrer do período de tempo eles tendem a se uniformizar atingindo uma temperatura constante e mais próxima da temperatura de operação do secador.

Para suavizar a obtenção desses picos, foi feito o alisamento dos perfis de temperatura das Figuras 4.20 e 4.21, utilizando o Adjacent Averaging do programa Origin 4.1, cujo resultado é mostrado nas Figuras 4.22 e 4.23, onde constata-se com mais clareza a tendência de evolução da temperatura sobre cada bandeja, atingindo uma temperatura praticamente constante após um período inicial no qual muda rapidamente. Pode também ser observado que, como esperado, a temperatura evolui mais rapidamente com a velocidade do ar maior, alcançando em aproximadamente 50 minutos a condição de estabilidade, enquanto que para a velocidade de 0,2m/s, são necessários mais de 200 minutos. Este comportamento está de acordo com o esperado, já que o coeficiente convectivo de transferência de calor aumenta com o número de Reynolds, isto é com a velocidade de escoamento do ar, favorecendo a troca térmica entre o produto e o ar.

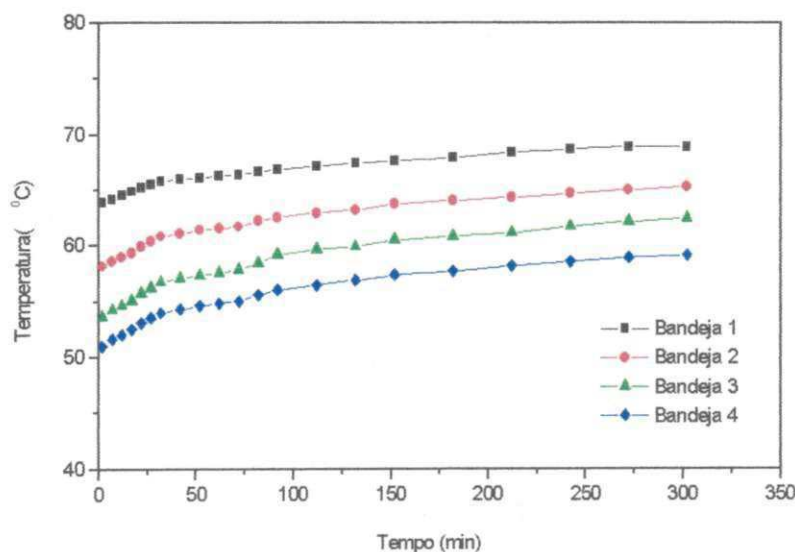


FIGURA 4.22- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

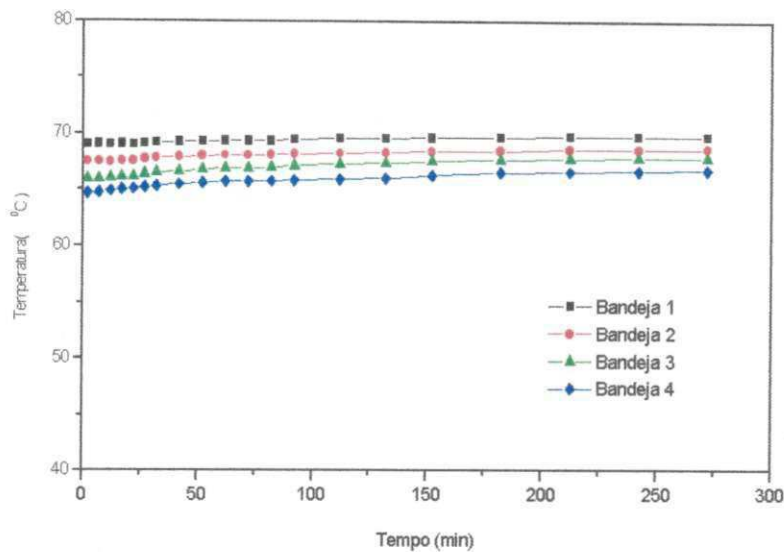


FIGURA 4.23- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Dois experimentos foram representativos para essa análise, e o restante dos experimentos se encontram graficados no apêndice C, indicando um comportamento análogo.

4.9- Análise do desempenho do secador

O objetivo desta parte do trabalho foi realizar uma análise preliminar do desempenho do secador, de modo a fornecer subsídios para uma posterior otimização.

Para verificar o desempenho do secador foram utilizados dois critérios:

1. O índice de saturação do ar de secagem, que indica o grau de aproveitamento do ar, dando uma idéia do seu potencial de secagem;
2. A eficiência energética global do secador, permitindo-lhe analisar o aproveitamento energético do ar no processo de secagem.

Para isto, foram escolhidos 4 experimentos com parâmetros operacionais distintos para comparação e análise dos resultados sobre o desempenho do secador:

Experimento	1	2	3	4
Condições	V = 1,5m/s $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e E = 0,6cm	V = 0,2m/s $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e E = 0,6cm	V = 1,5m/s $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e E = 2,0cm	V = 2,2m/s $T_0 = 50^{\circ}\text{C}$ e E = 0,6cm

4.9.1- Índice de saturação do ar de secagem

O índice de saturação contra o tempo está representado graficamente nas Figuras 4.24 - 4.27, que representam os 4 experimentos selecionados para a análise:

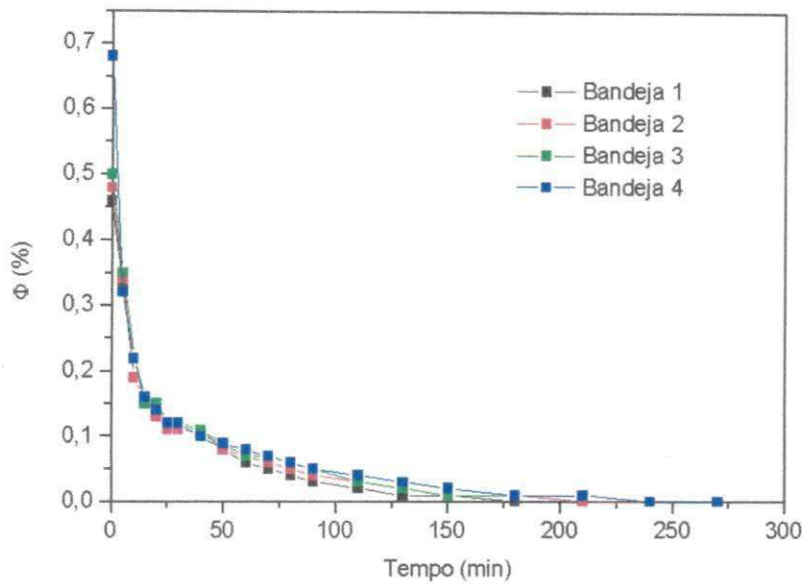


FIGURA 4.24- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

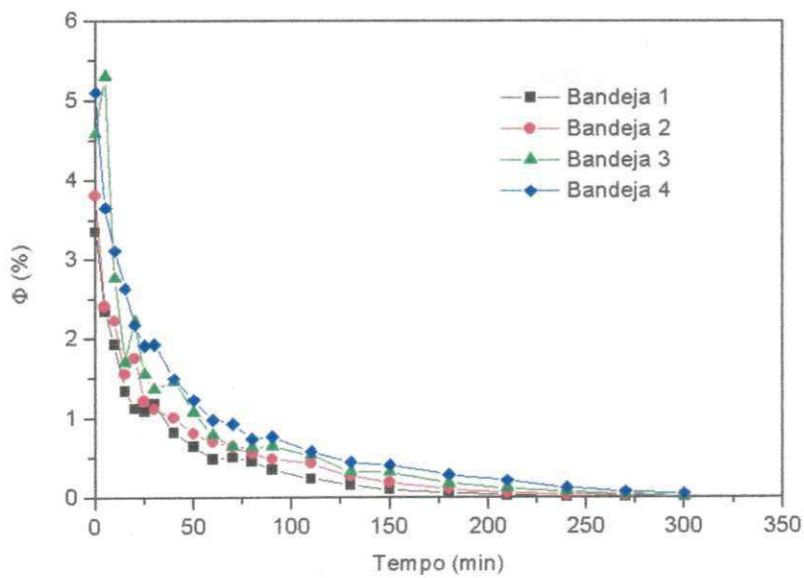


FIGURA 4.25- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

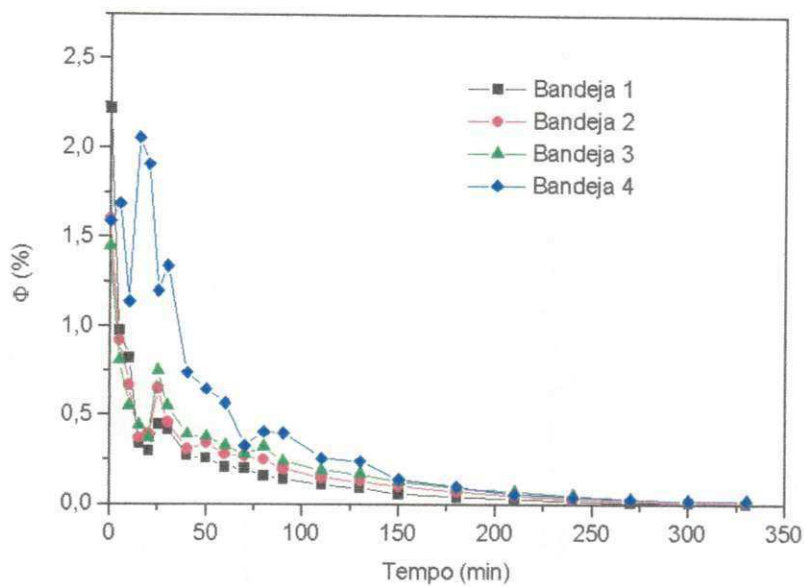


FIGURA 4.26- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

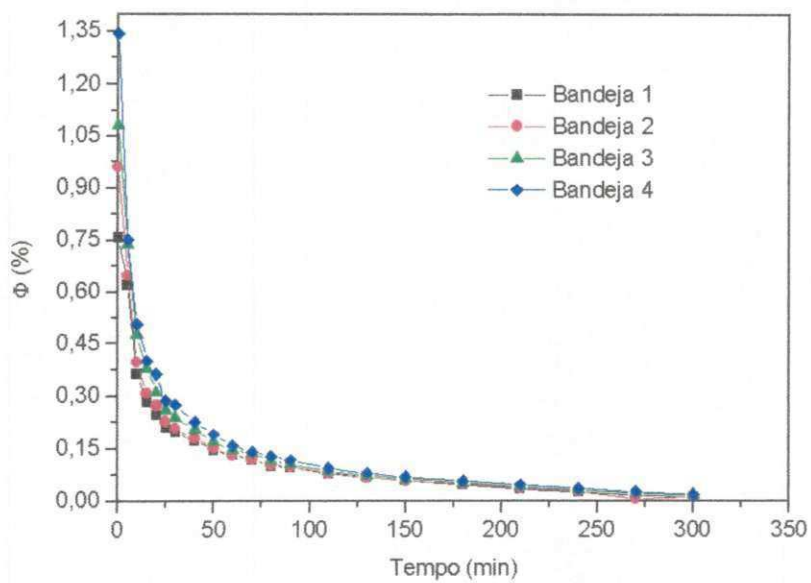


FIGURA 4.27- Índice de saturação do ar de secagem sobre as bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Observando-se as Figuras 4.24 a 4.27, verifica-se que o índice de saturação do ar de secagem é muito baixo em todas as condições de secagem utilizadas, atingindo um grau de aproveitamento um pouco melhor para as

situações apresentadas nas Figuras 4.25 e 4.26. Percebe-se que o índice de saturação do ar é maior para a 4ª bandeja e diminui sucessivamente, até a 1ª bandeja onde atinge o menor grau de aproveitamento do ar de secagem. Este fato é observado também para as demais condições utilizadas. Comparando as Figuras 4.24 e 4.26, que representam dados obtidos com a mesma $V = 1,5\text{m/s}$, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e variam apenas a espessura da camada de banana sobre as bandejas, observa-se na Figura 4.26 com $E = 2,0\text{cm}$ um melhor aproveitamento do ar de secagem. Isto nos indica que seria possível aumentar a carga sobre as bandejas e o número de bandejas, pois o ar de secagem ainda está muito distante da saturação. Deste modo haveria um melhor aproveitamento do potencial de secagem do ar.

Comparando as Figuras 4.24 e 4.25, que representam dados obtidos com a mesma $T = 70^{\circ}\text{C}$, $E = 0,6\text{cm}$ e variam apenas a velocidade do ar de secagem, observa-se na Figura 4.25 que, quando se opera com velocidade baixa se obtém melhor aproveitamento do ar, enquanto que, a Figura 4.24 que representa uma $V = 1,5\text{m/s}$ (alta) constata-se que o ar de secagem está sendo aplicado ao sistema em excesso. No entanto o tempo para atingir $U (b.s) = 0,2$ é reduzido bastante para velocidade alta. Portanto um estudo do custo energético deve ser conduzido para conclusões mais seguras.

Observando as Figuras 4.24 e 4.27, pode-se dizer que possuem aproximadamente um mesmo grau de aproveitamento do ar de secagem, devido a uma provável compensação das variáveis operacionais, isto é, uma $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $V = 1,5\text{m/s}$ compensam as condições de secagem a $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $V = 2,2\text{m/s}$.

4.9.1.1- Índice de saturação médio do ar de secagem

O índice de saturação médio do ar de secagem ($\bar{\Phi}$) determinado pela equação (3.13) encontra-se na Tabela 4.1, em (%), para todos os experimentos selecionados:

TABELA 4.1- Índice de saturação médio do ar de secagem

Bandejas	1	2	3	4
Condições				
V = 1,5m/s T = 70°C E = 0,6cm t _{0,1} = 110min	0,096	0,028	0,033	0,023
V = 0,2m/s T = 70°C E = 0,6cm t _{0,1} = 150min	0,667	0,828	1,105	1,232
V = 1,5m/s T = 70°C E = 2,0cm t _{0,1} = 180min	0,235	0,273	0,304	0,567
V = 2,2m/s T = 50°C E = 0,6cm t _{0,1} = 240min	0,114	0,12	0,135	0,15

As mesmas tendências assinaladas para o índice de aproveitamento instantâneo são observadas para o índice de saturação médio do ar de secagem.

4.9.2- Eficiência energética global do secador

A eficiência energética global contra o tempo está representada graficamente nas figuras a seguir, que representam os 4 experimentos selecionados:

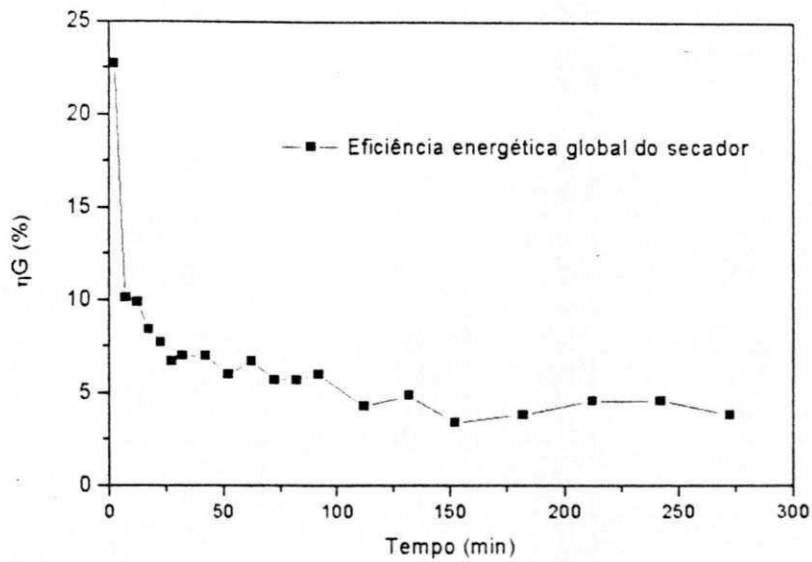


FIGURA 4.28- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

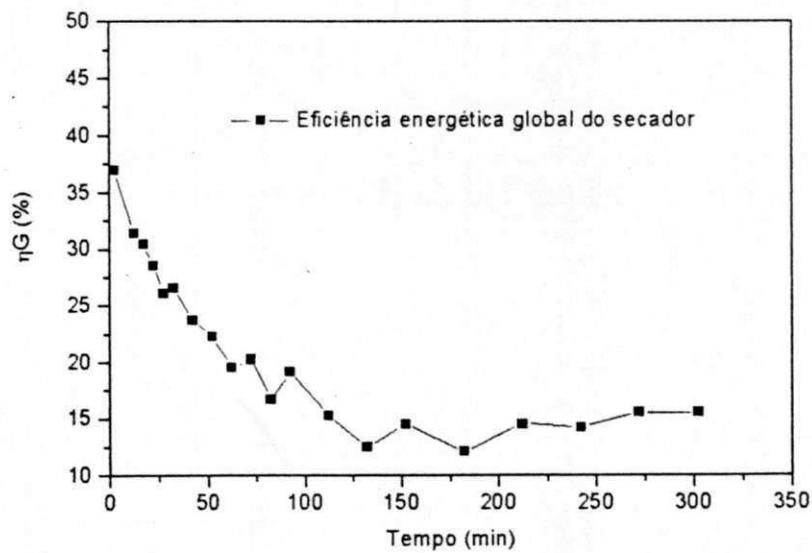


FIGURA 4.29- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V = 0,2\text{m/s}$, $T = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

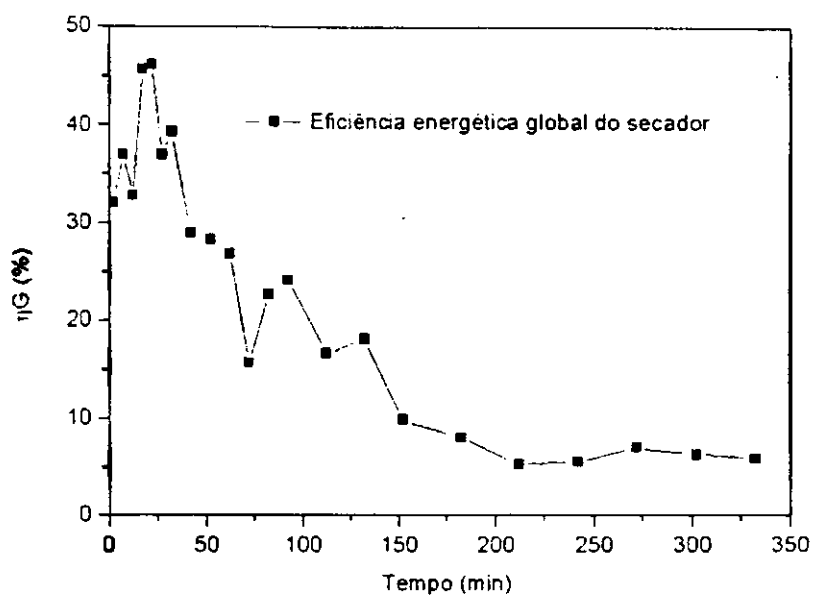


FIGURA 4.30- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

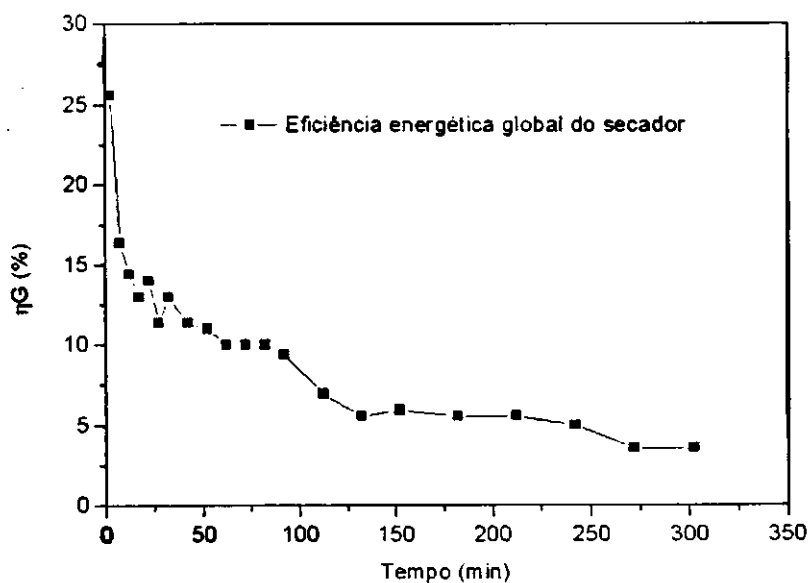


FIGURA 4.31- Eficiência energética global do secador a cada intervalo de tempo, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T = 50^{\circ}\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Para as condições de secagem representadas pelas Figuras 4.28 a 4.31, observa-se baixas eficiências energéticas globais. Como pode ser visto, para as situações apresentadas nas Figuras 4.29 e 4.30, percebe-se melhores índices de eficiências. Ou seja, a aplicação de uma velocidade do ar mais baixa

ou uma maior carga nas bandejas favorece um melhor aproveitamento energético no processo de secagem. Isto porque o ar está muito longe da saturação, e neste caso, há uma grande quantidade de energia perdida no ar que sai do secador, já que este não é recirculado. Em consequência, uma maneira de melhorar a eficiência energética do secador, além da recirculação do ar é mediante o aumento da carga em cada bandeja e/ou do número de bandejas. Observa-se também que a eficiência energética cai rapidamente nos primeiros momentos podendo afirmar que a partir de 100 minutos o processo torna-se ineficiente também do ponto de vista energético, confirmando o observado em termos do índice de aproveitamento do potencial de secagem do ar, bem como da evolução da umidade da fruta.

4.9.2.2- Eficiência energética global média do secador

Considerando a acentuada variação temporal da eficiência energética instantânea apresentada no ponto anterior, foi desenvolvida uma análise baseada na eficiência global média, determinada através da equação (3.14).

A Tabela 4.2 apresenta a eficiência energética global média percentual para todos os experimentos selecionados:

TABELA 4.2- Eficiência energética global média do secador

Condições	V = 1,5m/s T = 70°C E = 0,6cm t _{0,1} = 110min	V = 0,2m/s T = 70°C E = 0,6cm t _{0,1} = 150min	V = 1,5m/s T = 70°C E = 2,0cm t _{0,1} = 180min	V = 2,2m/s T = 50°C E = 0,6cm t _{0,1} = 240min
η_G (%)	6,98	20,41	22,34	8,27

Da análise da Tabela 4.2 fica claro, confirmando as observações anteriores, que se obtém melhor eficiência energética utilizando velocidades menores do ar de secagem ou com maiores cargas nas bandejas. No entanto, deve-se observar que os tempos de secagem também são maiores.

A utilização de baixas temperaturas não é recomendada em termos de desempenho já que conduz a baixas eficiências e elevados tempos de secagem. Entretanto, deve-se levar em conta a qualidade do produto na decisão final.

Um estudo posterior de otimização, com adequada definição da função objetivo poderá levar a resultados conclusivos.

4.10- Comparação dos resultados experimentais e simulados

O programa simulador desenvolvido por Cavalcante (1999), foi utilizado para a simulação a partir dos parâmetros operacionais mencionados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3- Parâmetros experimentais do ar e da banana para cada teste de secagem realizado e usados para avaliação da simulação

	Temperatura do ar na entrada (°C)	Umidade Relativa ambiente (%)	Velocidade do ar (m/s)	Nº de bandejas	Temperatura Inicial da fruta (em rodela) (°C)	Teor de umidade inicial da fruta (Kg/Kg)
1	70	63,7	0,5	4	27	2,213
2	70	64,2	1,5	4	27	2,353
3	50	65,02	2,2	4	25,8	2,191

Nas Figuras 4.32, 4.33; 4.34, 4.35; 4.36 e 4.37 são mostrados alguns exemplos representativos dos resultados da simulação comparados com os dados experimentais para o teor de umidade da fruta, temperatura e umidade do ar, respectivamente, para as quatro bandejas dos experimentos selecionados:

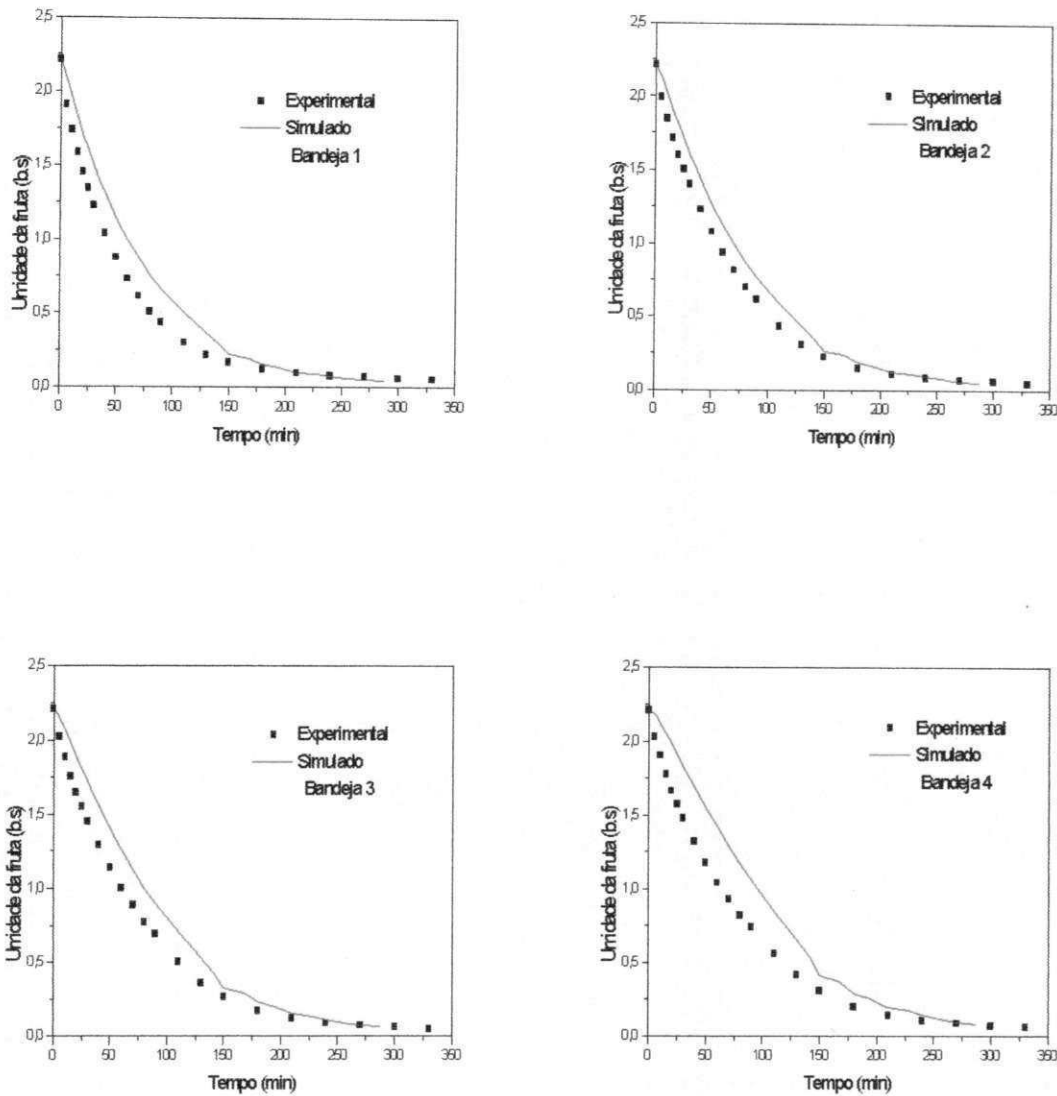
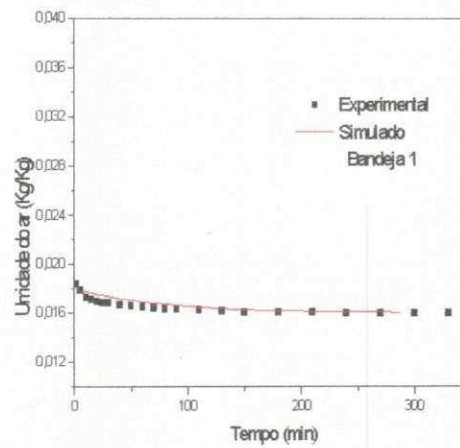
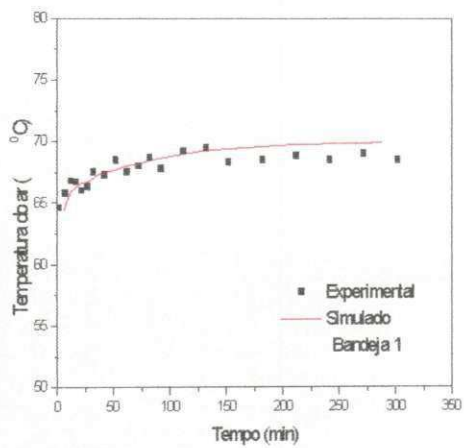
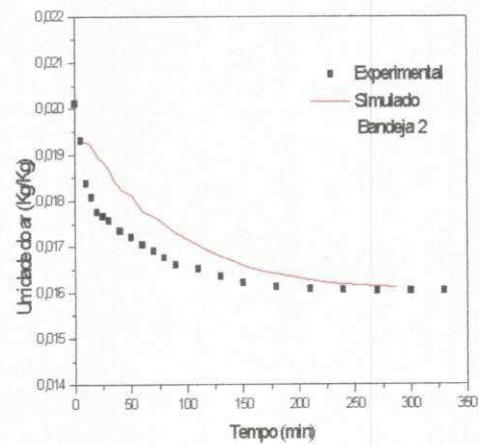
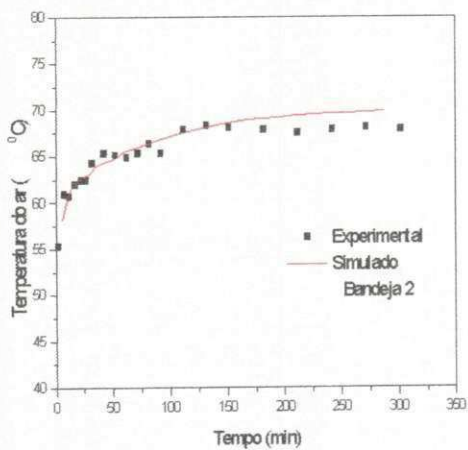


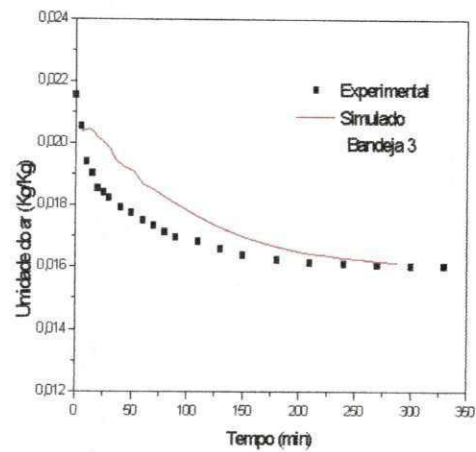
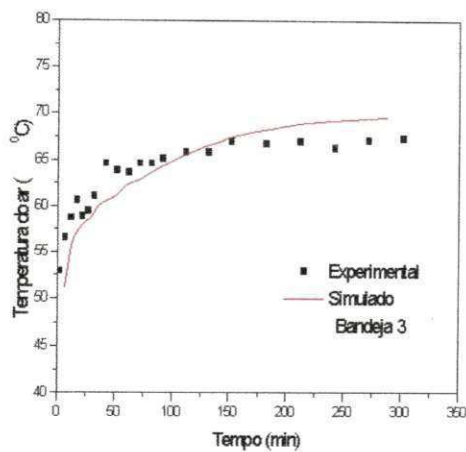
FIGURA 4.32- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 0,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$



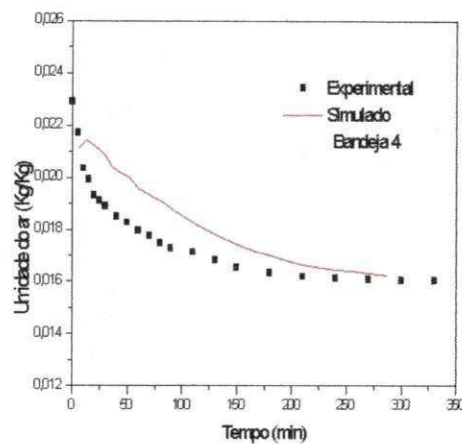
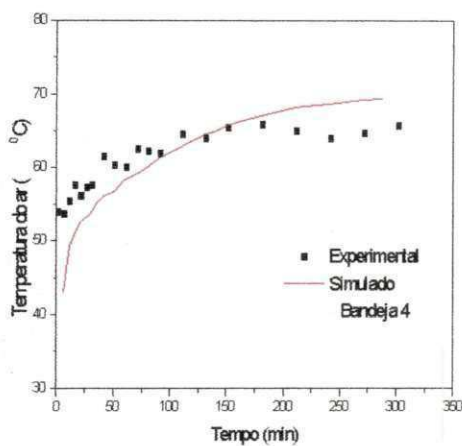
a – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 1



b – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 2



c- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 3



d- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 4

FIGURA 4.33- Comparação dos dados simulados e experimentais da temperatura e umidade do ar, com $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 0,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Mediante observação das Figuras 4.32 e 4.33 constata-se que os resultados simulados para a temperatura ajustam-se adequadamente aos experimentais; o mesmo não é verificado para os dados de umidade. Isto pode ser provavelmente devido à influência direta da constante de secagem que não foi estimada para velocidades tão baixas. A faixa experimental utilizada para o ajuste da constante de secagem foi limitada a velocidade do ar entre 0,7 –

2,2m/s; espessura da camada de banana entre 0,3 – 1,0cm e temperatura entre 43 - 96°C. Os dados experimentais utilizados foram de Coutinho *et alii* (1997) obtidos por Cavalcante (1999) de acordo com o modelo de Kiranoudis *et alii* (1997).

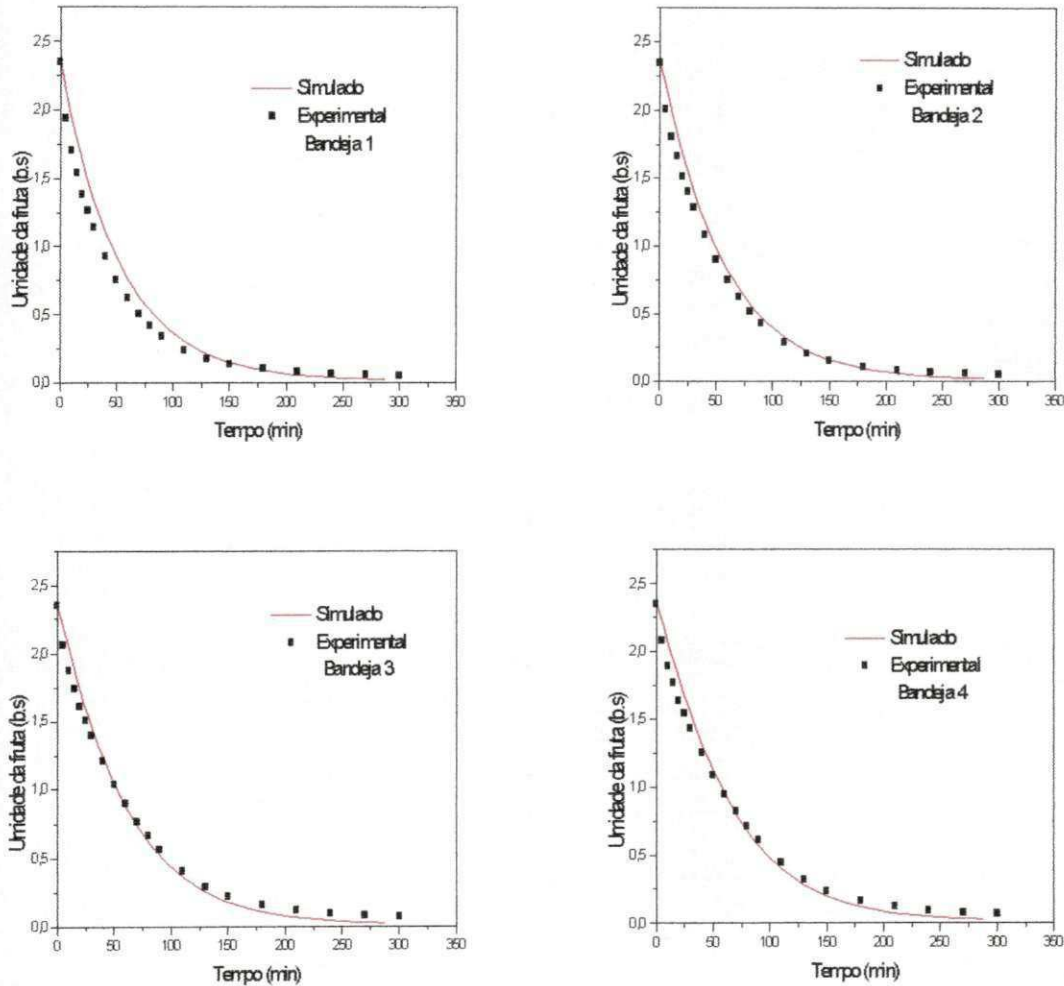
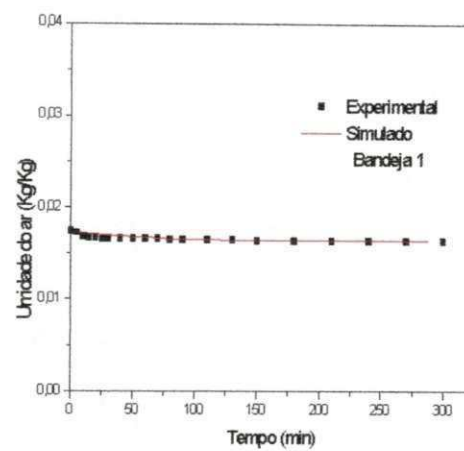
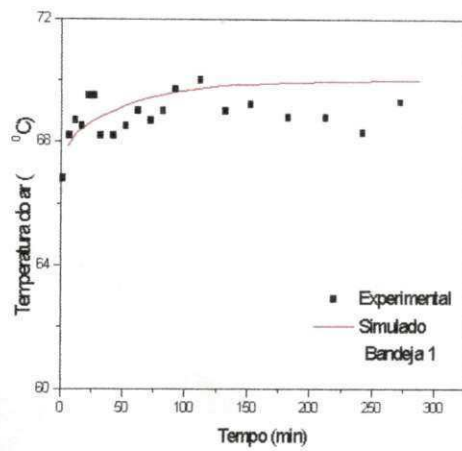
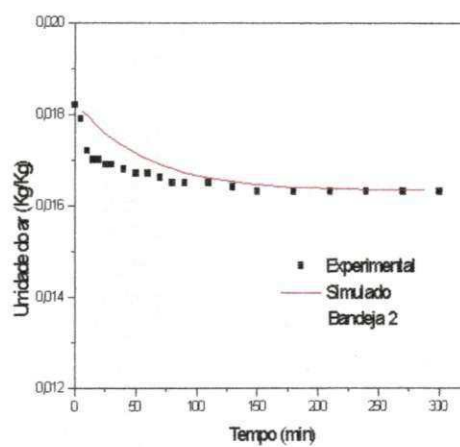
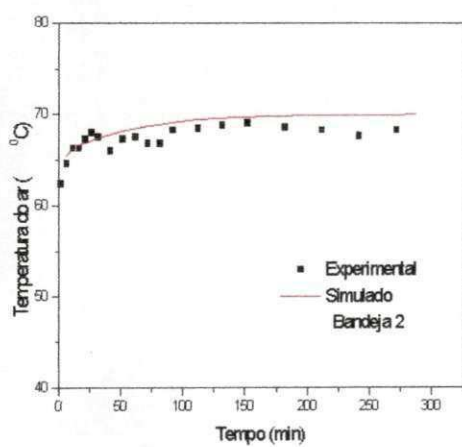


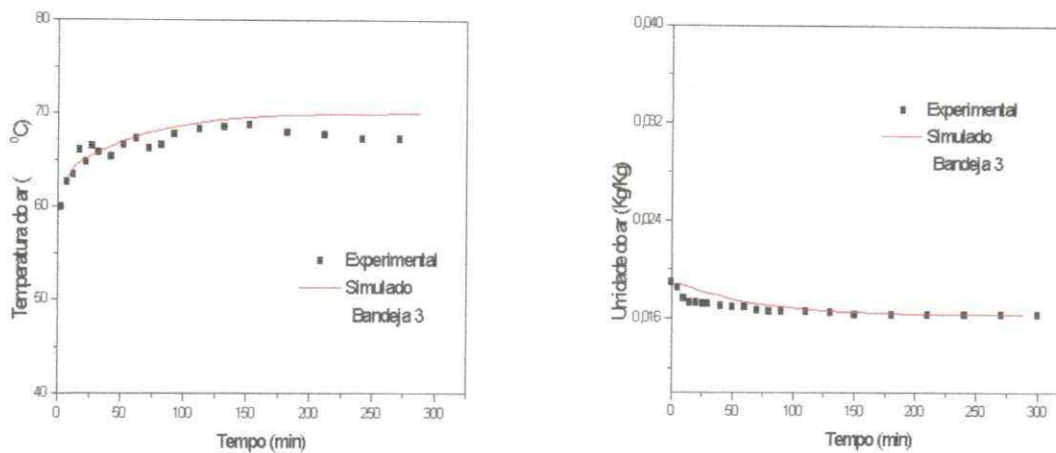
FIGURA 4.34- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 1,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$



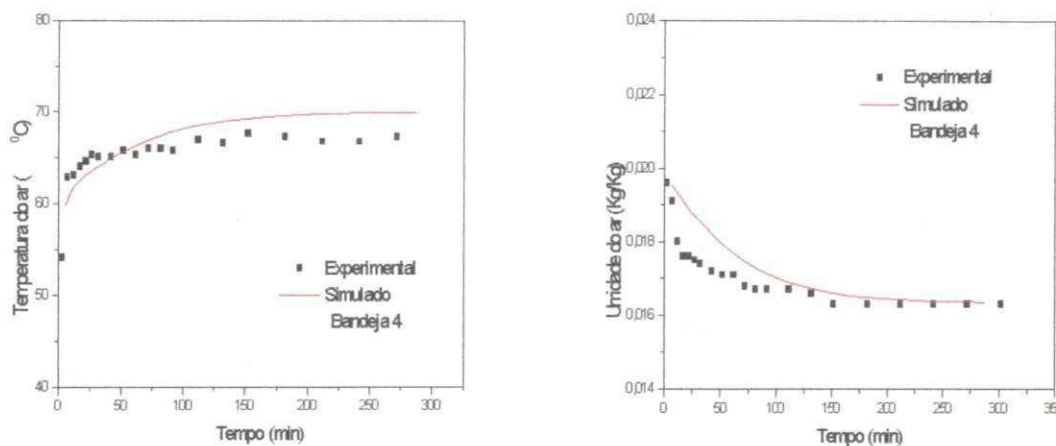
a – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 1



b – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 2



c – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 3



d – Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 4

FIGURA 4.35 – Comparação dos dados simulados e experimentais para a temperatura e umidade do ar, com $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 1,5\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Para análise das Figuras 4.34 e 4.35, observa-se que o simulador reproduz muito bem o comportamento experimental em todas as bandejas, tanto das condições da fruta como do ar, para a temperatura e umidade. Os dados simulados e experimentais retratam o que ocorre fisicamente: a umidade do ar aumenta à medida que avança nas bandejas ascendentes, ou seja,

ocorre um acúmulo de umidade ao longo das bandejas, comprovando que o balanço de massa para o ar é satisfeito.

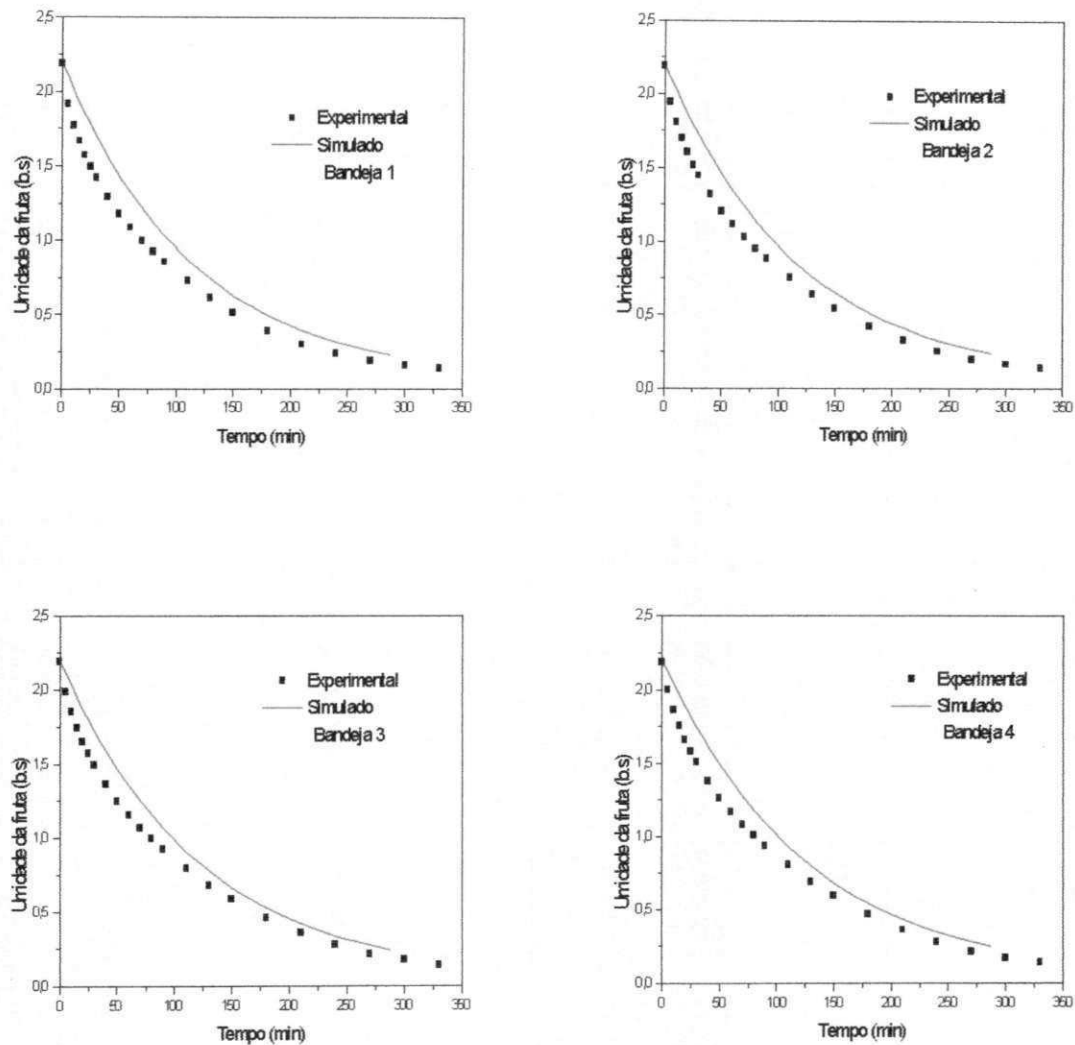
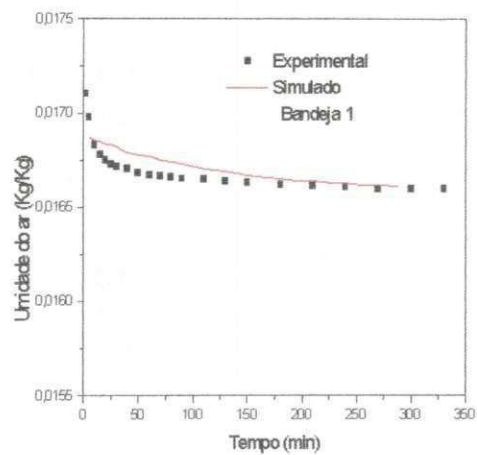
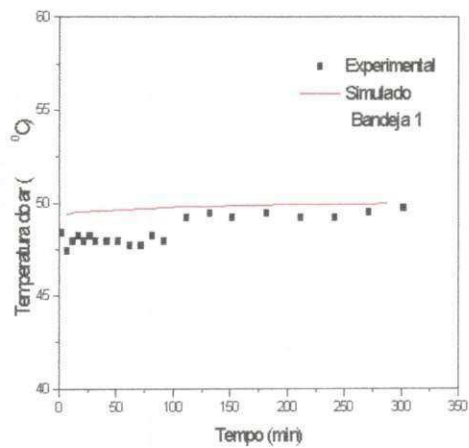
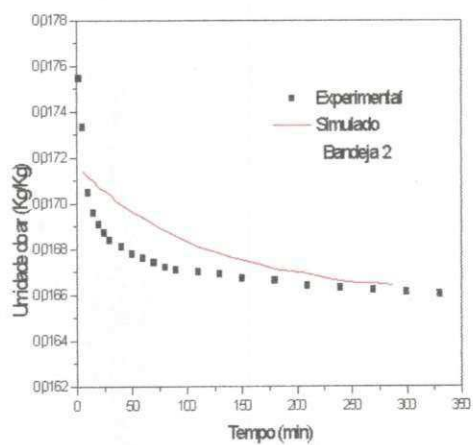
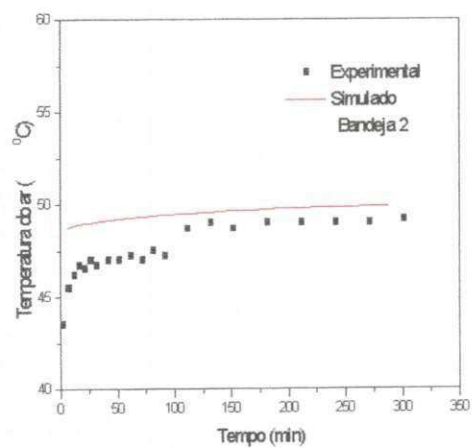


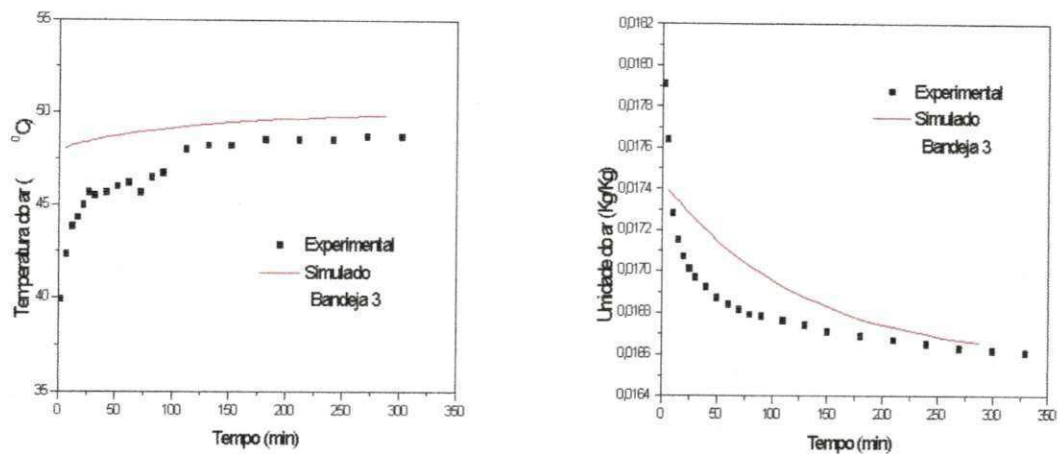
FIGURA 4.36- Comparação dos dados simulados e experimentais para a umidade da fruta, com $T = 50^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$



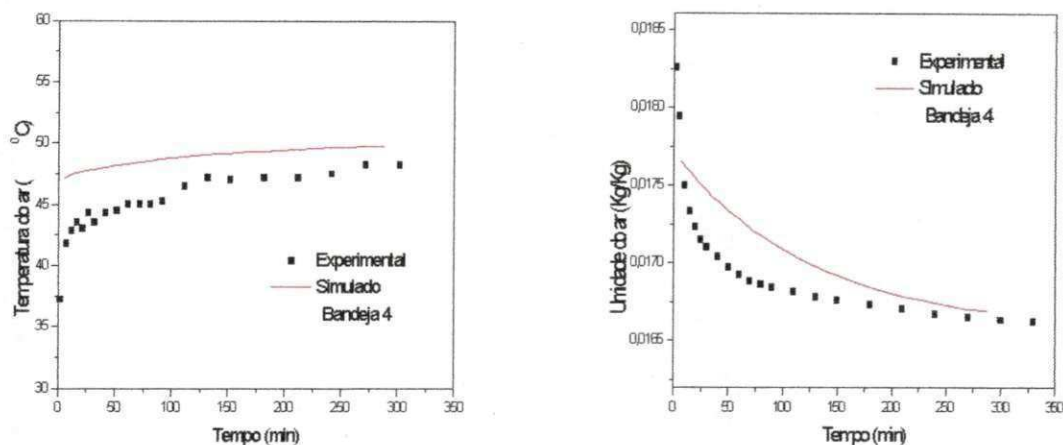
a- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 1



b- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 2



c- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 3



d- Evolução da temperatura e umidade do ar na bandeja 4

FIGURA 4.37- Comparação dos dados simulados e experimentais para a temperatura e umidade do ar, com $T = 50^{\circ}\text{C}$, $V = 2,2\text{m/s}$ e $E = 0,6\text{cm}$

Analisando as Figuras 4.36 e 4.37, observa-se que o simulador também reproduz bem o comportamento experimental para a evolução da temperatura e umidade do ar e da umidade da fruta, porém apresentando desvios um pouco maiores, em consequência das condições limite da faixa experimental utilizada.

Pelo exposto pode-se concluir que em geral o modelo e simulador utilizados representam satisfatoriamente o comportamento do secador. Entretanto, alguns ajustes permitirão melhorar seu desempenho, mediante "feed-back" à luz dos resultados obtidos no presente trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados discutidos anteriormente, pode-se concluir que:

- ❖ as curvas de secagem de banana possuem comportamento semelhantes, ou seja, todas as bandejas, com suas respectivas camadas de bananas, iniciam o processo de secagem ao mesmo tempo, sem apresentar defasagens nas camadas superiores, isto, porque o ar está insaturado;
- ❖ o efeito da velocidade do ar de secagem pode ser percebido para as velocidades menores que 1,0m/s, indicando que a resistência externa controla o processo, e para velocidades do ar acima de 0,5m/s o controle é praticamente difusional no interior das frutas;
- ❖ sobre o efeito da temperatura podemos concluir que aumentando-se a temperatura de entrada do ar a taxa de eliminação de água aumenta, reduzindo, portanto, o tempo de secagem; entretanto, esse efeito é pouco significativo a partir de 60^oC;
- ❖ em todas as bandejas, a secagem evolui mais rapidamente com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem;
- ❖ o aumento da espessura da camada de banana diminui a velocidade de secagem, sendo que a taxa específica de secagem não é influenciada significativamente para espessuras entre 1,2 e 2,0cm.
- ❖ O ar sai do secador longe das condições de saturação, sendo possível aumentar a carga e/ou o número de bandejas para melhorar a eficiência;
- ❖ O modelo e o simulador utilizados representam adequadamente o comportamento observado experimentalmente, tanto na predição da evolução da umidade da fruta, como da temperatura e umidade do ar.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES

Com relação ao estudo experimental:

- ◆ analisar a qualidade do produto final em termos de propriedades físico-químicas e sensoriais;
- ◆ acompanhar a temperatura interna da banana em todas as bandejas;
- ◆ aumentar a carga e/ou número de bandejas.

Com relação ao desempenho:

- ◆ otimizar as condições de operação utilizando o simulador quanto a:
 - ✓ distribuição de carga nas bandejas;
 - ✓ utilização de reciclos de ar;
 - ✓ vazão e temperatura do ar de secagem;
 - ✓ espaçamento entre as bandejas.

Com relação à validade do modelo e simulador:

- ◆ obter um melhor ajuste para a equação da camada fina e constante de secagem, especialmente abrangendo uma maior faixa de condições experimentais;
- ◆ utilizar modelos mais realísticos, que incluam variação de propriedades com a temperatura e/ou teor de umidade, sistemas não ideais, encolhimento das frutas;
- ◆ aplicar o modelo e simulador a outras frutas.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALSINA, O.L.S.; SILVA, O.S.; SANTOS, J.M.A. Efeito das condições operacionais na cinética de secagem de fatias de banana. In: XXVI CONBEA-Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola- CDROM, Campina Grande, 1997 (a).
- ALTEMANI, C.A.C.(1976). Apud LIMA, A.G.B. de *Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 265p. Tese (Doutorado).
- ALVARADO & MORENO (1986); BROOKER *et alii* (1974); COUTINHO *et alii* (1997), SOKHANSANJ (1984); WHITAKER (1972). Apud CAVALCANTE, J.A. de *Simulação de um secador convectivo de bandejas para frutas tropicais*. Campina Grande: Departamento de Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1999. 64p. Dissertação (Mestrado).
- BELAHMIDI, B.; BELGHIT, A., MIR. A. Experimental and simulação of drying of orange peels. *Proceedings of the 2nd World Renewable Energy Congress*, p.913-917, Reading, UK, 1992.
- BEN MABROUK, S.; AZZOUS, S.; BELGHIT, A. Development of drying of agricultural products. *Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress*, p.958-963, Reading, UK, 1990.
- BENNET, C.O.; MYERS, J.G. *Fenômenos de Transporte*. Ed. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., São Paulo, 1978.

CALÇADA, L.A.; MOTTA LIMA, O.C., SOUZA Jr., M.B.; BISCAIA Jr., E.C.
Otimização energética de secadores de leito fixo e leito deslizante. In: 11^o
Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 1996, Rio de Janeiro. Anais...

CAVALCANTE, JOSILENE ASSIS de *Simulação de um secador convectivo de bandejas para frutas tropicais*. Campina Grande: Departamento de Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1999. 64p. Dissertação (Mestrado).

DIAMANTE, L.M.; MOUNRO, P.A. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, v.51, p.271-276, 1993.

ELSAYED, M.M. Mathematical modeling of a thin layer solar kiln. *Transactions of ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, v.112, p.196-203, 1990.

FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B.
Princípios das operações unitárias, Guanabara Dois, Segunda edição, Rio de Janeiro, 1980, 670p.

GORG, H.P.; SHARMA, S. Mathematical modeling of a natural convection solar dryer. *Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress*, p.904. Reading, UK, 1990.

GUZMAN, J.A.; LAUTERBACK, R.; JORDAN, R. Mathematical model for determining overall performance of solar kiln. *Transactions ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, v.109, p.26-29, 1987.

IMRE, L.; PALANIAPPAN, C. Development of solar drying, *Drying Technology*, v.14, n.6, p.1381-1388, 1996.

INTERPA-PB, *Informe Agropecuário*, a.5, n.5, 1996.

JAYARAMAN, K.S.; DAS GUPTA, D.K. *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. Chapter: Drying of fruits and vegetables. v.1, p.643-690.

KHATTAB, N.M. Toward a homogeneous and efficient batch- tray dryer, *Energy Sources*, n.18, p.447-459, 1996.

KIRANOUDIS, C.T. Design of batch grape dryers, *Drying Technology*, v.16, n.1e 2, p.141-162, 1998.

KIRANOUDIS, C.T.; SAMI, E.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits, *Drying Technology*, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

KROKIDA, M.K.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables, *Drying technology*, v.16, n.3 e 5, p.667-685, 1998.

LIMA, ANTONIO GILSON BARBOSA de *Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 265p. Tese (Doutorado).

NONHEBEL, G.; MOSS, A.A.H. *El secado de sólidos en la indústria química*, Editora Reverté S. A., 1979.

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H.; *Manual de engenharia química*, 5ª edição, Guanabara Dois, 1980.

PRASERTSAN, S.; SAEN-SABY, P. Heat pump drying of agricultural materials, *Drying Technology*, v.16, n.1 e 2, p.235-250, 1998.

QUEIROZ, M.R.; NEBRA, S.A. Modelo de difusão aplicado à secagem de banana: análise da condição de contorno convectiva. In: Congresso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos, 1995, Campinas, Anales... Tomo II, p.301-311.

QUEIROZ, M.R.; NEBRA, S.A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas, *Drying* 96, v.B, p.1045-1052, 1996.

SATYRO, M.A.; ALVES, P.M.; PICOLLI FILHO, D.E. Modelagem e simulação de processos - Conceituação geral, REBEC, p.3-7, 1986.

SCHIRMER, P.; JANJAI, S.; ESPER, A.; SMITABHINDU, R.; MUHLBAUER, W. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy*, v.7, n.2, p.119-129, 1996.

SHARMA, V.K.; COLANGELO, A.; SPAGNA, G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. *Proceedings of the 2nd World Renewable Energy Congress*, p.635-641, Reading, UK, 1992.

SIMÃO (1971). Apud LIMA, ANTONIO GILSON BARBOSA de *Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 265p. Tese (Doutorado).

STEINFELD, A.; SEGAL, I. A simulation model for solar thin layer drying process, *Drying Technology*, v.4, 535p., 1986.

TRAVAGLINI, D.A.; NETO, M.P.; BLEINROTH, E.W.; LEITÃO, M.F.F. *Banana-passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial*, Campinas: ITAL, 1993, 73p. (Manual Técnico 12).

APÊNDICE A
(Tabelas de dados obtidos na câmara de secagem)

TABELA A1: Experimento 01

Parâmetros utilizados: $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $T_{\text{amb}} = 29,7 \pm 1,6^\circ\text{C}$, $\bar{U}R_{\text{amb}} = 50,7 \pm 7,9\%$, $H_0 = 0,014 \pm 0,003$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	140,73	2,299	2	69,0
	2	131,48	2,299		67,7
	3	140,58	2,299		66,0
	4	150,63	2,299		65,5
5	1	129,26	1,905	7	67,3
	2	122,97	1,98		66,5
	3	132,11	2,010		64,1
	4	141,78	2,023		63,9
10	1	122,02	1,656	12	68,0
	2	117,09	1,759		66,8
	3	126,19	1,807		64,8
	4	135,47	1,825		64,6
15	1	117,01	1,484	17	69,0
	2	113,03	1,606		67,0
	3	122,04	1,664		65,6
	4	131,04	1,686		64,6
20	1	113,83	1,375	22	69,0
	2	110,57	1,514		67,0
	3	119,51	1,578		65,1
	4	128,37	1,603		62,1
25	1	110,94	1,275	27	69,0
	2	108,24	1,426		67,5
	3	117,17	1,497		65,8
	4	125,87	1,525		62,4
30	1	107,26	1,149	32	69,0
	2	105,21	1,312		67,0
	3	114,09	1,392		65,8
	4	122,62	1,423		65,3
40	1	101,55	0,953	42	69,7
	2	100,42	1,132		68,3
	3	109,23	1,225		66,8
	4	117,53	1,263		66,1
50	1	96,62	0,783	52	69,7
	2	96,04	0,968		68,3
	3	104,73	1,071		68,0
	4	112,86	1,117		65,8
60	1	92,23	0,632	62	69,5
	2	91,83	0,81		67,8
	3	100,41	0,923		65,8
	4	108,41	0,978		64,9

TABELA A1 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs (°C)
70	1	89,06	0,523	72	70,0
	2	88,55	0,686		68,5
	3	96,93	0,804		67,5
	4	104,80	0,865		66,3
80	1	86,03	0,419	82	69,5
	2	85,25	0,562		67,5
	3	93,28	0,679		66,1
	4	101,01	0,746		65,6
90	1	83,96	0,348	92	68,5
	2	82,80	0,47		67,3
	3	90,51	0,584		67,1
	4	98,07	0,654		66,8
110	1	80,89	0,242	112	69,5
	2	78,88	0,322		68,5
	3	85,58	0,415		67,3
	4	92,61	0,483		66,6
130	1	78,96	0,176	132	68,5
	2	76,37	0,228		67,3
	3	82,10	0,295		66,6
	4	88,45	0,353		66,1
150	1	77,83	0,137	152	70,7
	2	74,85	0,171		70,3
	3	79,83	0,218		69,8
	4	85,56	0,263		67,3
180	1	76,86	0,104	182	70,5
	2	73,61	0,125		69,8
	3	77,94	0,153		69,0
	4	82,98	0,182		66,9
210	1	76,26	0,083	212	70,0
	2	72,91	0,098		69,1
	3	76,90	0,117		68,8
	4	81,50	0,135		68,1
240	1	75,89	0,070	242	70,8
	2	72,48	0,082		69,6
	3	76,27	0,096		69,3
	4	80,61	0,108		68,1
270	1	75,61	0,061	272	70,0
	2	72,18	0,071		69,6
	3	75,86	0,082		69,6
	4	80,06	0,090		67,9
300	1	75,40	0,054	302	-
	2	71,93	0,061		-
	3	75,53	0,070		-
	4	79,61	0,076		-

TABELA A2: Experimento 02

Parâmetros utilizados: $V = 1,0\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 30,1 \pm 1,1^\circ\text{C}$, $\bar{U} \cdot R_{\text{amb}} = 44,9 \pm 4,3\%$, $H_0 = 0,0134 \pm 0,001$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs ($^\circ\text{C}$)
0	1	166,33	2,365	2	63,9
	2	165,00	2,365		59,7
	3	167,38	2,365		55,6
	4	166,70	2,365		51,7
5	1	154,95	1,992	7	64,9
	2	156,78	2,089		61,0
	3	159,77	2,114		57,0
	4	159,86	2,136		56,1
10	1	149,31	1,807	12	65,8
	2	151,84	1,923		61,7
	3	155,09	1,96		58,0
	4	155,59	1,993		56,1
15	1	144,64	1,653	17	66,1
	2	147,70	1,784		63,4
	3	151,00	1,825		59,7
	4	151,76	1,865		56,6
20	1	140,34	1,512	22	66,6
	2	143,94	1,658		64,1
	3	147,26	1,702		60,7
	4	148,29	1,748		58,5
25	1	136,47	1,386	27	67,3
	2	140,57	1,545		63,1
	3	143,82	1,589		61,2
	4	145,07	1,641		60,2
30	1	132,82	1,266	32	68,0
	2	137,40	1,439		65,6
	3	140,65	1,485		62,4
	4	142,11	1,542		60,2
40	1	126,04	1,044	42	67,8
	2	131,36	1,236		65,8
	3	134,53	1,283		62,9
	4	136,40	1,35		60,5
50	1	120,40	0,859	52	67,5
	2	126,33	1,068		65,6
	3	129,49	1,117		62,9
	4	131,62	1,19		60,5
60	1	115,50	0,698	62	67,8
	2	121,88	0,918		65,6
	3	125,10	0,973		64,4
	4	127,54	1,054		61,0

TABELA A2 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs ($^{\circ}$ C)
70	1	111,21	0,557	72	68,5
	2	117,81	0,782		66,6
	3	121,06	0,84		63,9
	4	123,69	0,925		61,5
80	1	107,93	0,45	82	68,0
	2	114,39	0,667		66,1
	3	117,77	0,731		65,1
	4	120,59	0,821		62,2
90	1	104,99	0,353	92	68,5
	2	110,90	0,55		66,6
	3	114,37	0,619		65,6
	4	117,23	0,709		62,4
110	1	100,86	0,218	112	69,0
	2	105,03	0,353		67,3
	3	108,54	0,428		66,1
	4	111,29	0,51		63,4
130	1	98,68	0,146	132	69,3
	2	101,20	0,225		67,6
	3	104,45	0,293		66,6
	4	106,85	0,361		63,9
150	1	97,51	0,108	152	69,8
	2	98,84	0,146		68,3
	3	101,76	0,204		67,3
	4	103,49	0,249		64,9
180	1	96,51	0,075	182	69,5
	2	96,99	0,084		68,1
	3	99,55	0,132		68,3
	4	100,59	0,152		66,6
210	1	96,05	0,06	212	69,6
	2	96,12	0,054		68,6
	3	98,54	0,098		68,3
	4	99,22	0,106		66,4
240	1	95,76	0,051	242	69,6
	2	95,64	0,038		68,6
	3	97,93	0,078		67,9
	4	98,50	0,082		66,4
270	1	95,49	0,042	272	68,8
	2	95,30	0,027		67,9
	3	97,55	0,066		67,4
	4	98,01	0,065		66,1
300	1	95,34	0,037	302	69,1
	2	95,07	0,019		67,6
	3	97,29	0,057		67,1
	4	97,71	0,055		65,2

TABELA A3: Experimento 03

Parâmetros utilizados: $V = 0,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 28,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$, $\bar{U}R_{\text{amb}} = 63,7 \pm 3,1\%$, $H_0 = 0,016 \pm 0,001$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	142,77	2,213	2	64,6
	2	142,71	2,213		55,3
	3	139,47	2,213		52,9
	4	139,41	2,213		53,8
5	1	133,43	1,907	7	65,8
	2	135,99	1,995		60,9
	3	133,84	2,023		56,5
	4	134,10	2,032		53,6
10	1	128,26	1,737	12	66,8
	2	131,46	1,848		60,7
	3	129,80	1,887		58,7
	4	130,33	1,903		55,3
15	1	123,57	1,584	17	66,7
	2	127,35	1,715		61,9
	3	125,91	1,755		60,6
	4	126,58	1,776		57,5
20	1	119,58	1,453	22	66,0
	2	123,82	1,600		62,4
	3	122,61	1,644		58,9
	4	123,31	1,664		56,0
25	1	116,28	1,345	27	66,3
	2	120,85	1,504		62,4
	3	119,85	1,551		59,4
	4	120,67	1,574		57,2
30	1	112,72	1,228	32	67,5
	2	117,67	1,400		64,3
	3	116,94	1,453		61,1
	4	117,86	1,478		57,5
40	1	107,06	1,042	42	67,3
	2	112,45	1,231		65,3
	3	112,10	1,289		64,6
	4	113,22	1,319		61,4
50	1	101,96	0,875	52	68,5
	2	107,67	1,076		65,1
	3	107,67	1,140		63,9
	4	108,91	1,173		60,2
60	1	97,52	0,729	62	67,5
	2	103,28	0,933		64,8
	3	103,63	1,003		63,6
	4	105,06	1,041		59,9

TABELA A3 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_i (min)	T_{bs} ($^{\circ}$ C)
70	1	93,97	0,613	72	68,0
	2	99,61	0,814		65,3
	3	100,21	0,888		64,6
	4	101,85	0,932		62,4
80	1	90,70	0,506	82	68,7
	2	96,00	0,697		66,3
	3	96,88	0,775		64,6
	4	98,68	0,824		62,1
90	1	88,51	0,434	92	67,8
	2	93,40	0,613		65,3
	3	94,38	0,691		65,1
	4	96,31	0,743		61,9
110	1	84,40	0,299	112	69,2
	2	87,86	0,433		67,8
	3	88,85	0,504		65,8
	4	91,00	0,562		64,4
130	1	81,88	0,217	132	69,5
	2	83,92	0,305		68,3
	3	84,67	0,363		65,8
	4	86,75	0,417		63,9
150	1	80,38	0,167	152	68,3
	2	81,40	0,223		68,0
	3	81,77	0,265		67,0
	4	83,59	0,309		65,3
180	1	79,00	0,122	182	68,5
	2	79,08	0,148		67,8
	3	78,98	0,171		66,8
	4	80,37	0,199		65,8
210	1	78,20	0,096	212	68,8
	2	77,78	0,106		67,5
	3	77,48	0,120		67,0
	4	78,61	0,139		64,9
240	1	77,67	0,078	242	68,5
	2	76,99	0,080		67,8
	3	76,56	0,089		66,3
	4	77,59	0,104		63,9
270	1	77,37	0,069	272	69,0
	2	76,59	0,067		68,0
	3	76,11	0,074		67,1
	4	77,06	0,086		64,6
300	1	77,09	0,059	302	68,5
	2	76,25	0,056		67,8
	3	75,72	0,061		67,3
	4	76,63	0,071		65,6

TABELA A4: Experimento 04

Parâmetros utilizados: $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 28,2 \pm 0,7^\circ\text{C}$, $\bar{U}R_{\text{amb}} = 64,2 \pm 2,3\%$, $H_0 = 0,0163 \pm 0,001$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	143,95	2,353	2	66,8
	2	138,23	2,353		62,4
	3	142,60	2,353		60,0
	4	141,83	2,353		54,1
5	1	131,74	1,941	7	68,2
	2	128,61	2,012		64,6
	3	134,18	2,066		62,6
	4	134,03	2,083		62,9
10	1	124,71	1,703	12	68,7
	2	122,73	1,804		66,3
	3	128,61	1,876		63,4
	4	128,62	1,895		63,1
15	1	120,01	1,544	17	68,5
	2	118,74	1,662		66,3
	3	124,83	1,747		66,0
	4	125,03	1,770		64,1
20	1	115,36	1,387	22	69,5
	2	114,65	1,517		67,3
	3	120,89	1,613		64,8
	4	121,29	1,640		64,6
25	1	111,74	1,264	27	69,5
	2	111,55	1,407		68,0
	3	117,88	1,510		66,5
	4	118,41	1,540		65,3
30	1	108,06	1,140	32	68,2
	2	108,23	1,289		67,5
	3	114,63	1,399		65,8
	4	115,33	1,433		65,1
40	1	101,79	0,928	42	68,2
	2	102,43	1,083		66,0
	3	109,10	1,210		65,3
	4	110,06	1,250		65,1
50	1	96,70	0,756	52	68,5
	2	97,40	0,905		67,3
	3	104,20	1,043		66,6
	4	105,37	1,087		65,8
60	1	92,78	0,623	62	69,0
	2	93,22	0,757		67,5
	3	100,03	0,901		67,3
	4	101,40	0,950		65,3

TABELA A4 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} (°C)
70	1	89,34	0,507	72	68,7
	2	89,47	0,624		66,8
	3	96,17	0,769		66,3
	4	97,65	0,819		66,0
80	1	86,76	0,420	82	69,0
	2	86,56	0,521		66,8
	3	93,04	0,662		66,6
	4	94,60	0,713		66,0
90	1	84,54	0,345	92	69,7
	2	83,91	0,427		68,3
	3	90,07	0,561		67,8
	4	91,60	0,609		65,8
110	1	81,46	0,240	112	70,0
	2	80,13	0,292		68,5
	3	85,45	0,404		68,3
	4	86,78	0,442		67,0
130	1	79,61	0,178	132	69,0
	2	77,71	0,207		68,8
	3	82,18	0,292		68,6
	4	83,18	0,317		66,6
150	1	78,45	0,139	152	69,2
	2	76,29	0,156		69,0
	3	80,08	0,220		68,8
	4	80,83	0,235		67,6
180	1	77,42	0,104	182	68,8
	2	75,08	0,113		68,6
	3	78,23	0,157		68,0
	4	78,77	0,164		67,3
210	1	76,75	0,081	212	68,8
	2	74,34	0,087		68,3
	3	77,11	0,119		67,8
	4	77,51	0,120		66,8
240	1	76,33	0,067	242	68,3
	2	73,89	0,071		67,6
	3	76,45	0,096		67,3
	4	76,81	0,096		66,8
270	1	76,03	0,057	272	69,3
	2	73,59	0,060		68,3
	3	75,98	0,080		67,3
	4	76,35	0,079		67,3
300	1	75,79	0,049	332	-
	2	73,33	0,051		-
	3	75,68	0,070		-
	4	76,02	0,068		-

TABELA A5: Experimento 05

Parâmetros utilizados: $V = 0,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 29,6 \pm 1,5^\circ\text{C}$, $\bar{U.R}_{\text{amb}} = 48,9 \pm 5,5\%$, $H_0 = 0,0134 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_i (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	145,39	2,247	2	60,9
	2	138,92	2,247		51,2
	3	141,20	2,247		46,6
	4	146,45	2,247		44,1
5	1	137,12	1,979	7	63,6
	2	134,18	2,085		56,8
	3	137,33	2,117		44,1
	4	143,18	2,141		47,5
10	1	131,60	1,801	12	60,9
	2	130,09	1,945		55,1
	3	133,77	1,997		50,7
	4	140,00	2,039		48,0
15	1	127,53	1,669	17	63,1
	2	126,81	1,832		58,2
	3	130,74	1,895		55,6
	4	137,25	1,951		48,7
20	1	123,94	1,553	22	63,9
	2	123,72	1,727		54,6
	3	127,97	1,802		50,2
	4	134,66	1,867		50,0
25	1	120,87	1,453	27	63,4
	2	121,09	1,637		59,5
	3	125,50	1,719		55,3
	4	132,33	1,792		51,7
30	1	117,63	1,349	32	60,9
	2	118,28	1,541		60,0
	3	122,76	1,627		56,8
	4	129,72	1,708		51,4
40	1	112,30	1,176	42	64,6
	2	113,59	1,380		59,5
	3	118,14	1,471		53,6
	4	125,14	1,561		53,4
50	1	107,40	1,018	52	66,3
	2	109,26	1,232		61,2
	3	113,92	1,329		56,3
	4	120,96	1,427		54,4
60	1	103,26	0,884	62	68,8
	2	105,53	1,104		61,9
	3	110,33	1,209		59,5
	4	117,39	1,312		56,3

TABELA A5 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} (°C)
70	1	99,40	0,759	72	66,8
	2	101,99	0,983		61,9
	3	106,89	1,093		61,7
	4	113,98	1,202		55,8
80	1	95,95	0,647	82	66,8
	2	98,82	0,875		63,2
	3	103,80	0,989		60,9
	4	110,94	1,104		58,3
90	1	92,73	0,543	92	68,8
	2	95,72	0,769		63,9
	3	100,76	0,887		59,3
	4	107,92	1,007		56,6
110	1	87,78	0,383	112	69,8
	2	90,25	0,582		64,1
	3	95,42	0,707		60,5
	4	102,61	0,836		59,3
130	1	84,20	0,267	132	70,0
	2	85,44	0,417		67,6
	3	90,56	0,544		65,4
	4	97,67	0,677		61,2
150	1	82,13	0,200	152	70,0
	2	81,99	0,299		67,8
	3	86,71	0,414		62,7
	4	93,75	0,551		59,8
180	1	80,09	0,134	182	70,0
	2	78,52	0,180		67,6
	3	82,00	0,256		65,6
	4	88,49	0,382		61,5
210	1	79,07	0,101	212	68,6
	2	76,85	0,123		65,9
	3	79,34	0,166		63,0
	4	84,89	0,266		59,8
240	1	78,47	0,082	242	69,3
	2	75,93	0,092		66,9
	3	77,85	0,116		61,3
	4	82,63	0,193		60,0
270	1	78,09	0,069	272	69,8
	2	75,39	0,073		63,7
	3	77,05	0,089		61,8
	4	81,33	0,151		59,1
300	1	77,81	0,060	302	68,1
	2	75,02	0,061		65,2
	3	76,55	0,073		64,2
	4	80,54	0,126		59,1

TABELA A6: Experimento 06

Parâmetros utilizados: $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 28,2 \pm 1,2^\circ\text{C}$, $\bar{U}R_{\text{amb}} = 62,0 \pm 4,8\%$, $H_0 = 0,0157 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	146,33	2,426	2	58,7
	2	147,92	2,426		55,3
	3	141,54	2,426		53,6
	4	145,78	2,426		52,9
5	1	135,29	2,053	7	61,1
	2	137,30	2,077		58,7
	3	132,30	2,100		55,0
	4	136,86	2,122		53,6
10	1	129,40	1,854	12	60,4
	2	132,12	1,906		59,7
	3	127,45	1,929		57,2
	4	131,90	1,953		53,6
15	1	124,00	1,672	17	60,7
	2	127,22	1,745		57,7
	3	122,91	1,769		55,6
	4	127,26	1,794		55,0
20	1	120,63	1,559	22	59,7
	2	124,08	1,642		58,0
	3	120,04	1,668		57,2
	4	124,34	1,695		56,3
25	1	117,19	1,442	27	59,0
	2	120,86	1,536		57,2
	3	117,09	1,564		56,8
	4	121,36	1,593		56,3
30	1	113,97	1,334	32	60,0
	2	117,91	1,439		58,0
	3	114,37	1,468		57,2
	4	118,56	1,498		56,8
40	1	107,95	1,131	42	60,2
	2	112,20	1,251		58,7
	3	109,04	1,280		58,2
	4	113,13	1,313		56,3
50	1	103,27	0,973	52	58,7
	2	107,63	1,101		58,5
	3	103,64	1,090		58,0
	4	108,82	1,166		57,0
60	1	99,22	0,836	62	60,4
	2	103,60	0,969		59,5
	3	101,05	0,999		59,5
	4	105,00	1,035		58,0

TABELA A6 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} (°C)
70	1	95,47	0,710	72	60,2
	2	99,86	0,846		59,2
	3	97,52	0,874		58,5
	4	101,44	0,914		58,0
80	1	92,37	0,605	82	59,7
	2	96,56	0,737		59,0
	3	94,47	0,767		58,2
	4	98,38	0,810		57,3
90	1	89,77	0,517	92	59,7
	2	93,86	0,649		59,0
	3	91,97	0,679		58,5
	4	95,81	0,722		58,0
110	1	85,40	0,370	112	60,2
	2	88,76	0,481		59,7
	3	87,11	0,508		59,5
	4	90,88	0,554		58,7
130	1	82,32	0,266	132	60,7
	2	84,80	0,351		60,5
	3	83,12	0,367		60,0
	4	86,71	0,412		59,5
150	1	80,36	0,200	152	61,0
	2	81,97	0,258		60,7
	3	80,08	0,260		60,2
	4	83,40	0,299		59,0
180	1	78,71	0,144	182	61,2
	2	79,55	0,178		61,0
	3	77,38	0,165		60,7
	4	80,27	0,192		59,7
210	1	77,79	0,113	212	61,2
	2	78,28	0,136		61,0
	3	76,01	0,116		60,7
	4	78,64	0,137		60,5
240	1	77,25	0,095	242	61,7
	2	77,57	0,113		61,2
	3	75,29	0,091		60,7
	4	77,77	0,107		60,5
270	1	76,86	0,082	272	62,2
	2	77,09	0,097		61,7
	3	74,82	0,074		61,5
	4	77,22	0,088		61,2
300	1	75,40	0,054	302	60,7
	2	71,93	0,061		60,2
	3	75,53	0,070		60,0
	4	79,61	0,076		59,8

TABELA A7: Experimento 07

Parâmetros utilizados: $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 25,8 \pm 1,1^\circ\text{C}$, $U.R_{\text{amb}} = 65,02 \pm 5,6\%$, $H_0 = 0,0166 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	170,88	2,191	2	48,4
	2	168,47	2,191		43,5
	3	171,55	2,191		39,9
	4	170,28	2,191		37,2
5	1	161,72	1,918	7	47,4
	2	160,46	1,945		45,5
	3	164,95	1,991		42,3
	4	163,96	1,999		41,8
10	1	156,87	1,774	12	47,9
	2	155,84	1,803		46,2
	3	160,46	1,855		43,8
	4	159,53	1,864		42,8
15	1	153,26	1,666	17	48,2
	2	152,30	1,694		46,7
	3	156,86	1,746		44,3
	4	155,99	1,757		43,5
20	1	150,14	1,573	22	47,9
	2	149,24	1,600		46,5
	3	153,73	1,651		45,0
	4	152,84	1,661		43,0
25	1	147,53	1,495	27	48,2
	2	146,59	1,518		47,0
	3	151,06	1,570		45,7
	4	150,19	1,581		44,3
30	1	145,09	1,423	32	47,9
	2	144,26	1,447		46,7
	3	148,61	1,496		45,5
	4	147,76	1,507		43,5
40	1	140,66	1,291	42	47,9
	2	140,04	1,317		47,0
	3	144,21	1,363		45,7
	4	143,45	1,376		44,3
50	1	136,97	1,181	52	47,9
	2	136,44	1,206		47,0
	3	140,56	1,252		46,0
	4	139,72	1,263		44,5
60	1	133,85	1,088	62	47,7
	2	133,40	1,113		47,2
	3	137,39	1,156		46,2
	4	136,58	1,168		45,0

TABELA A7 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs ($^{\circ}$ C)
70	1	130,90	1,000	72	47,7
	2	130,62	1,027		47,0
	3	134,57	1,071		45,7
	4	133,75	1,082		45,0
80	1	128,45	0,927	82	48,2
	2	128,20	0,953		47,5
	3	132,12	0,997		46,5
	4	131,29	1,007		45,0
90	1	126,08	0,857	92	47,9
	2	125,89	0,882		47,2
	3	129,77	0,926		46,7
	4	128,93	0,935		45,3
110	1	121,80	0,729	112	49,2
	2	121,75	0,754		48,7
	3	125,52	0,797		48,0
	4	124,65	0,805		46,5
130	1	118,05	0,617	132	49,4
	2	118,07	0,641		49,0
	3	121,81	0,685		48,2
	4	120,92	0,692		47,2
150	1	114,64	0,516	152	49,2
	2	114,97	0,546		48,7
	3	118,55	0,586		48,2
	4	117,69	0,594		47,0
180	1	110,58	0,395	182	49,4
	2	110,92	0,422		49,0
	3	114,39	0,460		48,5
	4	113,47	0,466		47,2
210	1	107,49	0,303	212	49,2
	2	107,76	0,324		49,0
	3	111,01	0,358		48,5
	4	110,03	0,362		47,2
240	1	105,26	0,237	242	49,2
	2	105,36	0,251		49,0
	3	108,34	0,277		48,5
	4	103,74	0,278		47,5
270	1	103,67	0,191	272	49,5
	2	106,35	0,199		49,0
	3	105,21	0,216		48,7
	4	102,71	0,215		48,2
300	1	102,71	0,161	302	49,7
	2	102,51	0,163		49,2
	3	104,97	0,175		48,7
	4	103,71	0,170		48,2

TABELA A8: Experimento 08

Parâmetros utilizados: $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 80^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 25,7 \pm 0,8^\circ\text{C}$, $\bar{U} \cdot R_{\text{amb}} = 74,6 \pm 3,0\%$, $H_0 = 0,0164 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	168,23	2,228	2	79,9
	2	172,61	2,228		68,4
	3	163,85	2,228		65,2
	4	170,99	2,228		62,0
5	1	154,35	1,798	7	79,8
	2	158,93	1,818		71,3
	3	158,86	2,064		65,4
	4	159,67	1,878		63,2
10	1	147,11	1,574	12	80,0
	2	151,85	1,606		73,0
	3	152,43	1,854		68,1
	4	153,34	1,683		67,6
15	1	141,09	1,388	17	79,4
	2	145,77	1,424		74,5
	3	147,05	1,677		70,1
	4	148,37	1,530		69,9
20	1	135,79	1,224	22	78,7
	2	140,38	1,262		75,0
	3	142,13	1,516		71,1
	4	143,66	1,384		70,4
25	1	131,29	1,085	27	76,2
	2	135,53	1,117		75,5
	3	137,62	1,368		73,0
	4	139,36	1,252		70,6
30	1	127,50	0,967	32	78,7
	2	131,65	1,001		76,5
	3	133,88	1,246		73,8
	4	135,80	1,142		72,6
40	1	120,57	0,753	42	78,4
	2	124,23	0,779		78,0
	3	126,55	1,005		75,3
	4	128,67	0,922		73,8
50	1	115,12	0,584	52	78,4
	2	118,33	0,602		78,0
	3	120,60	0,810		75,3
	4	122,78	0,740		73,8
60	1	110,78	0,450	62	78,9
	2	113,65	0,462		77,7
	3	115,68	0,649		75,5
	4	117,90	0,589		73,6

TABELA A8 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} (°C)
70	1	107,59	0,351	72	78,4
	2	110,19	0,358		77,5
	3	111,90	0,525		75,8
	4	112,92	0,436		73,8
80	1	105,17	0,276	82	78,2
	2	107,54	0,279		77,0
	3	108,82	0,424		75,7
	4	110,91	0,374		73,5
90	1	103,45	0,223	92	78,4
	2	105,67	0,223		77,2
	3	106,58	0,351		76,2
	4	108,53	0,300		74,5
110	1	101,12	0,151	112	78,9
	2	103,14	0,147		78,0
	3	103,42	0,247		77,0
	4	105,04	0,192		75,0
130	1	99,86	0,112	132	79,0
	2	101,85	0,108		78,7
	3	101,78	0,193		78,0
	4	103,18	0,135		76,3
150	1	99,14	0,090	152	78,2
	2	101,10	0,086		78,0
	3	100,88	0,164		77,5
	4	102,15	0,103		76,0
180	1	98,47	0,069	182	77,2
	2	100,40	0,065		77,0
	3	100,09	0,138		76,5
	4	101,25	0,075		74,8
210	1	98,06	0,056	212	78,0
	2	100,00	0,053		77,5
	3	99,62	0,123		77,0
	4	100,74	0,060		75,5
240	1	97,79	0,048	242	78,2
	2	99,72	0,044		77,7
	3	99,31	0,112		77,5
	4	100,42	0,050		76,5
270	1	97,55	0,040	272	78,2
	2	99,49	0,037		77,5
	3	99,08	0,105		76,7
	4	100,19	0,043		76,0
300	1	97,44	0,037	302	78,0
	2	99,35	0,033		77,7
	3	98,91	0,099		77,2
	4	99,99	0,036		75,8

TABELA A9: Experimento 09

Parâmetros utilizados: $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 1,2\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 28,3 \pm 1,0^\circ\text{C}$, $U.R_{\text{amb}} = 67,1 \pm 4,9\%$, $H_0 = 0,0172 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	273,78	2,195	2	59,2
	2	276,68	2,195		55,8
	3	280,64	2,195		48,2
	4	287,34	2,195		45,3
5	1	259,23	1,974	7	59,7
	2	265,63	2,028		56,0
	3	271,03	2,052		51,9
	4	278,36	2,065		49,5
10	1	249,72	1,829	12	63,8
	2	256,88	1,897		59,5
	3	262,79	1,930		53,8
	4	271,00	1,959		53,6
15	1	242,36	1,717	17	64,8
	2	250,17	1,795		59,7
	3	256,12	1,831		53,8
	4	264,52	1,865		53,6
20	1	235,25	1,609	22	65,1
	2	243,61	1,697		60,2
	3	249,57	1,734		55,3
	4	258,09	1,772		54,6
25	1	229,10	1,515	27	64,6
	2	237,83	1,609		60,7
	3	243,87	1,650		57,3
	4	252,57	1,692		54,6
30	1	223,25	1,426	32	65,1
	2	232,28	1,526		61,4
	3	238,27	1,567		58,5
	4	247,10	1,613		54,8
40	1	212,79	1,267	42	65,5
	2	222,10	1,372		62,4
	3	228,03	1,415		59,9
	4	237,19	1,470		55,8
50	1	203,51	1,126	52	65,3
	2	212,86	1,233		62,9
	3	218,64	1,275		60,9
	4	228,01	1,338		56,8
60	1	195,57	1,005	62	66,3
	2	204,82	1,112		63,6
	3	210,45	1,154		60,7
	4	220,05	1,226		57,8

TABELA A9 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^{\circ}$ C)
70	1	188,50	0,898	72	66,3
	2	197,46	1,001		63,6
	3	203,00	1,043		61,4
	4	212,57	1,115		59,7
80	1	182,12	0,800	82	66,0
	2	190,68	0,899		63,9
	3	196,02	0,940		61,4
	4	205,52	1,013		60,0
90	1	176,36	0,713	92	65,8
	2	184,64	0,808		63,9
	3	189,82	0,848		61,4
	4	199,26	0,922		59,7
110	1	166,32	0,560	112	66,3
	2	173,36	0,638		64,1
	3	178,23	0,676		61,4
	4	187,34	0,750		59,5
130	1	158,73	0,445	132	66,5
	2	164,39	0,503		64,6
	3	168,69	0,535		62,4
	4	177,62	0,610		59,2
150	1	152,73	0,354	152	67,3
	2	157,18	0,394		65,3
	3	160,83	0,418		62,9
	4	169,46	0,492		60,2
180	1	146,22	0,254	182	67,8
	2	148,88	0,269		66,3
	3	151,69	0,283		64,9
	4	159,39	0,346		62,4
210	1	141,73	0,186	212	68,3
	2	143,31	0,185		67,3
	3	145,53	0,191		65,8
	4	152,31	0,244		64,4
240	1	138,77	0,141	242	68,8
	2	139,67	0,130		67,8
	3	141,48	0,131		66,3
	4	147,30	0,171		64,9
270	1	136,64	0,109	272	68,0
	2	137,40	0,096		67,3
	3	138,55	0,092		66,1
	4	144,16	0,126		64,9
300	1	135,16	0,086	302	68,0
	2	135,91	0,074		67,3
	3	137,25	0,068		66,8
	4	141,91	0,094		65,6

TABELA A10: Experimento 10

Parâmetros utilizados: $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$ $T_{\text{amb}} = 28,4 \pm 1,1^\circ\text{C}$, $U.R_{\text{amb}} = 44,9 \pm 3,4\%$, $H_0 = 0,0115 \pm 0,001$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	369,22	2,026	2	50,2
	2	401,45	2,026		49,7
	3	411,46	2,026		49,4
	4	385,92	2,026		47,5
5	1	348,16	1,816	7	59,0
	2	387,09	1,896		55,1
	3	398,96	1,916		55,1
	4	374,04	1,913		44,1
10	1	336,51	1,701	12	56,3
	2	377,68	1,812		54,6
	3	390,92	1,846		57,5
	4	365,88	1,836		47,0
15	1	325,16	1,588	17	68,5
	2	370,25	1,745		64,6
	3	382,46	1,772		60,4
	4	357,20	1,753		38,0
20	1	315,96	1,496	22	68,5
	2	360,34	1,656		64,6
	3	374,95	1,706		61,4
	4	350,38	1,688		37,7
25	1	306,64	1,404	27	62,1
	2	351,82	1,579		55,3
	3	368,18	1,647		50,4
	4	343,06	1,619		44,1
30	1	297,61	1,314	32	62,4
	2	343,43	1,503		59,9
	3	360,73	1,581		55,5
	4	335,65	1,549		42,4
40	1	281,35	1,152	42	67,0
	2	327,84	1,363		64,8
	3	346,56	1,457		59,7
	4	321,68	1,416		49,7
50	1	267,62	1,016	52	65,5
	2	313,80	1,236		61,9
	3	333,46	1,343		59,2
	4	309,14	1,297		50,2
60	1	255,41	0,895	62	66,8
	2	300,79	1,119		63,9
	3	320,92	1,233		60,7
	4	297,33	1,185		51,2

TABELA A10 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs ($^{\circ}$ C)
70	1	244,69	0,788	72	65,3
	2	288,75	1,011		62,9
	3	309,23	1,130		62,6
	4	286,39	1,081		59,0
80	1	235,09	0,693	82	66,8
	2	277,53	0,910		62,6
	3	297,96	1,032		59,2
	4	275,82	0,981		54,1
90	1	227,05	0,613	92	66,5
	2	267,66	0,821		64,8
	3	287,92	0,944		62,4
	4	266,57	0,893		53,1
110	1	212,82	0,471	112	67,5
	2	249,24	0,655		67,0
	3	268,71	0,776		64,1
	4	248,91	0,726		58,3
130	1	201,99	0,364	132	67,0
	2	234,02	0,518		66,3
	3	252,56	0,634		64,1
	4	233,73	0,582		57,3
150	1	193,40	0,278	152	68,3
	2	221,01	0,401		67,0
	3	238,23	0,509		64,9
	4	220,62	0,457		63,1
180	1	184,11	0,186	182	69,3
	2	206,03	0,266		67,8
	3	221,55	0,363		66,3
	4	205,24	0,311		64,4
210	1	177,66	0,122	212	69,3
	2	195,40	0,170		68,5
	3	208,63	0,249		67,6
	4	193,70	0,202		66,3
240	1	173,24	0,078	242	69,0
	2	188,24	0,106		68,8
	3	198,86	0,164		67,6
	4	185,34	0,122		66,1
270	1	170,12	0,047	272	69,0
	2	183,39	0,062		68,3
	3	191,86	0,103		68,0
	4	179,92	0,071		65,1
300	1	167,89	0,025	302	69,5
	2	180,08	0,032		68,5
	3	186,91	0,059		68,3
	4	175,88	0,033		65,6

Tabela A11: Experimento 11

Parâmetros utilizados: $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 68^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

$\bar{T}_{\text{amb}} = 24,4 \pm 1,2^\circ\text{C}$, $\bar{U}.R_{\text{amb}} = 72,9 \pm 3,6\%$, $H_0 = 0,0147 \pm 0,001$

Número de bandejas = 1

Tempo(Min)	Massa(g)	U(b.s)	Tbs($^\circ\text{C}$)	T, interna da Banana($^\circ\text{C}$)
0	224,98	2,301	68,1	23,7
5	211,81	1,890	67,6	48,6
10	202,10	1,587	67,6	55,2
15	195,4	1,378	67,1	57,1
20	191,39	1,252	67,4	58,9
25	187,55	1,132	66,4	58,6
30	184,38	1,033	66,9	59,3
40	178,90	0,862	66,4	60,1
50	174,47	0,724	66,9	61,3
60	170,54	0,601	66,2	61,3
70	167,02	0,491	65,7	61,3
80	164,15	0,401	66,2	62,1
90	161,76	0,327	65,7	61,6
110	158,56	0,227	66,2	62,3
130	156,59	0,165	67,2	63,5
150	155,45	0,130	66,5	63,8
180	154,37	0,096	66,2	64,3
210	153,80	0,078	65,7	64,3
240	153,39	0,065	65,7	64,5
270	153,10	0,056	66,2	65,3
300	152,88	0,049	65,5	65,0

TABELA A12: Experimento 12

Parâmetros utilizados: $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$ $\bar{T}_{\text{amb}} = 26,1 \pm 0,9^\circ\text{C}$, $\bar{U} \cdot R_{\text{amb}} = 52,5 \pm 4,1\%$, $H_0 = 0,0117 \pm 0,002$

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_i (min)	T_{bs} ($^\circ\text{C}$)
0	1	164,57	2,251	2	65,3
	2	164,87	2,251		61,8
	3	168,51	2,251		59,4
	4	172,45	2,251		57,0
5	1	152,80	1,871	7	67,2
	2	154,90	1,927		64,5
	3	159,30	1,958		63,0
	4	163,48	1,979		57,9
10	1	146,34	1,662	12	67,9
	2	148,95	1,734		65,5
	3	153,39	1,770		63,3
	4	157,51	1,797		60,6
15	1	141,70	1,512	17	68,4
	2	144,58	1,592		66,0
	3	149,22	1,638		63,5
	4	153,31	1,670		62,1
20	1	137,40	1,373	22	68,7
	2	140,64	1,464		66,0
	3	145,39	1,516		63,5
	4	149,38	1,550		62,6
25	1	133,80	1,257	27	69,4
	2	137,19	1,352		66,5
	3	142,04	1,409		64,3
	4	145,95	1,446		63,5
30	1	130,25	1,142	32	69,4
	2	133,87	1,244		67,0
	3	138,82	1,307		64,8
	4	142,69	1,347		63,8
40	1	123,82	0,935	42	69,6
	2	127,65	1,042		67,2
	3	132,81	1,116		65,0
	4	136,51	1,160		64,0
50	1	118,60	0,766	52	69,4
	2	122,32	0,869		67,0
	3	127,64	0,951		66,2
	4	131,16	0,997		64,0
60	1	114,30	0,627	62	69,7
	2	117,72	0,716		67,2
	3	123,04	0,805		66,0
	4	126,51	0,856		64,3

TABELA A12 (Continuação)

t_m (min)	Nº da bandeja	Massa (g)	U (b.s)	T_t (min)	Tbs (°C)
70	1	110,73	0,512	72	69,2
	2	113,80	0,592		67,0
	3	119,09	0,679		66,0
	4	122,40	0,731		64,5
80	1	107,83	0,418	82	69,4
	2	110,40	0,481		67,2
	3	115,50	0,565		66,5
	4	118,72	0,619		64,3
90	1	105,54	0,344	92	68,7
	2	107,62	0,391		67,0
	3	112,42	0,467		65,8
	4	115,53	0,523		64,5
110	1	102,20	0,236	112	69,4
	2	103,27	0,250		67,7
	3	107,43	0,309		66,3
	4	110,10	0,358		65,8
130	1	100,30	0,175	132	68,9
	2	100,70	0,166		67,2
	3	104,29	0,209		66,3
	4	106,43	0,246		65,8
150	1	99,19	0,139	152	69,4
	2	99,14	0,115		68,0
	3	102,40	0,149		67,2
	4	104,13	0,176		66,0
180	1	98,25	0,109	182	69,2
	2	97,85	0,073		67,7
	3	100,80	0,098		67,5
	4	102,11	0,115		66,0
210	1	97,71	0,091	212	69,0
	2	97,18	0,052		67,5
	3	100,03	0,073		67,2
	4	101,07	0,083		66,0
240	1	97,38	0,081	242	69,2
	2	96,75	0,038		67,7
	3	99,50	0,056		67,0
	4	100,43	0,064		65,8
270	1	97,15	0,073	272	69,5
	2	96,49	0,029		67,8
	3	99,17	0,046		67,3
	4	100,07	0,053		66,5
300	1	96,97	0,068	302	69,2
	2	96,25	0,021		67,8
	3	98,95	0,039		67,5
	4	99,76	0,044		65,6

Apêndice B

(Gráficos das curvas de secagem X tempo e seus respectivos gráficos das derivadas, para vários experimentos)

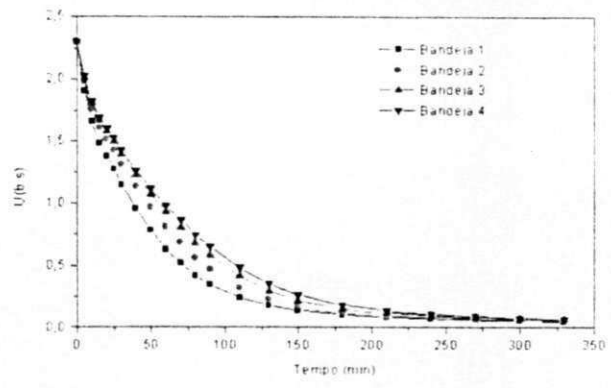


FIGURA 4.38- Curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

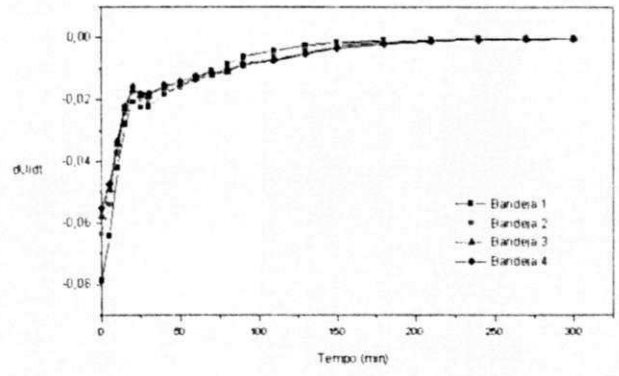


FIGURA 4.38.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

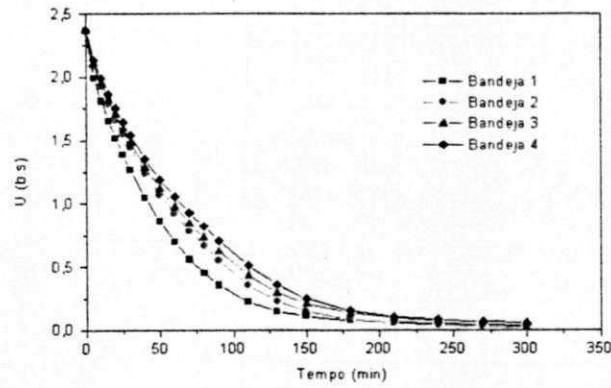


FIGURA 4.39- Curvas de secagem, para $V = 1,0\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

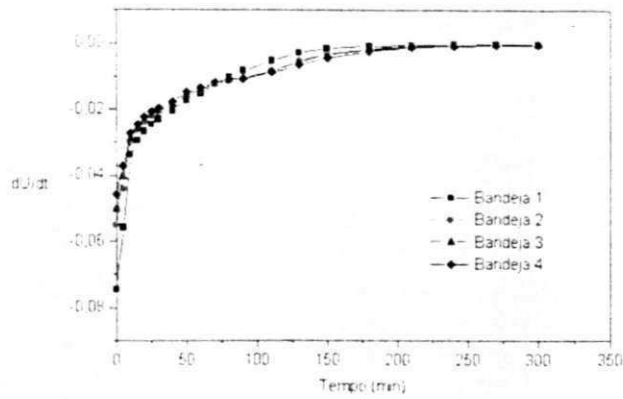


FIGURA 4.39.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 1,0\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

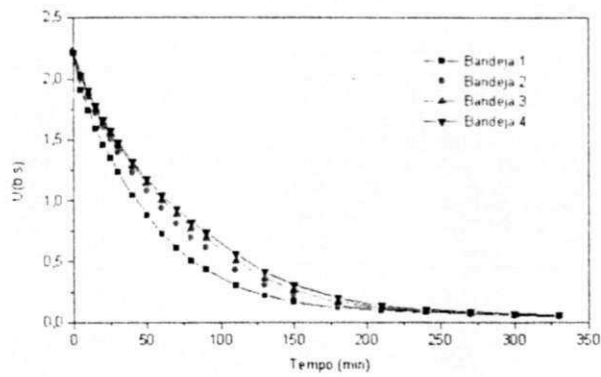


FIGURA 4.40- Curvas de secagem, para $V = 0,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

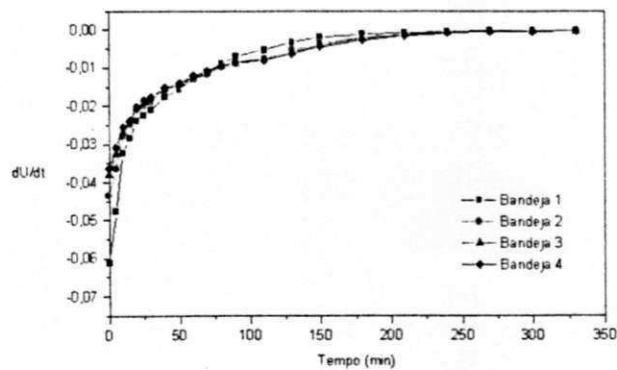


FIGURA 4.40.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 0,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

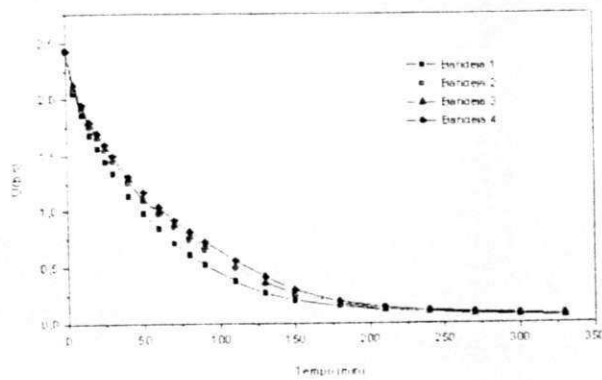


FIGURA 4.41- Curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

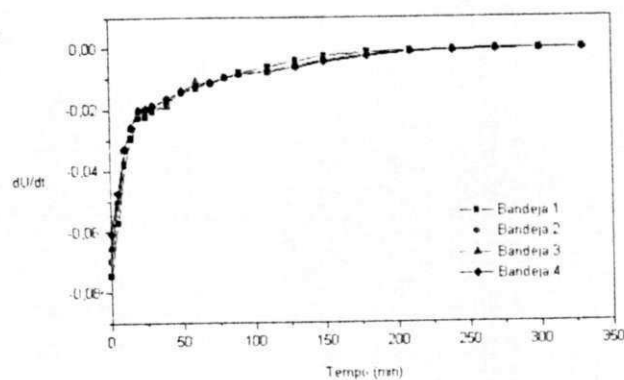


FIGURA 4.41.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

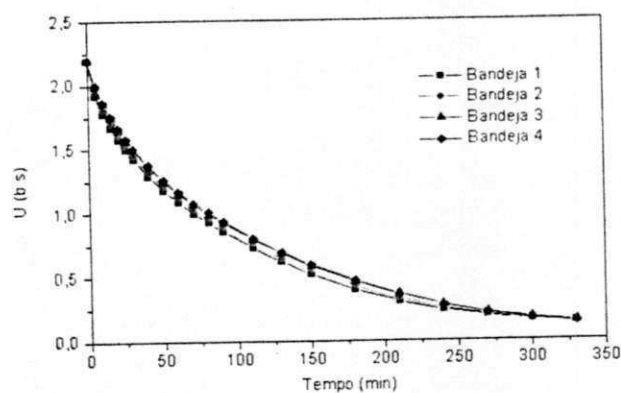


FIGURA 4.42- Curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

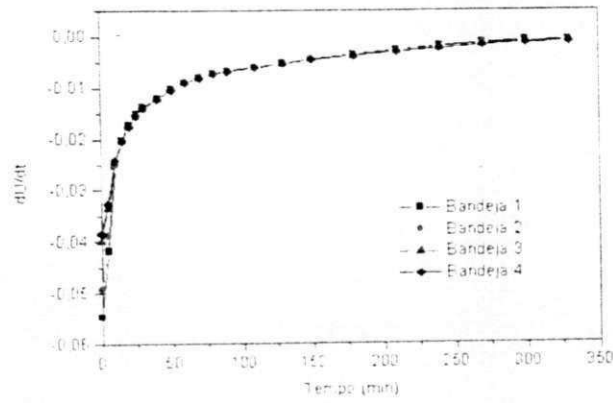


FIGURA 4.42.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

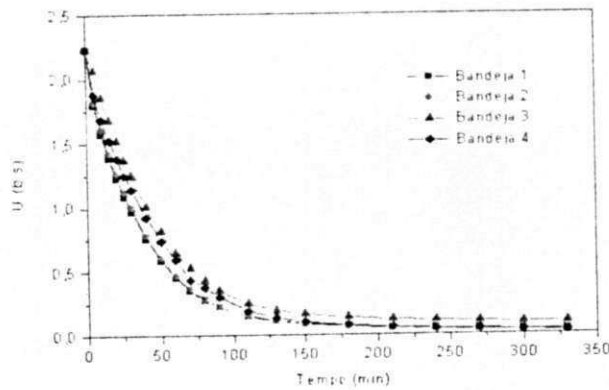


FIGURA 4.43- Curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 80^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

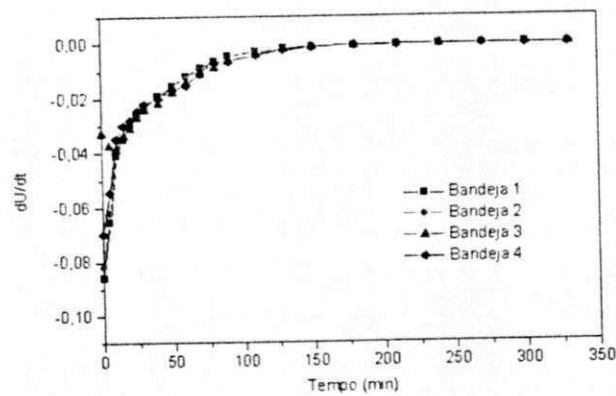


FIGURA 4.43.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 80^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

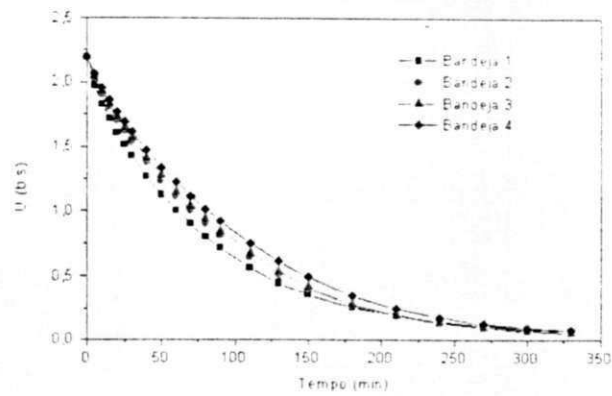


FIGURA 4.44- Curvas de secagem, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 1,2\text{cm}$

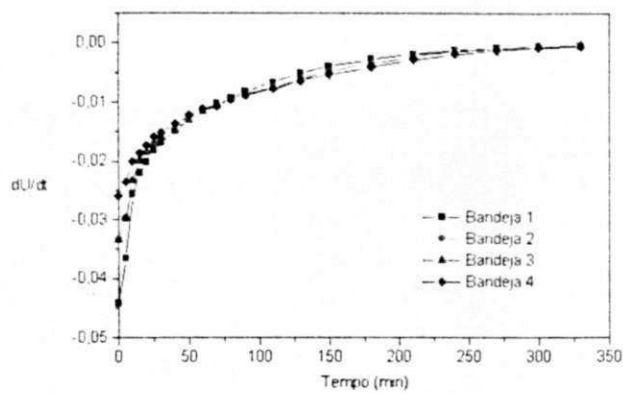


FIGURA 4.44.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 1,2\text{cm}$

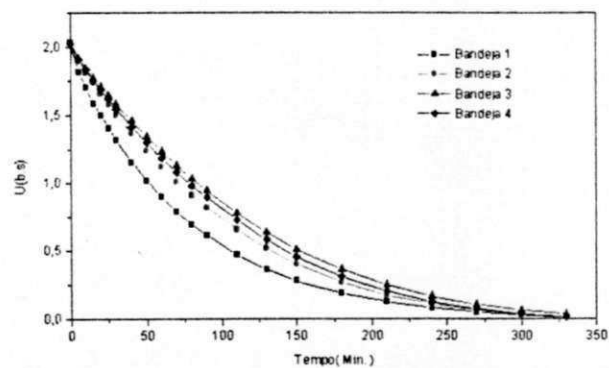


FIGURA 4.45- Curvas de secagem, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^{\circ}\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

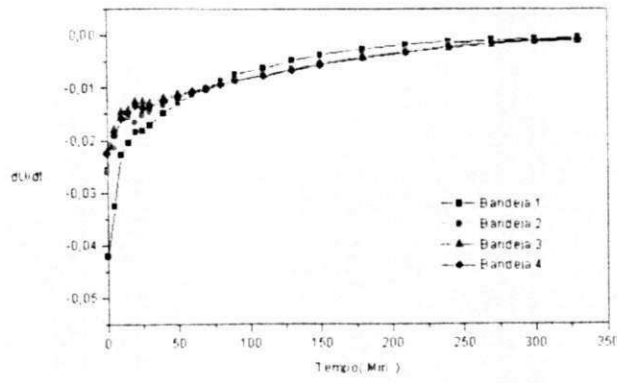


FIGURA 4.45.1- Derivada das curvas de secagem, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

Apêndice C

(Gráficos dos perfis de temperatura do ar de secagem X tempo e seus respectivos gráficos de alisamento, para vários experimentos)

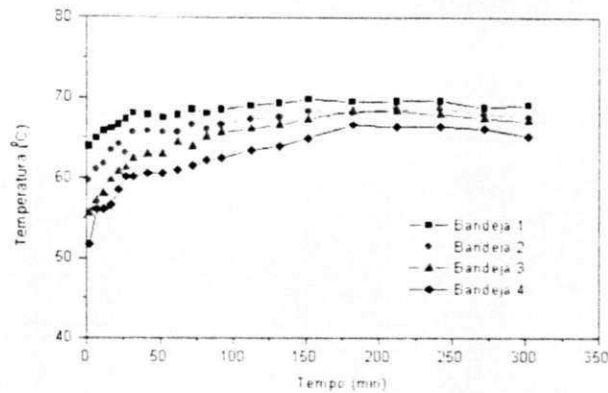


FIGURA 4.46- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,0\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

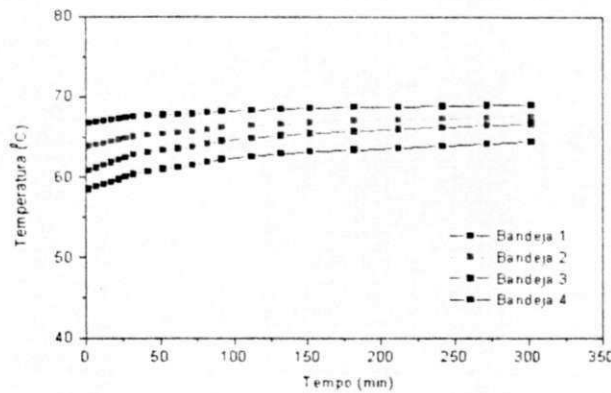


FIGURA 4.46.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,0\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

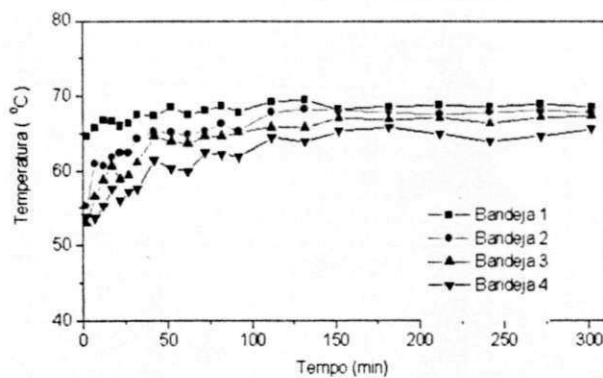


FIGURA 4.47- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 0,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

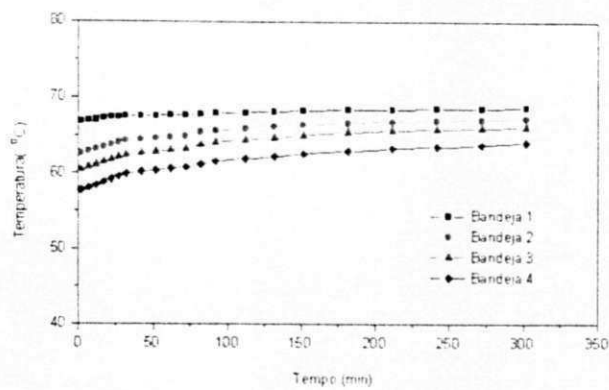


FIGURA 4.47.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 0,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^0\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

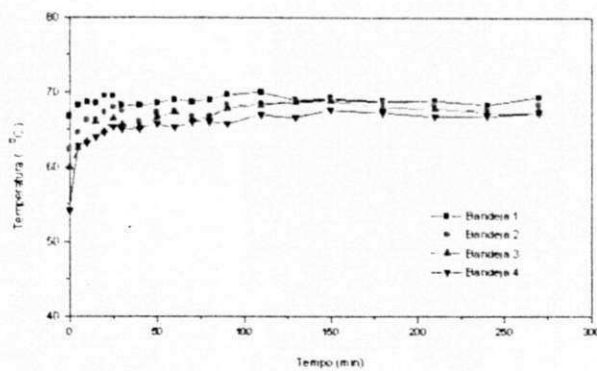


FIGURA 4.48- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^0\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

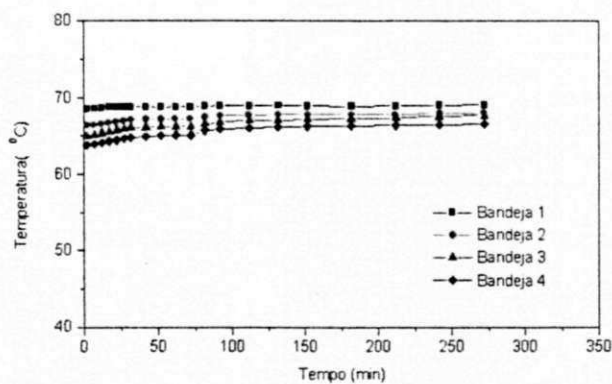


FIGURA 4.48.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^0\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

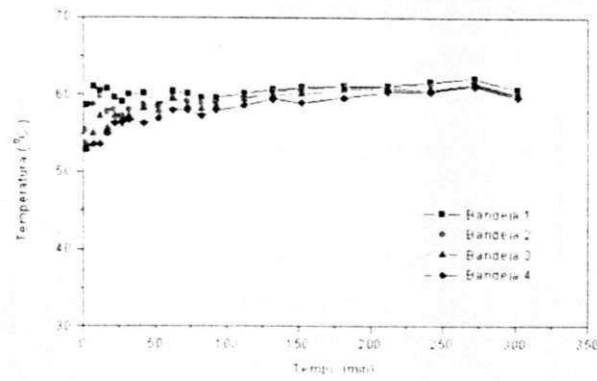


FIGURA 4.49- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

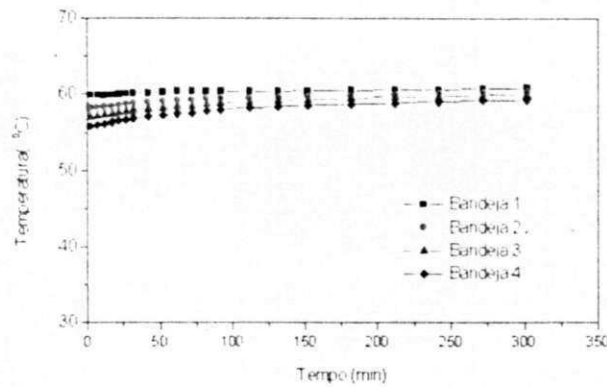


FIGURA 4.49.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

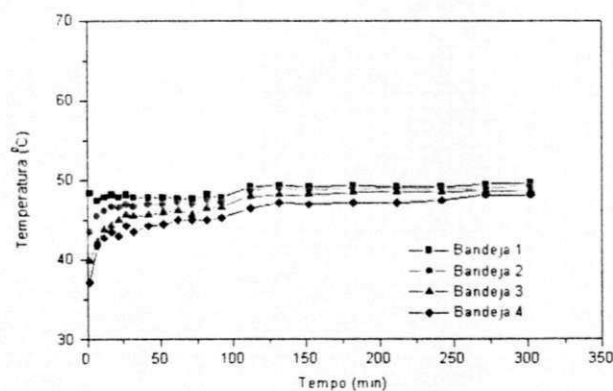


FIGURA 4.50- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

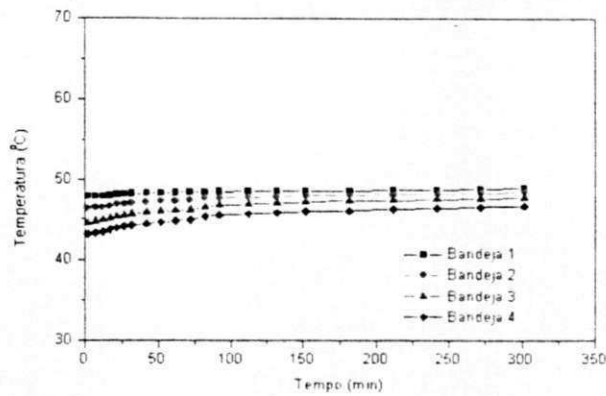


FIGURA 4.50.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 50^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

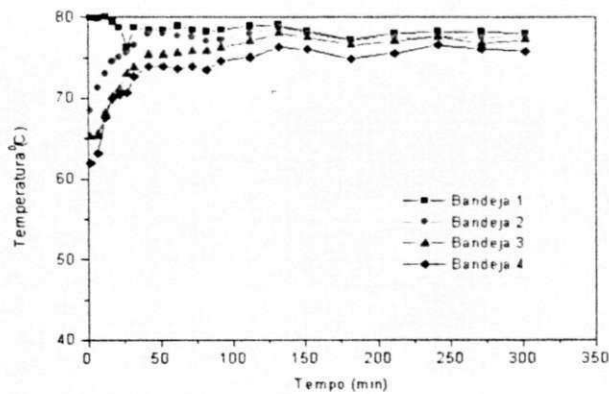


FIGURA 4.51- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 80^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

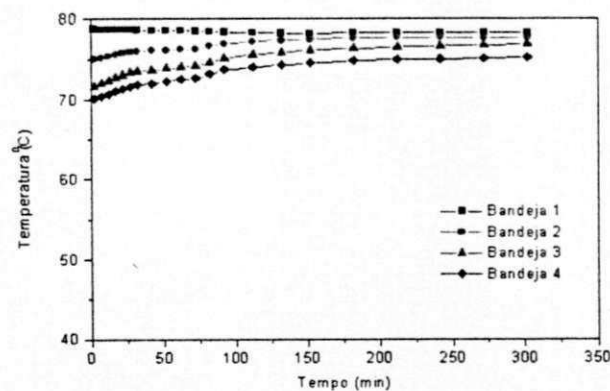


FIGURA 4.51.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 2,2\text{m/s}$, $T_0 = 80^\circ\text{C}$ e $E = 0,6\text{cm}$

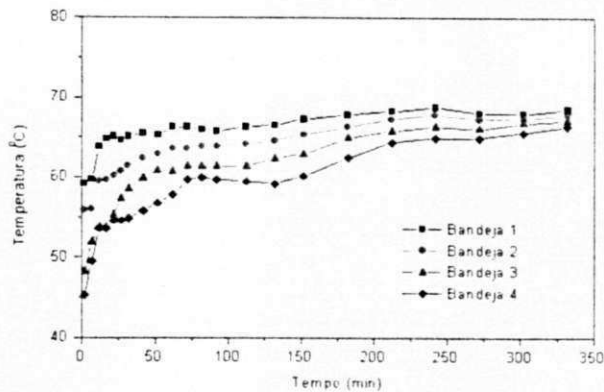


FIGURA 4.52- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 1,2\text{cm}$

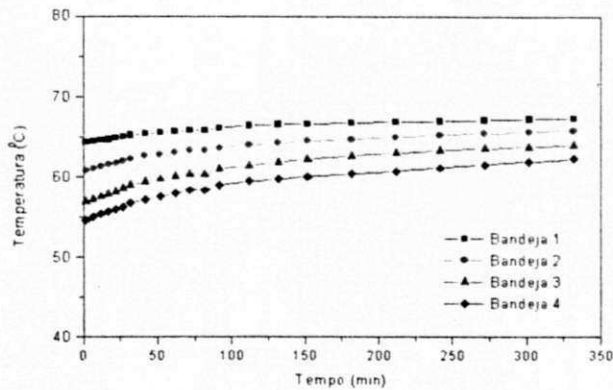


FIGURA 4.52.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 1,2\text{cm}$

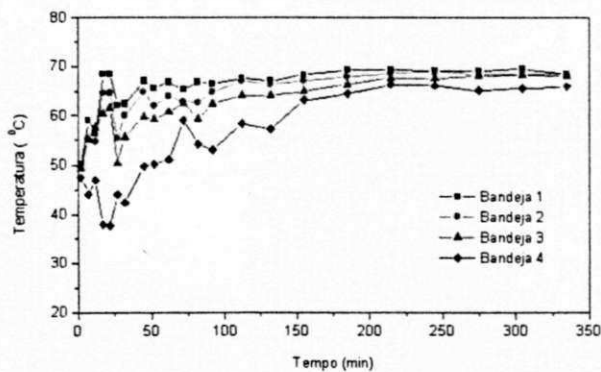


FIGURA 4.53- Perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

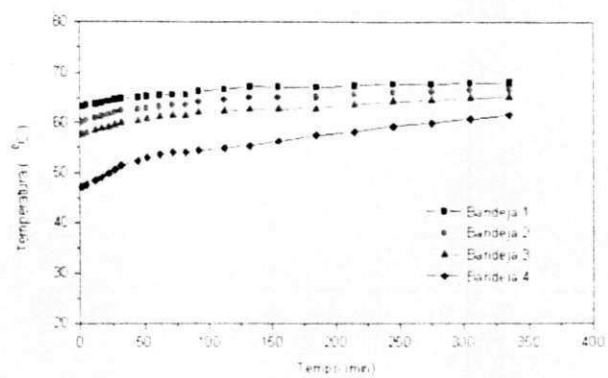


FIGURA 4.53.1- Alisamento dos perfis de temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas, para $V = 1,5\text{m/s}$, $T_0 = 70^\circ\text{C}$ e $E = 2,0\text{cm}$

Apêndice D

(Programa fortran para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar de secagem)

C FILENAME: PSYCHRO

C
C COMPUTATION OF PSYCHROMETRIC DATA IN SI UNITS
C

113

C THIS PROGRAM CALCULATES SELECTED PSYCHROMETRIC PARAMETERS
C FROM COMBINATIONS OF THE INPUT PARAMETERS WET AND DRY-BULB
C TEMPERATURES, DEW POINT, AND RELATIVE HUMIDITY.
C

C ENTER DATA AS REQUESTED.
C

C THE EQUATIONS USED ARE FROM L.R. WILHELM, TRANS. ASAE,
C VOL. 19, 318-325 (1976).
C

C WRITTEN BY KEITH REINHARDT.
C

C
C DOUBLE PRECISION P,R,T,TWB,W,DSAT,RH,PW,TDP,H,V,WS
C INTEGER DATA,AGAIN

C DATA P,R/96.000D0,.28705D0/
C OPEN(1,FILE='PSIC1.SAI',STATUS='UNKNOWN')
C WRITE(*,20)

20 FORMAT(' PROGRAM PSYCHRO',/,/, ' COMPUTATION OF ',
2 ' PSYCHROMETRIC DATA IN SI UNITS.',/)

C WRITE(*,21)

21 FORMAT(' THIS PROGRAM CALCULATES SELECTED PSYCHROMETRIC',
2 ' PARAMETERS FROM COMBINATIONS',/, ' OF THE INPUT ',

3 ' PARAMETERS WET AND DRY-BULB TEMPERATURES, DEW POINT, ',

4 ' AND',/, ' RELATIVE HUMIDITY, RATIO HUMIDITY.',/,/, ' ENTER THE DATA

5 AS ', ' REQUESTED.',/)

C
C SELECT TYPE OF DATA TO BE ENTERED
C

5 WRITE(*,200)

200 FORMAT(' WHAT TYPE OF DATA DO YOU HAVE? TYPE THE CORRECT',
2 ' NUMBER AND PRESS ENTER.',/,6X,'1) DRY-BULB AND WET-BULB',

3 ' TEMPERATURES',/,6X,'2) DRY-BULB AND DEW POINT',

4 ' TEMPERATURES',/,6X,'3) DRY-BULB TEMPERATURE AND RELATIVE',

5 ' HUMIDITY',/,6X,'4) DRY-BULB TEMPERATURE AND HUMIDITY',

7 ' RATIO',/)

READ(*,*) DATA

C
C CALL CORRECT SUBPROGRAM FOR TYPE OF DATA ENTERED
C

IF(DATA.EQ.1) CALL WETBLB(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)

IF(DATA.EQ.2) CALL DEWPT(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)

IF(DATA.EQ.3) CALL HUMIDT(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)

IF(DATA.EQ.4) CALL RATIO(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,WS)

C
C DATA OUTPUT
C

WRITE(*,205)

205 FORMAT(//)

WRITE(1,210)

210 FORMAT(' THE RESULTS ARE:')

WRITE(1,220) T,TWB,TDP,RH,H,W,DSAT,V,PW,WS

220 FORMAT(6X,' DRY-BULB TEMPERATURE: ',F6.2,' DEGREES C',/,

2 6X,' WET-BULB TEMPERATURE: ',F6.2,' DEGREES C',/,

3 6X,' DEW POINT TEMPERATURE: ',F6.2,' DEGREES C',/,

4 6X,' RELATIVE HUMIDITY: ',F5.2,' PERCENT',/,

5 6X,' ENTHALPY: ',F7.2,' J/G',/,

6 6X,' HUMIDITY RATIO: ',E11.4,/,6X,' DEGREE OF SATURATION: ',

7 F9.4,/,6X,' SPECIFIC VOLUME: ',F6.3,' CU. M/KG',/,

8 6X,' VAPOR PARTIAL PRESSURE: ',F6.3,' KPA',/,

9 6X,' HUMIDITY RATIO AT SATURATION: ',E11.4)

WRITE(1,205)

WRITE(*,230)

230 FORMAT(' DO YOU WANT TO RUN AGAIN? ENTER THE APPROPRIATE',
2 ' NUMBER. 1)YES 2)NO.',/)

READ(*,*) AGAIN

IF(AGAIN.EQ.1) GO TO 5

STOP

END

C
C SUBROUTINE CALLED WHEN DRY-BULB AND WET-BULB TEMPERATURES
C ARE KNOWN.
C

```

SUBROUTINE WETBLB(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)
DOUBLE PRECISION P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,TK,TWBK,
2 PWSWB,WSWB,PWS,WS,ALPHA

```

114

```

C .....
C ENTER DRY-BULB AND WET-BULB TEMPERATURES
C

```

```

WRITE(*,11)
11 FORMAT(/,' ENTER THE DRY-BULB AND WET-BULB TEMPERATURES',
2 ' IN DEGREES C.',/)
READ(*,*) T,TWB

```

```

C .....
C PERFORM CALCULATIONS
C

```

```

TK=T+273.16
TWBK=TWB+273.16
IF(TWBK.LE.273.16) CALL WVP1(TWBK,PWSWB)
IF(TWBK.GT.273.16) CALL WVP2(TWBK,PWSWB)
WSWB=.62198*PWSWB/(P-PWSWB)
IF(TK.LE.273.16) CALL WVP1(TK,PWS)
IF(TK.GT.273.16) CALL WVP2(TK,PWS)
WS=.62198*PWS/(P-PWS)
W=((2501-2.411*TWB)*WSWB-1.006*(T-TWB))/(2501+1.775*T
2 -4.186*TWB)
DSAT=W/WS
PW=P*W/(.62198+W)
RH=PW/PWS*100.
ALPHA=DLOG(PW)
IF(T.LE.0) TDP=5.994+12.41*ALPHA+.4273*ALPHA**2
IF(T.GT.0.AND.T.LE.50) TDP=6.983+14.38*ALPHA+1.079*ALPHA**2
IF(T.GT.50) TDP=13.8+9.478*ALPHA+1.991*ALPHA**2
H=1.006*T+W*(2501+1.775*T)
V=R*TK/P*(1.+1.6078*W)
RETURN
END

```

```

C .....
C SUBROUTINE CALLED WHEN DRY-BULB AND DEW POINT TEMPERATURES
C ARE KNOWN.
C

```

```

SUBROUTINE DEWPT(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)
DOUBLE PRECISION P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,TK,TDPK,
2 PWS,WS

```

```

C .....
C ENTER DRY-BULB AND DEW POINT TEMPERATURES
C

```

```

WRITE(*,1)
1 FORMAT(/,' ENTER THE DRY-BULB AND DEW POINT TEMPERATURES',
2 ' IN DEGREES C.',/)
READ(*,*) T,TDP

```

```

C .....
C PERFORM CALCULATIONS
C

```

```

TK=T+273.16
TDPK=TDP+273.16
IF(TK.LE.273.16) CALL WVP1(TK,PWS)
IF(TK.GT.273.16) CALL WVP2(TK,PWS)
WS=.62198*PWS/(P-PWS)
IF(TDPK.LE.273.16) CALL WVP1(TDPK,PW)
IF(TDPK.GT.273.16) CALL WVP2(TDPK,PW)
W=.62198*PW/(P-PW)
DSAT=W/WS
RH=PW/PWS*100.
H=1.006*T+W*(2501+1.775*T)
V=R*TK/P*(1.+1.6078*W)

```

```

C .....
C CALL SUBROUTINE TO FIND WET-BULB TEMPERATURE
C

```

```

CALL WETTEMP(T,TDP,TWB,W,P)
RETURN
END

```

```

C .....
C SUBROUTINE CALLED WHEN DRY-BULB TEMPERATURE AND RELATIVE
C HUMIDITY ARE KNOWN
C

```


SUBROUTINE HUMIDT(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)
 DOUBLE PRECISION P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,TK,PWS,WS,
 2 ALPHA

115

.....
 C ENTER DRY-BULB TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY

WRITE(*,5)
 5 FORMAT(/,' ENTER THE DRY-BULB TEMPERATURE IN DEGREES C',
 2 ' AND THE RELATIVE HUMIDITY',/, ' IN PERCENT.',/)
 READ(*,*) T,RH

.....
 C PERFORM CALCULATIONS

TK=T+273.16
 RH=RH/100.
 IF(TK.LE.273.16) CALL WVP1(TK,PWS)
 IF(TK.GT.273.16) CALL WVP2(TK,PWS)
 WS=.62198*PWS/(P-PWS)
 PW=PWS*RH
 W=.62198*PW/(P-PW)
 DSAT=W/WS
 H=1.006*T+W*(2501+1.775*T)
 V=R*TK/P*(1.+1.6078*W)
 ALPHA=DLOG(PW)
 IF(T.LE.0) TDP=5.994+12.41*ALPHA+.4273*ALPHA**2
 IF(T.GT.0.AND.T.LE.50) TDP=6.983+14.38*ALPHA+1.079*ALPHA**2
 IF(T.GT.50) TDP=13.8+9.478*ALPHA+1.991*ALPHA**2

.....
 C CALL SUBROUTINE TO FIND WET-BULB TEMPERATURE

CALL WETTEMP(T,TDP,TWB,W,P)
 RH=RH*100.
 RETURN
 END

.....
 C SUBROUTINE CALLED TO FIND Pws WHEN TEMPERATURE IS LESS THEN
 273.16 K

SUBROUTINE WVP1(TT,PWS)
 DOUBLE PRECISION TT,PWS
 PWS=DEXP(24.2779-6238.64/TT-.344438*DLOG(TT))
 RETURN
 END

.....
 C SUBROUTINE CALLED TO FIND Pws WHEN TEMPERATURE IS GREATER
 THEN 273.16 K

SUBROUTINE WVP2(TT,PWS)
 DOUBLE PRECISION TT,PWS
 PWS=DEXP(-7511.52/TT+89.63121+.02399897*TT-1.1654551D-5*TT**
 2 2-1.2810336D-8*TT**3+2.0998405D-11*TT**4-12.150799*DLOG(TT))
 RETURN
 END

.....
 C SUBROUTINE CALLED TO FIND WET-BULB TEMPERATURE USING THE
 SECANT METHOD

SUBROUTINE WETTEMP(T,TDP,TWB,W,P)
 DOUBLE PRECISION X0,X1,TWB,W,P,PWSWB,WSWB,F0,DELTA,T,XOK,
 2 X1K,F1,DELTA,F,TDP
 X0=T
 X1=TDP
 XOK=X0+273.16
 IF(XOK.LE.273.16) CALL WVP1(XOK,PWSWB)
 IF(XOK.GT.273.16) CALL WVP2(XOK,PWSWB)
 WSWB=.62198*PWSWB/(P-PWSWB)
 F0=W-(((2501.-2.411*X0)*WSWB-1.006*(T-X0))/(2501.+1.775*T
 2 -4.186*X0))
 DELTA=X1-X0

.....
 C DO UP TO 100 ITERATIONS TO FIND WET-BULB TEMPERATURE

```

C
DO 20 N=1,100
X1K=X1+273.16
IF(X1K.LE.273.16) CALL WVP1(X1K,PWSWB)
IF(X1K.GT.273.16) CALL WVP2(X1K,PWSWB)
WSWB=.62198*PWSWB/(P-PWSWB)
F1=W-(((2501.-2.411*X1)*WSWB-1.006*(T-X1))/(2501.+1.775*T
2 -4.186*X1))
IF(DABS(F1).LE.1.D-6) GO TO 30
DELTA F=F0-F1
IF(DELTA F.EQ.0.) GO TO 40
DELTA X=F1/DELTA F*DELTA X
X0=X1
X1=X1+DELTA X
IF(DABS(DELTA X).LE.1.D-6) GO TO 30
20 F0=F1
GO TO 40
30 TWB=X1
RETURN

C
C .....
C WET-BULB TEMPERATURE IS NOT FOUND
C
40 WRITE(*,50)
50 FORMAT(/,' NO VALUE FOR THE WET-BULB TEMPERATURE CAN BE ',
2 ' FOUND. ')
RETURN
END

C
C SUBROUTINE CALLED WHEN DRY-BULB AND HUMIDITY RATIO ARE KNOWN.
C
SUBROUTINE RATIO(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,WS)
DOUBLE PRECISION P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,TK,PWS,WS,
2 ALPHA

C
C .....
C ENTER DRY-BULB TEMPERATURE AND HUMIDITY RATIO
C
WRITE(*,10)
10 FORMAT(/,' ENTER THE DRY-BULB TEMPERATURE IN DEGREES C',
2 ' AND THE HUMIDITY RATIO',/)
READ(*,*) T,W

C
C .....
C PERFORM CALCULATIONS
C

TK=T+273.16
W=W
IF(TK.LE.273.16) CALL WVP1(TK,PWS)
IF(TK.GT.273.16) CALL WVP2(TK,PWS)
WS=.62198*PWS/(P-PWS)
PW=P*W/(.62198+W)
DSAT=W/WS
RH=PW/PWS*100.
H=1.006*T+W*(2501+1.775*T)
V=R*TK/P*(1.+1.6078*W)
ALPHA=DLOG(PW)
IF(T.LE.0) TDP=5.994+12.41*ALPHA+.4273*ALPHA**2
IF(T.GT.0.AND.T.LE.50) TDP=6.983+14.38*ALPHA+1.079*ALPHA**2
IF(T.GT.50) TDP=13.8+9.478*ALPHA+1.991*ALPHA**2

C
C .....
C CALL SUBROUTINE TO FIND WET-BULB TEMPERATURE
C
CALL WETTEMP(T,TDP,TWB,W,P)
RH=RH*100.
RETURN
END

```

