

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

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE JORRO
CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA**

VERA LÚCIA MEIRA DE MORAIS

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
DEZEMBRO - 1996

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE JORRO
CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA**

VERA LÚCIA MEIRA DE MORAIS

*Dissertação apresentada ao curso de Pós-
Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADORA: Prof^a D.Sc. ODELSIA LEONOR SÁNCHEZ DE ALSINA

CAMPINA GRANDE

1996

ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE JORRO
CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA

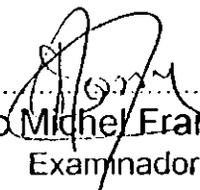
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13 / 12 / 1996



.....
Profª D.Sc Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
Orientadora



.....
Profª D.Sc Ana Lúcia de Medeiros Lula da Mata
Examinadora



.....
Prof. D.Sc Michel François Fossy
Examinador

Campina Grande, Dezembro de 1996

DEDICATÓRIA

A Deus

pois,

“Tua, Senhor é a grandeza, o poder, a honra, a vitória e a majestade; porque teu é tudo quanto há nos céus e na terra; teu Senhor é o reino, e tu te exaltaste por chefe sobre todo. Riquezas e glória vêm de ti, tu dominas sobre tudo, na tua mão há força e poder; contigo está o engrandecer e a tudo dar forças. Agora , pois, ó nosso Deus, graças te damos , e louvamos o teu glorioso nome “.

I Cro. 29:11-13

AGRADECIMENTOS

- * A Prof.^a. Dr.^a. Odélsia Leonor Sanchez de Alsina, pela orientação, dedicação e ajuda durante todo o desenvolvimento deste trabalho.
- * A Coordenação do Mestrado de Engenharia Química na pessoa do Prof. Dr. Kepler Borges França.
- * A CAPES pelo incentivo à pesquisa científica.
- * A minha mãe, Hercília Medeiros de Moraes, pelo carinho, compreensão e cuidado a cada instante de minha vida.
- * A meus irmãos e familiares, especialmente minha irmã Jane, pela força e o encorajamento que me deram ao longo desta caminhada.
- * A Lígia, amiga e companheira de cada alegria e angústia desta jornada. Porque *"a pessoa que tem muitos amigos pode congratular-se, mas há amigo mais chegado que um irmão"* Prov. 18:24.
- * A minha amiga Mérgia, pelo companheirismo, incentivo e ajuda durante toda essa difícil jornada.
- * A Robson, amigo de todas as horas, pelas palavras de ânimo e pela ajuda na digitação deste trabalho.
- * A minha amiga Weruska, que sem medir esforços, acompanhou e participou com dedicação e paciência de todo o período de correção e impressão deste trabalho. Também a seu esposo Gustavo, que gentilmente colaborou

na edição final. A eles o meu muito obrigada, porque, "*em todo tempo ama o amigo, e na angústia se faz o irmão*". Prov.17:17.

- * A Edinalda, Elcimar e Fábio pela ajuda indispensável na parte experimental deste trabalho.

- * Aos amigos Lucianna, Osvaldo e a todos os outros da *salinha de estudos*, pelos momentos em que compartilhamos nossos projetos, problemas e alegrias.

- * As secretárias Maria José e Maricé por todos os serviços prestados.

- * Aos funcionários do Laboratório de Processos Químicos, Sr. José Lopes e Sr. José Marques pela atenção e pronto atendimento, estando sempre dispostos a colaborar conosco.

- * A todos os que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização desta árdua jornada.

RESUMO

A secagem de pastas e suspensões em leito de jorro com partículas inertes é influenciada por variáveis operacionais e geométricas como a temperatura e a vazão de entrada do gás, altura do leito, bem como as propriedades do material a ser seco. O conhecimento das interações dessas variáveis e do desempenho da secagem é de fundamental importância para a otimização operacional. Este trabalho trata da secagem de polpa de acerola (*Malpighia emarginata* DC) em um leito de jorro convencional com 0,297m de diâmetro, base cônica com 60 ° e orifício de entrada com 0,05m de diâmetro. Partículas de poliestireno ($d = 0,326\text{cm}$, $\rho = 1,045\text{ g/m}^3$) formam o leito de partículas inertes com alturas entre 0,18 e 0,28m, envolvendo as regiões cônica e cilíndrica. A alimentação da polpa de acerola foi feita de maneira intermitente correspondendo a 2,0% da massa de inertes no leito, por alimentação. A temperatura não ultrapassou os 70 ° C, pois acima desse valor as propriedades da acerola ficam comprometidas. Os parâmetros estudados foram: a influência da temperatura (entre 45 e 54 ° C) e da vazão de entrada do gás dada pela relação Q/Q_{jm} entre 1,5 e 1,8; a influência da altura do leito nas regiões cônica e cilíndrica. Avaliou-se também o desempenho do rendimento e da umidade do pó de acerola coletado através do ciclone. Os dados obtidos no período à taxa constante (após todas as alimentações) foram utilizados para modelagem do sistema analisando-se a eficiência térmica e a taxa de evaporação de água, bem como a fração de partículas molhadas. Observou-se que a temperatura não influencia de maneira significativa o rendimento do pó, mas, a umidade contida no pó é influenciada, apresentando um máximo com o aumento da temperatura. A vazão do ar, pouco influencia no rendimento do pó, porém, influencia na umidade do pó para alturas do leito na

altura do leito igual a 0,25m, na região cilíndrica, a eficiência térmica, no período à taxa constante, aumenta com o aumento da relação Q/Q_{jm} . O coeficiente de transferência de calor baseado na área total de partículas, obtido no período à taxa constante, foi pequeno, mostrando que a fração de partículas molhadas é mínima. Dos resultados obtidos conclui-se que o desempenho é prejudicado pela alta retenção de produto no inerte e pela baixa fração de partículas molhadas, decorrente das necessidades de estabilidade do jorro. Melhorias no rendimento poderão ser obtidas diminuindo os efeitos de aderência nas partículas e otimizando o sistema de alimentação.

ABSTRACT

The drying of pastes and suspensions in spouted bed with inerts is influenced by operative and geometric variables such as temperature and flow rate of the input gas, bed height as well by the properties of the materials to be dried. The knowledge of the interactions of these variables and the performance of drying including the quality of the product is very important in order to optimize the operation. This work deals with the drying of West Indian cherry (*Malpighia emarginata*, DC) pulp in a spouted bed of 0,297m diameter, with a conic base of 60° and inlet orifice diameter of 0,05m. Polystyrene particles ($d = 0,326\text{cm}$, $\rho = 1,045\text{g/cm}^3$) formed the bed of inerts with high between 18cm to 28cm, including the conic to cylindrical regions. The feeding of West Indian cherry pulp was intermittent, corresponding to 2% of the mass of inerts. All the measures used to analyze the performance were made in the constant rate period of drying. The temperature was limited by the thermal sensibility of the West Indian cherry and the velocity of the gas by the stability of the spout. In this work the influences of the temperature (from 45°C to 54°C) and flow rate of input air with the relation Q/Q_{ms} (flow normalized with the flow of minimum spouting) between 1,5 and 1,8 were studied. To evaluate the performance, the yield of powder of West Indian cherry collected in the cyclone and its moisture content as well the thermal efficiency and the rate of evaporation of water were analyzed. Using a simplified model the fraction of wetted particles was calculated from the heat transfer coefficient. It was observed that, for the experimental ranges used in the present work, the temperature and velocity of gas has no significant influence on the yield of powder but the moisture content of the product is influenced, showing a maximum with the increasing of temperature and a minimum with the air flow. To explain this behavior, it must be considered that the mechanisms involved

are complex: the drying of suspensions proceeds by the covering of particles, followed by evaporation of water, crushing of the film and entrainment of the powder. So, an increasing of air flow, increases the rates of heat and mass transfer, but reduces the residence time of the product in the column. The temperature has a similar effect, improving the heat and mass transfer, but the residence time of the product may also be reduced because an earlier crushing of the film. The increasing of bed height improves the yield in powder. Nevertheless the rate of evaporation of water and the thermal efficiency decreases, due to the greater heat losses at the wall in the cylindrical region. Only a fraction of the inert particles is effective for the heat transfer, because the available area is limited by the wetted particles. The results obtained show that the performance is impaired by the high retention of product on inert and the low fraction of wetted particles, because the need of stability of the spout. Improvement on the efficiency can be obtained through of decrease of the adherence effects on the particles and the optimization of the food system.

NOMENCLATURA

A_a	Área da seção transversal no anel (m^2)
A_{ef}	Área efetiva de troca térmica (m^2)
a_p	Área específica da partícula inerte (m^{-1})
A_p	Área de partículas inertes (m^2)
A_{tp}	Área total de partículas inertes no leito (m^2)
C_{pg}	Capacidade calorífica do ar ($kJ/kg^\circ C$)
C_{pH_2O}	Capacidade calorífica da água (vapor) ($kJ/kg^\circ C$)
C_{pp}	Capacidade calorífica da polpa ($kJ/kg^\circ C$)
D_c	Diâmetro da coluna cilíndrica (m)
D_i	Diâmetro do orifício de entrada do ar (m)
d_p	Diâmetro da partícula inerte (m)
d_v	Diâmetro da esfera de igual volume (m)
f	Fração de partículas molhadas (%)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Coefficiente de transferência de calor ($kJ/h.m^2.^\circ C$)
H	Altura estática do leito (m)
Y	Umidade do pó em base seca (kg/kg)
H_e	Entalpia do ar na entrada do secador (kJ/kg)
h_{exp}	Coefficiente de transferência de calor a partir de dados experimentais ($kJ/h.m^2.^\circ C$)
$H_{máx}$	Altura máxima jorrável (m)
h_{Rom}	Coefficiente de transferência de calor pela correlação de ROMANKOV & RASKOVSKAYA ($kJ/h.m^2.^\circ C$)
H_s	Entalpia do ar na saída do secador (kJ/kg)
h_w	Coefficiente de transferência de calor pela correlação de Whitaker ($kJ/h.m^2.^\circ C$)
K_g	Condutividade Térmica do ar ($kJ/m.s.^\circ C$)

m_f	massa final da amostra (kg)
M_i	Massa de inertes (kg)
m_i	massa inicial da amostra (kg)
M_p	Massa de polpa (kg)
M_p/M_i	Relação entre a massa de polpa e a de inertes, por alimentação
$m_{pó}$	massa de pó em base seca (kg)
m_{sp}	massa de sólidos totais contida na polpa alimentada (kg)
ΔP_{je}	Queda de pressão de jorro mínimo (Pa)
ΔP_M	Queda de pressão máxima (Pa)
ΔT_{In}	Média logarítmica entre as temperaturas do gás e do sólido na entrada e saída do secador ($^{\circ}C$)
q	Calor requerido para evaporar a umidade (kJ/s)
Q	Vazão do gás (m^3/s)
q_c	Calor cedido pelo gás (kJ/s)
Q_{jm}	Vazão de jorro mínimo (m^3/s)
q_p	Calor perdido para o ambiente (kJ/s)
R	Rendimento do pó obtido (%)
S_t	Sólidos totais contidos na polpa de acerola (%)
T	Temperatura média do ar no período de secagem à taxa constante ($^{\circ}C$)
T_0	Temperatura da polpa alimentada ($^{\circ}C$)
T_{bu}	Temperatura média de bulbo úmido do ar na saída do secador ($^{\circ}C$)
T_{ga}	Temperatura do ar no anel ($^{\circ}C$)
T_{ge}	Temperatura média do ar na entrada do secador ($^{\circ}C$)
T_{gs}	Temperatura média do ar na saída do secador ($^{\circ}C$)
T_r	Temperatura de referência ($^{\circ}C$)
U	Velocidade do gás (m/s)
U_a	Velocidade do ar no anel (m/s)
\bar{U}_a	Velocidade média do ar no anel (m/s)
U_{aH}	Velocidade superficial do ar no anel (m/s)

U_i	Velocidade do ar no orifício de entrada (m/s)
U_j	Velocidade do jorro (m/s)
U_{jm}	Velocidade de jorro mínimo (m/s)
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
U_p	Umidade da polpa alimentada (kg/kg)
$U_{pó}$	Umidade do pó (kg/kg)
W_{aev}	Taxa de água evaporada (kg/s)
W_g	Vazão do ar (kg/s)
W_{gaiu}	Vazão do gás isento de umidade no anel (kg/s)
W_{giu}	Vazão do ar isento de umidade (kg/s)
W_p	Vazão de polpa alimentada (kg/s)
y_e	Umidade absoluta do ar na entrada do secador (kg/kg)
y_{ga}	Umidade do ar no anel (kg/kg)
y_s	Umidade absoluta do ar na saída do secador (kg/kg)
z	Coordenada axial (m)
z_1	Coordenada axial de referência (m)
z_i	Distância desde o orifício de entrada até a posição da tomada de temperatura (m)

SÍMBOLOS GREGOS

λ	Calor latente de vaporização da água (kg/kg)
η	Eficiência térmica (%)
ϕ	Esfericidade da partícula inerte
μ	Viscosidade dinâmica do ar (kg/m.s)
ϵ_a	Porosidade do anel
ϵ_l	Porosidade do leito
ϵ_{mf}	Porosidade de mínima fluidização
ρ_e	Densidade do ar na entrada do secador (kg/m ³)
ρ_g	Densidade do gás (kg/m ³)
ρ_s	Densidade do ar na saída do secador (kg/m ³)

ρ_l Densidade aparente do leito (kg/m^3)

NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Ar Número de Arquimedes $Ar = g \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{\mu^2}$

Gu Número de Gukhman $Gu = \frac{T_{gs} - T_{bu}}{T_{gs}}$

Nu Número de Nusselt $Nu = \frac{h \cdot d_p}{k_g} \left[\frac{\epsilon_a}{1 - \epsilon_a} \right]$

Pr Número de Prandt $Pr = \frac{C_{pg} \cdot \mu}{k_g}$

Re Número de Reynolds $Re = \frac{d_p \cdot U_a \cdot \rho_g}{\mu(1 - \epsilon_a)}$

$Re_{(i)}$ Número de Reynolds no orifício de entrada de ar $Re_{(i)} = \frac{d_p \cdot U_i \cdot \rho_g}{\mu}$

Re_{mf} Número de Reynolds de mínima fluidização $Re_{mf} = \frac{\rho_g \cdot U_{mf} \cdot d_v}{\mu}$

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
------------------------	----------

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Acerola	4
2.2 O Leito de Jorro.....	8
2.2.1 Descrição do Leito de Jorro.....	9
2.3 Mecanismo de secagem.....	11
2.4 Utilização do Leito de Jorro.....	13
2.4.1 Uso geral	13
2.4.2 Pastas e Suspensões em Leito de Jorro	19
2.5 Transferência de Calor em Leito de Jorro	29

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 MATERIAIS	35
3.2 EQUIPAMENTOS.....	36
3.2.1 Câmara de Secagem	36
3.2.2 Sistema de Impulsão e Aquecimento do Ar	37

3.2.3 Medidas de Pressão e Velocidade de Saída do Ar	38
3.2.4 Sistema de Alimentação da Polpa.....	38
3.2.5 Equipamentos Auxiliares	38
3.3 METODOLOGIA.....	39
3.3.1 Extração da Polpa	39
3.3.2 Secagem.....	40
3.3.3 Determinação do Rendimento e Umidade do Pó	41
3.3.4 Determinação dos Sólidos e Totais na Polpa de Acerola	41
3.3.5 Caracterização do Leito.....	42

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 INTRODUÇÃO	43
4.2 INFLUÊNCIA DA ALTURA DO LEITO SOBRE O RENDIMENTO E UMIDADE DO PÓ.....	43
4.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VAZÃO DE ENTRADA DO AR NO RENDIMENTO E NA UMIDADE DO PÓ.....	45
4.4 EFEITO DO TEMPO DE SECAGEM AO LONGO DO EXPERIMENTO SOBRE A UMIDADE ABSOLUTA DO AR NA SAÍDA DO SECADOR.....	49
4.5 PERFIL DE TEMPERATURA AO LONGO DO EXPERIMENTO.....	52

1

CAPÍTULO 5

MODELAGEM	57
5.1 BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA	58

5.2 COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	
FLUIDO-PARTÍCULA.....	59
5.2.1 Coeficiente de Transferência de Calor Experimental.....	60
5.2.2 Coeficiente de transferência de Calor pela Correlação de ROMANKOV & RASHKOUSKAYA.....	60
5.2.3 Coeficiente de transferência de Calor pela Correlação de WHITAKER.....	62
5.3 CÁLCULO DA ÁREA EFETIVA DE TROCA TÉRMICA.....	65
5.4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS A PARTIR DA MODELAGEM.....	67
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES.....	73
CAPÍTULO 7	
SUGESTÕES.....	79
CAPÍTULO 8	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
APÊNDICE A -Condições Operacionais para cada experimento	94
Anexo 1 - Programa FORTRAN	105

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - Composição da acerola em 100g de polpa.....	6
TABELA 2.2 - Quantidade de minerais na acerola.....	6
TABELA 2.3 - Vitaminas na acerola	6
TABELA 2.4 -Conteúdo de ácido ascórbico em acerolas maduras como resultado de diversas pesquisas.....	7
TABELA 3.1 - Propriedades da Polpa de Acerola	35
TABELA 3.2 - Propriedades Físicas do Poliestireno	36
TABELA 3.3 - Propriedades Fluidodinâmicas do Leito com 2,0% de polpa.....	42
TABELA 3.4 - Propriedades Fluidodinâmicas do Leito com 3,0% de polpa.....	42
TABELA 5.1 - Resultados obtidos a partir dos balanços de energia e massa. $T_{ge} = 45,5 \pm 2$, $M_p/M_i = 2,0\%$	71
TABELA 5.2 - Resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor experimental e por correlações.....	73
TABELA 5.3 - Taxa de água evaporada e coeficiente de transferência de calor para $H = 0,25m$	75
TABELA A1 - Condições operacionais para cada experimento	94
TABELA A2 - Dados psicrométricos para o experimento 01	95
TABELA A3 - Dados psicrométricos para o experimento 02	96
TABELA A4 - Dados psicrométricos para o experimento 03	97

TABELA A5 - Dados psicrométricos para o experimento 04	98
TABELA A6 - Dados psicrométricos para o experimento 05	99
TABELA A7 - Dados psicrométricos para o experimento 06	100
TABELA A8 - Dados psicrométricos para o experimento 07	101
TABELA A9 - Dados psicrométricos para o experimento 08	102
TABELA A10 - Dados psicrométricos para o experimento 09	103
TABELA A11 - Dados psicrométricos para o experimento 10	104

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Esquema geral do leito de jorro e seus periféricos.....	37
FIGURA 4.1 - Efeito da Altura do Leito no Rendimento do Pó.....	44
FIGURA 4.2 - Efeito da Altura do Leito na Umidade do Pó.....	45
FIGURA 4.3 - Efeito da Temperatura de Entrada do ar sobre a Umidade do Pó Obtido.....	46
FIGURA 4.4 - Efeito da Temperatura de Entrada do ar sobre o Rendimento do Pó Obtido.....	47
FIGURA 4.5 - Efeito da Relação Q/Q_{jm} na Umidade do Pó.....	48
FIGURA 4.6 - Efeito da Relação Q/Q_{jm} no Rendimento do Pó.....	48
FIGURA 4.7 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na Saída do Secador, $H = 0,18\text{m}$, $T_{ge} = 47,23\text{ °C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$	50
FIGURA 4.8 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na Saída do Secador, $H = 0,23\text{m}$, $T_{ge} = 46,60\text{ °C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$	51
FIGURA 4.9 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na Saída do Secador, $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 45,81\text{ °C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$	52
FIGURA 4.10 - Efeito do Tempo de Secagem ¹ na Umidade Absoluta do Ar na Saída do Secador, $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 54,51\text{ °C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$	53

FIGURA 4.11 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na Saída do Secador, $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 45,40\text{ }^\circ\text{C}$, $M_p/M_i = 3,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,5$ 54

FIGURA 4.12 - Perfil Radial de Temperatura ao Longo do Experimento 04 $H = 0,25\text{m}$, $Z = 0,37\text{m}$, $Q/Q_{jm} = 1,7$; $M_p/M_i = 2,0\%$ 55

FIGURA 4.13 - Evolução dos Perfis Radiais de Temperatura com as Alimentações Sucessivas. $H = 0,25$, $Z = 0,37\text{m}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$. Experimento 04.56

FIGURA 4.14 - Perfil de Temperatura ao Longo do Experimento 08, $H=0,25\text{m}$; $Z = 0,37\text{m}$; $M_p/M_i = 3,0\%$; $Q/Q_{jm} = 1,5$57

FIGURA 4.15 - Evolução dos Perfis Radiais de Temperatura com as Alimentações Sucessivas. $H = 0,25$, $Z = 0,37\text{m}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,5$. Experimento 08.58

FIGURA 5.1 - Eficiência Térmica e Taxa de Água Evaporada em função da Altura do Leito. $Q/Q_{jm} = 1,5$ 71

FIGURA 5.2 - Eficiência Térmica e Taxa de Água Evaporada em função da Altura do Leito. $Q/Q_{jm} = 1,7$ 72

2

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a fruticultura tem-se apresentado como uma alternativa importante para o desenvolvimento da Região Nordeste do Brasil. Porém, de modo geral, as frutas são comercializadas "in natura", o que ocasiona um grande desperdício da produção.

A busca de um método em que o produto seja aproveitado ao máximo em cada colheita, tem motivado diversos pesquisadores ao longo dos anos. Alguns estudando uma melhor forma de estocagem, outros procurando o modo ideal para o transporte e outros ainda, buscando um processo em que as frutas possam ser beneficiadas de maneira que possam ser armazenadas e transportadas mais facilmente, conservando suas propriedades organolépticas e vitamínicas.

Um desses processos é a secagem, que é um processo combinado de transferência de calor e massa, no qual se reduz a disponibilidade de água ou atividade de água, que facilita o crescimento microbiano e reações químicas e bioquímicas. O aumento da temperatura do material a ser desidratado promove a evaporação da água, enquanto a circulação do ar remove a umidade evaporada. MELO (1994).

A desidratação de frutas e vegetais como meio de conservação se remonta à pré-história. Entretanto, a utilização de tecnologias avançadas, teve um grande desenvolvimento durante e depois da segunda guerra mundial, onde os pesquisadores atinham-se em obter produtos desidratados de rápido preparo e de excelente qualidade, porém, não se preocupavam em manter a qualidade por um longo tempo de armazenamento. A partir de então, os

produtos obtidos passaram a apresentar um mínimo de umidade impedindo o crescimento microbiológico e viabilizando a estocagem por maiores períodos de tempo. TRESSLER (1956)

Vários tipos de secadores têm sido estudados com o fim de viabilizar a obtenção de um produto de alta qualidade segundo a diversidade de materiais a serem desidratados. Dentre esses, pode-se citar o secador em leito de jorro, o qual vem sendo empregado como uma alternativa à secagem em "spray".

Esse tipo de secador, proposto por MATHUR E GISHLER em 1955, oferece produtos de alta qualidade e baixo custo, envolvendo altas taxas de transferência de calor e massa.

Para materiais granulados, pastas e suspensões, o secador em leito de jorro tem encontrado larga utilização, apresentando resultados favoráveis em recentes pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Sistemas Particulados da UFPB, Campus II na desidratação de polpa de umbu e grãos de urucum.

Baseados no bom desempenho do secador para polpa de umbu, deu-se continuidade às pesquisas, usando a polpa de outra fruta tropical, a acerola (*Malpighia Emarginata DC*). A acerola foi escolhida por ser muito rica em vitamina C e de fácil cultivo, frutificando de 3 a 4 vezes por ano, existindo plantios nas diversas regiões do Brasil. Particularmente na Paraíba, sua importância econômica vem crescendo, apresentando em 1995 em torno de 1000 ha plantados com acerola, dos quais a maior parte nos municípios de Alhandra e Sapé, conforme dados do IBGE.

A acerola é facilmente perecível, havendo portanto a necessidade de um processo que possibilite sua armazenagem e comercialização por um maior período de tempo.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o desempenho do leito de jorro para a secagem de polpa de acerola. O desempenho é avaliado através dos parâmetros envolvidos na secagem tais como : temperatura e

vazão de entrada do gás e altura do leito de inertes estudando seu efeito sobre o rendimento operacional e sobre a umidade do produto. Através de um modelo simplificado foi calculado o coeficiente de transferência de calor e estimada a fração de partículas molhadas. Estes resultados serão úteis para uma posterior simulação e otimização do processo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Acerola

A Acerola (*Malpighia emarginata* DC) é uma planta originária das Antilhas, mas pode ser encontrada em estado nativo em outros países da América Central e Norte da América do Sul. Seu alto teor de vitamina C despertou o interesse de vários pesquisadores em todo o mundo, incentivando o cultivo industrial desde os anos 40 em países como Estados Unidos e Porto Rico. No Brasil o cultivo só transformou-se em escala comercial no início dos anos 80.

Atualmente existem plantios de pequeno e médio portes instalados, e outros em fase de instalação nos estados da Bahia, Pará, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo, visando principalmente a exportação na forma de polpa, suco ou frutos congelados e cápsulas de vitamina C, para a Europa, Japão e Estados Unidos. Apesar disso, a demanda interna tem aumentado nos últimos anos.

Mesmo com a grande divulgação da cultura a nível nacional e do potencial que a mesma apresenta atualmente, ainda existe uma grande escassez de trabalhos que visem ao estudo da fisiologia, bioquímica e conservação pós-colheita dos frutos, os quais podem contribuir para minimizar as perdas pelos produtores, como também facilitar o acesso da população a uma fonte extraordinária de vitamina (ALVES, 1993).

Segundo RUEHLE (1953), a planta de acerola é um arbusto de tamanho médio entre 2 e 3 metros de altura, com ramos densos espalhados. As folhas são opostas, de pecíolo curto com 2,5 a 7.5 centímetros de comprimento. As flores são dispostas em pequenas cimeiras axilares pendiculadas de 3 a 5 flores, com coloração rosa e esbranquiçada e vermelha. Os frutos, que apresentam diversidade de forma, tamanho e peso, são formados rapidamente, já que, do florescimento à maturação são gastos apenas cerca de 22 dias. A frutificação se dá de 3 a 4 vezes por ano, tendo sido registradas até 7 colheitas em Porto Rico. A forma dos frutos pode ser oval e subglobosa e o tamanho varia de 1 a 2,5 centímetros, o peso varia entre 2 e 10 gramas. Quanto à coloração, apresentam tonalidades diferentes, indo do verde, quando em desenvolvimento, passando a amarelo e finalmente a vermelho-escuro, quando maduro. Apresenta, normalmente, três sementes e um suco avermelhado. O suco representa 80% do peso da fruta.

Cada planta de acerola pode produzir de 20 a 30 kg de frutos por ano. Segundo o Dr. MOSCOSO (1956), em Porto Rico, de uma plantação consistindo de aproximadamente duzentas plantas, foram colhidos de 3.000 a 4.500 kg de frutos frescos por ano. Considerando que o teor de ácido ascórbico e de dehidroascórbico varia em torno de 1 a 4%, o rendimento total de uma plantação com duzentas árvores com idade de quatro anos, estaria em torno de 45 a 180kg de vitamina C, expressa em deidroascórbico e ácido ascórbico. (MARINO NETO, 1986).

As tabelas de 2.1 a 2.3 mostram algumas características da acerola.

TABELA 2.1 - Composição da acerola em 100g de polpa.

composição	gramas
Umidade	91,10
Proteína	0,68
Extrato etérico	0,19
Fibras	0,60
Cinzas	0,45
Carboidratos	6,98

FONTE: MARINO NETO (1986)

TABELA 2.2 - Quantidade de minerais na acerola

Mineral	miligramas
Cálcio	8,7
Fósforo	16,2
Ferro	0,7

FONTE: MARINO NETO (1986)

TABELA 2.3 - Vitaminas na acerola

Vitaminas	miligramas
Caroteno	0,408
Tiamina	0,028
Riboflavina	0,079
Niacina	0,034
Ác. Ascórbico	2.329,0

FONTE: MARINO NETO (1986)

1

A acerola possui elevado teor de vitamina C, mas este conteúdo é diferenciado de acordo com a variedade plantada, condições climáticas e tratos culturais utilizados. A acerola verde contém níveis mais altos de vitamina C, porém são mais ácidas, enquanto as acerolas maduras possuem mais açúcares e um sabor mais agradável.

Os teores de vitamina na acerola variam de 956mg de ácido ascórbico em frutos maduros a 4.827mg de ácido ascórbico por 100g em frutos verdes. A tabela abaixo mostra o conteúdo de ácido ascórbico.

TABELA 2.4 - Conteúdo de ácido ascórbico em acerolas maduras como resultado de diversas pesquisas.

Ác. Ascórbico		Local (país)	Autor(es)
mg/100g	mg/100ml		
2.520		México	CHARLEY(1969)
2.233		USA	CHARLEY(1969)
2.130		Porto Rico	JACKSON & PENNOCK(1958)
1.996		USA	CHARLEY(1969)
1.930		Brasil(PB)	BATISTA ET AL.(1991)
1.900		México	CHARLEY(1969)
1.827		USA	NAKASONE et al(1966)
1.759		Porto Rico	CAMPILLO & ASENJO(1957)
1.707		Porto Rico	CHARLEY(1969)
1.550		Porto Rico	LOPEZ(1963)
1.283	1.061	Porto Rico	MEDEIROS(1969)
1.130		Venezuela	CHARLEY(1969)
1.124		Brasil(RS)	CARVALHO(1992)
1.100		Colômbia	CHARLEY(1969)
994	1.200	Porto Rico	ASENJO & MOSCOSO(1950)
	1.331	Porto Rico	NIEVA(1955)
	1.267	Porto Rico	SANTINI JUNIOR & HUYKE

FONTE: CARVALHO & MANICA (1993)

Buscando conhecer a perda da vitamina C da acerola, vários trabalhos foram realizados, entre eles, MUSTERD verificou que durante a transformação do suco de acerola em geleia, após o cozimento, ainda continha alto teor vitamínico, o que é muito importante, já que normalmente o cozimento tende a destruir a vitamina (MARINO NETO, 1986).

2.2. O Leito de Jorro

A tecnologia do leito de jorro tem evoluído significativamente desde a sua descoberta por MATHUR & GISHLER na década de 1950, ocupando lugar relevante nas operações envolvendo um contato íntimo entre um fluido e partículas sólidas .

Ao invés de múltiplos orifícios para distribuição do gás, presentes no leito fluidizado, o leito de jorro apresenta uma coluna cônica e um orifício abaixo do cone por onde o gás é alimentado (MUJUMDAR, 1987).

O leito de jorro tem especial vantagem comparada com o leito fluidizado quando as partículas a serem secas são grandes para fluidização, maiores do que 5mm, (MUJUMDAR, 1987).

Por proporcionar baixo custo operacional e de manutenção e oferecer produtos de qualidade, envolvendo altas taxas de transferência de calor e massa, logo na década de 1960 foi instalada a primeira unidade no Canadá usada para secagem de ervilhas, lentilhas e sementes de linho. Desde então, outras unidades foram instaladas em diversos países com finalidades variadas tais como a secagem incluindo cristalização e evaporação; granulação e recobrimento de materiais sólidos e ainda, em escala piloto, na redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação de carvão, moagem e mistura de sólidos e pirólise de xisto (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

Segundo SCHNEIDER & BRIDGWATER (1989), no que diz respeito a secagem de suspensões em leito de jorro, os pioneiros foram REGER et al (1967) na União Soviética, com a secagem de lacas e tintas. A partir daí, ao longo dos anos, a secagem em leito de jorro vem sendo usada para diversos tipos de materiais, dentre eles, sangue animal (PHAM,1983; RÉ & FREIRE,1987), pasta de tomate (KACHAM & CHIAPPETTA, 1988), extratos farmacológicos vegetais(RÉ & FREIRE, 1986), carbonato de cálcio (GUBULIN & FREIRE, 1989), polpa de frutas tropicais (LIMA et al., 1991; LIMA 1992; LIMA 1993, LIMA et al 1992; LIMA & ALSINA 1994; ALSINA et al 1996), leite (OCHOA-MARTINEZ, 1993).

2.2.1. Descrição do leito de jorro

O leito de jorro, na forma convencional, consta de uma coluna cilíndrica de base tronco-cônica com injeção de gás, normalmente o ar, pela extremidade inferior da base, proporcionando a circulação das partículas sólidas em uma região central chamada Jorro, onde há o arraste pneumático e a formação de uma fonte de sólidos; e em uma região anular onde os sólidos em movimento descendente, comportam-se como leito deslizante. A maioria das partículas sólidas retorna ao jorro pela região inferior da base tronco-cônica invertendo o sentido do movimento, deslocando-se de maneira ascendente, completando assim o movimento cíclico dos sólidos.

Apesar da possibilidade de utilização para materiais diversos, o leito de jorro convencional apresenta algumas limitações, as quais são citadas por MUJUMDAR (1989).

- Elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável.
- Dimensões geométricas limitadas para uma operação eficiente.
- Fluxo de gás limitado, mais pelas exigências de estabilidade do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa.

- Faixa operacional limitada.
- Capacidade limitada por unidade de espaço.
- Dificuldade de mudança de escala.

Buscando superar essas limitações, foram introduzidas modificações internas e externas no leito de jorro convencional, dentre elas pode-se destacar, nas modificações externas, o leito de jorro cônico, muito usado nos países do leste europeu, segundo MATHUR & EPSTEIN (1974). Este tipo de geometria foi largamente discutida por GELPERIN et al. (1960), GOLTSIKER et al.(1964), ROMANKOV & RASHKOVSKAYA, (1968); entre outros. No Brasil, o jorro cônico tem sido estudado ao longo dos últimos dez anos por vários pesquisadores, entre os quais estão CREMASCO et al (1987), SILVA & FREIRE (1989). Quanto às modificações internas, uma de grande destaque foi a introdução de um tubo central (tubo "Draft"), separando as regiões do jorro e do anel. MUJUMDAR (1989) destaca algumas vantagens e desvantagens desse tipo de configuração. Entre as vantagens, têm-se:

- Aplica-se a qualquer sólido que possa ser arrastado pneumáticamente.
- Requer menores quedas de pressão para iniciar a circulação de sólidos.
- A altura e o diâmetro do leito podem ser alterados substancialmente.

Entre as desvantagens, têm-se:

- Redução da mistura entre as partículas.
- Projeto mais complexo.
- Tendência a entupimento quando do início ou término do movimento.
- Menores taxas de transferência de calor e massa, devido à maior regularidade do movimento das partículas.

PALLAI & NEMETH (1974) sugerem o uso de uma tela cilíndrica ao invés do tubo, de forma a provocar maiores trocas de gás entre o jorro e o anel. Porém, segundo CLAFIN & FANE (1984), o uso da tela não aumenta substancialmente o fluxo de gás no anel, diminuindo apenas as limitações do tamanho do sólido.

CLAFLIN & FANE (1983) e KOE & VAN BASSEL (1989) observaram um melhor controle no tempo de residência da partículas e maior economia térmica na secagem e desinfecção térmica do trigo no leito de jorro com tubo "Draft". Mas, a utilização dessa técnica limita necessariamente o fluxo de gás no anel.

SILVA & FREIRE (1987), na determinação do coeficiente de transferência de calor parede-fluido, constataram um melhor desempenho técnico no secador com tubo central do que no convencional.

Outras variações referem-se ao leito de jorro múltiplo, ao tridimensional (transversal e triangular), ao de base plana com tubo central e ao dividido internamente por pratos ou bandejas.

O leito pode ser constituído por partículas ativas com troca simultânea de calor e massa com o fluido ou por partículas inertes, no caso da secagem de pastas e suspensões. A alimentação pode ocorrer de forma contínua, intermitente ou batelada.

2.3. Mecanismo de Secagem

Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974) o processo que envolve a deposição, secagem e demolição da película, ocorre de forma contínua, quando a temperatura do leito, para uma dada vazão de alimentação, é suficientemente alta para que a proporção de partículas molhadas, em estado

estacionário, seja pequena não causando aglomeração e conseqüente comprometimento do movimento do jorro.

BARRET & FANE (1989), afirmam que existe uma necessidade de se compreender o mecanismo que ocorre no interior do leito para que se entenda o potencial de secagem de pastas e suspensões em leito de jorro.

Desde a alimentação até a obtenção do produto em pó, o mecanismo no interior da coluna é o seguinte:

- Atomização da suspensão sobre o leito de partículas inertes;
- deposição da suspensão formando uma película fina que reveste o material inerte;
- secagem da película tornando-a frágil;
- quebra da película devido ao atrito interpartículas no jorro;
- arraste do pó obtido pela fratura da película, através da corrente de ar;
- separação do pó através de um ciclone situado na parte superior do secador.

Ainda segundo BARRET & FANE (1989) a taxa de remoção da película deve ser maior ou igual à taxa de alimentação da suspensão. Afirmam também que películas finas provocam taxas de secagem substancialmente constantes.

Pode-se então concluir que dois fatores governam o desempenho do secador: as taxas de transferência de calor e massa e a friabilidade da película aderida à superfície das partículas inertes.

Um desses fatores pode ser a etapa limitante, no que diz respeito à estabilidade do processo. Deve-se observar que as propriedades mecânicas da película são de grande importância na estabilidade do processo; se a

película estiver fortemente aderida, pode não romper e sim aumentar como num processo de granulação.

Em seus relatos, BARRET & FANE (1989) observaram ainda que o acúmulo de material no leito, aumenta com o aumento da vazão de alimentação da suspensão e diminui com o aumento da vazão do ar de secagem e também com o aumento da temperatura de secagem. Deve-se ressaltar, no entanto, que o aumento da temperatura de secagem reduz a eficiência térmica (LIMA 1992). As propriedades das partículas inertes também afetam a taxa de acumulação. Partículas rugosas formam películas irregulares que não secam uniformemente; partículas de alta densidade proporcionam uma taxa de acumulação no estado estacionário, a níveis mais baixos e tempos mais curtos. A forma de alimentação pode afetar de maneira imprevisível a taxa de acumulação.

Outro fato observado por BARRET & FANE (1989), é que o uso de uma placa defletora acima do jorro central afeta a cinética de atrição da película favorecendo a secagem e remoção do material acumulado no leito.

2.4. Utilização do leito de jorro

2.4.1. Uso geral

A seguir são apresentados resumos de alguns trabalhos que envolvem o leito de jorro.

PEREIRA & REBOLA (1984), com o objetivo de projetar uma unidade comercial contínua de leito de jorro para a secagem de soja, levantaram dados relativos aos parâmetros de secagem, bem como à dinâmica

do leite, usando uma unidade semi-piloto para secagem de 100kg de soja por hora. Os testes realizados em escala piloto demonstraram a viabilidade da técnica de secagem de soja em leite de jorro. O comportamento dinâmico da unidade piloto pode ser bem estimado. A influência da temperatura sobre a taxa de secagem de soja é marcante. O secador opera continuamente com boa estabilidade e com uma redução média global da umidade dos grãos em torno de 4%. O projeto em escala semi-industrial baseai-se nos dados coletados na unidade em escala piloto e na literatura.

LEITE et al (1984) estudaram o processo de pirólise para finos de xistos com granulometria inferior a 6,4mm, que não podem ser processados em reatores de leite móvel característicos do processo de pirólise de xistos, por motivos operacionais, mas que contêm, ainda, matéria orgânica recuperável sob forma de óleos e gás, por meio de um processo de pirólise (450 a 600 °C). Usaram para tal estudo um reator de leite de jorro obtendo resultados bastante satisfatórios, em tempos de residência médios superiores a 5min, as conversões em matéria volátil e óleo recuperado atingem valores constantes e superiores a 90%. Na combustão parcial, uma queima de 15% de matéria volátil foi suficiente para manter a temperatura no nível desejado. Logo, a técnica do leite de jorro, apesar de apresentar alguma limitação quanto ao diâmetro da partícula, pois sólidos muito finos causam instabilidade no leite, pode ser aplicado com bastante sucesso ao processo de pirólise de finos de xistos.

FINZER & KIECKBUSCH (1986) desenvolveram um secador em leite vibro-jorrado realizando ensaios com esferas de vidro, sagú e confeitos aluminizados visando a verificação do comportamento dinâmico do leite. Os autores descreveram o comportamento do leite e quantificaram a queda de pressão e taxa de circulação de sólidos para uma ampla faixa de vazão do ar. Observaram que as partículas se movimentam através do tubo central e que a circulação ali é a principal responsável pela dispersão da distribuição do

tempo de residência. O equipamento foi considerado adequado para o objetivo do trabalho.

PAVARINE et al (1986), realizaram ensaios de granulação da rocha fosfática de Patos de Minas - MG em leito de jorro, com atomização de uma suspensão do material granulante na base do leito, verificando o efeito da temperatura e da porcentagem de amido (agente ligante) na taxa de crescimento dos grânulos e na resistência ao esmagamento. Como resultados obtiveram um produto com granulação uniforme e com distribuição normal. Os autores citam vários outros trabalhos nos quais as vantagens do leito de jorro com relação aos granuladores tradicionais são ressaltadas, dentre elas a capacidade de produzir grânulos de tamanho bastante uniforme e obter um produto seco em apenas uma etapa com um equipamento compacto.

PEREIRA et al. (1986) com o objetivo de atender a solicitação da Superintendência de Desenvolvimento do Xisto da PETROBRAS, realizaram experimentos em uma unidade semi-industrial de leito de jorro com 80cm de diâmetro, visando a obtenção de dados do comportamento dinâmico com finos de xistos, na faixa granulométrica inferior a 1/2". Foi realizado um teste com o escoamento contínuo de xistos durante seis horas de operação com vazões entre 0,8 e 2 toneladas por hora de xisto. As condições de jorro observadas e medidas foram boas, sem qualquer restrição. o teste contínuo de seis horas atesta definitivamente a compatibilidade do material com a técnica. O bom resultado conseguido, somado às experiências anteriores, induz à confiança do emprego do leito de jorro para escalas industriais.

KERSANACH et al. (1987) obtiveram algumas informações dinâmicas e curvas de secagem para o milho em protótipo com alimentação de gás em fenda, divisória interior e dispositivo que permite a recirculação do gás de exaustão através do leito, diferente do leito convencional, buscando contornar alguns problemas clássicos do jorro convencional como o "Scale-up"

e outros manifestados pelo equipamento projetado e construído no Laboratório de Sistemas Particulados da COPPE como imprecisão e falta de rigidez mecânicas. Os autores relatam que só foi possível a realização de três testes no protótipo, mas, mesmo assim, pode-se notar que, aparentemente, o protótipo é bastante rápido e causa pouco prejuízo à qualidade do produto.

FERNANDES & MASSARANI (1987) baseados em resultados satisfatórios obtidos em protótipo de laboratório, usando uma pequena unidade industrial para secagem de politereftalato de etileno em leito de jorro cônico, com bateladas de 30kg com redução de umidade para 25ppm. A escolha desta configuração, entre outras conhecidas, deve-se ao fato do leito cônico propiciar uma intensa circulação de sólidos, capaz, possivelmente, de desagregar o material quando, ao atingir a temperatura de transição entre as fases amorfa e cristalina, cerca de 70 °C, sobre uma fusão incipiente.

CREMASCO et al (1987) obtiveram dados dinâmicos e curvas de secagem para o milho em leito de jorro cônico com tubo interno. A partir dos resultados experimentais propuseram correlações para queda de pressão e vazão do ar em condições de jorro mínimo e para a redução de umidade e variação de temperatura do grão ao longo do tempo. Concluíram que a correlação obtida para vazão de ar no jorro mínimo para o leito não convencional é análoga a proposta por CREMASCO & MASSARANI (1986), usando arroz. As correlações não apresentaram influência significativa da altura do leito na dinâmica do leito não convencional. Quanto a secagem, observou-se através dos experimentos que o leito de jorro mostrou-se adequado à redução da umidade do milho de 18% a 12,5% em base úmida, que é uma faixa desejada pelo agricultor, sem prejudicar a qualidade do grão. Os autores ainda ressaltam o fato de que o leito de jorro pode ser usado como opção para o pequeno produtor que tenha uma rotatividade de plantio (soja, milho, arroz, feijão) de modo que o secador sempre possa estar ativo durante o período de entressafra.

CREMASCO & SILVA (1987), analisaram a produção ótima dos secadores de leite de jorro e fluidizado usando para isto curvas de secagem para diferentes materiais sólidos como areia e resina acrílica. Observaram que ambos os equipamentos apresentam um problema de empastamento dos sólidos, principalmente para areia, onde o período de desempastamento sobrepõe-se ao período de redução constante da umidade, tempo este necessário para retirar boa parte da umidade superficial dos sólidos.

CALADO et al (1987) com o objetivo de estudar o mecanismo de secagem de grãos em leite de jorro cônico, propuseram um modelo difuso a dois parâmetros, cuja determinação é feita utilizando um algoritmo de estimação paramétrico não linear, juntamente com dados da literatura, observando-se uma excelente concordância entre o modelo proposto e os pontos experimentais.

SANTANA et al. (1988), estudaram o desempenho do leite de jorro no recobrimento de comprimidos visando obter informações básicas para o projeto do equipamento. Observaram que o aumento da vazão do gás e da solução de recobrimento, para uma mesma altura estática do leite, levaram a um aumento da taxa de crescimento do placebo para um mesmo tempo de processamento; o aumento da altura do leite tem efeito desfavorável na taxa de crescimento dos placebos. Comportamento esperado, uma vez que o aumento da altura estática, H_e , aumenta o número de tabletes em contato com as gotas da solução atomizada, ou seja, o aumento do volume central de jorro reduz a probabilidade de recobrimento de uma partícula. Vazões de alimentação muito altas provocam aglomeração e um encharcamento das partículas, perturbando a hidrodinâmica do leite.

SILVA & ALSINA (1991) estudaram os efeitos das variáveis operacionais na secagem de urucum em leite de jorro, observando que a

reumidificação do produto por aspersão não causou efeito no comportamento da secagem e os dados obtidos apresentaram reprodutibilidade aceitável, sendo os dados obtidos considerados confiáveis. Com relação ao efeito das condições operacionais, observa-se que a secagem ocorre no período a taxa decrescente; a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura de operação e da umidade inicial do produto. O equipamento proposto foi considerado adequado para o processamento do urucum em termos de desempenho na secagem e da qualidade do produto final.

OLIVEIRA & FREIRE (1991) estudaram o recobrimento de partículas em leite de jorro procurando identificar parâmetros importantes no processo; analisar o efeito de alguns parâmetros na taxa de aumento de massa (k_1) e ainda, desenvolver um modelo para descrever a cinética de crescimento. Concluíram que sob as condições estudadas, k_1 , aumenta com a relação entre as vazões mássicas da suspensão e do gás (W_s/W_g) e com a relação entre as vazões do ar usada e a de jorro mínimo (Q/Q_{jm}), a temperatura não influencia significativamente K_1 , o produto apresenta distribuição de massa log-normal reproduzindo a distribuição inicial. O modelo desenvolvido foi adequado para descrever a cinética de crescimento das partículas; K_1 , pode ser estimado pela equação:

$K_1 = (-4,18 + 1,66 W_s/W_g + 2,17Q/Q_{jm})/1000$ com $W_s/W_g = (W_s/W_g) \times 10^3$ no intervalo de valores estudados

OLIVEIRA & FREIRE (1993) apresentaram uma comparação preliminar para o recobrimento de partículas, usando os processos em leite de jorro e da panela rotatória convencional. Usaram como critério de comparação, a eficiência a adesão, η , e a taxa de aumento de massa das partículas, K_1 ; empregando-se para tanto os dados experimentais publicados por OLIVEIRA (1992) e por CORREIA (1992), chegando a conclusão de que, preliminarmente, o processo em leite de jorro apresenta uma razoável vantagem sobre a técnica convencional para revestimento de partículas.

Sendo justificada porque a operação em panela rotatória é um processo em batelada, visto que a alimentação de revestimento é alterada por um período de secagem da película formada. Já no leito de jorro, tanto a alimentação da suspensão, quanto a secagem da película formada ocorrem continuamente.

2.4.2. Pastas e Suspensões em Leito de Jorro

PHAM & POOLEY (1981) buscando desenvolver um secador que oferecesse um produto de qualidade, semelhante ao obtido na secagem de sangue com um secador spray, construíram um leito de jorro e testaram sua eficiência na secagem de sangue, plasma, concentrado de hemáceas, caseinado de sódio e uma mistura de proteína e gordura em água, concluindo que o leito de jorro é uma alternativa viável ao secador spray para o caso de soluções pouco viscosas e pegajosas, com baixo teor de gordura, para escala de operação inferior a 1000 l/h, e que apresenta uma maior capacidade de alimentação e um produto de melhor qualidade do que o leito fluidizado.

PHAM (1983) em seu trabalho sobre secagem de sangue animal em leito de jorro, estudou a influência da vazão de alimentação do sangue no desempenho do secador, observando também a solubilidade do produto final, concluindo que o aumento da temperatura do ar na saída do secador provoca o surgimento de um máximo na umidade do produto e que a vazão de alimentação de sangue aumentando, aumenta linearmente a umidade do produto. A solubilidade do produto é pouco afetada pela vazão de alimentação de sangue, mas decresce rapidamente na vazão máxima de alimentação.

HUFENÜSSLER (1985) estudou um secador em leito de jorro usando como matéria-prima, purê de banana e como material inerte esferas de vidro com diâmetro de 5×10^{-3} m e de $2,7 \times 10^{-3}$ m e temperaturas, 70-75 e 100-105 °C, obtendo um produto em pó com uma umidade inferior a 3%, portanto,

dentro dos padrões de conservação exigidos. O processo com esferas de vidro com $2,7 \times 10^{-3}$ m de diâmetro forneceu uma umidade inferior ao que utiliza esferas maiores, devido ao maior movimento das esferas de menores diâmetros no leito e também da maior área superficial, fornecendo um pó mais fino e, portanto, mais seco. Quanto a análise sensorial, degustadores das Indústrias Reunidas Jaraguá SA, concluíram que, em alguns experimentos, os pós obtidos não diferem no sabor do purê original a um nível de 5% de significância e que o pó obtido no leito de jorro é mais parecido com o purê original do que o pó obtido por "drum-dryer".

RÉ & FREIRE (1986), estudando a secagem de sangue animal em leito de jorro, usando como material inerte partículas de polietileno, obtiveram como produto um pó com elevado teor de proteína e ferro evidenciando a viabilidade deste método de secagem. Quanto a umidade do pó obtido, observou-se a presença de um máximo na temperatura de 70 °C.

RÉ (1986) em sua dissertação de mestrado realizou experimentos para determinar o efeito da temperatura do ar na umidade do pó obtido da secagem de sangue animal em leito de jorro e na solubilidade do conteúdo protéico nele contido, para verificar a reprodutibilidade do processo e, ainda, a qualidade do produto. Foram determinados também o efeito da carga de inertes e circulação de sólidos na vazão máxima de sangue alimentado, procurando reunir condições de operação que favoreçam a máxima capacidade de produção com a qualidade desejada. Os resultados indicaram que a temperatura de saída do gás mais apropriada para o processo é de 74°C obtendo-se um conteúdo protéico e de ferro iguais a 85% e 0,22% respectivamente, comprovando a alta potencialidade do produto de proteína e ferro. A máxima produção do secador é função da carga de inertes e da circulação de sólidos imposta pela vazão do ar introduzida no leito. Nos secadores utilizados, é obtida pela razão $H/Dc = 1,00$ e $Q/Q_{jm} = 1,27$. O pó obtido pode ser consumido como alimento sem perigo de produzir nenhuma

doença. A secagem de sangue em leite de jorro é uma técnica viável porque o produto obtido é de boa qualidade, confirmada pela alta solubilidade do seu conteúdo protéico. O leite de jorro utilizado foi o convencional, já que o modificado com tubo central não apresentou bons resultados. RÉ sugere que o projeto de secadores de leite de jorro deve incluir várias escalas intermediárias entre escalas bancada e industrial.

RÉ & FREIRE (1987), tentando minimizar os problemas na secagem de extratos farmacológicos quanto à fragilidade dos princípios ativos ao aquecimento demorado, investigaram a secagem em leite de jorro, procurando garantir a degradação mínima dos princípios ativos visto que o tempo de permanência do extrato no secador é pequeno e conseqüentemente o tempo de exposição ao calor mantido durante um intervalo de tempo bastante limitado. Como resultados, eles determinaram que os extratos secos obtidos apresentam boas características organolépticas e o mesmo teor de umidade que o encontrado nos extratos secos vegetais na área farmacêutica, portanto o extrato seco possui a qualidade desejada e a secagem de extratos líquidos vegetais em leite de jorro é um processo viável.

KACHAN & CHIAPPETTA (1988) procuraram instalar um secador em leite de jorro para secagem de pasta de tomate, obtendo dados fluidodinâmicos do equipamento, estudando as condições propícias ao bom desempenho e relacionando as variáveis envolvidas na desidratação. Utilizaram esferas de vidro $2,7 \times 10^{-3}m$ e alimentação contínua de pasta de tomate, chegando as seguintes conclusões: Com o aumento da temperatura, ocorre uma queda na vazão máxima de alimentação de pasta devido a uma maior tendência a aglomeração de pasta. O aumento da altura do leite também provoca queda na vazão máxima de alimentação por unidade de massa de partícula (Q_{pe}). A maior vazão máxima de alimentação foi conseguida para leitões com 0,13m de altura e temperatura de bulbo seco do gás de entrada

igual a 60 °C com 2% de amido. A umidade do pó de tomate cresce com o aumento da vazão máxima de alimentação para cada altura do leito.

HACHAN et al. (1988) visando a caracterização do pó de tomate obtido através dos experimentos com leito de jorro, determinaram para o pó, entre outras características:

- O conteúdo de umidade - para as amostras desidratadas a 60 °C a umidade do pó ficou entre 5,39 e 7,33% enquanto que a 80 °C ficou entre 3,11 e 4,49% ambos em base seca, evidenciando que a temperatura de 80 °C fornece um pó que permite ser armazenado a 4,5 °C resistindo a aglomeração por aproximadamente 32 semanas.
- Cor da pasta obtida pela reconstituição do pó de tomate - apresentando uma tendência a luminosidade (cor branca) em relação a da pasta original, uma queda no teor de vermelho e um aumento do teor de amarelo.
- Conteúdo de umidade de início de aglomeração - ficou entre 5,24 e 5,69 (g H₂O/100g de pó seco) obtidas em um tempo de 11,5 a 12,0 h para amostras condicionadas em ambientes com 42% de umidade relativa e de 4,0 a 4,5 h para as amostras mantidas com 86% de umidade relativa.
- Reconstituição de pasta - para a temperatura de 80 °C, os tempos médios obtidos para as amostras são maiores do que os tempos médios obtidos para as amostras cujas temperaturas de obtenção do pó a 60 °C. Observou-se também que a viscosidade das pastas reconstituídas eram maiores para as temperaturas de 60 °C do que as de 80 °C, indicando que a 60 °C os pós apresentam uma elevada proporção de células intactas de tomate.

RÉ & FREIRE (1989) realizaram experimentos de secagem em leito de jorro com partículas inertes, secando sangue animal e extratos vegetais líquidos, chegando a conclusão de que o sangue animal seco é uma fonte de proteínas e ferro para as indústrias farmacêuticas e de alimentos e que o produto da secagem de extratos vegetais apresenta umidade apropriada

para uso farmacêutico, além do que os princípios ativos são mantidos após a secagem.

BARRET & FANE (1989) estudaram a secagem de materiais líquidos em leito de jorro observando que dois fatores controlam a operação do sistema de secagem: a taxa de evaporação e a taxa de remoção da película formada em volta do inerte pelo líquido alimentado. Afirmaram ainda ser o leito de jorro uma técnica promissora para os materiais estudados. Os experimentos envolveram a secagem de leite desnatado a diferentes concentrações de sólidos em um leito de jorro convencional. Sendo também proposto um modelo mecânico qualitativo para o efeito de vários parâmetros na taxa de remoção da película.

SCHNEIDER & BRIDGWATER (1989) relatam as características e funcionamento do leito de jorro e o mecanismo de secagem de soluções e suspensões naquele equipamento fazendo experimentos com alimentações em batelada e contínua. Usaram soluções de cloreto de sódio e suspensão de alumina, concluindo que soluções e suspensões podem ser secas em leito de jorro, sendo, portanto, uma alternativa interessante para o secador em spray.

GUBULIN & FREIRE (1989) desenvolveram e instalaram um leito de jorro em escala piloto com a finalidade de iniciar estudos sistemáticos visando a operação, controle e principalmente otimização com relação ao rendimento energético e eficiência de secagem. Em seu trabalho, usando como material inerte para formação do leito, partículas de polietileno de alta densidade, e para verificar o comportamento do leito de jorro como secador, foi usada uma suspensão de carbonato de cálcio a 10% em peso, foi constatada a perfeita adequação da secagem de pastas e suspensões em leito de jorro, apresentando uma boa circulação de sólidos.

POVRENOVIC et al (1990) usaram um secador em leito de jorro (fluido-jorrável) com tubo central visando a secagem de suspensões naturais. Secaram plasma sangüíneo obtendo um pó de alta qualidade. O teor protéico é mantido após a secagem. A umidade do pó sofre um pequeno acréscimo com o aumento da temperatura do ar no anel entre 100 - 135 °C, ficando a umidade do pó entre 2 e 7%, valores próximos aos propostos pelo padrão.

LIMA et al (1991) estudando as variáveis fluidodinâmicas do leito de jorro na secagem de polpa de umbu, observaram que a presença da suspensão altera de forma significativa a fluidodinâmica, reduzindo a porosidade do jorro e a taxa de circulação de sólidos e provocando uma maior distribuição do gás na região do anel.

REYES & MASSARANI (1991) estudaram a secagem de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), utilizando um secador em leito de jorro consistindo de uma coluna tronco-cônica de diâmetro superior igual a 60 cm. Avaliaram a umidade do produto com relação a massa de inertes no leito, a vazão de alimentação da suspensão e da vazão do ar na entrada, considerando que, uma vez obtido o jorro estável, qualquer vazão adicional de gás passaria pelo jorro, chegando às seguintes conclusões:

- A carga de inerte ideal para aquele equipamento é de 8 Kg, dando bons resultados térmicos e hidrodinâmicos.
- As curvas de umidade versus vazão da suspensão mostram que para a temperatura $T \approx 112^\circ \text{C}$ a umidade do $\text{Al}(\text{OH})_3$ aumenta gradualmente até 7% com $Q_{\text{susp}} = 4 \text{ l/h}$.
- Para Q_{susp} maiores que 4,5 l/h há aglomeração e conseqüentemente umidades altas, maiores que 14%.

- O pó obtido tem umidade menor que 8%, é bastante fino.

LIMA (1992) estudando os efeitos fluidodinâmicos e térmicos da secagem de umbu em leito de jorro, observou que o comportamento fluidodinâmico é geralmente afetado pela presença de polpa apresentando modificações quanto a queda de pressão de jorro estável, há uma maior distribuição de ar na região do jorro, o jorro é menos denso e a circulação de sólidos é menor. Quanto aos estudos térmicos, LIMA & ALSINA (1994) observaram que a eficiência térmica diminui com o aumento da temperatura e da vazão do gás e aumenta com a vazão de polpa alimentada. A área de troca térmica não corresponde a área total de partículas inertes; a fração de partículas molhadas é função direta da relação entre a vazão de polpa e o volume de partículas no leito.

OCHOA-MARTINEZ et al (1993a) visando a determinação do efeito das condições operacionais, tais como vazão de alimentação e temperatura de entrada do ar e, ainda altura do leito de inertes, sobre o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (h_a) em leito de jorro usando água deionizada como alimentação, realizaram diversos experimentos nos quais determinaram também o efeito da adição de surfactantes e do aumento da viscosidade da alimentação no coeficiente de transferência de calor. Como conclusão do trabalho, foi observado que o coeficiente global de transferência de calor aumenta com o aumento da vazão de alimentação e decresce com o acréscimo da temperatura de entrada do gás e da altura do leito. Observou-se também que a vazão do gás e o aumento da viscosidade da alimentação pouco afetam o h_a , enquanto que a redução da tensão superficial e da alimentação produz um aumento marginal nos valores de h_a . Os valores do coeficiente de transferência de calor são estimados em aproximadamente $0,036 \text{ kW} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$. Baseados neste valor, calcularam a fração de partículas molhadas, concluindo que apenas aproximadamente 10% da área superficial das partículas é usada na transferência de calor.

OCHOA-MARTINEZ et al (1993b), estudando a secagem de alimentos líquidos em leito de jorro, usaram leite desnatado e "in natura" observando que o produto em pó, para temperatura de saída controlada entre 70-75 °C para o leite não homogeneizado, apresenta melhor qualidade do que o obtido no secador spray. Diferente do leite integral, o leite desnatado fracassa na secagem em leito de jorro, apresentando deposição e aderência na superfície das partículas inertes.

OLIVEIRA et al (1993) desenvolveram um trabalho para a análise da influência do diâmetro médio da partícula inerte (d_p), da temperatura de entrada do ar de jorro (T_{ge}) e da relação entre as vazões do ar e de jorro mínimo (Q/Q_{jm}) na vazão máxima de alimentação de sangue bovino em um secador de leito de jorro, chegando às seguintes conclusões:

- A vazão máxima de alimentação, nas condições pesquisadas, aumentou com d_d , T_{ge} e Q/Q_{jm} . A variável que mais influencia a vazão de alimentação é d_p . A vazão máxima para sangue bovino foi entre 7 e 44,4% menor que para a pasta padrão (água) possivelmente pelo fato de que o sangue bovino apresenta uma consistência "pegajosa" podendo causar aderência entre as partículas.

LIMA (1993) realizou experimentos em um leito de jorro convencional, secando polpa de umbu observando que o teor de umidade do produto final está diretamente relacionado com a temperatura de entrada do ar, apresentando um máximo por volta de 65 °C para duas velocidades do ar estudadas. Com relação à altura do leito, existe também a presença de um máximo na umidade do pó, o qual ocorre para a altura do leito igual a 0,163 m. Temperaturas altas do ar de entrada proporcionam um maior teor de vitamina C, devido a secagem mais rápida do produto. A produção de pó aumenta com o aumento da vazão do ar e passa por um mínimo em aproximadamente 65 °C

quando da variação da temperatura de operação. A taxa de evaporação de água aumenta com a vazão do ar e com a altura do leito.

RODRIGUES (1993), estudou a secagem de pastas e suspensões em leito de jorro utilizando água pura para melhor compreender o processo de evaporação no leito, e posteriormente, aplicar os conhecimentos obtidos na evaporação de água para a secagem de uma suspensão de $Al(OH)_3$, de caráter inorgânico, e uma suspensão de levedura, de caráter orgânico, com o objetivo de identificar alguns parâmetros importantes e estudar o efeito desses parâmetros no processo de secagem; propor uma correlação empírica, baseada em um estudo estatístico, de modo a relacionar os parâmetros estudados com a taxa máxima de evaporação no leito e testar os modelos propostos para secagem de suspensões, já existentes na literatura, com os resultados experimentais. Concluindo, com relação a evaporação de água, que o jorro produzido é de boa qualidade e o equipamento apresentou boa performance. Quanto ao processo de secagem de suspensão de hidróxido de alumínio, o secador apresentou um bom desempenho, observando-se uma dependência do processo nas faixas das variáveis estudadas com relação a temperatura do ar na entrada do secador, a relação Q/Q_{jm} e altura do leito estático. Com relação as características do produto seco, apresentam-se semelhantes ao original. Nos testes com suspensão de levedura, os resultados indicam a necessidade de um estudo mais intenso das propriedades "colantes" da suspensão para um melhor desempenho do secador. Para cada tipo de suspensão, foram feitas análises estatísticas fornecendo equações que relacionam os parâmetros estudados.

LIMA et al (1995a) fizeram um estudo experimental da secagem em leito de jorro usando polpas de cajá, seriguela e acerola, apresentando resultados preliminares sobre a influência da temperatura sobre o teor de umidade no pó, concluindo que a polpa de seriguela apresentou melhor comportamento fluidodinâmico e nível aceitável de umidade no pó.

LIMA et al (1995b) observaram a secagem de polpa de cajá em leito de jorro, avaliando os efeitos da carga de inerte, vazão de alimentação e vazão do ar sobre a qualidade do produto e eficiência do processo, concluindo que maiores vazões favorecem o processo, fornecendo pós menos úmidos e em maior quantidade; o aumento da alimentação da polpa, mantendo-se as demais condições operacionais, provoca um aumento na umidade do pó e uma redução na quantidade de pó coletado; a concentração da polpa prejudica a dinâmica do leito e conseqüentemente o arraste do pó. A reumidificação das partículas de inerte já revestidas pela película concorre para a produção de pós úmidos e em pequenas quantidades com relação à quantidade de sólidos alimentados. A desidratação de polpa de cajá em leito de jorro apresentou problemas operacionais que comprometem a eficiência do processo tanto no que se refere a quantidade como a produção do pó.

LIMA et al (1995c) baseados em estudos sobre a desidratação de polpas de frutas tropicais em leito de jorro, realizaram uma série de experimentos procurando estudar a influência das variáveis operacionais (temperatura, carga de inerte e vazão do ar), sobre a eficiência do processo e qualidade do produto em pó, secando polpa de seriguela, concluindo que: o teor de umidade contido no pó de seriguela na secagem em leito de jorro (em torno de 5%) é compatível com os níveis exigidos para conservação, isto dependendo da faixa operacional. A umidade do pó diminui com o aumento da carga de inertes, ocorre acumulação acentuada de material no inerte, o que pode ser minimizado com o uso de maiores vazões do ar. De modo geral, a secagem em leito de jorro de polpa de seriguela pode ser viável desde que se encontrem soluções para o acúmulo de material no leito e otimização da coleta do pó pelo ciclone.

2.5 Transferência de Calor em Leito de Jorro

No que se refere a transferência de calor no âmbito global, não existe uma bibliografia considerável, visto que os pesquisadores tendem a estudar situações particulares como a transferência fluido-partícula; transferência parede-leito e transferência corpo submerso-leito. EPSTEIN & MATHUR (1971) e MATHUR & EPSTEIN (1974) apresentaram uma revisão envolvendo essas três formas de transferência de calor de maneira compreensiva e detalhada até a data da referida publicação. SILVA (1987) e SILVA & FREIRE (1989) apresentaram uma revisão a respeito da transferência de calor parede-leito. Mais recentemente, LIMA (1992) apresentou uma revisão sobre a transferência de calor fluido-partícula.

A troca térmica aqui estudada é a transferência de calor fluido-partícula, sendo por isto apresentada de forma mais detalhada.

Na revisão feita por EPSTEIN & MATHUR (1971) é ressaltada a escassez de trabalhos referentes a transferência de calor em leito de jorro e mais especificamente quanto à transferência de calor fluido-partícula. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor fluido-partícula, baseiam-se na área superficial total de partículas no leito. Observam que no jorro o efeito da velocidade do gás sobre as partículas é duas vezes maior do que no anel, e a concentração de partículas é consideravelmente menor. Os valores médios do coeficiente de calor fluido-partícula no jorro são maiores do que no anel, mas, devido ao menor tempo de residência do gás e área superficial de partículas no jorro, a temperatura do gás é pouco menor ou aproximadamente igual a região anular. Consideram ainda que a temperatura de equilíbrio entre o gás e o sólido é obtida no anel a uma pequena distância do orifício de entrada do gás.

Na revisão apresentada por MATHUR & EPSTEIN (1974) é ressaltada a importância de se compreender o mecanismo de transferência de calor fluido-partícula para viabilizar o entendimento prático das interações mais complexas presentes em processos de secagem, granulação e carbonização em leito de jorro. Observa-se que os principais estudos realizados até ali foram feitos por UEMAKI & KUGO (1967), os quais estudaram a transferência de calor fluido-partícula usando um leito de jorro com alimentação contínua de partículas com diâmetro entre 1 e 4 mm e temperatura média do gás de 70 °C. Sendo a diferença de temperatura entre o fluido e a partícula considerada como a média integrada entre a temperatura do fluido na região do jorro e a temperatura de mistura do sólido e a área superficial das partículas foi baseada na área superficial total das partículas no leito. Consideram ainda que a região de maior troca térmica é a região do jorro. A análise dos resultados mostrou que o aumento da altura do leito reduz a temperatura do gás de maneira gradual nas regiões do jorro e do anel; que o equilíbrio térmico gás-sólido no anel ocorre apenas a alguns centímetros da entrada do gás e propuseram ainda uma equação para estimar o coeficiente de calor fluido-partícula, sendo dado por:

$$\frac{h \cdot d_p}{k_f} = 0,0005 \left[\frac{d_p \cdot U_{jm}}{\mu_f} \right]^{1,46} \left[\frac{U_j}{U_{jm}} \right]^{1,3} \quad (2.1)$$

onde K_f é a condutividade térmica do fluido.

KMIEC (1975) estudou a transferência de calor em sistemas com leito de jorro, porém, utilizando apenas a região cônica num processo em batelada. A diferença de temperatura fluido-partícula foi a média logarítmica e usou a área superficial total das partículas no leito.

PONTE & FREIRE (1989) estudaram a determinação experimental da área de troca térmica fluido-partícula em leito de jorro

convencional e modificado com alimentação contínua de sólidos, determinando experimentalmente a área de troca térmica entre o fluido e as partículas; estabelecimento da diferença da temperatura entre as fases fluido-partícula e da taxa de transferência de calor fluido-partícula. Com a determinação destes parâmetros experimentais, chegaram às seguintes conclusões: a partir dos perfis de temperatura em função da posição radial, axial e angular, obtiveram a área de troca térmica entre o fluido e o sólido. Notaram também que a área de troca térmica na região anular é de fato muito importante no processo global de transferência de calor fluido-partícula, concordando com EPSTEIN & MATHUR (1971). Campos típicos da temperatura do fluido mostraram que o perfil é plano na região anular e praticamente parabólico na região do jorro, tanto para o sistema convencional quanto para o modificado. Concluíram também que o uso adequado do método para a obtenção do coeficiente de calor fluido-partícula em leito de jorro, necessita estar fisicamente ligado ao processo efetivo de troca térmica entre as fases do sistema, a área e a diferença de temperatura estabelecidas.

Como no sistema leito de jorro existem três regiões bem distintas: o jorro, o anel e a fonte, não se consegue estimar corretamente um único coeficiente de transferência de calor para todas as regiões, pode-se no entanto estimar parâmetros a partir de condições próprias de cada região.

MATHUR & EPSTEIN (1974) fornecem uma equação para o cálculo da queda de temperatura do gás ao atravessar o leito de partículas, baseados nas temperaturas, do gás a uma distância vertical z da entrada (T_g) e na entrada (T_{ge}); e ainda na temperatura de mistura do sólido (T_{ms}).

$$\frac{T_g - T_{ms}}{T_{ge} - T_{ms}} = \exp\left[-\frac{6h_p(1-\varepsilon)z}{U\rho_g C_{pg}d_p}\right] \quad (2.2)$$

Esta equação pode ser usada para cada uma das regiões do leite, desde que sejam aplicadas às condições específicas a cada uma delas.

Para a região do jorro, onde o número de Reynolds (Re) é maior do que 1.000, ainda segundo segundo MATHUR & EPSTEIN (1974), uma equação adequada para estimar o coeficiente de transferência de calor é a de ROWE & CLAXTON (1965).

$$\text{Nu} = \text{A} + \text{B Pr}^{1/3} \text{Re}^{0,55} \quad (2.3)$$

$$\text{onde: } \text{A} = \frac{2}{1 - (1 - \epsilon)^{1/2}}$$

$$\text{B} = \frac{2}{3\epsilon}$$

Para a região do anel, onde $\text{Re} < 100$, eles sugerem a equação de LITTMAN & SLIVA (1971)

$$\text{Nu} = 0,42 + 0,35 \text{Re}^{0,8} \quad (2.4)$$

No que se refere a secagem de pastas e suspensões, MATHUR & EPSTEIN (1974) citam ROMANKOV & RASHKOVSKAYA (1968) os quais, baseados em dados obtidos a partir da secagem de tintas orgânicas, pigmentos inorgânicos e diversos outros tipos de substâncias sensíveis ao calor, propuseram uma correlação considerando que o processo é controlado pela taxa de secagem, e ocorre em período, à taxa constante, definindo o coeficiente de transferência de calor no qual se baseia o número de Nusselt da correlação, como sendo:

$$\text{h} = \frac{\text{q}}{\text{A}_p \cdot \Delta \text{T}_{\text{in}}} \quad (2.5)$$

onde:

q = taxa de calor requerida para evaporação da umidade.

A_p = Área total de partículas inertes no leito.

ΔT_m = Diferença média logarítmica entre as temperaturas, do gás e do sólido na entrada e saída do secador.

A correlação desses autores para estimar o coeficiente de transferência de calor, utilizando partículas de vidro com diâmetro variando de 2 a 5mm, é dada por:

$$Nu = 0,0597 \cdot Ar^{-0,438} \cdot Re_{(i)}^{2,0} \cdot Gu^{0,61} \left(\frac{H}{d_p} \right)^{-1,0} \quad (2.6)$$

onde:

$$Gu = \text{número de Gukhman} = \frac{T_{gs} - T_{bu}}{T_{gs}}$$

$Re_{(i)}$ = número de Reynolds baseado na velocidade do gás no

$$\text{orifício de entrada} = \frac{d_p \cdot U_i \cdot \rho_f}{\mu}$$

As faixas operacionais adequadas são as seguintes:

$$0,31 \times 10^6 \leq Ar \leq 5,0 \times 10^6$$

$$935 \leq Re \leq 1.700$$

$$0,18 \leq Gu \leq 0,292$$

$$40 \leq H/d_p \leq 55$$

LIMA (1992) apresenta resultados fluidodinâmicos e térmicos da secagem de polpa de umbu em leito de jorro, concluindo, com relação aos efeitos térmicos, que a área de troca térmica não corresponde à área de todas as partículas inertes do leito e que a eficiência térmica diminui com a vazão de polpa alimentada. A partir do cálculo do coeficiente de transferência de

calor foi determinada a fração de partículas molhadas, a qual é função direta da relação entre a vazão de polpa e o volume de partículas no leito.

ROCHA & AYUB (1993) estudaram a transferência de calor fluido-partícula durante o recobrimento de comprimidos em um leito de jorro bi-dimensional, determinando o coeficiente médio de transferência de calor convectivo, baseado na área total de partículas para várias condições experimentais. No entanto, esse é um estudo preliminar envolvendo a transferência de calor fluido-partícula no leito de jorro bi-dimensional, servindo como estimativa inicial do valor do coeficiente de transferência de calor convectivo.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 . Materiais

Os materiais utilizados foram, a polpa de acerola, e, como material inerte, partículas de poliestireno. O poliestireno foi escolhido baseado em resultados anteriores (ALMEIDA, 1991; LIMA, 1992 e LIMA, 1993) e por se tratar de um material aprovado para uso com alimentos.

- A polpa de acerola foi obtida a partir de acerolas maduras provenientes da região de Boqueirão, Paraíba, cujas propriedades são mostradas na Tabela3.1.

TABELA 3.1 - Propriedades da Polpa de Acerola

Sólidos Totais (%)	Densidade (g/cm ³)	Brix (%)
9 - 12	0,99 - 1,02	6,0

FONTE: SOARES & ALSINA (1995)

- O Poliestireno utilizado é do tipo 849, produzido pela EDN , Camaçari-Bahia., cujas propriedades físicas estão relacionadas na Tabela 3.2

TABELA 3.2 - Propriedades Físicas do Poliestireno

Propriedades	valores obtidos	Método de determinação
d_v	0,3260 cm	Pelo volume de líquido deslocado
ρ_1	0,6511 g/cm ³	Determinação da massa contida num recipiente de volume conhecido
ρ_s	1,0450 g/cm ³	Picnometria líquida
ε_i	0,411	Picnometria de comparação a ar
ϕ	0,8673	Considerando a partícula como um cilindro elíptico
a_p	2101,6 m ⁻¹	Considerando a partícula como um cilindro elíptico

FONTE: ALSINA et al(1996)

3.2 . Equipamentos

3.2.1 . Câmara de secagem

A câmara de secagem em leito de jorro, mostrada na Figura 3.1, é formada por uma coluna cilíndrica de aço inoxidável de diâmetro interno igual a 0,297 m e 0,73 m de altura, acoplada a uma base cônico-cilíndrica também de aço inoxidável com ângulo interno de 60°. A razão entre o diâmetro da coluna e o orifício de entrada do ar (D_c/D_i) é igual a 6,0. Para proporcionar o acompanhamento visual do processo de secagem, há na parte cilíndrica visores em acrílico. Uma placa defletora de tela metálica colocada no interior da coluna, acima do leito, impede o arraste das partículas inertes. O pó obtido é separado e recolhido através de um ciclone tipo Lapple de 0,15m de diâmetro e coletado em embalagens plásticas. Na entrada e ao longo da coluna cilíndrica existem orifícios para tomadas de temperatura e pressão.

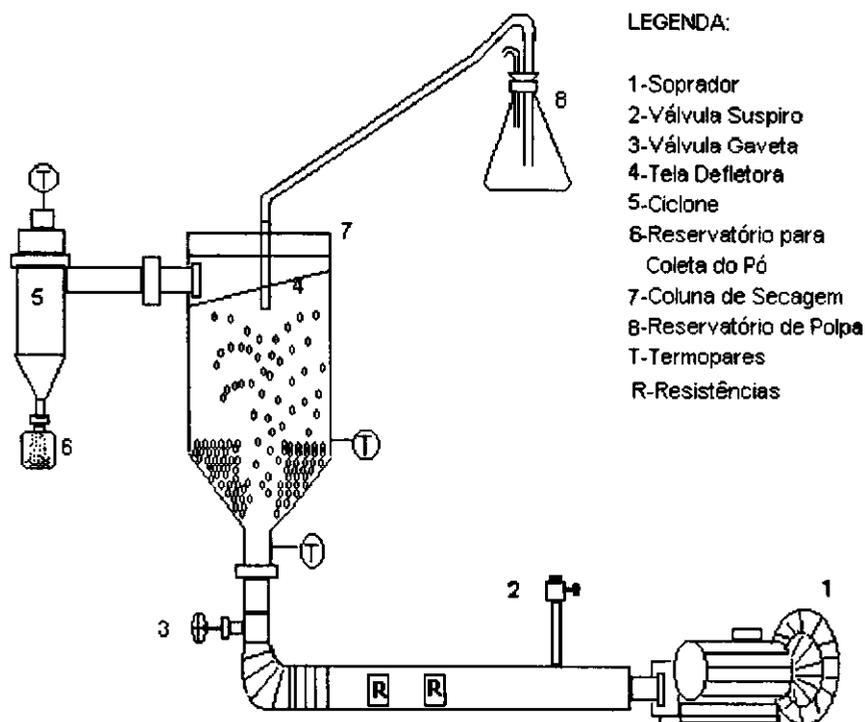


Figura 3.1 - Esquema geral do leito de jorro e seus periféricos

3.2.2 . Sistema de Impulsão e Aquecimento do Ar

Consiste de um compressor rotatório, modelo S100, marca EBERLE com potência 4Hp, que impulsiona o ar ao longo de uma tubulação em que estão acopladas duas resistências tipo espiral, com potência total igual a 1.750 Watts, uma ligada diretamente à rede e outra a um auto-transformador variável, para que se possa controlar a temperatura, variando-se a tensão de entrada. Ainda na tubulação, há duas válvulas, uma tipo globo de ½ pol. logo após a saída do soprador e outra tipo gaveta próximo à entrada do secador, ambas para controle da vazão do ar.

Termopares de ferro-constantan são introduzidos nos orifícios na entrada do secador e ao longo da câmara de secagem e na saída do ciclone para medidas de temperatura. Os termopares são ligados a uma chave seletora e a um milivoltímetro.

3.2.3 . Medidas de pressão e velocidade de saída do ar

As tomadas de pressão são feitas através de sondas ligadas a um manômetro em "U" e posicionadas na entrada do secador e ao longo da câmara de secagem.

As medidas de velocidade de saída do ar são efetuadas na parte superior do ciclone com um anemômetro digital com sensor tipo hélice.

3.2.4 . Sistema de alimentação da polpa

Alimenta-se a polpa de acerola por gravidade através de um conduto plástico conectado a um erlemeyer de 1000ml, graduado, com tampa de borracha, onde existem dois orifícios nos quais são inseridos dois tubos de vidro, um para entrada do ar e outro com o conduto. O conduto é introduzido na coluna por orifícios centrais na tampa da coluna e na tela defletora.

3.2.5 . Equipamentos auxiliares

- Anemômetro Digital, modelo AM 4201, marca LUTRON, com medidas de velocidade do ar de 0,4 a 30 m/s, através de um sensor tipo hélice de baixo fricção.
- Auto-transformador variável, tipo 216B, com IN V 240 e OUT V 0-280, fabricado por THE SUPERIOR ELETRIC CO. BRISTOL CONN USA.
- Balança Arja com capacidade máxima de 150Kg.
- Balança Mettler, tipo PC 440, capacidade 440 g, com precisão de leitura 0,001 g, fabricada por Mettler Instrumentos AG-Suíça.
- Balança Sartorius, tipo EMBH gottinger com precisão de leitura de 0,1 g e capacidade de 1000 g, fabricada por Sartorius, Alemanha Federal.

- Cronômetro marca Gallenkamp, referência TKM-340Y, fabricado por Gallenkamp-Suíça.
- Estufa de secagem e esterilização, modelo 315 SE, escala 0-10, temperatura máxima 180 °C, fabricado pela FANEM - São Paulo, Indústria Brasileira.
- Higrômetro/Termômetro, modelo HT-3003 com medidores de umidade relativa entre 10-95 % e temperatura de 0 a 50 °C fabricado pela LUTRON.
- Milivoltímetro, modelo MD-045, capacidade de leitura até 199,9 mv com precisão de 0,1 mv, fabricado pela ECB-Equipamentos Científicos do Brasil Indústria Brasileira.

3.3. Metodologia

3.3.1. Extração da Polpa

A fruta devidamente lavada e selecionada é processada em liquidificador industrial por um tempo médio de 1 minuto e em seguida, prensada em peneiras de nylon com malhas de 22 mesh. Após o processamento a polpa é acondicionada em embalagens plásticas próprias para congelamento e armazenada em freezer doméstico a -10 °C. Antes do processo de secagem a polpa é descongelada e só utilizada quando está a temperatura ambiente.

3.3.2. Secagem

Trabalhou-se com alturas de inertes nas regiões cônica e cilíndrica da coluna de secagem. O procedimento está descrito a seguir:

- Enchimento da coluna com uma quantidade de inerte equivalente a altura do leito desejada, procurando um empacotamento uniforme.
- Acionamento do soprador e ajuste da velocidade do ar requerida, medida através de um anemômetro digital na extremidade superior do ciclone.
- Pré-aquecimento do sistema com o inerte nas condições operacionais selecionadas, até atingir a temperatura de entrada do ar desejada.
- Tomada de dados de temperatura na entrada, no interior e na saída da coluna, sendo que na saída é também medida a temperatura de bulbo úmido do gás.
- Alimentação de uma quantidade pré-fixada de polpa. Na maioria dos experimentos a quantidade de polpa por alimentação, foi igual a 2.0% da massa de inertes, isto é, $M_p/M_i = 0,02$.
- Acompanhamento da secagem com tomadas de dados imediatamente após a alimentação e a intervalos de 10 minutos.
- Após 20 minutos de secagem, há nova alimentação seguindo o procedimento anterior. O processo é repetido até três alimentações.
- Depois da terceira e última alimentação, são tomados dados de temperatura à intervalos de 10 minutos até completar 60 minutos.
- Finalizado o experimento, o pó coletado é quantificado e submetido à análise de umidade.
- Apenas uma experiência conteve seis alimentações, porém seguindo a mesma metodologia.

3.3.3 - Determinação do Rendimento e Umidade do Pó

O pó coletado após o período de secagem, foi quantificado e medido o rendimento como sendo a relação entre a massa de pó obtido em base seca e o total de sólidos presentes na polpa alimentada, segundo a equação abaixo:

$$R = \frac{m_{po}}{m_{sp}} \quad (3.1)$$

A umidade contida no pó, foi medida em base seca, quilogramas de água por quilogramas de pó seco. Utilizando-se para isto o método da estufa, ou seja, a amostra do pó era pesada e colocada em uma estufa de secagem a 70 °C durante 24 horas, tempo suficiente para peso constante, sendo pesada novamente. A umidade em base seca foi obtida pela equação:

$$Y = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (3.2)$$

3.3.4 . Determinação dos Sólidos totais na polpa

Os sólidos totais contidos na polpa foram medidos utilizando-se o método da estufa, sob as mesmas condições em que se determinou a umidade do pó.

$$S_t = \frac{m_f}{m_i} \quad (3.3)$$

3.3.5 . Caracterização do leito

Para análise térmica do processo de secagem são também necessários conhecimentos sobre a fluidodinâmica do leito.

A caracterização do leito foi realizada através das curvas dinâmicas, de acordo com o procedimento usual, descrito por LIMA (1996).

.Alguns desses dados , estão listados nas tabelas 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 - Propriedades Fluidodinâmicas do Leito com 2,0% de polpa

H (m)	U_{jm} (m/s)	ΔP_M (kgf/m ²)	Taxa de Circulação de Sólidos (kg/s)
0,18	0,40	744,83	78,436
0,23	0,55	1276,97	81,000
0,26	0,57	1377,63	-
0,28	0,60	1265,60	-

FONTE - Lima ,L.M.R., Dissertação de Mestrado (no prelo)

TABELA 3.4 - Propriedades Fluidodinâmicas do Leito com 3,0% de polpa

H (m)	U_{jm} (m/s)	ΔP_M (kgf/m ²)
0,25	0,49	1632,00

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os dados referentes ao estudo de parâmetros envolvidos na desidratação de polpa de acerola em leito de jorro convencional, para quatro alturas do leito de inertes entre 0,18m e 0,28m, em três vazões do ar com base na relação entre a vazão de operação e a vazão de jorro mínimo (Q/Q_{jm}) de 1,5; 1,7 e 1,8. A quantidade de polpa alimentada, dada pela relação entre a massa de polpa e a massa de inertes (M_p/M_i) foi mantida igual a 2,0% para cada alimentação em todos os casos, com exceção do experimento 8, que foi realizado com M_p/M_i igual a 3,0% por alimentação.

4.2. Influência da Altura do Leito sobre o Rendimento e Umidade do Pó

Observando a Figura 4.1, percebe-se que para uma mesma vazão de ar, o aumento da altura do leito melhora o rendimento do pó. Nota-se também que o aumento da vazão do ar provoca um aumento no rendimento do pó. Uma possível explicação é que, de acordo com os dados obtidos por ALSINA et al (1995) e LIMA (1996), a elevação da altura do leito, proporciona uma maior circulação de sólidos, aumentando o atrito entre as partículas, propiciando assim a quebra da película e o arraste do pó pelo gás, facilitado também pelo acréscimo da vazão do ar.

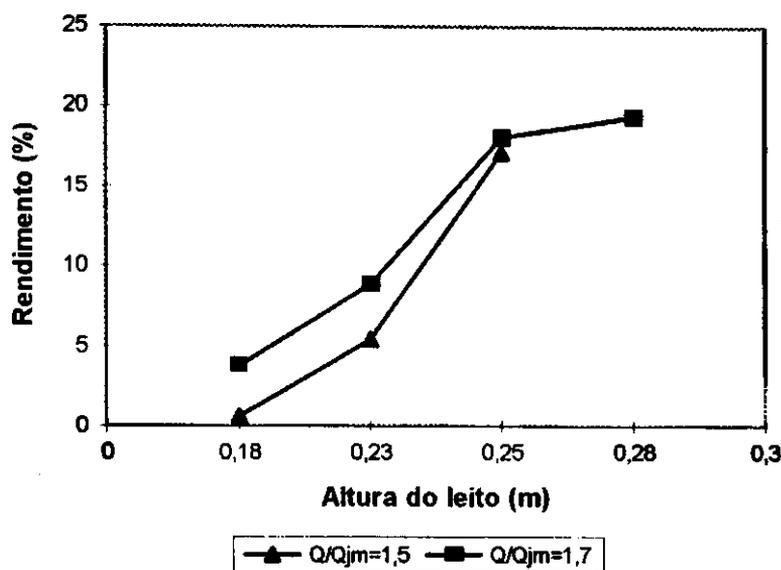


FIGURA 4.1 - Efeito da Altura do Leito no Rendimento do Pó. $M_p/M_i = 2,0\%$,
 $T_{ge} = 45,5 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$

A Figura 4.2 mostra que a umidade do pó decresce com o aumento da altura do leito para vazão do ar dada por Q/Q_{jm} igual a 1,5; enquanto que, aumentando esta relação para 1,7 a umidade do pó decresce, muito pouco, sendo praticamente independente da altura do leito.

Para as alturas do leito iguais a 0,18m e 0,23m, ou seja, na região cônica, os valores da umidade do pó obtidos para a relação Q/Q_{jm} igual a 1,7 são consideravelmente menores do que os obtidos para Q/Q_{jm} igual a 1,5. Para alturas do leito na região cilíndrica, isto é, 0,25m e 0,28m, este efeito não é tão relevante. A mesma tendência ocorre no rendimento do pó como se vê na Figura 4.1. A redução da umidade do pó pode ser explicado pelo fato de que o aumento da vazão aumenta as taxas de transferência e este efeito pode ser maior do que o efeito causado pela redução do tempo de residência que é também consequência do aumento da vazão do ar.

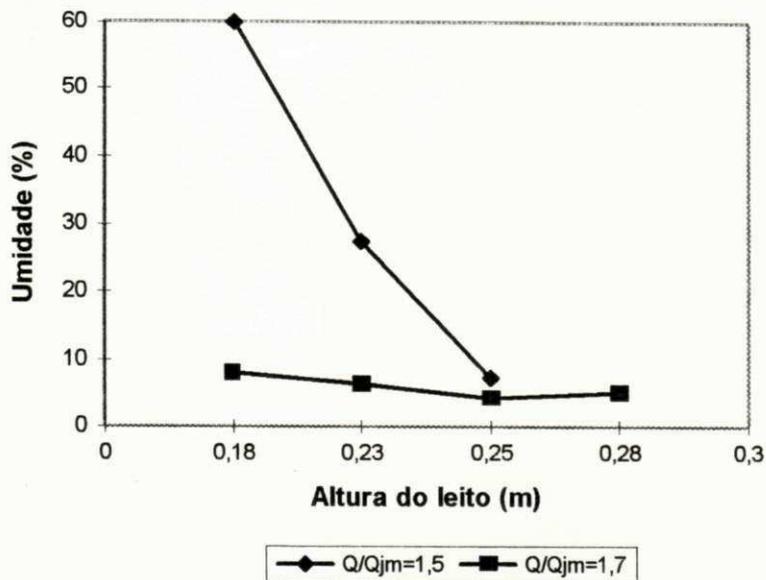


FIGURA 4.2 - Efeito da Altura do Leito na Umidade do Pó.

$$M_p/M_i = 2,0\%, T_{ge} = 45,5 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.3. Influência da Temperatura e da Vazão de entrada do Ar no Rendimento e na Umidade do Pó

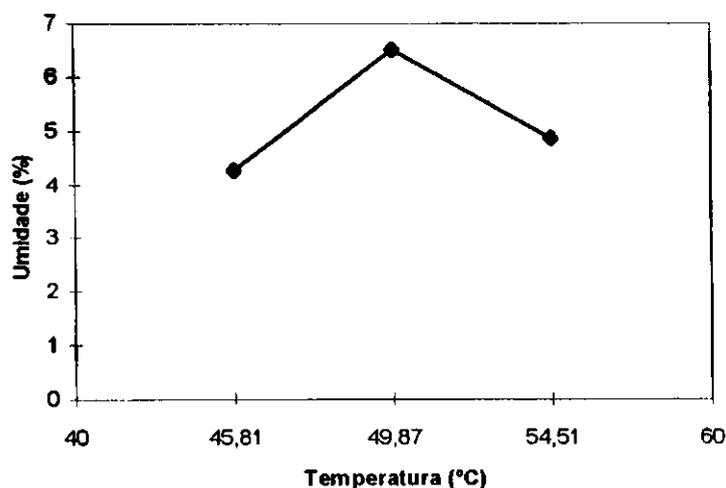
Dentre as alturas do leito estudadas, percebeu-se que a de 0,25 m forneceu bons resultados independentemente da vazão escolhida, por isto essa altura foi selecionada para estudo do desempenho da secagem, variando Q/Q_{jm} , a temperatura de entrada do ar e o número de alimentações.

Na Figura 4.3, pode-se observar o surgimento de um máximo na umidade do pó quando do aumento da temperatura de entrada do ar, fato também observado na secagem de sangue animal por RÉ & FREIRE (1986). e na secagem de polpa de umbu por LIMA (1993). Possivelmente isto ocorreu devido à quebra prematura da película.

Na Figura 4.4, é mostrado o efeito da temperatura de entrada do ar sobre o rendimento do pó. Como era esperado, o aumento da temperatura,

favorece a separação do pó, devido ao incremento na taxa de secagem. Porém, no caso da acelora, o aumento no rendimento é muito pequeno, visto que é necessário um aumento de aproximadamente 10 °C para que se tenha um acréscimo de cerca de 2% no rendimento. Na faixa utilizada, não foi observado incremento da aderência com a temperatura, contrariamente ao encontrado por outros autores, como por exemplo LAZAR (1956) desidratando polpa de tomate em secador spray. Maiores estudos acerca de aderência deverão ser realizados para esclarecer esse ponto.

Deve-se notar que, devido aos cálculos terem sido realizados na base seca, na temperatura de 49,87 °C, onde o máximo de umidade ocorre, o rendimento do pó em base úmida apresenta valores aparentes maiores do que os mostrados na Figura 4.4.



1

FIGURA 4.3 - Efeito da Temperatura de Entrada do ar sobre a Umidade do Pó obtido. $H = 0,25\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$

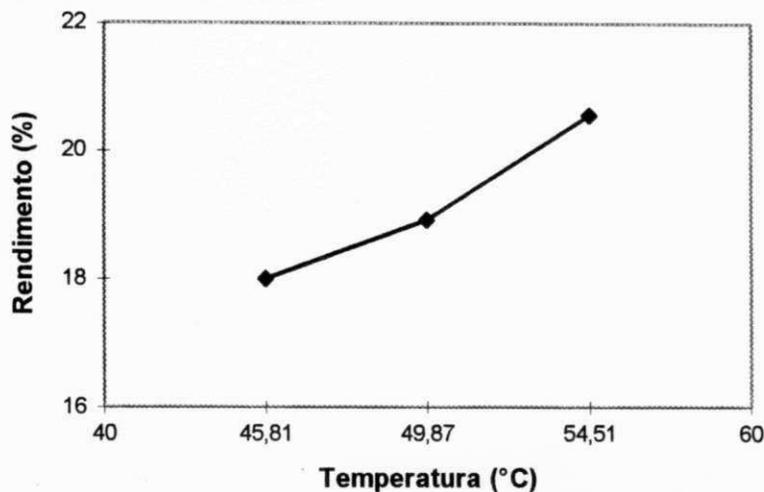


FIGURA 4.4 - Efeito da Temperatura de Entrada do ar sobre o Rendimento do Pó obtido. $H = 0,25$; $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$

Para uma melhor análise da influência da vazão, nas Figuras 4.5 e 4.6 são mostrados os resultados sobre a umidade e o rendimento para uma altura do leito igual a 25 cm, na região cilíndrica do leito. Observa-se que a vazão de entrada do ar que apresentou melhores resultados foi dada por Q/Q_{jm} igual a 1,7, o que fornece uma menor umidade e um melhor rendimento quanto ao pó coletado. A queda do desempenho para Q/Q_{jm} igual a 1,8 nos leva a crer que, a partir de $Q/Q_{jm} = 1,7$, a redução do tempo de residência afeta mais o processo do que o aumento das taxas de transferência de calor e massa.

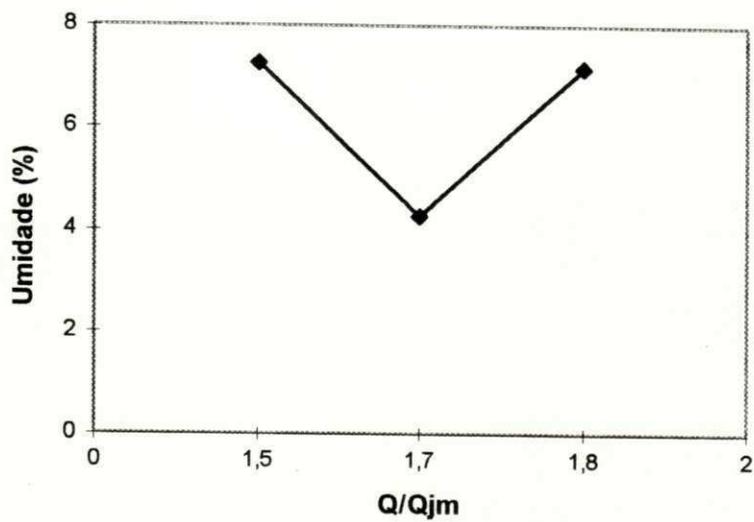


FIGURA 4.5 - Efeito da Relação Q/Q_{jm} na Umidade do Pó. $H = 0,25m$; $T_{ge} = 45,5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

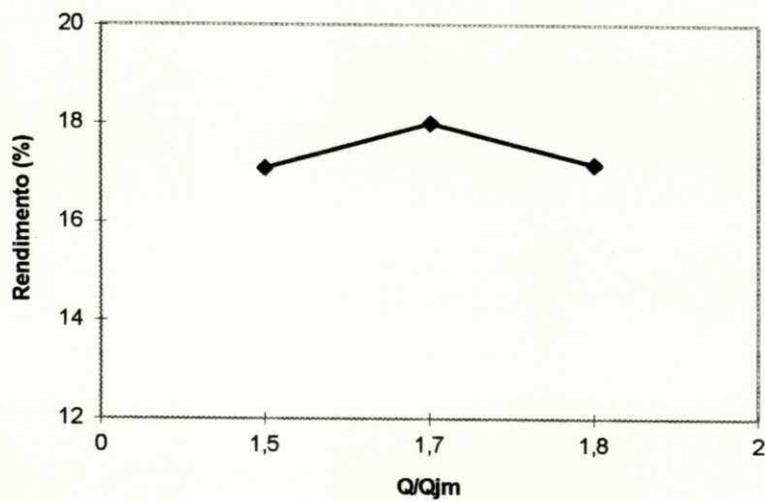


FIGURA 4.6 - Efeito da Relação Q/Q_{jm} no Rendimento do Pó. $H = 0,25m$; $T_{ge} = 45,5 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

4.4. Efeito do Tempo de Secagem ao Longo do Experimento sobre a Umidade Absoluta do ar na Saída do Secador

Para uma Análise do desempenho do secador no sistema de operação com alimentação intermitente, foi acompanhada a evolução da umidade de saída do ar e dos perfis de temperatura ao longo do experimento.

As Figuras 4.7 a 4.11, mostram o comportamento da umidade absoluta do ar na saída do secador. Nota-se que após cada alimentação há um pico na umidade e logo em seguida uma tendência a estabilização. Depois de todas as alimentações a umidade torna-se praticamente constante, daí esse período ser considerado período de secagem à taxa constante, denominado aqui, simplesmente secagem.

A partir dessas informações e dos perfis de temperatura, o período à taxa constante foi escolhido para o estudo da eficiência térmica, do coeficiente de transferência de calor e dos parâmetros nele envolvidos, pois a instabilidade entre as alimentações torna a modelagem do sistema bastante complexa.

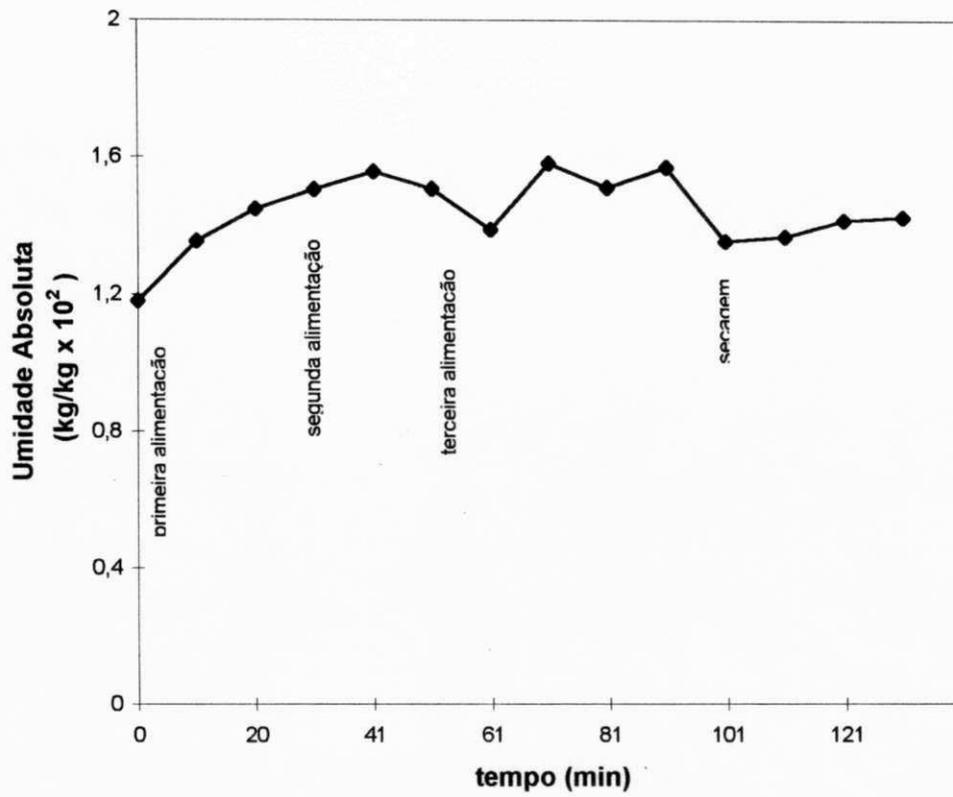


FIGURA 4.7 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na saída do Secador. $H = 0,18\text{m}$, $T_{ge} = 47,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$.

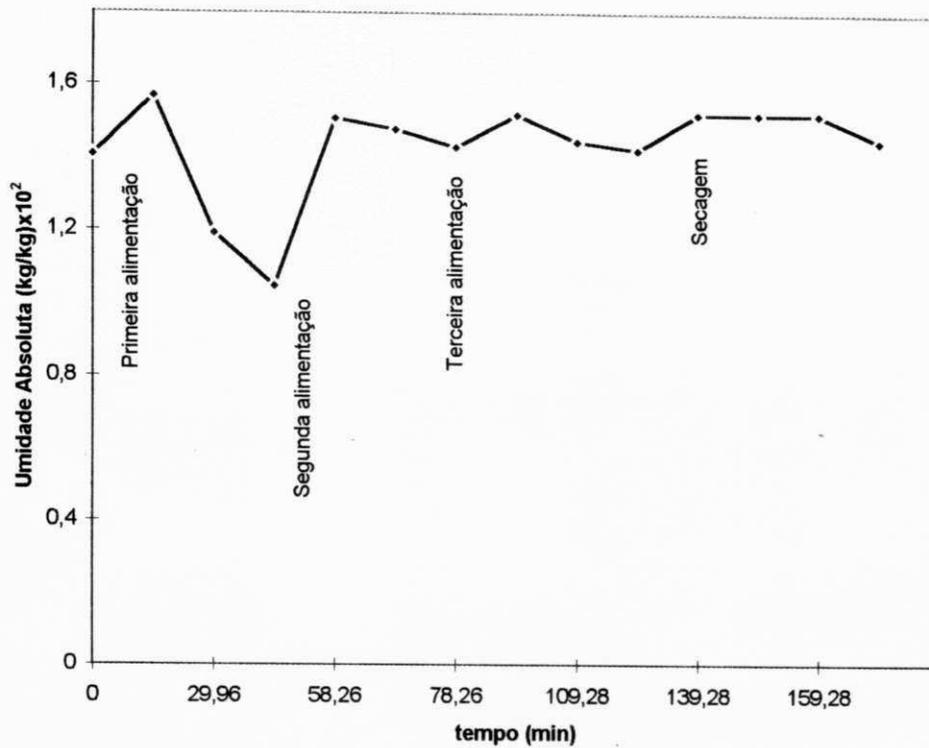


FIGURA 4.8 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na saída do Secador. $H = 0,23\text{m}$, $T_{ge} = 46,60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$.

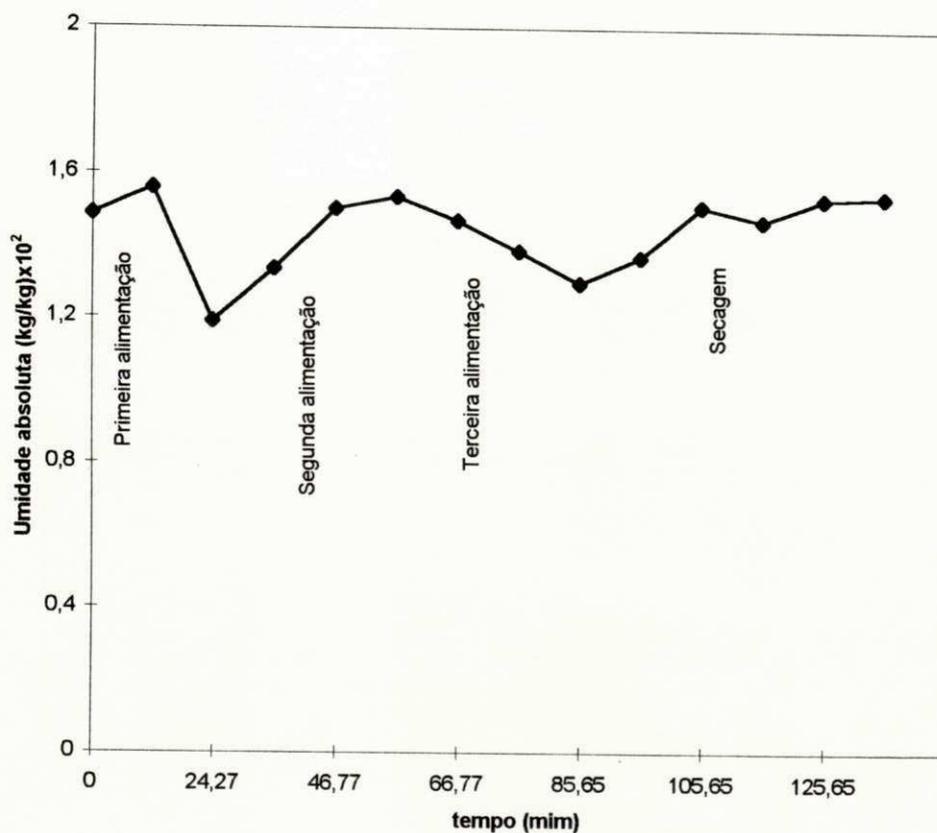


FIGURA 4.9 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na saída do Secador. $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 45,81^{\circ}\text{C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$.

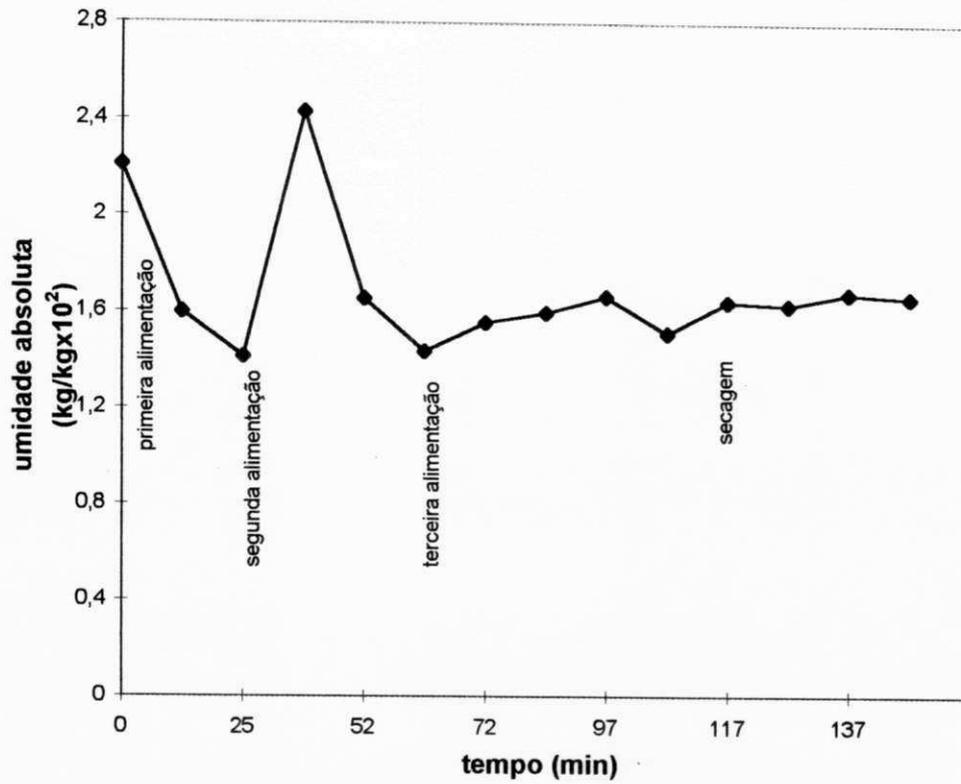


FIGURA 4.10 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na saída do Secador. $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 54,51\text{ }^\circ\text{C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$

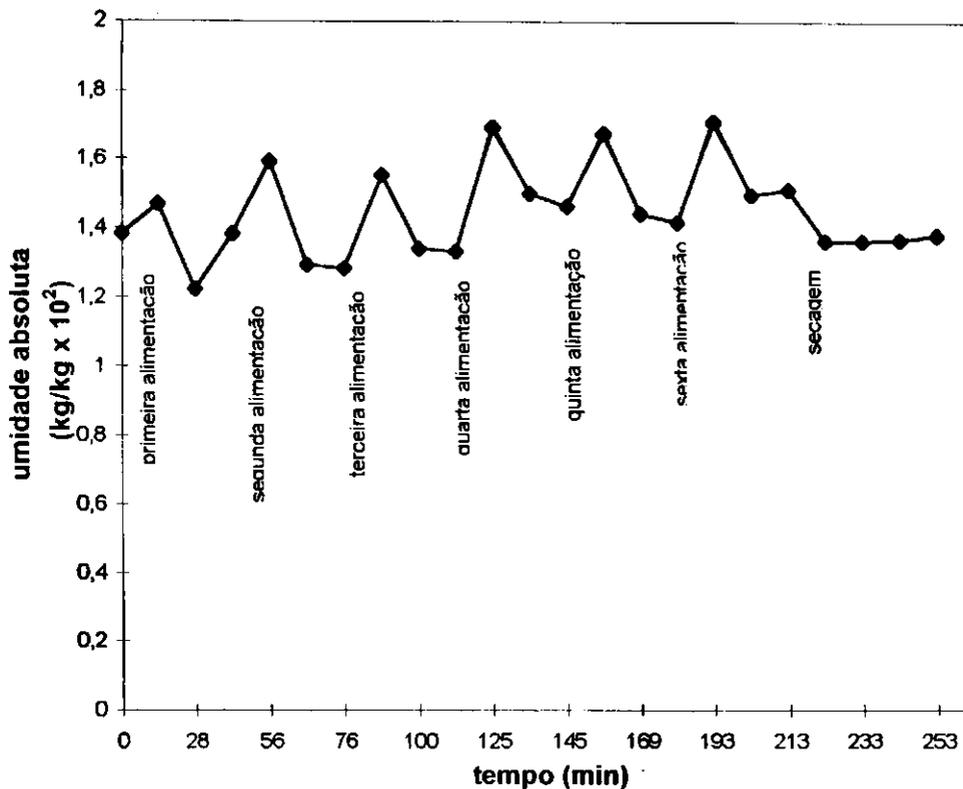


FIGURA 4.11 - Efeito do Tempo de Secagem na Umidade Absoluta do Ar na saída do Secador. $H = 0,25\text{m}$, $T_{ge} = 44,72\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_p/M_i = 2,0\%$, $Q/Q_{jm} = 1,7$.

4.5. Perfil de Temperatura ao Longo do Experimento

Os perfis de temperatura ao longo do experimento para altura do leito igual a 0,25m, variando-se a vazão do ar e a quantidade de polpa alimentada podem ser vistos nas Figuras 4.12 a 4.15.

Nas Figuras 4.12 e 4.14, observa-se que o perfil radial de temperatura cresce desde a primeira alimentação até o período dito, secagem, onde não há mais alimentações. Vale observar que as tomadas de temperatura para cada alimentação são feitas imediatamente após cada uma delas. Como a temperatura das partículas aumenta ao longo do experimento tendendo a estabilizar-se em um valor próximo ao da temperatura de entrada do ar, e, a

quantidade de polpa alimentada é a mesma para cada alimentação, é natural que, por exemplo, os valores obtidos imediatamente após a segunda alimentação sejam maiores do que os imediatamente após a primeira e assim por diante até o período após todas as alimentações onde o perfil tende, claramente, à temperatura de entrada do ar.

A evolução dos perfis radiais de temperatura para os experimentos 04 e 08 pode ser melhor observada nas Figuras 4.13 e 4.15 respectivamente. Nelas se pode ver claramente que a temperatura aumenta entre as alimentações, tendo uma suave queda imediatamente após cada uma delas, ficando praticamente constante no período final (secagem).

A partir dos perfis radiais de temperatura, pretendia-se estimar o diâmetro do jorro. No entanto, não foi possível observar uma transição nítida que permitisse utilizar esse método como medida indireta desse parâmetro tal como fez LIMA (1992) operando com polpa de umbu

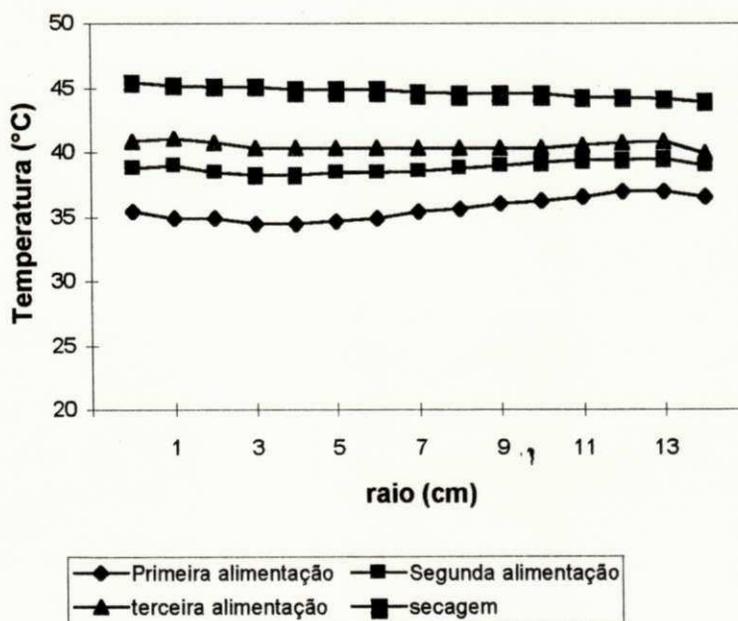


FIGURA 4.12 - Perfil Radial de Temperatura ao Longo do Experimento 04
 $H = 0,25\text{m}$, $Z = 0,37\text{m}$, $Q/Q_{jm} = 1,7$; $M_p/M_i = 2,0\%$

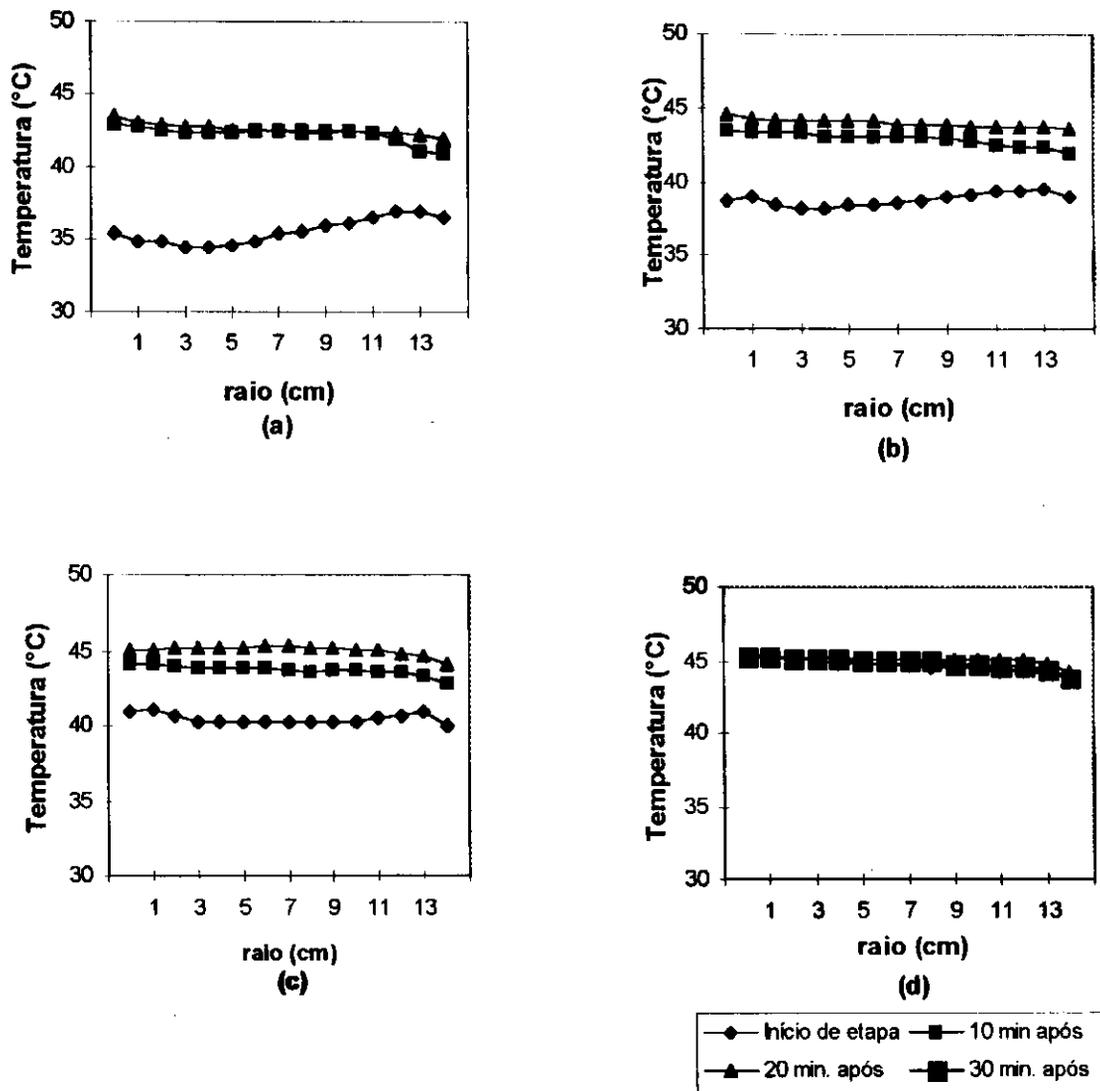


FIGURA 4.13 - Evolução dos Perfis Radiais de Temperatura com as Alimentações Sucessivas. $H = 0,25\text{m}$, $Z = 0,37\text{m}$, $Q/Q_{jm}=1,7$; $M_p/M_i = 2,0\%$, Experimento - 04

- (a) Primeira alimentação (b) Segunda alimentação
(c) Terceira alimentação (d) Secagem

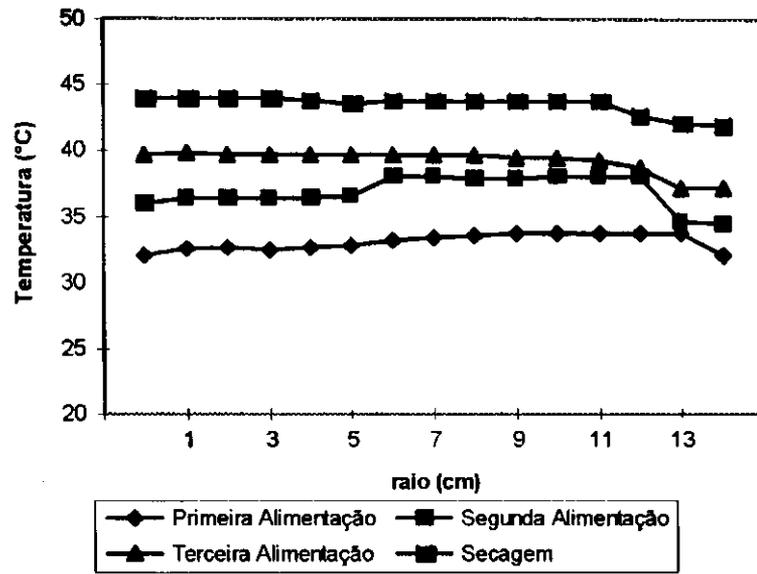


FIGURA 4.14 - Perfil Radial de Temperatura ao Longo do Experimento - 08
 $H = 0,25\text{m}$, $Z = 0,37\text{m}$, $Q/Q_{jm} = 1,5$; $M_p/M_i = 3,0\%$

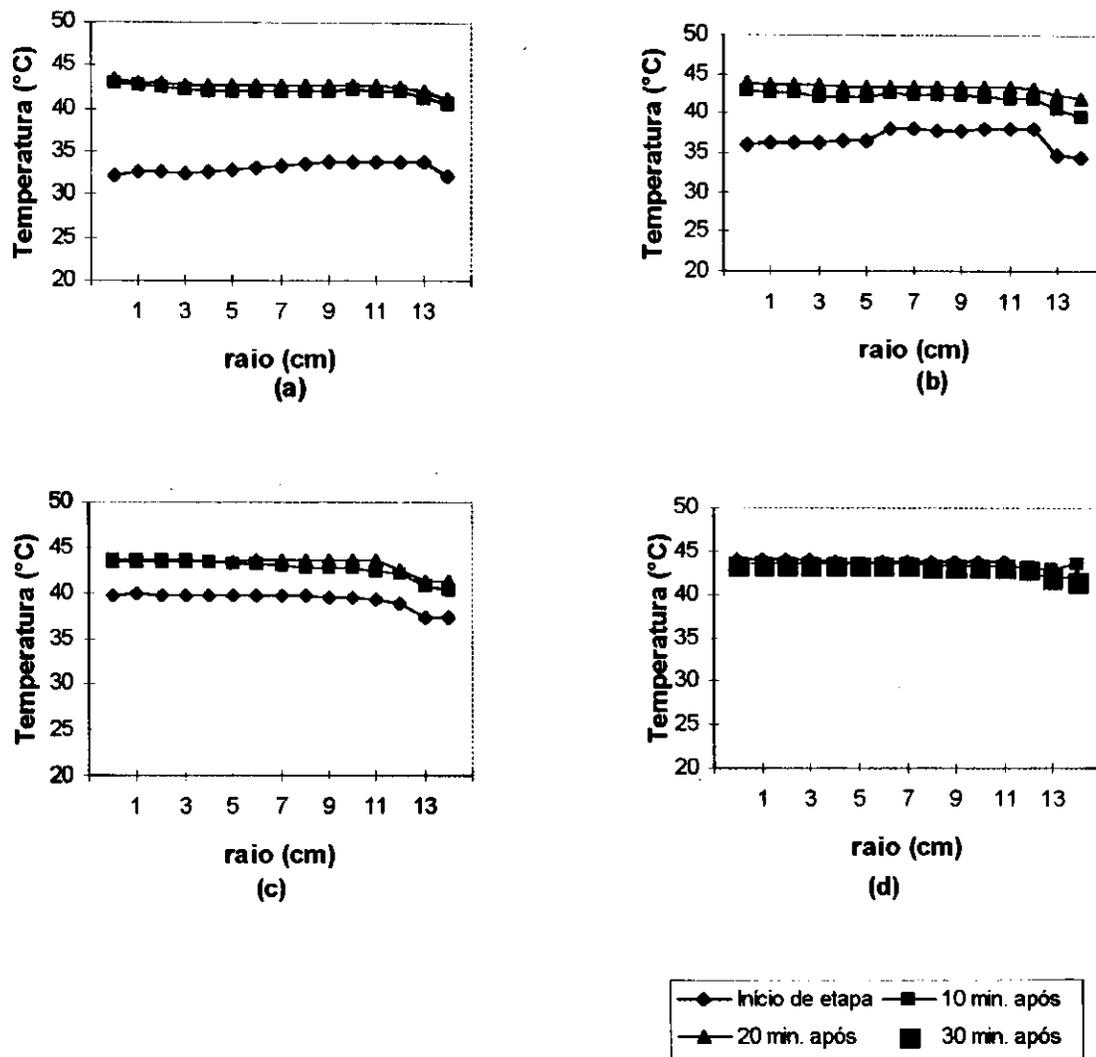


FIGURA 4.15 - Evolução dos Perfis Radiais de Temperatura com as Alimentações Sucessivas. $H = 0,25m$, $Z = 0,37m$, $Q/Q_{jm}=1,5$; $M_p/M_i = 3,0\%$, Experimento - 08

(a) Primeira alimentação

(b) Segunda alimentação

(c) Terceira alimentação

(d) Secagem

CAPÍTULO 5

MODELAGEM

Como foi assinalado no capítulo anterior, os dados obtidos no período de secagem à taxa constante foram utilizadas para a modelagem do sistema. As suposições propostas para o modelo são:

- a - Equilíbrio térmico entre as partículas inertes e o ar.
- b - A secagem ocorre no período à taxa constante e é controlada pelas taxas de transferência de calor.
- c - Equilíbrio térmico entre o pó obtido e o ar de secagem.
- d - A umidade do pó coletado é equivalente a do pó retido no inerte.

As suposições utilizadas são as mesmas propostas por LIMA (1992) e LIMA & ALSINA (1994) para desidratação de polpa de umbu. A diferença principal com esses autores é que, devido a alimentação ser intermitente, em nosso caso, foi aplicado o modelo no período sem alimentação de polpa, $W_p = 0$. Também no caso de polpa de umbu foram utilizados dados para altura do leito na região cônica, enquanto que neste trabalho a modelagem foi aplicada tanto na região cônica como na cilíndrica.

Inicialmente foram obtidos os dados psicrométricos a partir das temperaturas de bulbo seco do ar, da umidade absoluta do ar na entrada do secador e das temperaturas de bulbo seco e úmido para o ar na saída do secador, usando um programa FORTRAN que se encontra no anexo1, implementado por SILVA 1991.

5.1 . Balanços de Massa e Energia

Os balanços de energia e massa foram realizados no período à taxa constante, e todas as vazões são expressas em base seca.

- Balanço Macroscópico de Água

Em um regime contínuo, o balanço seria:

$$y_e \cdot W_{giu} + U_p \cdot W_p = y_s \cdot W_{giu} + U_{pó} \cdot W_p$$

Entretanto, neste trabalho, no período à taxa constante não houve alimentação de polpa, portanto $W_p = 0$. Logo, a taxa de água evaporada será dada por :

$$W_{sev} = W_{giu} (y_s - y_e) \quad (5.1)$$

- Balanço Macroscópico de Energia

Usando as considerações:

- Temperatura de referência $T_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Negligenciando o calor de mistura e as variações do calor específico com a temperatura.

temos para o regime contínuo:

$$W_{giu} \cdot H_e + W_p \cdot U_p \cdot C_{pH_2O} \cdot T_0 + W_p \cdot C_{pp} \cdot T_0 = W_{giu} \cdot H_s + W_p \cdot U_{pó} \cdot C_{pH_2O} \cdot T_{gs} + W_p \cdot C_{pp} \cdot T_{gs} + q_p$$

No período à taxa constante, sem alimentação de polpa, temos:

$$q_p = W_{giu} (H_e - H_s) \quad (5.2)$$

Na equação 5.2 foi desprezada a contribuição devida ao arraste do pó.

O calor utilizado na desidratação da polpa pode ser medido a partir da taxa de água evaporada e do calor latente de vaporização da água.

$$q = W_{\text{ev}} \cdot \lambda \quad (5.3)$$

O calor total cedido pelo gás é dado por:

$$q_c = q + q_p \quad (5.4)$$

A eficiência térmica (η) é definida como sendo a razão entre o calor gasto na desidratação e o calor total cedido pelo gás.

$$\eta = \frac{q}{q_c} \quad (5.5)$$

Os resultados quanto a taxa de água evaporada, o calor usado na desidratação, o calor cedido pelo gás, o calor perdido para o ambiente e a eficiência térmica, são apresentados na tabela 5.1. As condições operacionais podem ser vistas na tabela A1 do apêndice A.

5.2 . Coeficiente de Transferência de Calor Fluido-Partícula

Baseados no trabalho de LIMA(1992), calculou-se o coeficiente de transferência de calor experimental e por duas correlações, uma considerando a área de todas as partículas como a área de troca térmica e outra considerando apenas o anel.

5.2.1. Coeficiente de Transferência de Calor experimental (h_{exp})

Foi calculado utilizando a definição de ROMANKOV & RASHKOVSKAYA(1968), a qual considera a área de troca térmica como sendo a área total de partículas inertes no leito.

$$h = \frac{q}{\Delta T_{ln} \cdot A_p} \quad (5.6)$$

e q calculado pela equação (5.3)

onde:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{ge} - T_{bu}) - (T_{gs} - T_{bu})}{\ln \left[\frac{T_{ge} - T_{bu}}{T_{gs} - T_{bu}} \right]} \quad (5.7)$$

é a média logarítmica entre a temperatura do gás e do sólido na entrada e na saída do secador. A temperatura do sólido é considerada como a temperatura de bulbo úmido do gás na entrada do secador. A suposição está fundamentada em medidas realizadas por ALMEIDA (1991)

A área total de partículas inertes no leito é:

$$A_p = \frac{m_i \cdot a_p}{\rho_s} \quad (5.8)$$

5.2.2. Coeficiente de transferência de calor pela correlação de ROMANKOV & RASHKOVSKAYA(1968) (h_{Rom})

A correlação de ROMANKOV & RASHKOVSKAYA, apesar de ser uma das mais recomendadas, sempre apresenta diferenças com os resultados experimentais, devido a consideração feita para a área de troca térmica (área total de partículas inertes no leito). LIMA (1992)

concluiu em seus resultados que a área de troca térmica não corresponde à área de todas as partículas inertes do leito e sim a fração de partículas molhadas.

A correlação é dada por:

$$Nu = 0,0597 \cdot Ar^{-0,438} \cdot Re_{(i)}^{2,0} \cdot Gu^{0,61} \cdot \left(\frac{H}{d_p}\right)^{-1,0} \quad (5.9)$$

onde:

$$Ar = g \cdot d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot \frac{1}{\mu^2} \quad (5.10)$$

$$Gu = \frac{T_{gs} - T_{bu}}{T_{gs}} \quad (5.11)$$

$$Re_{(i)} = \frac{d_p \cdot U_i \cdot \rho_g}{\mu} \quad (5.12)$$

A correlação apresenta as seguintes limitações:

$$0,31 \times 10^6 \leq Ar \leq 5,0 \times 10^6$$

$$935 \leq Re_{(i)} \leq 1.700$$

$$0,18 \leq Gu \leq 0,292$$

$$40 \leq H/d_p \leq 55$$

No nosso caso

$$Ar = 0,9046 \times 10^6$$

$$3.700 \leq Re_{(i)} \leq 6.633$$

$$0,29 \leq Gu \leq 0,40$$

$$55 \leq H/d_p \leq 76,7$$

Observa-se que as condições do presente trabalho fogem das faixas de aplicabilidade, especialmente o $Re_{(i)}$. Entretanto as diferenças não parecem suficientes para explicar a diferença de três ordens de magnitude nos resultados, como será visto mais adiante.

5.2.3. Cálculo do Coeficiente de Transferência de Calor pela Correlação de WHITAKER(1977) (h_w)

Foi usada a correlação de WHITAKER (1977) para transferência de calor, tomando-se como verdade que toda a evaporação ocorre no anel (MATHUR & EPSTEIN, 1971 e PONTE & FREIRE, 1989) e basea-se nas seguintes suposições:

- A temperatura do gás, embora varie axialmente, é radialmente uniforme. O que pode ser observado nos perfis de temperatura. Figuras 12 e 13.
- Escoamento pistão admitindo que o perfil de velocidade segue o mesmo comportamento do perfil de temperatura.
- A velocidade do gás no anel não varia com a vazão total. Esta suposição foi verificada por vários autores, como BECKER (1961) e GRBAVCIC et al (1976) citados por LIMA (1992) e REYES & MASSARANI (1991).
- A região do anel comporta-se como leito fixo e as trocas térmicas entre o jorro e o anel são desprezíveis.

A correlação de WHITAKER(1977) aplicada a leitos fixos é dada por:

$$\text{Nu} = \left(0,4 \text{Re}^{\frac{1}{2}} + 0,2 \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right) \text{Pr}^{0,4} \quad (5.13)$$

onde:

$$\text{Re} = \frac{d_p \cdot U_a \cdot \rho_g}{\mu(1 - \varepsilon_a)} \quad (5.14)$$

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot d_p}{k_g} \left[\frac{\varepsilon_a}{1 - \varepsilon_a} \right] \quad (5.15)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_{pg} \cdot \mu}{k_g} \quad (5.16)$$

Limitações:

$$3,7 \leq \text{Re} \leq 8.000$$

$$\text{Pr} \approx 0,7$$

$$0,34 \leq \varepsilon_a \leq 0,74$$

em nosso caso:

$$76 \leq \text{Re} \leq 164$$

$$\text{Pr} \approx 0,7$$

$$\varepsilon \approx 0,44$$

As condições operacionais encontram-se dentro da faixa de aplicabilidade da correlação.

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor pela correlação de WHITAKER, necessita-se da porosidade e da velocidade do gás no anel.

Considerando a porosidade do anel como sendo a de mínima fluidização, calculou-se a porosidade naquela posição usando a equação de WEN and YU (1966) para porosidade mínima de fluidização.

$$\frac{1}{\phi \cdot \epsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad (5.16)$$

A velocidade mínima de fluidização é obtida a partir da equação de ERGUN (1952):

$$Ar = \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \cdot Re_{mf} + \frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \cdot Re_{mf}^2 \quad (5.17)$$

onde:

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g \cdot U_{mf} \cdot d_v}{\mu} \quad (5.18)$$

Para a obtenção da velocidade média no anel, utilizou-se o modelo de MAMURO & HATTORI(1968), modificado por GRBAVCIC et al (1976):

$$\frac{U_a}{U_{mf}} = 1 - \left[1 - \frac{z}{H_{máx}} \right]^3 \quad \text{para qualquer } H \quad (5.19)$$

Integrando a equação (5.17) para o intervalo Δz , z variando de z_1 até H , temos:

$$\frac{\overline{U}_a}{U_{mf}} z_{z_1}^H = z_{z_1}^H - \left[\frac{\left(1 - \frac{z}{H_{má x}}\right)^4}{4} (-H_{má x}) \right] \Big|_{z_1}^H \quad (5.19a)$$

logo:

$$\overline{U}_a = U_{mf} + \frac{U_{mf} \cdot H_{má x}}{4(H - z_1)} \left[\left(1 - \frac{H}{H_{má x}}\right)^4 - \left(1 - \frac{z_1}{H_{má x}}\right)^4 \right] \quad (5.19b)$$

Para $z_1 = 0$ em (5.18b), têm-se:

$$\overline{U}_a = U_{mf} \left\{ 1 - \frac{H_{má x}}{4H} \left[1 - \left(1 - \frac{H}{H_{má x}}\right)^4 \right] \right\} \quad (5.20)$$

Para $z = H$ em (5.18a), têm-se:

$$U_{aH} = U_{mf} \left[1 + \frac{H_{má x}}{4H} \left(1 - \frac{H}{H_{má x}}\right)^4 \right] \quad (5.21)$$

onde, a altura máxima jorrável é dada pela correlação de LEFROY e DAVIDSON:

$$H_{má x} = 0,67 \frac{D_c^{\frac{4}{3}}}{d_p^{\frac{1}{3}}} \quad (5.22)$$

Os valores obtidos para o coeficiente de transferência de calor experimental e pelas correlações, podem ser vistos na tabela 5.2..

5.3 . Cálculo da Área Efetiva de Troca Térmica (A_{ef})

A Área efetiva de troca térmica é encontrada a partir do coeficiente de transferência de calor obtido pela correlação de WHITAKER (1977), segundo a definição abaixo:

$$h = \frac{q}{\Delta T_{ln} \cdot A_{ef}} \quad (5.23)$$

onde:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{ge} - T_{bu}) - (T_{ga} - T_{bu})}{\ln \left[\frac{T_{ge} - T_{bu}}{T_{ga} - T_{bu}} \right]} \quad (5.24)$$

A temperatura do gás no anel (T_{ga}) é obtida através do balanço macroscópico de energia, considerando que todo o calor usado na desidratação é cedido pelo gás que passa na região do anel.

$$q = W_{gaiu} \left[C_{pg} (T_{ge} - T_{ga}) + C_{pH_2O} (y_{ge} T_{ge} - y_{ga} T_{ga}) \right] \quad (5.25)$$

com:

$$W_{gaiu} = \frac{\rho_g \cdot U_a \cdot A_s}{y_{ga} + 1} \quad (5.26)$$

Considerando a umidade absoluta do gás no anel (y_{ga}) como sendo igual a umidade absoluta do gás na saída do secador (y_s).

A partir da área efetiva de troca térmica e da área total de partículas inertes, calculou-se a fração de partículas molhadas, cujos valores obtidos podem ser vistos na tabela 5.2.

$$f = \frac{A_{ef}}{A_{tp}} \quad (5.27)$$

5.4 . Resultados e comentários a partir da modelagem

5.4.1 . Efeito da altura do leito e da vazão do ar sobre o desempenho do secador

Na Tabela 5.1 são mostrados os resultados da modelagem para $T_{gs} = 46 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $M_p/M_i = 0,02$ de modo a analisar o desempenho para alturas de 0,18m a 0,28m para duas relações Q/Q_{jm} ; 1,5 e 1,7 com três alimentações de polpa.

LIMA (1992); ALSINA et al (1995) e LIMA (1996) mostraram que o aumento da altura do leito provoca um aumento na circulação de sólidos. Espera-se por conseguinte que as taxas de transferência, tanto para troca ar-partícula como leito-parede, aumentem. Por isso, a eficiência térmica de secagem, em termos de taxa de evaporação, é favorecida. Em contrapartida, as perdas para o ambiente na coluna de secagem também aumentam, influenciando negativamente a eficiência térmica. Estes efeitos opostos podem ser observados nas Figuras 5.1 e 5.2 para $Q/Q_{jm} = 1,5$ e 1,7 respectivamente.

Nas Figuras citadas, percebe-se que a taxa de evaporação e a eficiência térmica apresentam a mesma tendência para a vazão maior. Já para $Q/Q_{jm} = 1,5$, na região cilíndrica, o aumento do calor perdido predomina sobre

a maior taxa de evaporação, mostrando uma queda contínua na eficiência térmica.

Note-se também que em ambas as figuras, há mudança de comportamento uma vez ultrapassada a região cônica ($H > 0,23\text{m}$). Naturalmente este comportamento está associado a mudanças também observadas na fluidodinâmica diferenciada nas regiões cônica e cilíndrica. (LIMA 1996)

Com relação ao efeito da vazão, observa-se na Tabela 5.1, que a evaporação no período à taxa constante é maior para vazões menores. Este resultado, que parece surpreendente, era esperado. Como dito anteriormente, a taxa de troca térmica e de transferência de massa é diretamente influenciada pela circulação de sólidos. Efetivamente, ALSINA et al (1995) utilizando o mesmo sistema mostraram que a partir de $Q/Q_{jm} \approx 1,4$ a taxa de circulação de sólidos passa por um máximo e tende a diminuir levemente. Maiores detalhes podem ser consultados na dissertação de LIMA (1996), que confirma observações feitas por LIMA (1992) com polpa de umbu. A diminuição na circulação de sólidos explicaria a queda nas taxas de evaporação e da eficiência térmica quando comparados os resultados obtidos com $Q/Q_{jm} = 1,5$ e $1,7$. Vale salientar entretanto, que na região cilíndrica, para $0,25\text{m}$, a eficiência térmica não acompanhou esta tendência, sugerindo que, neste caso, o aumento da taxa de evaporação predomina sobre o correspondente aumento do calor perdido.

TABELA 5.1 - Resultados obtidos a partir dos balanços de energia e massa.

$$T_{g,e} \cong 45,5 \pm 2, M_p/M_i = 2,0\%.$$

Número do Experimento	W_{aev} (kg/s)X10 ⁵	q (kJ/s)	q _c (kJ/s)	η (%)	H (m)	Q/Q _{jm}
02	7,822	0,1859	0,2244	82,84	0,18	1,5
07	6,896	0,1646	0,2873	57,28	0,18	1,7
01	5,986	0,1430	0,2166	66,01	0,23	1,5
03	3,799	0,0908	0,2188	41,50	0,23	1,7
09	8,141	0,1948	0,3766	51,72	0,25	1,5
04	5,897	0,1411	0,1874	75,27	0,25	1,7
05	1,527	0,0366	0,1908	19,16	0,28	1,7

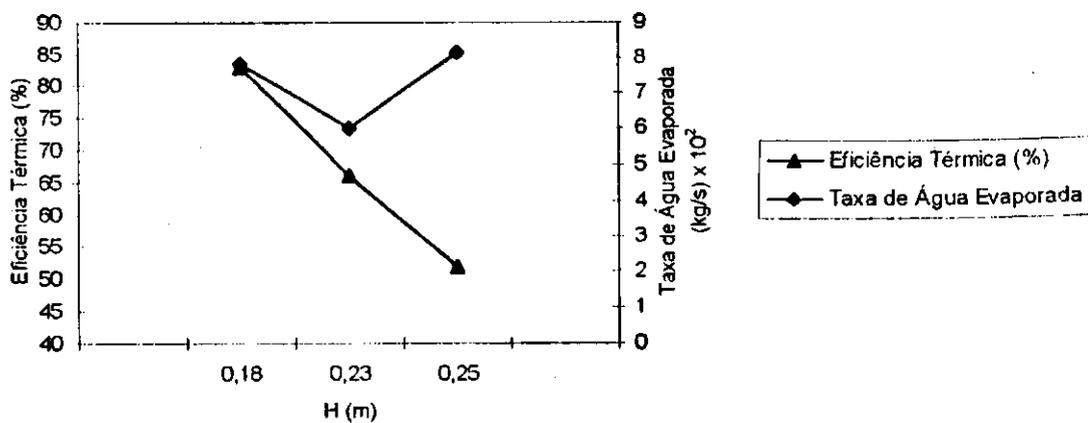


FIGURA 5.1 - Eficiência Térmica e Taxa de Água Evaporada em função da Altura do leito. $Q/Q_{jm} = 1,5$

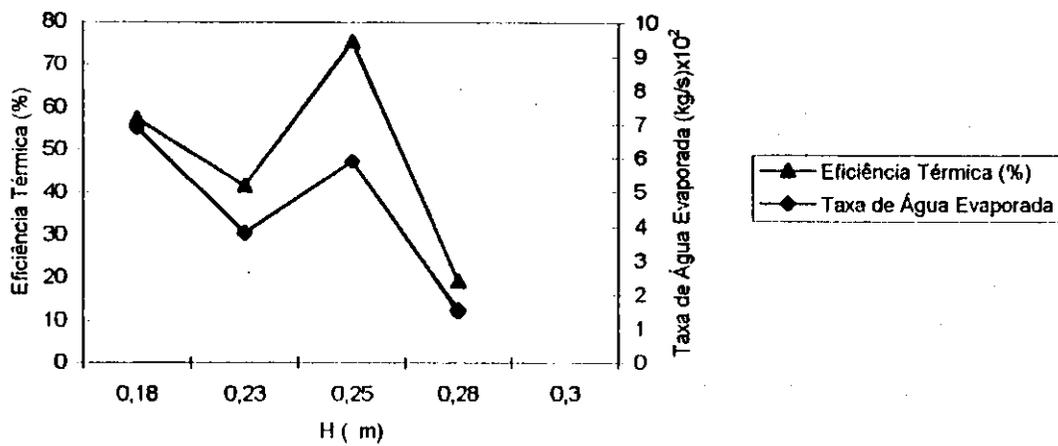


FIGURA 5.2 - Eficiência Térmica e Taxa de Água Evaporada em função da Altura do leito. $Q/Q_{jm} = 1,7$

Na tabela 5.2, pode-se observar que o coeficiente de transferência de calor experimental é insignificante, na ordem de 1000 vezes menor com relação aos obtidos pelas correlações, tanto de ROMANKOV & RASHKOVSKAYA (1969), que considera área de troca térmica a área de todas as partículas inertes no leito, quanto pela de WHITAKER (1977), onde a área de troca térmica é considerada apenas o anel.

TABELA 5.2 - Resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor experimental e por correlações.

Experimento n°	H (m)	h (kJ/s.m ² .°C)			f (%)	Q/Q _{jm}
		h _{exp} X 10 ³	h _{Rom}	h _w		
01	0,23	0,7957	0,2512	0,1829	0,43	1,5
02	0,18	1,7640	0,1570	0,1999	0,84	1,5
03	0,23	0,5040	0,3276	0,1829	0,27	1,7
04	0,35	0,6635	0,4610	0,1782	0,38	1,7
05	0,28	0,1350	0,3317	0,1728	0,07	1,7
06	0,25	0,0137	0,4585	0,1782	0,01	1,7
07	0,18	1,5650	0,2138	0,1999	0,73	1,7
08	0,25	0,1240	0,4034	0,1782	0,07	1,5
09	0,25	1,0560	0,3393	0,1782	0,58	1,5

Como os valores das correlações têm a mesma ordem de grandeza, conclue-se que nem todas as partículas fazem parte da área efetiva de troca térmica, o que pode ser explicado pelo fato de que apenas uma fração das partículas inertes é molhada pela polpa alimentada. (MATHUR & EPSTEIN 1974). Na 6ª coluna da Tabela 5.2 são mostrados os valores da fração de partículas molhadas, calculadas pela equação 5.27.

Já que, para todos os experimentos a fração de partículas molhadas no período a taxa constante é insignificante, era de se esperar que o rendimento do pó coletado fosse bastante alto, mas os dados nos mostram que esse rendimento não ultrapassa 20%. Logo, deve ocorrer deposição de pó no interior da coluna, a aderência no inerte deve ser bastante elevada. Provavelmente, apenas uma pequena fração das partículas inertes é revestida por uma película mais densa que seca, quebra e é arrastada pelo ar, sendo coletada através do ciclone, outra parte mantém-se aderida de tal forma, que o

atrito entre as partículas não consegue quebrá-la para que seja arrastada pela corrente de ar.

Para uma melhor análise, na Tabela 5.3 apresenta-se um resumo dos resultados para a altura do leito igual a 0,25m. Observa-se que o aumento da temperatura provoca uma queda no coeficiente de transferência de calor experimental, a qual pode ser explicada porque aumento da temperatura acelera o processo de evaporação da água contida na polpa, logo, no período a taxa constante, praticamente toda a água já foi evaporada e o calor fornecido pelo gás é perdido para o ambiente, valendo ainda salientar que a coluna não foi isolada termicamente. Como não há praticamente água a ser evaporada, a fração de partículas molhadas é muito pequena e o coeficiente de transferência de calor experimental que se baseia na área total de partículas, dá um valor aparente reduzido.

O aumento da proporção M_p/M_i provoca uma redução, significativa, na taxa de água evaporada no final do experimento e conseqüentemente no coeficiente de transferência de calor experimental.

TABELA 5.3 - Taxa de água evaporada e coeficiente de transferência de calor para $H = 0,25\text{m}$

Exp. N°	M_p/M_i (%)	$h(\text{kJ/s.m}^2.\text{°C})$			T °C	Q/Q_{jm}	W_{aev} (kg/s)X10 ⁵
		$h_{exp} \times 10^3$	h_{Rom}	h_w			
04	2,0	0,6635	0,4610	0,1782	45,20	1,7	5,897
06	2,0	0,0137	0,4585	0,1782	54,39	1,7	1,366
08	3,0	0,1240	0,4034	0,1782	45,01	1,5	1,082
09	2,0	1,0560	0,3393	0,1782	45,21	1,5	8,141

Na análise precedente não deve ser esquecido que, devido a estar restrita ao período de taxa constante, sem alimentação de polpa, o comportamento não é independente da história durante os períodos de alimentação intermitente. Assim, uma menor taxa de evaporação poderia também estar correlacionada com a secagem mais rápida nos períodos anteriores e em conseqüência, uma menor fração de partículas molhadas, ou seja menor área disponível para a troca, durante o período à taxa constante.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A altura do leito afeta diretamente o rendimento do pó. Quanto maior a altura do leito, maior o rendimento.
- Para $Q/Q_{jm} = 1,5$, o aumento da altura do leito diminui a umidade do pó obtido, porém para $Q/Q_{jm} = 1,7$, a umidade do pó praticamente independe da altura do leito.
- Para $H = 0,25$ e $Q/Q_{jm} = 1,7$, o aumento da temperatura de entrada do gás provoca o surgimento de um máximo na umidade do pó. O rendimento do pó aumenta muito pouco com o aumento da temperatura de entrada do ar.
- A vazão de ar que melhor resultado apresentou para $H = 0,25m$ foi dada pela relação $Q/Q_{jm} = 1,7$.
- O rendimento do pó por experimento não ultrapassa 21%. Portanto, deve haver deposição de pó no interior da coluna e a aderência ao inerte deve ser bastante elevada
- Os perfis de temperatura ao longo do experimento mostraram que a temperatura aumenta entre as alimentações, tendo uma queda

imediatamente após cada uma delas, ficando praticamente constante no período final.

Quanto aos resultados obtidos pela modelagem no período à taxa constante, temos:

- O aumento da altura do leito, na região cônica, provoca redução tanto na taxa de água evaporada, quanto na eficiência térmica. Para $H=0,25\text{m}$, na região cilíndrica, as perdas para o ambiente aumentam e o comportamento muda, ou seja, a taxa de água evaporada cresce, mas a eficiência térmica diminui em relação a região cônica. Para $H = 0,28\text{m}$ e $Q/Q_{jm} = 1,7$, tanto a taxa de água evaporada como a eficiência térmica caem.
- A evaporação nas regiões cônica e cilíndrica, no período à taxa constante, é maior para a menor vazão, ou seja $Q/Q_{jm} = 1,5$.
- A eficiência térmica na região cônica tem o mesmo comportamento que a taxa de água evaporada com relação a vazão do ar. Isto é, aumentando-se a vazão, ambas diminuem.
- Para $H = 0,25\text{m}$, na região cilíndrica, a eficiência térmica aumenta com o aumento da relação Q/Q_{jm} ; sugerindo que, neste caso, o aumento da taxa de evaporação predomina sobre o correspondente aumento do calor perdido.
- O coeficiente de transferência de calor experimental, baseado na área total de partículas é insignificante, na ordem de 1000 vezes menor com relação aos obtidos por correlações, mostrando que a fração de partículas molhadas no período de taxa constante é muito pequena.

- Para $H = 0,25\text{m}$ o aumento da temperatura e da proporção M_p/M_i reduzem a taxa de água evaporada e conseqüentemente o coeficiente de transferência de calor experimental, calculado a partir da mesma, apresenta valores menores.
- Na análise feita a partir da modelagem, deve-se levar em consideração que, devido a estar restrita ao período de taxa constante, sem alimentação de polpa, o comportamento não é independente da história durante os períodos de alimentação intermitente. Assim, uma menor taxa de evaporação poderia estar correlacionada com a secagem mais rápida nos períodos anteriores.

Apesar de que os resultados encontrados possam desencorajar a utilização da técnica do leito de jorro para desidratação de polpas, em particular a de acerola, acreditamos que existem meios de superar as dificuldades, principalmente diminuindo-se a aderência e otimizando o sistema de alimentação.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES

Para continuidade do trabalho envolvendo a secagem de polpas de frutas em leito de jorro, tendo como base o estudo aqui relatado, algumas sugestões podem servir de ponto de partida, dentre elas:

- Estudar a influência da aderência da polpa às partículas inertes e ao equipamento, visto que a aderência é uma das causas do baixo rendimento de obtenção de pó.
- Estudar uma forma ótima de alimentação, procurando alimentar a maior quantidade de polpa capaz de ser seca sem que o jorro colapse.
- Estudar a mudança de escala analisando a viabilidade da secagem em equipamentos maiores e até em escala industrial.
- Estudar a possibilidade de aeração do anel, o que aumentaria o atrito entre as partículas e conseqüentemente, melhoraria as taxas de transferência.
- Estudar o efeito de outros inertes, procurando materiais mais densos que possibilitem uma maior energia de colisão facilitando a remoção do filme aderido.

- Estudar a influência da temperatura, indo desde a secagem sem aquecimento complementar, até a máxima temperatura suportável pela polpa.
- Estudar as propriedades organolépticas e também o teor de vitaminas e proteínas contidas no pó obtido.
- Estudar o desempenho da secagem de outras polpas de frutas.
- Modelagem, simulação e otimização do processo.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. M., "Desidratação de Polpa de Umbu", Relatório de Estágio Integrado. UFPB, Campus II, Campina Grande, 1991

ALSINA, O. L. S., MORAIS, V. L. M., LIMA, L. M. R. & SOARES, F. H. L., "Studies on the Performance of the Spouted Bed Dryer for West Indian Cherry Pulp". 10th International Drying Symposium (IDS'96). Kraków, Poland, vol. B, pp. 865-872, 1996.

ALSINA, O. L. S., LIMA, L. M. R., MORAIS, V. L. M. & NÓBREGA, E. S., "Estudo da Circulação de Sólidos em Leito de Jorro Convencional, para Secagem de Polpa de Acerola", In: I CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, Campinas, São Paulo, 1995, no prelo.

ALSINA, O. L. S., MORAIS, V. L. M., LIMA, L. M. R. & SOARES, F. H. L., "Studies on The Performance of the Spouted Bed for West Indian Cherry Pulp". 10th International Drying Symposium (IDS'96) Kraków, Poland, vol. B, pp.865-872, 1996.

ALVES, R. E., **Acerola (Malpighia emarginata D.C) Fisiologia da Maturação e Armazenamento Refrigerado Sob Atmosfera Ambiente e Modificada.** Lavras-MG, PP. 99. Dissertação (Mestrado), ESAL, 1993.

BARRET, N. & FANE, A., "Drying Liquid Materials in a Spouted Beds", In: **Drying Canada: Hemisphere**, pp. 425-420. 1989.

BECKER H. A "Na Investigation of Baws Governing the Spouting of Coarse Particles ", apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974, apud LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

CALADO, V. M. A., BISCAIA, E. C. JR & MASSARANI, G. "Secagem de Grãos em Leito de Jorro: Aplicações de um Modelo Difusional" In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Uberlândia - MG, vol. 2, pp.374-381, 1987.

CARVALHO, R. I. N. & MANICA, I. "Acerola - Composição e Armazenamento de Frutos", **Cadernos de Horticultura**, UFRGS, ano 1, nº 1. 1993.

CLAFIN, J. K. & FANE, A. G. "Gas Distribution and Heat Transfer in a Draft-tube Spouted Bed". **A.I.Ch.E Symp. Serv.** 241,80, 17. 1984. Apud LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

CLAFIN, J. K. & FANE, A. G. "Spouting With a Porous Draft-tub", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. Vol. 61, p.356, 1983. Apud LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

CREMASCO, M. A. & DA SILVA, M. G. C., "Estudo Comparativo de Secagem de Sólidos em Leito de Jorro e Leito Fluidizado em Escala de Laboratório", In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, **(Anais)**, Uberlândia - MG, vol.2, pp.407-415, 1987.

CREMASCO, M. A., ROCHA, S. C. S. & MASSARANI, G. "Secagem de Milho em Leito de Jorro" In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS **(Anais)**, Uberlândia-MG, vol. 1, 1987.

EPSTEIN, N. & MATHUR, K. B., "Heat and Mass Transfer in Spouted Beds. A Review ", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, vol. 49, pp. 467-476, 1971.

ERGUN (1952), apud KUNNI, D. & LEVESPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Huntington, New York, p. 73, 1977.

FERNANDES, E. G. & MASSARANI, G. "Nota Sobre a Secagem de Politereftalato de Etileno em Leito de Jorro". In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS **(Anais)**, Uberlândia - MG, vol. 2, pp.394-405, 1987.

FINZER, J. R. D. & KIECKBUSCH, T. G., "Desenvolvimento de um Secador de Leito Vibro-jorrado I - Estudo da Dinâmica do Leito". In: XIV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS **(Anais)**, Campinas - SP, vol. 1, pp.341-352, 1986.

GELPERIN, N. I., AINSHTEIN, V. G., GELPERIN, E. N. & L'VOVA, S. D., "Hydrodynamic properties of Fluidized Granular Materials in Conical and Conical-Cylindrical sets", 1960, apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

- GOLTSIKER, A., RASHKOVSKAYA, A. B. & ROMANKOV, P. G., "The Mechanism of Commencement of Boiling in Conical Sets", 1964. Apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.
- GRBAVCIC, A. B., VUKOVIC, D. U. & ZDANSKI, F. K., "Fluid Flow Pattern, Minimum Spouting Velocity and Pressure Drop in Spouted Beds" (1976) apud LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.
- GUBULIN, J. C. & FREIRE, J. T., "Secagem de pastas em Leito de Jorro: Testes de Secagem e Estudos Hidrodinâmicos Globais em Escala Piloto", In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS. **(Anais)**, São Carlos - SP, vol. 1, pp.203-213, 1989.
- HUFENÜSSLER, M & KACHAN, G. C., "Secagem de Purê de Banana em um Secador de Leito de Jorro", In: XIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS **(Anais)**, São Paulo, vol. 2, pp. 340-353, 1985.
- KACHAM, G. C. & CHIAPPETTA, E., "Desidratação da Pasta de Tomate em um Secador de Leito de Jorro", In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, **(Anais)**, vol. 2, pp. 524-531, 1988.
- KMIEC, A. "The Minimum Spouting Velocitying Conical Beds". **Canadian Journal of Chemical Engineering.**, vol. 61, p.274, 1983. Apud RODRIGUES, C. C. **Análise de Secagem de Suspensões em Leito de Jorro com Partículas Inertes**. São Carlos - SP, pp. 116. Dissertação (Mestrado), UFSCar, 1993.

- KOE, G. K. & VAN BRAKEL, J., "Solids Sep. Processes, I" Apud MUJUMDAR, A. S., "Spouted Beds: Principles and Recent Developments". In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), São Carlos - SP, vol. 1, pp.3-13, 1989.
- KUNNI, D. & LEVESPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Huntington, New York, p. 73, 1977.
- LAZAR, M. E., BROWN, A. H., SMITH, G. S., WONG, F. F. & LINDQUIST. "Experimental Production of Tomato Powder by Spray Drying", **Food Technology**, vol.10, pp.129-134, 1956.
- LEFROY, G. A. & DAVIDSON, J. F., "The Mechanics of Spouted Beds", apud LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.
- LEITE, A. C. B., WODTKE, R. M. P., LISBÔA, A. C. L. & RESTINI, F., "Pirólise de Finos de Xistos em Reator de leito de Jorro", In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (Anais), vol. 1, pp. 248-261, 1984
- LIMA, C. A. P., **Desidratação de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Estudos do Desempenho de um Jorro**. Campina Grande - PB. pp. 56. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1993.
- LIMA, L. M. R., **Estudo das Variáveis Fluidodinâmicas na secagem de Polpa de Acerola em Leito de Jorro Convencional**. Campina Grande - PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1996 (no prelo).

LIMA, M. F. M., **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos.** Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

LIMA, M. F. M. & Allsina, O. L. S., "Dehydration of "Umbu" Pulp in Spouted Bed - Termal Studies", In: CONGRESSO EUROPEO DE FLUIDIZACIÓN (Anais V), Las Palmas de Gran Canária, pp. 299-308, 1994.

LIMA, M. F. M., SANTOS, E. M. B. D., CARVALHO, L. P., COSTA, F. A., SANTOS, C. I., LIMA, L. M. O., "Influência das Variáveis Operacionais na Desidratação de Polpa de Seriguela em Leito de Jorro" In: XXIII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, Maringá - PR, 1995, no prelo

LIMA, M. F. M., SANTOS, E. M. B. D., SANTOS, C. I., LIMA, L. M. O., "Secagem de Cajá em Leito de Jorro" In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 1995.no prelo.

LIMA, M. F. M., SOUZA, F. M. F. & ALSINA, O. L. S., "Secagem de Polpa de Umbu em Leito de Jorro - Variáveis Fluidodinâmicas do Leito", In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Campinas -SP, vol. 1, pp. 367-377, 1991.

LIMA, M. L., SANTOS, C. I., COSTA, F. A., LIMA, M. F. M., SANTOS, E. M. B. D. & CARVALHO, L. P., "Desidratação de Polpas de Frutas Tropicais em Leito de Jorro"- In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, Iniciação Científica (Anais) COBEQ - IC, São Carlos, 1995, no prelo.

LITTMAN, H., & SILVA, D. E., "Gas-Particle Heat Transfer Coefficients in Packed Beds at Low Reynolds Number", apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

MAMURO, T. & HATTORI, H. "Flow Pattern of Fluid in Spouted Beds", apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

MARINO NETO, L., **Acerola - a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., pp.94, 1986.

MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

MELO, H. C., Tecnologia de Secagem de Frutos. Curso pela UFPB Campus I, João Pessoa, julho/1994.

MOSCOSO, 1956. Apud MARINO NETO, L., **Acerola - a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., pp.94, 1986.

MUJUMDAR, A. S., "Spouted Beds: Principles and Recent Developments". In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), São Carlos - SP, vol. 1, pp.3-13, 1989.

MUJUMDAR, A. S., **Handbook of Industrial Drying Library of Congress Catalogin in Publication data**. 1987.

MUSTERD, apud MARINO NETO, L., **Acerola - a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., pp.94, 1986.

OCHOA-MARTINEZ, L. A., BRENNAN, J. G. & NIRAJAN, K., "Drying of Liquids in a Spouted Bed of Inert Particles: Heat Transfer Studies", **Journal of Food Engineering**, pp. 135-148, 1993a.

OCHOA-MARTINEZ, L. A., BRENNAN, J. G. & NIRAJAN, K., "Spouted Bed Dryer for Liquids Foods". **Food Control**, vol. 4, pp. 41-45 1993b.

OLIVEIRA, W. P. & FREIRE, J. T., "Análise Comparativa do Revestimento de Partículas: Método Convencional com Processo em Leito de Jorro", In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Campinas - SP, vol. 1, pp. 341-354, 1991.

OLIVEIRA, W. P. & FREIRE, J. T., "Recobrimento de Partículas - Análise do Processo em Leito de Jorro". In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Campinas - SP, vol. 2, pp.407-415, 1991.

OLIVEIRA, W. P., SILVEIRA, A. M. & FREIRE, J. T., "Análise Comparativa da Vazão Máxima de Alimentação de Água e de Sangue Bovino em um Secador de Leito de Jorro". In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Campina - SP, vol. 2, pp. 488-498, 1993.

PALLAI, I. & NEMETH, J. "Residence Time Distribution in Spouting Beds". Apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

PAVARINE, P. J., DUARTE, O. B. F. & COURY, J. R. "Granulação em Leito de Jorro: Resultados Preliminares".In: XIV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (**Anais**), Campinas - SP, vol. 1, pp.353-365, 1986.

PEREIRA, N. C. & REBOLA, P., "Secagem de Soja em Leito de Jorro" In: XII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), São Carlos - SP, vol. 1, pp.73-79, 1984.

PEREIRA, N. C., NEITZEL, I., MENDES, E. S., CANASSA, E. M. REBOLA, P., DAMASCENO, J. W., LISBOA, A. C. L. & MARTIGNONI, W. P., "Comportamento Dinâmico de uma Unidade Semi-Industrial de Leito de Jorro com Finos de Xisto na Faixa Granulométrica $< 1/2$." In: XIV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Campinas - SP, vol. 2, pp.376-387, 1986.

PHAM, Q. T. & POOLEY, E. J., "A Spouted Bed Dryer Using Inert Particles", Proc, 9TH AUSTRALASIAN CHEM. ENG. CONF. CHISTCHURCH, New Zealand, p. 57, 1981.

PHAM, Q. T., "Behaviour of Conical Spouted-Bed Dryer for Animal Blood". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol.61,6, pp. 426-434, 1983. Apud LIMA, M. F. M., *Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos fluidodinâmicos e térmicos*. Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.

PONTE, M. J. J. de S & FREIRE, J. T., "Determinação Experimental da Área de Troca Térmica Fluido -Partícula em Leito de Jorro com Alimentação Contínua de Sólidos". In: XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais) vol. 1, São Carlos - SP, pp. 149-161, 1989.

POURENOVIC, D. S., GRBAVIC, Z. R., HADZISMALLOVIC, D. E., VUKOVIC, D. V. & LITTMAN, H., "A Drying of Thermo-Sensitive Suspensions in the Draft Tube Spouted -Fluid Bed Sistem". IDS'90 - 7TH INTERNATIONAL DRYING SIMPOSIUM, vol.2, Praga Checoslovaquia, 1990. Apud LIMA, M. F. M., *Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro — Estudos*

- fluidodinâmicos e térmicos.** Campina Grande - PB. pp.132. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, 1992.
- RÉ, M. & FREIRE, J.T., "Drying of Pastelike Materials in Spouted Beds", in: **Drying Canada: Hemisphere**, 1989.
- RÉ, M. I & FREIRE, J. T., "Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro", In: **XIV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, (Anais)** Campinas -SP, pp. 187-198, 1986.
- RÉ, M. I. & FREIRE, J.T., "Secagem de Extratos Farmacológicos", **XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (anais)**, Uberlândia - MG, vol. 2, pp. 399-406, 1987.
- RÉ, M. I., **Secagem de Sangue Animal em Leito de Jorro.** São Carlos - SP, pp. 89. Dissertação (Mestrado), UFSCar, 1986.
- REYES, A. E. & MASSARANI, G., "Secado de Pastas en Lecho de Chorro". In: **XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais)**, vol. 2, Campinas - SP, pp. 406-418, 1991.
- ROCHA, S. C. S & AYUB, G. E., "Transferência de Calor Gás-Partícula no Recobrimento de Comprimidos em Leito de Jorro Bi-dimensional", In: **XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, (Anais)**, Minas Gerais, vol. 1, pp. 137-148, 1993.
- RODRIGUES, C. C. **Análise de Secagem de Suspensões em Leito de Jorro com Partículas Inertes.** São Carlos - SP, pp. 116. Dissertação (Mestrado), UFSCar, 1993.

- ROMANKOV, P. G. & RASHKOVSKAYA, N. B., "Drying in a Suspended State", 1968, apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.
- ROWE, P. N. & CLAXTON, K. T., "Heat and Mass Transfer from a Single Sphere to Fluid-Flowing Through an Array". Apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.
- RUEHLE, 1953. Apud MARINO NETO, L., **Acerola - a cereja tropical**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., pp.94, 1986.
- SANTANA, C. C., ROCHA, S. C. S., CREMASCO, M. A. & ATAIDE, C. H., "Recobrimento de Comprimidos em Leito de Jorro: Estudos Preliminares". In: XVI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, (Anais), Petrópolis - RJ, vol. 2, pp. 378-389, 1988.
- SCHNEIDER T. & BRIDWATER, J., "Drying of Solutions and Suspensions in Spouted Beds", in: **Drying Canada: Hemisphere**, 1989. pp. 421-425.
- SILVA, E. L. & FREIRE, J. T. "Transferência de Calor em Leito de Jorro Cônico: Determinação do Coeficiente de Troca Térmica Parede-Leito". In XVII ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), São Carlos - SP, vol. 1, pp. 163-174, 1989.
- SILVA, G. F. & ALSINA, O. L. S., "Secagem de Urucum em Leito de Jorro: Estudo dos efeitos das variáveis operacionais". In: XIX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (Anais), Campinas - SP, vol. 1, pp.355-365, 1991.
- SILVA, G. F., **Processamento de urucum em leito de jorro**. Campina Grande - PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), pp. UFPB, 1991.

SOARES, F.H. & ALSINA, O. L. S., "Caracterização Reológica da Polpa de Acerola", III SEMANA DE ENGENHARIA QUÍMICA INDUSTRIAL, Aracaju, SE, 1995

TRESSLER, D. K., "New Developments in the Dehydration of Fruits and Vegetables", **Food Technology**, vol. 10, pp.119-128, 1956.

UEMAKI, O. & KUGO, M, , "Heat Transfer in Spouted Bed", 1967. Apud MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. **Spouted Beds**, New York: Academic Press, pp. 303, 1974.

WEN, C. Y. & YU, Y. H., "A Generalized method for predicting the minimum fluidization velocity", 1966, apud. KUNNI, D. & LEVESPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Huntington, New York, p. 73, 1977.

WHITAKER, S., **Fundamental Principles of Heat Transfer**, Pergamon Press Inc., Chapter 7, pp348-373. 1977.

APÊNDICE

TABELAS

TABELA A1 - Condições operacionais para cada experimento

Experimento.	H (m)	Sólidos Totais (%)	T _{ge} (°C)	T _{gs} (°C)	Y (%)	R (%)	Q/Q _{jm}
01	0,23	10,64	47,43	43,77	27,45	5,45	1,5
02	0,18	10,64	50,25	46,94	60,0	0,59	1,5
03	0,23	10,33	46,60	43,40	6,35	8,88	1,7
04	0,25	10,33	45,81	43,53	4,26	18,00	1,7
05	0,28	10,33	45,45	42,94	5,13	19,33	1,7
06	0,25	10,00	54,51	50,38	4,87	20,57	1,7
07	0,18	9,74	47,23	42,10	8,03	3,82	1,7
08	0,25	9,26	45,40	42,78	12,03	28,88	1,5
09	0,25	9,50	45,54	40,56	7,26	17,07	1,5
10	0,25	9,72	44,72	43,01	6,24	20,22	1,7
11	0,23	9,52	44,89	42,10	6,48	8,91	1,7
12	0,18	10,33	47,79	44,83	8,08	3,81	1,7
13	0,25	9,26	46,73	44,16	4,22	18,54	1,7
14	0,25	8,36	49,87	45,93	6,59	18,92	1,7
15	0,25	9,75	45,49	41,83	7,19	17,16	1,8

TABELA A2 - Dados psicrométricos para o experimento 01 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,23\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(^{\circ}\text{C})$		$T_{bu}(^{\circ}\text{C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,97	41,95	27,45	25,62	1,5879	1,3959	86,22	78,15	0,00
44,97	33,96	27,45	25,64	1,5879	1,7349	86,22	78,60	11,46
45,16	41,36	27,49	25,80	1,5879	1,4508	86,42	78,96	21,46
44,97	41,36	27,45	25,99	1,5879	1,4830	86,22	79,79	31,46
45,76	38,55	27,41	26,22	1,5480	1,6404	86,01	80,93	56,48
45,57	41,02	27,37	26,40	1,5480	1,5678	85,81	81,62	66,48
45,38	41,02	27,32	25,46	1,5480	1,4080	85,61	77,50	76,48
46,57	38,98	28,12	26,46	1,6443	1,6640	89,33	81,98	97,48
46,38	42,40	28,08	26,08	1,6443	1,4549	89,14	80,13	107,66
46,57	42,02	28,12	26,08	1,6443	1,4708	89,33	80,15	117,66
47,76	43,96	27,75	28,02	1,5251	1,7351	87,48	88,97	127,66
47,19	43,58	27,62	26,89	1,5251	1,5462	86,89	83,71	137,66
47,19	43,77	27,62	27,46	1,5251	1,6403	86,89	86,33	147,66
47,57	43,77	27,70	27,10	1,5251	1,5756	87,29	84,66	157,66

TABELA A3 - Dados psicrométricos para o experimento 02 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,18m$; $M_p/M_i = 2,0\%$.

$T_{bs}(^{\circ}C)$		$T_{bu}(^{\circ}C)$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
43,86	38,93	28,52	25,07	1,8336	1,4309	91,41	75,94	0,00
48,60	39,12	29,55	26,59	1,8336	1,6808	96,33	82,56	23,80
49,17	43,67	29,67	27,73	1,8336	1,6938	96,92	87,61	33,80
47,65	43,67	29,35	27,73	1,8336	1,6938	95,35	87,61	43,80
50,45	37,97	29,91	27,40	1,8268	1,8741	98,08	86,33	60,83
50,45	44,78	29,91	28,27	1,8268	1,7473	98,08	90,14	70,83
50,36	44,86	29,89	28,92	1,8268	1,8678	97,98	93,33	80,83
51,25	41,38	29,90	28,48	1,7909	1,9306	97,98	91,33	107,33
51,06	44,99	29,86	28,48	1,7909	1,7781	97,78	91,15	117,33
51,25	45,56	29,90	28,29	1,7909	1,7182	97,98	90,20	127,33
52,06	46,56	30,74	30,05	1,9288	2,0198	102,39	99,02	137,33
52,44	47,70	30,82	30,62	1,9288	2,0887	102,79	101,99	147,33
52,44	46,56	30,82	30,62	1,9288	2,1371	102,79	102,05	157,33
52,44	46,94	30,82	31,00	1,9288	2,2008	102,79	104,10	167,33

TABELA A4 - Dados psicrométricos para o experimento 03 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,23m$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(^{\circ}C)$		$T_{bu}(^{\circ}C)$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,94	40,76	26,89	26,34	1,4887	1,4060	83,63	81,36	0,00
44,94	36,40	26,89	24,26	1,4887	1,5683	83,63	72,69	19,96
46,08	38,40	27,16	33,74	1,4887	1,1915	84,81	120,62	29,96
44,94	41,71	26,89	33,74	1,4887	1,0469	83,63	120,42	39,96
46,31	38,53	27,19	25,43	1,4850	1,5072	84,95	77,48	58,26
46,31	42,32	27,19	26,19	1,4850	1,4770	84,95	80,62	60,26
46,50	42,70	27,23	26,00	1,4850	1,4287	85,14	79,77	70,26
46,50	38,35	26,86	25,45	1,4180	1,5181	83,41	77,58	89,28
46,50	42,33	26,86	26,00	1,4180	1,4441	83,41	79,78	99,28
46,10	42,90	26,76	26,00	1,4180	1,4203	83,00	79,76	109,28
46,60	43,21	27,04	26,65	1,4461	1,5195	84,24	82,63	129,28
46,60	43,40	27,04	26,70	1,4461	1,5203	84,24	82,85	139,28
46,60	43,40	27,04	26,70	1,4461	1,5203	84,24	82,85	149,28
46,60	43,59	27,04	26,32	1,4461	1,4463	84,24	81,14	159,28

TABELA A5 - Dados psicrométricos para o experimento 04 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,25\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(\text{°C})$		$T_{bu}(\text{°C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,75	40,38	26,58	25,77	1,4432	1,4868	82,26	78,87	0,00
44,94	37,16	26,63	25,39	1,4432	1,5581	82,46	77,38	14,27
44,94	42,28	26,63	24,44	1,4432	1,1896	82,46	73,18	24,27
44,94	42,47	26,63	25,39	1,4432	1,3359	82,46	77,14	34,27
44,61	37,97	26,39	25,26	1,4153	1,5362	81,39	76,79	46,77
45,56	42,52	26,62	26,58	1,4153	1,4704	82,37	82,35	56,77
44,99	42,52	26,48	26,20	1,4153	1,3857	81,79	80,66	66,77
45,20	40,84	26,63	25,28	1,4321	1,5025	82,44	76,74	78,65
44,63	42,16	26,49	25,08	1,4321	1,2977	81,85	75,84	85,65
45,01	42,73	26,58	25,66	1,4321	1,3700	82,24	78,28	95,65
45,62	43,34	26,80	26,64	1,4450	1,5123	83,20	82,59	105,65
45,81	43,53	26,85	26,46	1,4450	1,4730	83,40	81,77	115,65
45,62	43,53	26,80	26,81	1,4450	1,5342	83,20	83,35	125,65
46,19	43,72	26,94	26,89	1,4450	1,5404	83,79	83,70	135,65

TABELA A6 - Dados psicrométricos para o experimento 05 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,28\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(^{\circ}\text{C})$		$T_{bu}(^{\circ}\text{C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,18	40,38	25,73	23,88	1,3215	1,1804	78,53	70,99	0,00
43,99	34,31	25,68	21,98	1,3215	1,1478	78,34	63,92	14,18
44,18	40,57	25,73	23,88	1,3215	1,1725	78,53	70,98	24,18
44,56	41,33	25,83	24,26	1,3215	1,2005	78,92	72,48	34,18
44,04	33,98	25,48	22,41	1,2847	1,2242	77,44	65,54	45,76
44,80	41,20	25,67	24,88	1,2847	1,3052	78,22	75,04	55,76
44,80	43,09	25,67	24,49	1,2847	1,1639	78,22	73,35	65,76
44,80	38,21	26,10	24,17	1,3159	1,3162	80,06	72,25	75,76
44,85	42,20	25,86	25,69	1,3159	1,3972	79,08	78,44	85,76
44,85	43,90	25,86	24,58	1,3159	1,1447	79,08	73,68	95,76
45,45	43,17	25,85	25,72	1,2881	1,3617	78,98	78,53	105,76
45,45	42,99	25,85	24,96	1,2881	1,2436	78,98	75,30	115,76
45,45	42,80	25,85	24,96	1,2881	1,2515	78,98	75,31	125,76
45,45	42,80	25,85	25,72	1,2881	1,3772	78,98	78,55	135,76

TABELA A7 - Dados psicrométricos para o experimento 06 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,25m$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(^{\circ}C)$		$T_{bu}(^{\circ}C)$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
53,72	49,35	29,76	31,52	1,6588	2,2097	97,11	106,85	0,00
54,16	40,25	29,85	26,39	1,6588	1,5984	97,57	81,61	15,37
54,41	50,04	29,90	27,65	1,6588	1,4124	97,83	86,92	25,37
54,79	50,80	29,98	32,78	1,6588	2,4286	98,22	114,03	35,37
54,70	43,88	29,75	27,56	1,6160	1,6539	97,01	86,79	52,00
54,32	49,95	29,67	27,75	1,6160	1,4344	96,62	87,39	62,00
54,32	49,58	29,67	28,32	1,6160	1,5552	96,62	90,14	72,00
54,40	44,19	29,84	27,30	1,6464	1,5938	97,49	85,56	86,53
54,20	46,70	29,79	28,25	1,6464	1,6628	97,29	89,94	96,53
54,44	50,36	29,85	28,25	1,6464	1,5095	97,53	89,76	106,53
54,44	49,89	29,79	28,84	1,6362	1,6407	97,27	92,68	116,53
54,44	50,28	29,79	28,85	1,6362	1,6263	97,27	92,70	126,53
54,96	51,35	29,90	29,34	1,6362	1,6763	97,81	95,11	136,53
54,20	50,00	29,74	28,96	1,6362	1,6591	97,02	93,27	146,53

TABELA A8 - Dados psicrométricos para o experimento 07 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,18\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(\text{°C})$		$T_{bu}(\text{°C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,73	39,60	26,19	23,66	1,3765	1,1787	80,52	70,15	0,00
46,48	34,90	26,61	23,52	1,3765	1,3530	82,32	69,78	10,27
46,10	39,83	26,52	25,41	1,3765	1,4494	81,93	77,34	20,27
46,79	41,28	26,69	26,10	1,3765	1,5052	82,64	80,27	30,27
47,19	34,09	26,40	24,60	1,3101	1,5574	81,34	74,19	40,64
47,19	41,30	26,40	26,12	1,3101	1,5078	81,34	80,36	50,64
47,37	41,87	26,45	25,55	1,3101	1,3875	81,52	77,85	61,09
47,98	35,83	26,58	25,20	1,3087	1,5824	82,11	76,63	71,09
47,98	40,57	26,58	25,96	1,3087	1,5110	82,11	79,69	81,09
47,98	42,28	26,58	26,72	1,3087	1,5708	82,11	83,00	91,09
47,36	40,58	26,33	25,02	1,2490	1,3538	80,96	75,66	101,09
48,18	43,43	26,29	25,82	1,2490	1,3677	80,77	78,95	111,09
48,18	42,48	26,29	25,86	1,2490	1,4141	80,77	79,17	121,09
47,61	41,91	26,15	25,78	1,2490	1,4244	80,19	78,85	131,09

TABELA A9 - Dados psicrométricos para o experimento 08 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,25 \text{ m}$; $M_p/M_i = 3,0\%$.

$T_{bs}(^{\circ}\text{C})$		$T_{bu}(^{\circ}\text{C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,98	42,32	27,07	25,43	1,5196	1,3487	84,47	77,32	0,00
44,00	29,80	26,84	25,05	1,5196	1,8121	83,46	76,26	12,40
43,84	40,43	26,80	24,67	1,5196	1,3033	83,29	74,20	22,40
45,00	41,96	27,08	25,64	1,5196	1,3988	84,49	78,24	32,40
45,00	30,77	26,67	25,55	1,4479	1,8547	82,64	78,35	45,27
44,35	39,42	26,51	24,58	1,4479	1,3310	81,97	73,88	55,27
45,50	43,02	26,79	25,56	1,4479	1,3412	83,15	77,85	65,27
45,11	31,07	26,37	24,99	1,3916	1,7484	81,30	75,95	78,14
45,31	41,70	26,42	25,19	1,3916	1,3349	81,50	76,32	88,14
45,49	43,03	26,46	25,38	1,3916	1,3109	81,69	77,07	98,14
46,19	42,77	26,70	25,88	1,4034	1,4054	82,72	79,24	108,14
46,19	42,96	26,70	27,02	1,4034	1,5953	82,72	84,33	118,14
44,60	43,08	26,32	25,62	1,4034	1,3487	81,08	78,10	128,14
44,60	42,32	26,32	25,25	1,4034	1,3190	81,08	76,55	138,14

TABELA A10 - Dados psicrométricos para o experimento 09 fornecendo-se a temperatura e a umidade absoluta do ar na entrada e as temperaturas de bulbos seco e úmido na saída do secador ao longo do experimento. $H = 0,25\text{m}$; $M_p/M_i = 2,0\%$

$T_{bs}(\text{°C})$		$T_{bu}(\text{°C})$		$U_{abs} \times 10^2$ (kg/kg)		Entalpia (kJ/kg)		Tempo (min)
E	S	E	S	E	S	H_e	H_s	
44,73	40,18	27,70	24,62	1,6442	1,3057	87,43	74,08	0,00
44,92	31,83	27,75	24,81	1,6442	1,6868	87,62	75,16	11,58
45,30	41,70	27,83	24,05	1,6442	1,1521	88,02	71,62	21,58
45,12	40,95	27,79	25,20	1,6442	1,3679	87,83	76,41	31,58
44,55	32,22	27,55	23,49	1,6240	1,4606	86,72	69,78	43,08
44,74	39,05	27,60	24,25	1,6240	1,2938	86,91	72,54	53,08
45,31	39,43	27,73	24,25	1,6240	1,2780	87,50	72,52	63,08
45,14	31,67	27,64	24,84	1,6155	1,6984	87,11	75,29	74,68
45,71	39,64	27,77	24,46	1,6155	1,3026	87,70	73,37	84,68
45,14	40,21	27,64	24,84	1,6155	1,3399	87,11	74,91	94,68
45,63	41,08	27,50	26,85	1,5685	1,6441	86,40	83,64	104,68
45,63	41,08	27,50	27,04	1,5685	1,6779	86,40	84,51	114,68
45,44	39,37	27,45	26,65	1,5685	1,6808	86,21	82,82	124,68
45,44	40,70	27,45	27,22	1,5685	1,6992	86,21	84,67	134,68

```

IEF285I WATFIV.FUNLIB          KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I WATFIV.WATLIB          KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I WATFIV.ERRTEXTS        KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I SYS95227.T095326.RF104.MEIRA.R0000001  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS3.
IEF285I SYS95227.T095326.RF104.MEIRA.R0000002  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= VS1CIC.
IEF285I SYS95227.T095326.RF104.MEIRA.R0000003  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS3.
IEF285I SYS95227.T095326.RF104.MEIRA.R0000004  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= VS1CIC.
IEF373I STEP /WAT  / START 95227.0953
IEF374I STEP /WAT  / STOP 95227.0953 CPU 0MIN 00.76SEC STOR VIRT2048K
IEF298I MEIRA  SYSOUT=H.
IEF375I JOB /MEIRA  / START 95227.0953
IEF376I JOB /MEIRA  / STOP 95227.0953 CPU 0MIN 00.76SEC
      □JOB      X,LIBLIST,TIME=40,PAGE=20
1      DOUBLE PRECISION TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V
2      INTEGER COND,CONT
      C*****
      CENTRADA: TEMPERATURA DE BULBO SECO E UMIDADE RELATIVA
      C*****
3      WRITE(6,10)
4      10 FORMAT(/,5X,'TBS',5X,'TDP', 5X,'TBU',5X,'U.ABS.',4X,'U.REL',2X,
      *'ENTALPIA',3X,'VOL.ESP.')
```

```
5      READ(5, 40)TBS,UREL
```

```
6      CONT = 0
```

```
7      20 CONTINUE
```

```
8      CALL PTBSUR(TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V,COND)
```

```
9      IF (COND.EQ.0) THEN DO
```

```
10     WRITE(6,30) TBS,TDP,TBU,W,UREL,H,V
```

```
11     30  FORMAT(1X,3F8.2,F11.6,F8.4,F10.2,F11.6)
```

```
12     ELSE DO
```

```
13     WRITE(6,*)'FORA DA FAIXA DE TEMPERATURA'
```

```
14     END IF
```

```
15     READ(5,40) TBS,UREL
```

```

16  CONT = CONT + 1
17  IF (CONT.EQ.4) THEN DO
18  WRITE(6,*) ' '
19  CONT = 0
20  END IF
21  IF(TBS.LT.1000) GO TO 20
22  40 FORMAT (F8.3,F5.2)
23  STOP
24  END

C
C
C  ESTA SUBROTINA EXECUTA EM WATFIV
C
C*****
25  SUBROUTINE PTBSUR(TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V,COND)
C*****
C* SUB-ROTINA PSICROMETRICA TEMP. DE BULBO SECO E UMIDADE RELATIVA *
C*****
C
C  A SUBROTINA PTBSUR EH USADA PARA CALCULAR OS PARAMETROS
C PSICROMETRICOS DANDO COMO ENTRADA A TEMPERATURA DE BULBO SECO E
C UMIDADE REALATIVA. OS PARAMETROS SAO DETERMINADOS EM UNIDADES
SI.
C
C
C  CHAMADA: CALL PTBSUR(TBS,TBU,TDP,W,EREL,H,V,COND)
C
C*****INSTITUICAO*****
C  UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
C  CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA
C  DEPARTAMENTO DE ENG. QUIMICA
C  CAMPUS II/CAMPINA GRANDE /PB
C
C*****REFERENCIAS*****
C
C  WILHWLM,L.R."NUMERICAL CALCULATION OF PSYCHROMETRIC PROPERTIES
C  IN SI UNITS"TRANSACTIONS DA ASAE,1976,PP.318-325
C
C  BROOKER,D.B.,BAKKER-ARKEMA,F.W.,E HALL,C.W.,"DRYING CEREAL

```

C GRAINS, WESTPOR, CONNECTICUT, THE AVI PUBLISHING CO. INC, 1974

C

C*****PROGRAMADOR*****

C

C GABRIEL FRANCISCO DA SILVA

C ALUNO DO MESTRADO DE ENG. QUIMICA

C EM 04/07/1991

C PROIBIDA A COPIA DESTA ROTINA. SOMENTE COM AUTORIZACAO DO MESMO.

C

C*****VARIABLES DECLARADAS*****

C

C TBS - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM GRAUS CELSIUS, VARIABEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C KTBS - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KELVIN, VARIABEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C TBU - TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM GRAUS CELSIUS, VARIABEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C KTBU - TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM KELVIN, VARIABEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C TDP - TEMPERATURA NO PONTO DE ORVALHO EM GRAUS CELSIUS, VARIABEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C KTDP - TEMPERATURA NO PONTO DE ORVALHO EM KELVIN, VARIABEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C P - PRESSAO ATMOSFERICA EM KILO PASCAL, VARIABEL TIPO DOUBLE

C PRECISION

C R - CONSTANTE DOS GASES IDEAIS PARA O AR ATMOSFERICO, VARIABEL

C TIPO DOUBLE PRECISION.

C PWSS - PRESSAO DE SATURACAO NA TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KILO

C PASCAL, VARIABEL TIPO DOUBLE PRECISION.

C WSS - UMIDADE ABSOLUTA NA TEMPERATURA DE BULBO SECO, VARIABEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C WSU - UMIDADE ABSOLUTA NA TEMPERATURA DE BULBO UMIDO, VARIABEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C W - UMIDADE ABSOLUTA, VARIABEL TIPO DOUBLE PRECISION.

C PW - PRESSAO DE VAPOR EM KILO PASCAL, VARIABEL TIPO DOUBLE

C PRECISION

C UREL - UMIDADE RELATIVA DECIMAL, VARIABEL TIPO DOUBLE PRECISION

C H - ENTALPIA ESPECIFICA EM JOULE/GRAMA, VARIABEL TIPO DOUBLE

C PRECISION.

```

C V - VOLUME ESPECIFICO EM METROCUBICO/KILOGRAMA, VARIABEL TIPO
C   DOUBLE PRECISION.
C COND - VARIABEL INTEIRA, CONDICAO QUE INDICA:
C   0 - A TEMPERATURA (BULBO SECO OU UMIDO)ESTA DENTRO DA FAIXA
C     DE VALIDADE DAS EQUACOES.
C   1 - A TEMPERATURA ESTA FORA DA FAIXA.
C
C*****PROGRAMA EXEMPLO*****
C
C   DOUBLE PRECISION TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V
C*****
C   ENTRADA: TEMPERATURA DE BULBO SECO E UMIDADE RELATIVA
C*****
C   WRITE(6,10)
C10  FORMAT(/,5X,'TBS',5X,'TDP',5X,'TBU',5X,'U.ABS.',4X,'U.REL.',2X,
C     *'ELTALPIA',2X,'VOL.ESP.')
```

C READ, TBS, UREL

C20 CONTINUE

C CALL PTBSUR(TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V,COND)

C IF(COND.EQ.0) THEN DO

C WRITE(6,30) TBS,TDP,TBU,W,UREL,H,V

C30 FORMAT(1X,3F8.2,F11.6,F8.3,F10.2,F11.6)

C ELSE DO

C WRITE(6,*) 'FORA DA FAIXA DE TEMPERATURA'

C END IF

C READ TBS, UREL

C IF (TBS.LT.1000) GO TO 20

C STOP

C END

C

C

C*****

C

C INICIO DA SUBROTINA

C

26 DOUBLE PRECISION TBS,TBU,KTBS,KTBU,P,R,PWSU,WSU,PWSS,WSS,W,PW,

* UREL,ALFA,TDP,H,V,A,B,XTOL,FTOL

27 EXTERNAL F

28 INTEGER IER,COND

```

29   P = 0.101325D03
30   R = 0.28705D00
31   COND = 0
32   XTOL = 0.1D-4
33   FTOL = 0.1D-6
34   ITMAX = 100
35   KTBS = TBS + 0.27316D03
36   A = 0.22316D03
37   B = KTBS
38   IF ((TBS.GE.(-0.50D02)).AND.(TBS.LT.0.120D03)) THEN DO
39     IF (KTBS.LT.0.27316D03) THEN DO
40       PWSS = DEXP(0.242779D02 - 0.623864D04/KTBS - 0.344438D00*
*         DLOG(KTBS))
41     ELSE DO
42       IF (KTBS.GE.0.27316D03) THEN DO
43         PWSS = DEXP((-0.751152D04/KTBS) + 0.8963121D02 +
*         0.023998970D00*KTBS - 1.1654551D-05*KTBS**2 -
*         1.2810336D-08*KTBS**3 + 2.0998405D-11*KTBS**4 -
*         12.150799*DLOG(KTBS))
44       END IF
45     END IF
46     PW = PWSS * UREL
47     W = 0.62198D0*(PW/(P-PW))
48     ALFA = DLOG(PW)
49     IF (TBS.LT.0) THEN DO
50       TDP = 0.5994D01 + 0.1241D02*ALFA + 0.4273D00*ALFA**2
51     ELSE DO
52       IF((TBS.GE.0).AND.(TBS.LT.0.50D02)) THEN DO
53         TDP = 0.6983D01 + 0.1438D02*ALFA + 0.1079D01*ALFA**2
54       ELSE DO
55         IF(TBS.GE.0.50D02) THEN DO
56           TDP = 0.1380D02 + 0.9478D01* ALFA + 0.1991D01*ALFA**2
57         END IF
58       END IF
59     END IF
60     H = 0.1006D01*TBS + W*(0.2501D04 + 0.1775D01*TBS)
61     V = (R*KTBS)*(1 + 0.16078D01*W)/P
62     CALL DREGFA(F,A,B,XTOL,FTOL,ITMAX,KTBU,KTBS,W,P,IER)
63     TBU = KTBU - 0.27316D03

```

```

64  ELSE DO
65    COND = 1
66  END IF
67  RETURN
68  END
69  SUBROUTINE DREGFA(F,A,B,XTOL,FTOL,ITMAX,ROOT,T,W,P,IER)
70  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
71  XTOLSQ = XTOL*XTOL
72  IER = 4
73  FA = F(A,T,W,P)
74  FB = F(B,T,W,P)
75  FWLAST = 0D0
76  IF ((DABS(FA).GT.FTOL).AND.(DABS(FB).GT.FTOL)) GO TO 8
77  IER = 1
78  ITMAX = 0
79  ROOT = B
80  IF (DABS(FA).LE.DABS(FB)) ROOT = A
81  RETURN
82  8  ROOT = (FB*A-FA*B)/(FB-FA)
83  FW = F(ROOT,T,W,P)
84  DO 18 I = 1,ITMAX
85    IF ((FA*FB).LT.0.D0) GO TO 10
86    IER = 5
87    GO TO 20
88  10  WR = ROOT
89    IF ((FA*FW).GT.0.D0) GO TO 12
90    IF ((FWLAST*FW).GT.0.D0) FA = FA/2.D0
91    B = WR
92    FB = FW
93    GO TO 14
94  12  IF ((FWLAST*FW).GT.0.D0)FB = FB/2.D0
95    A = WR
96    FA = FW
97  14  ROOT = (A*FB-B*FA)/(FB-FA)
98    FWLAST = FW
99    FW = F(ROOT,T,W,P)
100   IF(DABS(FW).LE.FTOL) IER = 3
101   IF(DABS(ROOT).LE.XTOLSQ.AND.IER.EQ.3) GO TO 20
102   IF(DABS(ROOT-W).LE.XTOL*DABS(ROOT).AND.IER.GT.2)

```

```

*      IER = IER -2
103    IF(IER.EQ.1) GO TO 20
104    18 CONTINUE
105    RETURN
106    20 ITMAX = 1
107    RETURN
108    END
109    DOUBLE PRECISION FUNCTION F(KTBU,KTBS,W,P)
110    DOUBLE PRECISION TBS,KTBS,TBU,KTBU,W,P,LPWSU1,LPWSU2,WSU
111    TBU = KTBU - 0.27316D03
112    TBS = KTBS - 0.27316D03
113    IF(KTBU.LT.0.27316D03) THEN DO
114    LPWSU1 = 0.242779D02-0.623864D04/KTBU-0.344438D00*DLOG(KTBU)
115    ELSE DO
116    IF(KTBU.GE.0.27316D03) THEN DO
117    LPWSU1 = (-0.751152D04/KTBU) + 0.8963121D02 + 0.2399870D-01*KTBU-
*      1.1654551D-05*KTBU**2 - 1.2810336D-08*KTBU**3 +
*      2.0998405D-11*KTBU**4 - 0.12150799D02*DLOG(KTBU)
118    END IF
119    END IF
120    WSU = (W*(0.2501D04 + 0.1775D01*TBS - 0.4186D01*TBU) +
*      0.1006D01*(TBS-TBU))/(0.2501D04 - 0.2411D01*TBU)
121    LPWSU2 = DLOG((WSU*P)/(0.62198 + WSU))
122    F = LPWSU1 - LPWSU2
123    RETURN
124    END

```

□ENTRY

TBS	TDP	TBU	U.ABS.	U.REL	ENTALPIA	VOL.ESP.
29.00	19.68	22.48	0.014423	0.5730	65.99	0.875859
30.00	19.38	22.58	0.014153	0.5310	66.33	0.878384
30.40	19.57	22.80	0.014321	0.5250	67.17	0.879775
31.20	19.71	23.11	0.014450	0.5060	68.33	0.882273

STATEMENTS EXECUTED= 9498

CORE USAGE OBJECT CODE= 6016 BYTES,ARRAY AREA= 8 BYTES,TOTAL AREA

DIAGNOSTICS NUMBER OF ERRORS= 0, NUMBER OF WARNINGS= 0, NUMBE

COMPILE TIME= 0.38 SEC,EXECUTION TIME= 0.22 SEC, 9.53.37 TUESDAY

□STOP


```

16   CONT = CONT + 1
17   IF (CONT.EQ.4) THEN DO
18   WRITE (6,*) ' '
19   CONT = 0
20   END IF
21   IF(TBS.LT.1000) GO TO 20
22  40 FORMAT (F7.2,F11.6)
23   STOP
24   END

```

C

C

C ESTA SUBROTINA EXECUTA EM WATFIV

C

C*****

```

25   SUBROUTINE PTBSUA(TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V,COND)

```

C*****

C* SUB-ROTINA PSICROMETRICA TEMP. DE BULBO SECO E UMIDADE ABSOLUTA *

C*****

C

C A SUBROTINA PTBSUA EH USADA PARA CALCULAR OS PARAMETROS

C PSICROMETRICOS DANDO COMO ENTRADA A TEMPERATURA DE BULBO SECO E

C UMIDADE ABSOLUTA. OS PARAMETROS SAO DETERMINADOS EM UNIDADES SI.

C

C

C CHAMADA: CALL PTBSUA(TBS,TBU,TDP,W,EREL,H,V,COND)

C

C*****INSTITUICAO*****

C UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

C CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA

C DEPARTAMENTO DE ENG. QUIMICA

C CAMPUS II/CAMPINA GRANDE /PB

C

C*****REFERENCIAS*****

C

C WILHWLM,L.R.."NUMERICAL CALCULATION OF PSYCHROMETRIC PROPERTIES

C IN SI UNITS"TRANSACTIONS DA ASAE,1976,PP.318-325

C

C BROOKER,D.B..BAKKER-ARKEMA,F.W.,E HALL,C.W.,"DRYING CEREAL

C GRAINS,WESTPOR,CONNECTICUT, THE AVI PUBLISHING CO.INC,1974

C

C*****PROGRAMADOR*****

C

C GABRIEL FRANCISCO DA SILVA

C ALUNO DO MESTRADO DE ENG. QUIMICA

C EM 04/07/1991

C PROIBIDA A COPIA DESTA ROTINA.SOMENTE COM AUTORIZACAO DO MESMO.

C

C*****VARIAVEIS DECLARADAS*****

C

C TBS - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM GRAUS CELSIUS,VARIAVEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C KTBS - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KELVIN, VARIAVEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C TBU - TEMPERATURA DE BULBO UMIDOEM GRAUS CELSIUS, VARIAVEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C KTBU - TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM KELVIN, VARIAVEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C TDP - TEMPERATURA NO PONTO DE ORVALHO EM GRAUS CELSIUS,VARIAVEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C KTDP - TEMPERATURA NO PONTO DE ORVALHO EM KELVIN, VARIAVEL TIPO

C DOUBLE PRECISION

C P - PRESSAO ATMOSFERICA EM KILO PASCAL, VARIAVEL TIPO DOUBLE

C PRECISION

C R - CONSTANTE DOS GASES IDEAIS PARA O AR ATMOSFERICO, VARIAVEL

C TIPO DOUBLE PRECISION.

C PWSS - PRESSAO DE SATURACAO NA TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KILO

C PASCAL, VARIAVEL TIPO DOUBLE PRECISION.

C WSS - UMIDADE ABSOLUTA NA TEMPERATURA DE BULBO SECO, VARIAVEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C WSU - UMIDADE ABSOLUTA NA TEMPERATURA DE BULBO UMIDO, VARIAVEL

C TIPO DOUBLE PRECISION

C W - UMIDADE ABSOLUTA, VARIAVEL TIPO DOUBLE PRECISION.

C PW - PRESSAO DE VAPOR EM KILO PASCAL, VARIAVEL TIPO DOUBLE

C PRECISION

C UREL - UMIDADE RELATIVA DECIMAL, VARIAVEL TIPO DOUBLE PRECISION

C H - ENTALPIA ESPECIFICA EM JOULE/GRAMA, VARIAVEL TIPO DOUBLE

C PRECISION.

C V - VOLUME ESPECIFICO EM METROCUBICO/KILOGRAMA, VARIAVEL TIPO

```

C   DOUBLE PRECISION.
C COND - VARIÁVEL INTEIRA, CONDIÇÃO QUE INDICA:
C   0 - A TEMPERATURA (BULBO SECO OU ÚMIDO) ESTÁ DENTRO DA FAIXA
C     DE VALIDADE DAS EQUAÇÕES.
C   1 - A TEMPERATURA ESTÁ FORA DA FAIXA.
C
C*****PROGRAMA EXEMPLO*****
C
C   DOUBLE PRECISION TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V
C*****
C   ENTRADA: TEMPERATURA DE BULBO SECO E UMIDADE ABSOLUTA
C*****
C   WRITE(6,10)
C10  FORMAT(/,5X,'TBS',5X,'TDP',5X,'TBU',5X,'U.ABS.',4X,'U.REL.',2X,
C     *'ELTALPIA',2X,'VOL.ESP.')
```

```

C   READ, TBS, W
C20  CONTINUE
C   CALL PTBSUA(TBS,TBU,TDP,W,UREL,H,V,COND)
C   IF(COND.EQ.0) THEN DO
C     WRITE(6,30) TBS,TDP,TBU,W,UREL,H,V
C30  FORMAT(1X,3F8.2,F11.6,F8.3,F10.2,F11.6)
C   ELSE DO
C     WRITE(6,*) 'FORA DA FAIXA DE TEMPERATURA'
C   END IF
C   READ TBS, W
C   IF (TBS.LT.1000) GO TO 20
C   STOP
C   END
C
C
C*****
C
C   INICIO DA SUBROTINA
C
26   DOUBLE PRECISION TBS,TBU,KTBS,KTBU,P,R,PWSU,WSU,PWSS,WSS,W,PW,
*     UREL,ALFA,TDP,H,V,A,B,XTOL,FTOL
27   EXTERNAL F
28   INTEGER IER,COND
29   P = 0.101325D03
```

```

30  R = 0.28705D00
31  COND = 0
32  XTOL = 0.1D-4
33  FTOL = 0.1D-6
34  ITMAX = 100
35  KTBS = TBS + 0.27316D03
36  A = 0.22316D03
37  B = KTBS
38  IF ((TBS.GE.(-0.50D02)).AND.(TBS.LT.0.120D03)) THEN DO
39    IF (KTBS.LT.0.27316D03) THEN DO
40      PWSS = DEXP(0.242779D02 - 0.623864D04/KTBS - 0.344438D00*
*        DLOG(KTBS))
41    ELSE DO
42      IF (KTBS.GE.0.27316D03) THEN DO
43        PWSS = DEXP((-0.751152D04/KTBS) + 0.8963121D02 +
*        0.023998970D00*KTBS - 1.1654551D-05*KTBS**2 -
*        1.2810336D-08*KTBS**3 + 2.0998405D-11*KTBS**4 -
*        12.150799*DLOG(KTBS))
44      END IF
45    END IF
46    PW = (P*W)/(0.62198D00 + W)
47    UREL = PW/PWSS
48    ALFA = DLOG(PW)
49    IF (TBS.LT.0) THEN DO
50      TDP = 0.5994D01 + 0.1241D02*ALFA + 0.4273D00*ALFA**2
51    ELSE DO
52      IF((TBS.GE.0).AND.(TBS.LT.0.50D02)) THEN DO
53        TDP = 0.6983D01 + 0.1438D02*ALFA + 0.1079D01*ALFA**2
54      ELSE DO
55        IF(TBS.GE.0.50D02) THEN DO
56          TDP = 0.1380D02 + 0.9478D01*ALFA + 0.1991D01*ALFA**2
57        END IF
58      END IF
59    END IF
60    H = 0.1006D01*TBS + W*(0.2501D04 + 0.1775D01*TBS)
61    V = (R*KTBS)*(1 + 0.16078D01*W)/P
62    CALL DREGFA(F,A,B,XTOL,FTOL,ITMAX,KTBU,KTBS,W,P,IER)
63    TBU = KTBU - 0.27316D03
64  ELSE DO

```

```

65     COND = 1
66     END IF
67     RETURN
68     END
69     SUBROUTINE DREGFA(F,A,B,XTOL,FTOL,ITMAX,ROOT,T,W,P,IER)
70     IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
71     XTOLSQ = XTOL*XTOL
72     IER = 4
73     FA = F(A,T,W,P)
74     FB = F(B,T,W,P)
75     FWLAST = 0D0
76     IF ((DABS(FA).GT.FTOL).AND.(DABS(FB).GT.FTOL)) GO TO 8
77     IER = 1
78     ITMAX = 0
79     ROOT = B
80     IF (DABS(FA).LE.DABS(FB)) ROOT = A
81     RETURN
82 8   ROOT = (FB*A-FA*B)/(FB-FA)
83     FW = F(ROOT,T,W,P)
84     DO 18 I = 1,ITMAX
85     IF ((FA*FB).LT.0.D0) GO TO 10
86     IER = 5
87     GO TO 20
88 10  WR = ROOT
89     IF ((FA*FW).GT.0.D0) GO TO 12
90     IF ((FWLAST*FW).GT.0.D0) FA = FA/2.D0
91     B = WR
92     FB = FW
93     GO TO 14
94 12  IF ((FWLAST*FW).GT.0.D0) FB = FB/2.D0
95     A = WR
96     FA = FW
97 14  ROOT = (A*FB-B*FA)/(FB-FA)
98     FWLAST = FW
99     FW = F(ROOT,T,W,P)
100    IF(DABS(FW).LE.FTOL) IER = 3
101    IF(DABS(ROOT).LE.XTOLSQ.AND.IER.EQ.3) GO TO 20
102    IF(DABS(ROOT-W).LE.XTOL*DABS(ROOT).AND.IER.GT.2)
*     IER = IER - 2

```

```

103     IF(IER.EQ.1) GO TO 20
104 18 CONTINUE
105     RETURN
106 20 ITMAX = 1
107     RETURN
108     END
109     DOUBLE PRECISION FUNCTION F(KTBU,KTBS,W,P)
110     DOUBLE PRECISION TBS,KTBS,TBU,KTBU,W,P,LPWSU1,LPWSU2,WSU
111     TBU = KTBU - 0.27316D03
112     TBS = KTBS - 0.27316D03
113     IF(KTBU.LT.0.27316D03) THEN DO
114     LPWSU1 = 0.242779D02-0.623864D04/KTBU-0.344438D00*DLOG(KTBU)
115     ELSE DO
116     IF(KTBU.GE.0.27316D03) THEN DO
117     LPWSU1 = (-0.751152D04/KTBU) + 0.8963121D02 + 0.2399870D-01*KTBU-
*       1.1654551D-05*KTBU**2 - 1.2810336D-08*KTBU**3 +
*       2.0998405D-11*KTBU**4 - 0.12150799D02*DLOG(KTBU)
118     END IF
119     END IF
120     WSU = (W*(0.2501D04 + 0.1775D01*TBS - 0.4186D01*TBU) +
*       0.1006D01*(TBS-TBU))/(0.2501D04 - 0.2411D01*TBU)
121     LPWSU2 = DLOG((WSU*P)/(0.62198 + WSU))
122     F = LPWSU1 - LPWSU2
123     RETURN
124     END

```

□ENTRY

TBS	TBU	TPO	U.ABS.	U.REL	ENTALPIA	VOL.ESP.
44.75	26.58	19.69	0.014432	0.2427	82.26	0.921525
44.94	26.63	19.69	0.014432	0.2403	82.46	0.922076
44.94	26.63	19.69	0.014432	0.2403	82.46	0.922076
44.94	26.63	19.69	0.014432	0.2403	82.46	0.922076
44.94	26.63	19.69	0.014432	0.2403	82.46	0.922076
44.61	26.39	19.38	0.014153	0.2398	81.39	0.920716
45.56	26.62	19.38	0.014153	0.2284	82.37	0.923468
44.99	26.48	19.38	0.014153	0.2352	81.79	0.921817
44.99	26.48	19.38	0.014153	0.2352	81.79	0.921817

45.20	26.63	19.57	0.014321	0.2354	82.44	0.922669
44.63	26.49	19.57	0.014321	0.2424	81.85	0.921017
45.01	26.58	19.57	0.014321	0.2377	82.24	0.922118
45.62	26.80	19.71	0.014450	0.2324	83.20	0.924073
45.81	26.85	19.71	0.014450	0.2301	83.40	0.924624
45.62	26.80	19.71	0.014450	0.2324	83.20	0.924073
46.19	26.94	19.71	0.014450	0.2257	83.79	0.925726

STATEMENTS EXECUTED= 37995

CORE USAGE OBJECT CODE= 6016 BYTES,ARRAY AREA= 8 BYTES,TOTAL AREA

DIAGNOSTICS NUMBER OF ERRORS= 0, NUMBER OF WARNINGS= 0, NUMBE

COMPILE TIME= 0.43 SEC,EXECUTION TIME= 0.87 SEC, 10.02.18 TUESDAY

C□STOP

//MEIRA JOB MSGCLASS=H

LOG IEF4031 MEIRA STARTED TIME=09.21.46

LOG IEF4041 MEIRA ENDED TIME=09.22.04

// EXEC WATFOR

XXWAT EXEC PGM=WATFIV,REGION=120K 00000100

XXSTEPLIB DD DSN=WATFIV.JOBLIB,VOL=SER=UFPVS2,DISP=SHR,UNIT=SYSDA
00000200

XXWATLIB DD DSN=WATFIV.FUNLIB,UNIT=SYSDA,VOL=SER=UFPVS2,DISP=SHR
00000300

XX DD DSN=WATFIV.WATLIB,UNIT=SYSDA,VOL=SER=UFPVS2,DISP=SHR
00000400

XXWATERRS DD DSN=WATFIV.ERRTEXTS,UNIT=SYSDA,VOL=SER=UFPVS2,
00000500

XX DISP=SHR 00000600

XXFT01F001 DD SPACE=(TRK,(20,10)),DCB=(RECFM=VBS,BLKSIZE=1024), 00000700
XX UNIT=SYSDA 00000800

XXFT02F001 DD SPACE=(TRK,(20,10)),DCB=(RECFM=VBS,BLKSIZE=1024), 00000900
XX UNIT=SYSDA 00001000

XXFT03F001 DD SPACE=(TRK,(20,10)),DCB=(RECFM=VBS,BLKSIZE=1024), 00001100
XX UNIT=SYSDA 00001200

XXFT04F001 DD SPACE=(TRK,(20,10)),DCB=(RECFM=VBS,BLKSIZE=1024), 00001300
XX UNIT=SYSDA 00001400

XXFT05F001 DD DDNAME=SYSIN 00001500

//FT06F001 DD SYSOUT=H

X/FT06F001 DD SYSOUT=A,OUTLIM=0 00001600

XXFT07F001 DD SYSOUT=B 00001700

//SYSIN DD *

IEF236I ALLOC. FOR MEIRA WAT

IEF237I 153 ALLOCATED TO STEPLIB

IEF237I 153 ALLOCATED TO WATLIB

IEF237I 153 ALLOCATED TO

IEF237I 153 ALLOCATED TO WATERRS

IEF237I 151 ALLOCATED TO FT01F001

IEF237I 152 ALLOCATED TO FT02F001

IEF237I 151 ALLOCATED TO FT03F001

IEF237I 150 ALLOCATED TO FT04F001

IEF142I - STEP WAS EXECUTED - COND CODE 0000

IEF285I WATFIV.JOBLIB KEPT

IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.

```

IEF285I WATFIV.FUNLIB          KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I WATFIV.WATLIB          KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I WATFIV.ERRTEXTS        KEPT
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS2.
IEF285I SYS95229.T091954.RF104.MEIRA.R0000001  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS3.
IEF285I SYS95229.T091954.RF104.MEIRA.R0000002  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= VS1CIC.
IEF285I SYS95229.T091954.RF104.MEIRA.R0000003  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS3.
IEF285I SYS95229.T091954.RF104.MEIRA.R0000004  DELETED
IEF285I VOL SER NOS= UFPVS4.
IEF373I STEP /WAT  / START 95229.0921
IEF374I STEP /WAT  / STOP 95229.0922 CPU 0MIN 00.42SEC STOR VIRT2048K
IEF298I MEIRA  SYSOUT=H.
IEF375I JOB /MEIRA  / START 95229.0921
IEF376I JOB /MEIRA  / STOP 95229.0922 CPU 0MIN 00.42SEC
   □JOB      X,LIBLIST,TIME=40,PAGE=20
1   DOUBLE PRECISION P,R,T,TWB,W,DSAT,RH,PW,TDP,H,V
2   INTEGER CONT
C*****
C ENTRADA: TEMPERATURA DE BULBO SECO E TEMPERATURA DE BULBO UMIDO
C*****
3   WRITE(6,10)
4   10 FORMAT(/,5X,'TBS',5X,'TBU', 5X,'TPO',5X,'U.ABS.',4X,'U.REL',2X,
   *'ENTALPIA',3X,'VOL.ESP.')
```

```
5   READ(5, 40)T,TWB
```

```
6   CONT = 0
```

```
7   20 CONTINUE
```

```
8   CALL WETBLB(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)
```

```
C
```

```
C
```

```
C IF (COND.EQ.0) THEN DO
```

```
9   WRITE(6,30) T,TWB,TDP,W,RH,H,V
```

```
10  30 FORMAT(1X,3F8.2,F11.6,F9.4,F10.4,F11.6)
```

```
C ELSE DO
```

```
C WRITE(6,*)'FORA DA FAIXA DE TEMPERATURA'
```

```

C   END IF
11  READ(5,40) T,TWB
12  CONT = CONT + 1
13  IF (CONT.EQ.4) THEN DO
14  WRITE (6,*)
15  CONT = 0
16  END IF
17  IF(T.LT.1000) GO TO 20
18  40 FORMAT (F8.3,F8.3)
19  STOP
20  END

C
C
C
C  ESTA SUBROTINA EXECUTA EM WATFIV
C
C*****
21  SUBROUTINE WETBLB(P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB)
C*****
C      SUB-ROTINA PSICROMETRICA
C*****
C
C  A SUBROTINA WETBLB EH USADA PARA CALCULAR OS PARAMETROS
C PSICROMETRICOS, DANDO COMO ENTRADA AS TEMPERATURAS DE BULBO
C SECO E DE BULBO UMIDO. OS PARAMETROS SAO DETERMINADOS EM
C UNIDADES SI.
C
C*****
C*****
C      REFERENCIA
C
C  L.R. WILHELM, TRANS. ASAE, VOL.19,318-325 (1976)
C
C  OBS.:A SUBROTINA ORIGINAL FOI ESCRITA POR KEITH REINHARDT
C
C*****
C*****
C      VARIAVEIS DECLARADAS
C*****

```

C
 C DSAT - GRAU DE SATURACAO
 C H - ENTALPIA EM JOULE/GRAMA
 C P - PRESSAO ATMOSFERICA EM KILO PASCAL
 C PW - PRESSAO DE VAPOR EM KILO PASCAL
 C PWS - PRESSAO DE SATURACAO NA TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KPA
 C PWSWB - PRESSAO DE SATURACAO NA TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM
 KPA
 C R - CONSTANTE DOS GASES IDEAIS PARA O AR ATMOSFERICO
 C RH - UMIDADE RELATIVA DECIMAL
 C T - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM GRAUS CELSIUS
 C TDP - TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO EM GRAUS CELSIUS
 C TK - TEMPERATURA DE BULBO SECO EM KELVIN
 C TWB - TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM GRAUS CELSIUS
 C TWBK - TEMPERATURA DE BULBO UMIDO EM KELVIN
 C V - VOLUME ESPECIFICO
 C W - UMIDADE ABSOLUTA
 C WS - UMIDADE ABSOLUTA DE SATURACAO NA TEMP. DE BULBO SECO
 C WSWB - UMIDADE ABSOLUTA DE SATURACAO NA TEMP. DE BULBO UMIDO
 C
 C*****
 C
 C*****
 C INICIO DA SUBROTINA
 C*****
 C
 22 DOUBLE PRECISION P,R,RH,H,W,DSAT,V,PW,TDP,T,TWB,TK,TWBK,
 * PWSWB,WSWB,PWS,WS,ALFA
 C
 C COND = 0.0
 23 P = 0.101325D03
 24 R = 0.28705D00
 25 TK = T + 273.16
 26 TWBK = TWB + 273.16
 27 IF(TWBK.LE.273.16) CALL WVP1(TWBK,PWSWB)
 28 IF(TWBK.GT.273.16) CALL WVP2(TWBK,PWSWB)
 29 WSWB = 0.62198*PWSWB/(P-PWSWB)
 30 IF(TK.LE.273.16)CALL WVP1(TK,PWS)
 31 IF(TK.GT.273.16)CALL WVP2(TK,PWS)

```

32   WS = 0.62198*PWS/(P-PWS)
33   W = ((2501-2.411*TWB)*WSWB-1.006*(T-TWB))/(2501 + 1.775*T
    * -4.186*TWB)
34   DSAT = W/WS
35   PW = P*W/(0.62198 + W)
36   RH = PW/PWS
37   ALPHA = DLOG(PW)
38   IF(T.LE.0)TDP= 5.994 + 12.41*ALPHA + 0.4273*ALPHA**2
39   IF(T.GT.0.AND.T.LE.50) TDP = 6.983 + 14.38*ALPHA + 1.079*ALPHA**
40   IF(T.GT.50) TDP= 13.8 + 9.478*ALPHA + 1.991*ALPHA**2
41   H = 1.006*T + W*(2501 + 1.775*T)
42   V = R*TK/P*(1.0 + 1.6078*W)
43   RETURN
44   END

```

C*****

```

45   SUBROUTINE WVP1(TT,PWS)
46   DOUBLE PRECISION TT,PWS
47   PWS = DEXP(24.2779-6238.64/TT-0.344438*DLOG(TT))
48   RETURN
49   END

```

C*****

```

50   SUBROUTINE WVP2(TT,PWS)
51   DOUBLE PRECISION TT,PWS
52   PWS = DEXP(-7511.52/TT + 89.63121 + 0.02399897*TT-1.1654551D-5*
    * TT**2 - 1.2810336D-8*TT**3 + 2.0998405D-11*TT**4
    * 12.150799*DLOG(TT))
53   RETURN
54   END

```

□ENTRY

TBS	TBU	TPO	U.ABS.	U.REL	ENTALPIA	VOL.ESP.
40.38	25.77	20.16	0.014868	0.3141	78.8717	0.909480 [†]
37.16	25.39	20.91	0.015581	0.3909	77.3777	0.901147
42.28	24.44	16.67	0.011896	0.2284	73.1773	0.910721
42.47	25.39	18.48	0.013359	0.2533	77.1416	0.913373
42.47	25.39	18.48	0.013359	0.2533	77.1416	0.913373
37.97	25.26	20.33	0.015025	0.3611	76.7871	0.902712
42.52	26.58	20.68	0.015362	0.2896	82.3546	0.916398

42.52 26.20 19.99 0.014704 0.2775 80.6594 0.915452

42.52 26.20 19.99 0.014704 0.2775 80.6594 0.915452

40.84 25.28 19.05 0.013857 0.2861 76.7451 0.909368

42.16 25.08 18.02 0.012977 0.2503 75.8407 0.911928

42.73 25.66 18.87 0.013700 0.2562 78.2894 0.914617

43.34 26.64 20.43 0.015123 0.2733 82.5866 0.918434

43.53 26.46 20.02 0.014730 0.2637 81.7694 0.918419

43.53 26.81 20.66 0.015342 0.2744 83.3471 0.919301

43.72 26.89 20.73 0.015404 0.2728 83.7022 0.919942

STATEMENTS EXECUTED= 523

CORE USAGE OBJECT CODE= 3320 BYTES,ARRAY AREA= 0 BYTES,TOTAL AREA

DIAGNOSTICS NUMBER OF ERRORS= 0, NUMBER OF WARNINGS= 0, NUMBE

COMPILE TIME= 0.20 SEC,EXECUTION TIME= 0.06 SEC, 9.21.53 THURSDA

C□STOP