

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE DOUTORADO EM
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

TESE DE DOUTORADO

**SECAGEM DE LEVEDURAS – ESTUDO
COMPARATIVO DO DESEMPENHO DOS
SECADORES EM LEITO DE JORRO E LEITO
FLUIDIZADO**

VIMÁRIO SIMÕES SILVA

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA
AGOSTO - 2004**

Secagem de leveduras – estudo comparativo do desempenho dos secadores em leito de jorro e leito fluidizado

Vimario Simões Silva

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande - Campus I, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Odelsia Leonor Sanchez de Alsina
Orientadora

Flávio Luiz Honorato da Silva
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586s
2004

Silva, Vímário Simões
Secagem de leveduras = estudo comparativo do desempenho dos secadores
em leito de jorro e leito fluidizado / Vímário Simões Silva. — Campina Grande:
UFCG, 2004.

156f. : il., col.

Inclui Bibliografia.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal de
Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Odelsia Leonor Sanchez de Alsina e Flávio Luiz Honorato da
Silva.

1— Secagem 2— Leveduras 3— Leito de jorro 4— Leito fluidizado 1—
Título

CDU 664.642:66.047.4.5

Secagem de leveduras – Estudo comparativo do desempenho dos secadores em leito de jorro e leito fluidizado

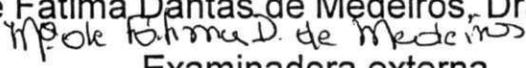
Tese aprovada em 31 de agosto de 2004

Vimario Simões Silva


Profa Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, Dra., DEQ/UFCG
Orientadora


Flávio Luiz Honorato da Silva, Dr., DEQ/UFCG
Orientador


Florência Cecília Menegalli, Dra., FEA/UNICAMP
Examinadora externa


Maria de Fátima Dantas de Medeiros, Dra., DEQ/UFRN
Examinadora externa


Gabriel Francisco da Silva, Dr., DEQ/UFS
Examinador externo


Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia, Dra., DEAg/UFCG
Examinadora interna

Dedicatória

Ao
Meus pais: Vicente Simões (in
memorian) e Maria do Carmo
Simões
Minha esposa: Maria José Batista
Simões
Meus filhos: Thiago e Matheus

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina e Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva pela orientação deste trabalho;

A todos os colegas do DEQ pela força em todos os momentos desta caminhada;

Em especial ao Professor e irmão Vicemário Simões, por me dar a oportunidade de continuar meus estudos despertando a interesse pela Química;

Ana Paula Trindade Rocha, pelo estímulo e colaboração, tanto na parte experimental como na análise e discussão dos resultados;

A algumas pessoas especiais, cujos nomes não são citados aqui, gostaria de expressar toda minha gratidão, admiração e respeito. Espero que de alguma maneira, realmente possa retribuir ao menos um pouco o que fizeram por mim, que certamente não será esquecido.

UMA LIÇÃO

... Quando as pessoas me dizem, você é um sucesso, como você conseguiu? Eu me volto para aquilo que meus pais me ensinaram, seja esforçado, obtenha todas as instruções possíveis, mas depois, pelo amor de Deus, faça alguma coisa, não fique parado, porque é incrível como numa sociedade livre pode-se chegar a lugares tão sonhados, mas nunca deixe de agradecer a Deus por todas as coisas que lhe der.

Lee Iacocca - Biografia

RESUMO

Os microrganismos, além de sua importância industrial na obtenção por via biotecnológica de diversos produtos, podem ser utilizados diretamente como alimento para humanos e animais. Neste contexto, vem crescendo o interesse pelo aproveitamento de fontes protéicas não tradicionais, na formulação de ração animal. A utilização de leveduras, tem por meta suprir a carência de proteínas e vitaminas B1. A operação de secagem é importante porque prepara o produto com as características necessárias para atender as exigências de mercado e dentro deste contexto, o leite de jorro e leite fluidizado podem ser utilizados como mais uma opção dentro dos diversos tipos de secadores ora empregados nesta operação. A matéria prima utilizada neste trabalho foi a levedura do gênero *Saccharomyces cerevisiae* prensada do tipo comercial (fermento biológico fresco da marca Fleischmann^s), com umidade média de 70% em base úmida, de cor creme, e granulometria média de 0,991 mm. Os experimentos de secagem de levedura foram realizados em leite de inertes constituído de partículas de poliestireno de 3,26 mm em coluna de 10,3 cm de diâmetro e 25,3 cm de altura. Inicialmente foram levantados dados de equilíbrio higroscópico da levedura a 25, 30, 40 e 49 °C e as isotermas de dessorção obtidas foram ajustadas pelos modelos de GAB e BET. Numa segunda etapa, foi estudada a fluidodinâmica do leite de jorro e leite fluidizado para analisar o efeito da presença de leveduras sobre o comportamento do leite de inertes e definir as condições mínimas de operação de modo a estabelecer a matriz de planejamento fatorial. Com o objetivo de analisar e comparar o desempenho dos leitos fluidodinamicamente ativos foi estudada a secagem em leite de jorro e leite fluidizado. Para isto, foi seguido um planejamento fatorial tendo como variáveis de entrada a velocidade do ar e a quantidade de leveduras alimentada, e, como respostas, o rendimento, retenção, perdas, umidade do produto e teor de proteínas. A temperatura foi fixada entre 38 e 44 °C. para todos os experimentos. As taxas instantâneas de evaporação de água apresentaram flutuações na maioria dos ensaios, tanto em leite de jorro como em leite fluidizado, as eficiências energéticas de secagem foram

relativamente baixas nos dois processos, em torno de 5 a 50%. A cinética de produção de pó mostrou comportamento crescente e praticamente linear em todos os experimentos. Foi obtido nos ensaios em leite de jorro, um conteúdo de umidade no produto entre 11,65 a 31,34%, em base úmida, e teor proteínas entre 50,09 e 52,68%. Para o leite fluidizado em 7,98 a 48,72% de umidade e 40,6 a 49,7% de proteínas. Diante do exposto, o secador de leite de jorro apresentou melhor desempenho, visto que, na qualidade do produto, a umidade e teor de proteínas apresentaram melhores resultados, e um maior rendimento e menor retenção de pó. Comparado com outros secadores, apresentou desempenho maior em termos de proteínas e performance, sendo recomendado estudar o processamento com temperaturas maiores de modo a reduzir o teor de umidade do produto.

ABSTRACT

Microorganisms, aside from their industrial importance in obtaining several products by biotechnology, can be used directly as food for humans and animals. In this context, an interest in non-conventional sources of protein for animal feed has been growing. The use of yeasts has the aim of supplying the proteins and vitamin B1 requirement. The drying operation is important because it prepares the product with the characteristics necessary for attending to the market demands and in this context the spouted bed and the fluidized bed can be used as one more option in the various types of dryers used in this operation. The raw material used in this work was pressed *Saccharomyces cerevisiae* commercial type yeast (fresh biological Fleischmann yeast), with an average moisture of 70% in a wet base, cream-colored, and an average size of 0.991 mm. The yeast drying experiments were performed in inert beds constituted by polystyrene particles of 3.26 mm in a column of 10.3 cm of diameter and 25.3 cm of height. The yeast was fed at the top of the column in an intermittent regime. Initially data of hygroscopic equilibrium of the yeast were studied at 25, 30, 40 and 49 °C and the obtained desorption isotherms were adjusted by the GAB and BET models. In a second stage, the fluid dynamics of the spouted bed and the fluidized bed was studied to analyze the effect of the presence of yeast on the behavior of the inert particles bed and to define the minimal operating conditions so that the matrix of factorial design was established. With the objective of analyzing and comparing the performance of the dynamically active beds, the drying of yeast in the spouted and the fluidized bed was studied. For this, a factorial experimental design was followed. The input variables were the velocity of the air and the quantity of yeast fed and as response variables the product yield, retention, loses, moisture and protein content of the dried yeast. The temperature was fixed between 38 and 44 °C for all the experiments. The instant water evaporation rate presented fluctuations in most of the experiments, both in the spouted bed and in the fluidized bed. The drying energy efficiency was relatively low in both processes, in turn of 5 and 50 %. The powder production kinetics showed an increasing and practically linear behavior in

all the experiments. The moisture content of the product varied between 11.65 and 31.34% in a wet base and a protein content between 50.09 and 52.68% was obtained in the spouted bed tests. For the fluidized bed a 7.98 to 48.72% moisture and 40.6 to 49.7% proteins were obtained. The spouted bed dryer presented a better performance, inasmuch as, in the quality of the product, the moisture and the protein content presented best results and a greater yield and less retention of powder. Compared to other dryers, it presented a better operation in terms of protein and performance. It is recommended to study the process in a higher temperature interval so as to reduce the moisture content of the product.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	xii
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABELAS	xx
CAPÍTULO I	1
Introdução	1
CAPÍTULO II	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 – Leveduras	3
2.1.1 – Obtenção da Levedura	5
2.1.1.1 – Sangria do leite de levedura	5
2.1.1.2 – Fundo de dorna	6
2.1.2 – Composição química da levedura	6
2.2 – Secagem	12
2.2.1 – Equações Empíricas	16
2.2.2 – Período a taxa constante	17
2.2.3 – Período a taxa decrescente	18
2.3 – Atividade de água	21
2.3.1 – Isoterma de dessorção	22
2.3.2- Descrição das isotermas	23
2.4 – O leite de jorro	25
2.5 – Curvas características do leite de jorro	31
2.6 – O leite fluidizado	34
2.6.1 – Velocidade mínima e porosidade mínima de fluidização	35
2.7 – Secagem de leveduras	37
2.8 – Eficiência energética	40
2.9 – Planejamento experimental e otimização de processos	42
2.9.1 – Planejamento fatorial e análise de superfície se resposta	42

CAPÍTULO III	44
Materiais e Métodos	44
3.1 – Materiais	44
3.1.1 – Matéria prima	44
3.1.2 – Partículas inertes	44
3.2 – Equipamentos	45
3.2.1 – Secador em leito de jorro	45
3.2.2 – Equipamentos auxiliares	46
3.3 – Metodologia	47
3.3.1 – Preparação da levedura para estudo em leito de jorro	47
3.3.2 - Obtenção das curvas características em leito de jorro	47
3.3.3 –Delineamento da matriz de planejamento experimental para o estudo de secagem em leito de jorro	48
3.4- Ensaios de secagem em leito de jorro	49
3.5 - Secador em leito fluidizado	50
3.5.1 - Equipamentos auxiliares	51
3.5.2 - Preparação da levedura para estudo em leito fluidizado	51
3.5.3 - Obtenção das curvas características em leito fluidizado	51
3.5.4 - Delineamento da matriz de planejamento experimental para o estudo da secagem em leito fluidizado	52
3.6 - Ensaios de secagem em leito fluidizado	53
3.7 - Caracterização físico-química da levedura	54
3.7.1 Umidade	55
3.7.2 – Proteínas totais	55
3.8 – Rendimento	56
3.9 – Levedura retida	56
3.10 - Cinética de produção	57
3.11 – Curvas de secagem: Evaporação de água	57
3.12 – Eficiência energética	59
3.13 – Isotermas de dessorção	59
3.13.1 – Atividade de água	59

3.13.2 – Procedimento	60
3.13.3 – Thermoconstanter Novasina (Th-200)	60
CAPÍTULO IV	62
ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	62
4.1- Resultados das isotermas de dessorção	62
CAPITULO V	71
FLUIDODINÂMICA DE LEITOS DE JORRO E FLUIDIZADO COM LEVEDURAS	71
5.1 – Fluidodinâmica do leito de jorro	71
5.2 – Efeito da concentração de leveduras na fluidodinâmica do leito de jorro	72
5.3 – Fluidodinâmica do leito fluidizado	84
5.4 – Efeito da concentração de leveduras na fluidodinâmica do leito fluidizado	84
5.5 – Comparação nas fluidodinâmicas dos leitos de jorro e fluidizado	90
CAPITULO VI	94
DESEMPENHO DOS SECADORES	94
6.1 -Taxas de evaporação de água	94
6.1.1 – Leito de jorro	94
6.1.2 - Leito fluidizado	100
6.2 – Eficiência energética	103
6.2.1 – Leito de jorro	103
6.2.2 – Leito fluidizado	106
6.3 – Leito fluidizado: Cinética de produção de pó	108
6.4 - Análise dos efeitos das variáveis: M_L/M_i e velocidade sobre as respostas em leito de jorro e leito fluidizado	113
6.5 – Análise da taxa de produção	117
6.6 - Comparação dos secadores de leito de jorro e leito fluidizado	119
CAPITULO VII	121
CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
7.1 – Resumo dos resultados obtidos	121
7.2 – Contribuição do trabalho	122

7.3 - Conclusões	123
7.4 - Perspectivas	124
CAPITULO VIII	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APENDICE I: Leite de Jorro e Leite Fluidizado	138
APENDICE II: Determinação de proteínas	153

LISTA DE SÍMBOLOS

- A : área da superfície, m^2
A₁, A₂: parâmetros do modelo da cinética de secagem
A_L: constante de Littman
a_p : área específica da partícula inerte, m^{-1}
Ar : número de Arquimedes, adimensional
a_w : atividade de água
B₁ e B₂ : constantes da equação de Herdenson
C : constante de Guggenheim
C₁ e C₂ : constantes
C_{pg} : calor específico do gás, $cal.g^{-1} °C^{-1}$
D_C : diâmetro da coluna, m
D_{sc} : diâmetro da saída do ciclone, m
D_{ef} : difusividade efetiva, $m^2 . h^{-1}$
D_i : diâmetro do orifício da entrada do ar, m
D_p : diâmetro da partícula, m
d_v : diâmetro da esfera de igual volume, m
dX/dt : taxa de secagem, $g.g^{-1} . s^{-1}$
f : fator de correção para o HCl;
g : aceleração gravitacional, $m.s^{-2}$
G : fluxo de massa de ar, $kg.s^{-1}$
g_a : fluxo de massa do ar, $kg.s^{-1}$
G_a : número de Galileu , adimensional
h : coeficiente de transferência de massa, $W.m^{-2} . °C^{-1}$
H : razão de H/H_{max} , adimensional
H: altura do jorro, m

H_i : calor de condensação do vapor de água pura, $J.mol^{-1}$
 H_m : calor de sorção da primeira camada, $J.mol^{-1}$
 H_{max} : altura máxima do jorro, m
 H_{mf} : altura do leito de mínima fluidização, m
 H_n : calor de sorção das moléculas nas multicamadas, $J.mol^{-1}$
 H_{vap} : calor de vaporização, $J.mol^{-1}$.
 K : número de variáveis (fatores) independentes
 k : parâmetro da equação de GAB
 K : fator de correção das propriedades das moléculas multicamada com relação ao volume de líquido
 K_0, K_1 : parâmetros do modelo para cinética
 L : espessura da amostra, m
 m : massa da amostra, g.
 m_f : massa final da amostra, g
 M_i : Massa de inerte, g
 $m_{i=}$: massa inicial da amostra, g
 M_L : massa da amostra alimentada no secador, g
 M_L : massa de levedura, g
 M_{LO} : massa de pó obtida, g
 M_R : massa do pó retida no secador, g
 M_s : massa de sólido seco, g
 m_{ss} : massa de sólido seco, g
 N : parâmetro do modelo para cinética de secagem
 P : pressão parcial de vapor d'água de um produto, mmHg
 p_0 : pressão de vapor d'água a mesma temperatura T , mmHg
 Q_a : energia total fornecida ao secador, $kJ.kg^{-1}$
 Q_{ab} : energia absorvida pelo leito, $kJ.kg^{-1}$
 Q_s : energia total transportada pela corrente de ar, $kJ.kg^{-1}$
 R : constante universal dos gases, $J.mol^{-1}.K^{-1}$
 Re_{mf} : número de Reynolds de mínima fluidização
 t : tempo de secagem, min

T' : fator adimensional de temperatura
 T : temperatura, °C
 T_a : temperatura ambiente, °C
 T_{bu} : temperatura de bulbo úmido, °C
 T_{go} : temperaturas do ar na entrada do secador, °C
 T_{gs} : temperaturas do ar na saída do secador, °C
 T_r : temperatura de referência, °C
 T_s : tempo de secagem, min
 U_ϕ : umidade ambiente do ar, kg vapor.(kg ar seco)⁻¹
 U_{ge} : umidade absoluta do ar na entrada do secador, kg.kg⁻¹
 U_{gs} : umidade absoluta do ar na saída do ciclone em kg.kg⁻¹.
 U_{gs} : umidade absoluta do ar na saída do ciclone, kg.kg⁻¹.
 U_{JM} : velocidade de jorro mínimo, m.s⁻¹
 U_{mf} : velocidade mínima de fluidização, m.s⁻¹
 UR : umidade relativa do ar, %
 U_s : umidade de saturação (T_{bu}), kg vapor.(kg ar seco)⁻¹
 U_t : velocidade terminal da partícula, m.s⁻¹
 V : velocidade do ar da saída do ciclone, m.s⁻¹
 V : volume da solução de HCl, mL
 W_{EV} : taxa de evaporação de água, kg.s⁻¹
 W_s : fluxo de massa de ar úmido, kg.s⁻¹
 X : conteúdo de umidade, base seca, g.g⁻¹
 X : umidade média, base seca, kg.kg⁻¹
 X_{bs} : umidade em base seca do pó
 X_{bu} : umidade em base úmida do pó
 $X_{E(bu)}$: umidade da amostra na entrada do secador
 X_e : conteúdo de umidade de equilíbrio, base seca, g.g⁻¹
 X_i : conteúdo de umidade inicial, base seca, g.g⁻¹
 X_m : conteúdo de umidade na monocamada, base seca, g.g⁻¹
 X_m : parâmetro da equação de GAB, g.g⁻¹
 $X_{S(bu)}$: umidade do pó na saída do secador, g.g⁻¹

ΔP_M : queda de pressão máxima, $N.m^{-2}$
 ΔP_{JM} : queda de pressão de jorro mínimo, $N.m^{-2}$
 ΔH_{BET} : entalpia de sorção, $J.mol^{-1}$
 $(X - X_e)/(X_i - X_e)$: razão de umidade, adimensional

SÍMBOLOS GREGOS

δ : nível axial (ampliação dos níveis do planejamento fatorial)
 α : coeficiente do calor de sorção
 ∂ : derivada parcial
 η : eficiência energética
 ϕ : esfericidade da partícula inerte
 ∇ : gradiente
 ρ_l : densidade aparente do leito, $kg.m^{-3}$
 ρ_g : densidade do gás, $kg.m^{-3}$
 ρ_m : densidade do leito, $kg.m^{-3}$
 μ_g : viscosidade do gás, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
 ρ_{gs} : densidade do ar na saída do ciclone, $kg.m^{-3}$
 ϵ_l : porosidade do leito
 ϵ_m : porosidade mínima
 ϵ_{mf} : porosidade mínima de fluidização
 ρ_p : densidade da partícula, $kg.m^{-3}$
 ρ_s : densidade aparente do inerte, $kg.m^{-3}$
 θ : ângulo do cone

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva característica da cinética de secagem	15
Figura 2.2	Taxa de secagem em função da umidade	15
Figura 2.3	Diagrama esquemático do leito de jorro convencional	27
Figura 2.4	Curva característica da queda de pressão	32
Figura 2.5	Descrição de um fenômeno de fluidização por um gás	35
Figura 3.1	Secador de leito de jorro cone-cilíndrico convencional	46
Figura 3.2	Secador de leito fluidizado	51
Figura 3.3	Thermoconstanter Novasina	61
Figura 4.1	Isotermas de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para temperatura de 25 °C	67
Figura 4.2	Isotermas de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para temperatura de 30 °C	67
Figura 4.3	Isotermas de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para temperatura de 40 °C	68
Figura 4.4	Isotermas de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para temperatura de 49 °C	68
Figura 4.5	Isotermas de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para temperaturas de 25,30,40 e 49 °C	69
Figura 5.1	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar. $M_p/M_i = 0\%$	73
Figura 5.2	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar. $M_p/M_i = 2\%$	73
Figura 5.3	Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem = 0 min	74
Figura 5.4	Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem = 5 min	74
Figura 5.5	Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem = 10 min	75

Figura 5.6	Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem = 15 min	75
Figura 5.7	Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem = 0 min	76
Figura 5.8	Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem = 5 min	77
Figura 5.9	Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem = 10 min	77
Figura 5.10	Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem = 15 min	78
Figura 5.11	Influência do tempo de secagem na queda de pressão de jorro máximo	78
Figura 5.12	Influência do tempo de secagem na queda de pressão de jorro mínimo	79
Figura 5.13	Influência do tempo de secagem na velocidade de jorro mínimo	79
Figura 5.14	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 0\%$	85
Figura 5.15	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 2\%$	86
Figura 5.16	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 4\%$	87
Figura 5.17	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 6\%$	87
Figura 5.18	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 10\%$	88

Figura 5.19	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 15\%$	89
Figura 5.20	Correlação entre a perda de carga e a proporção M_L/M_i	91
Figura 5.21	Correlação entre a velocidade em condições mínimas e a proporção M_L/M_i	92
Figura 5.22	Correlação entre a perda de carga e a velocidade em condições mínimas	93
Figura 6.1	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 6\%$ e velocidade de 0,227 m/s	95
Figura 6.2	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade de 0,213 m/s	96
Figura 6.3	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade de 0,213 m/s	96
Figura 6.4	Taxas médias de evaporação de água: exp. 1,2,3,4 e 5	97
Figura 6.5	Taxas médias de evaporação de água: exp. 6,7,8,9,10 e 11	97
Figura 6.6	Taxas iniciais instantâneas de evaporação de água: exp. 1,2,3,4 e 5	98
Figura 6.7	Taxas iniciais instantâneas de evaporação de água: exp 6,7,8,9,10 e11	98
Figura 6.8	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade de 0,284 m/s	101
Figura 6.9	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade de 0,355 m/s	101
Figura 6.10	Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade de 0,284m/s	102
Figura 6.11	Leito fluidizado: Taxas médias de evaporação de água: exp. 1,2,3,4,5 e 6	102
Figura 6.12	Leito fluidizado: Taxas médias de evaporação de água: exp. 7,8,9,10 e 11	103

Figura 6.13	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 2\%$ e velocidade de 0,199 m/s	104
Figura 6.14	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade de 0,213 m/s	105
Figura 6.15	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 6,8\%$ e velocidade de 0,213 m/s	105
Figura 6.16	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade de 0,284 m/s	106
Figura 6.17	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade de 0,284 m/s	107
Figura 6.18	Eficiência Energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade de 0,320 m/s	107
Figura 6.19	Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade de 0,355 m/s	109
Figura 6.20	Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade de 0,284 m/s	110
Figura 6.21	Eficiência de produção de leveduras em função do tempo: Exp. 1,2,3,4,8 e 10	110
Figura 6.22	Eficiência de produção de leveduras em função do tempo: Exp. 5,6,7,9 e 11	111
Figura 6.23	Valores observados versus valores preditos da taxa de produção	118
Figura 6.24	Superfície de resposta para taxa de produção de pó em leito fluidizado	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição Bromatológica da Levedura (Sangria do Leite de Levedura)	7
Tabela 2.2	Composição em Aminoácidos	7
Tabela 2.3	Composição em Minerais	8
Tabela 2.4	Composição em Vitaminas	8
Tabela 2.5	Modelos para cinética de secagem	16
Tabela 2.6	Modelos e respectivos materiais de estudos	16
Tabela 2.7	Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão máxima	33
Tabela 2.8	Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão de jorro mínimo	34
Tabela 2.9	Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de jorro	34
Tabela 2.10	Resumo das correlações empíricas para determinação da velocidade mínima de fluidização (V_{mf})	36
Tabela 3.1	Propriedades físicas do poliestireno	45
Tabela 3.2	Níveis reais e codificados das variáveis independentes para leito de jorro	49
Tabela 3.3	Matriz de planejamento experimental fatorial $2^2 +$ configuração estrela em leito de jorro	49
Tabela 3.4	Níveis reais e codificados das variáveis independentes para leito fluidizado	53
Tabela 3.5	Matriz de planejamento experimental fatorial $2^2 +$ configuração estrela em leito fluidizado	53
Tabela 4.1	Dados de atividade de água e umidade de equilíbrio para as leveduras <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	63

Tabela 4.2	Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção no modelo de GAB	64
Tabela 4.3	Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção no modelo de BET	64
Tabela 4.4	Entalpias de dessorção da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	70
Tabela 5.1	Valores dos parâmetros fluidodinâmicos em função da concentração de levedura alimentada.	82
Tabela 5.2	Queda de pressão máxima determinada por correlações (N/m^2)	83
Tabela 5.3	Queda de pressão de jorro mínimo determinada por correlações empíricas (N/m^2)	83
Tabela 5.4	Velocidade de jorro mínimo determinada por correlações empíricas (m/s)	83
Tabela 5.5	Parâmetros fluidodinâmicos em leito fluidizado	86
Tabela 5.6	Parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro em função da proporção M_L/M_i : Tempo de secagem 0 min	90
Tabela 5.7	Parâmetros fluidodinâmicos em leito fluidizado em função da proporção M_L/M_i	90
Tabela 6.1	Resultados da regressão linear de massa acumulativa em função do tempo	112
Tabela 6.2	Respostas no leito de jorro	113
Tabela 6.3	Respostas no leito fluidizado	114
Tabela 6.4	Modelos para variáveis em leito de jorro	116
Tabela 6.5	Modelos para variáveis em leito fluidizado	116
Tabela 6.6	Análise de variância para taxa de produção	117

CAPÍTULO I

1- INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial aumenta a demanda por alimentos. A capacidade de produção é desigual, no entanto os países mais e menos desenvolvidos correm em busca de soluções para produzir mais alimentos e de melhor qualidade. Enquanto em alguns países as populações podem ser alimentadas com todos os elementos básicos de uma dieta, há outros com carência de proteínas, gorduras e vitaminas. Novas técnicas contribuem para aumentar a produção de alimentos. Existem métodos especiais de criação de animais que levam a obtenção de melhor crescimento e ganho de peso em menor tempo. O incremento do consumo de pequenos animais e de pescado abre novos campos à produção de alimentos. Por outro lado, pesquisadores de diversos países vêm estudando a utilização de microrganismos como alimento. Eles fazem parte da alimentação do homem e dos animais, como agentes ou integrantes de processo de preparo de alimentos e, em muitos casos, são ingeridos com o alimento que ajudaram a preparar, como exemplo: pães, bebidas alcoólicas, vinagres, leites fermentados e queijos. Todavia, as pesquisas têm procurado desenvolver técnicas para produzir microrganismos em grande escala e economicamente, para eles próprios serem consumidos como alimento. A utilização de microrganismos (algas, bactérias, fungos e leveduras) tem por meta suprir a carência de proteínas, embora em muitos casos os lipídeos e as vitaminas sejam complementos valiosos.

Portanto, nos últimos anos vem crescendo o interesse pelo aproveitamento de fontes protéicas, conhecidas como "não convencionais", na indústria de ração animal do Brasil e do mundo. Isto ocorre devido ao constante aumento nos preços dos grãos de cereais e suplementos protéicos convencionais.

Capítulo I: Introdução

As leveduras podem substituir os suplementos protéicos convencionais usados na alimentação animal. Estes microrganismos possuem uma elevada velocidade de crescimento, possibilidade de ser cultivado em diversos tipos de substratos além de possuir um elevado teor de proteínas e vitamina B.

Segundo LAHR FILHO *et al.* (1996) o Brasil é o maior produtor mundial de álcool de cana-de-açúcar, com uma produção estimada em 11,5 bilhões de litros por ano, o que nos torna um país privilegiado quanto ao aproveitamento dos subprodutos obtidos no processamento da indústria canavieira, a exemplo da levedura utilizada para produção de álcool etílico (*Saccharomyces cerevisiae*). A levedura pode ser usada como fonte de proteínas, vitaminas e palatilizante nas formulações de ração animal. Com o aumento da produção de álcool a levedura passou a ser obtida em excesso, o que torna viável a instalação de uma unidade de secagem deste material, para fins de alimentação animal (ANDRIETTA, 1998).

Para que sejam comercializadas junto aos produtores de ração animal é necessário que as leveduras encontrem-se dentro das especificações exigidas pelo mercado nos aspectos relacionados à cor, granulometria, teor de proteína e teor de umidade (evitando o aparecimento de bolores e empedramento do produto). Dentro do que foi exposto, observa-se que a operação de secagem torna-se indispensável, uma vez que coloca a biomassa de leveduras sob a forma física que facilita o armazenamento, o transporte e, conseqüentemente, a comercialização.

A proposta deste trabalho tem objetivo de estudar a secagem de leveduras em leito de jorro e leito fluidizado para análise do desempenho e comparação dos secadores, variando-se as seguintes condições de operação: vazão do ar na entrada do secador e quantidade de levedura alimentada, visando o rendimento, retenção e eficiência de secagem, através do levantamento das curvas características de secagem e eficiência energética de secagem em diversas condições operacionais, verificando-se a qualidade do produto final dentro das especificações exigidas no mercado, tendo em vista seu aproveitamento como complemento protéico em alimentação animal.

CAPÍTULO II

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Leveduras

As leveduras são os principais microrganismos usados como alimento em todo o mundo. As leveduras alimentares são leveduras secas, fragmentadas, inativas, sem poder fermentativo. As espécies mais estudadas pertencem aos gêneros *Cândida* e *Saccharomyces*.

A produção de levedura alimentar é uma realidade industrial, com amplas aplicações em países europeus a partir de diversas matérias primas: melaços, resíduos de destilação de etanol, resíduos sulfíticos e hidrocarbonetos.

As leveduras constituem um grupo de microrganismos unicelulares, que se reproduzem assexuadamente por brotamento ou por cissiparidade e que desenvolvem a fermentação alcoólica. São largamente encontradas na natureza: sendo comuns no solo, na superfície de órgãos dos vegetais, principalmente em flores e frutos, no trato intestinal de animais, em líquidos açucarados, e numa série de outros locais. São importantes sob vários aspectos, e industrialmente, apresentam os seguintes pontos de interesse: São agentes de fermentação alcoólica, na produção do álcool industrial e de todas as bebidas alcoólicas destiladas ou não destiladas; utilizadas na panificação e importantes fontes de proteínas e de fatores de crescimento, passíveis de serem utilizadas na alimentação animal e humana;

Como agentes de fermentação são prejudiciais à conservação de frutos, e de sucos vegetais. Algumas espécies, são patogênicas a plantas, animais e ao homem. Geralmente são unicelulares, a *Saccharomyces cerevisiae* e outras leveduras comuns apresentam forma oval ou cilíndrica.

As células vegetativas da maioria das leveduras industriais variam em tamanho, de 4 a 8 μm de largura por 7 a 12 μm de comprimento, havendo, evidentemente, espécies maiores e menores que as citadas. A forma e o tamanho das células, mesmo em espécies monomorfas, podem variar de acordo com o nutriente, com as condições ambientais, com o estado fisiológico ou a idade.

A estrutura das leveduras apresentam membrana celular bem definida, pouco espessa, em células jovens; rígidas em células adultas, de constituição variável, com predominância de hidratos de carbono, e menor quantidade de proteínas e graxas. Internamente delimitando o citoplasma, existe a membrana citoplasmática, mais evidente em células adultas, por plasmólise. No geral, as leveduras se apresentam sem cápsula, se bem que algumas espécies de *Torulopsis* se apresentem com cápsula, constituída de hidratos de carbono.

As leveduras se multiplicam por brotamento, processo pelo qual na superfície da célula adulta (célula mãe) desenvolve-se uma pequena saliência (célula-filha) que se transformará numa nova célula e se reproduzem assexuadamente por esporos endógenos (ascoporos), contidos no interior da célula mãe, agora transformada em casca. Os ascoporos são geralmente em número de 4 a 8, variando de acordo com a espécie envolvida: são esféricos em *Saccharomyces cerevisiae*, anelados (anel de Saturno) em *Hansenula saturnus* alongadas com flagelos em *Nematospora*, etc.

Os fungos, na sua fase vegetativa, a de maior duração, é geralmente haplóide; a fase diplóide, compreendida entre a cariogamia e a meiose é geralmente muito curta. As leveduras, porém, apesar de pertencerem ao grupo dos fungos, comportam-se de maneira variável, a esse respeito, dependendo da espécie envolvida. Entre elas são encontrados vários tipos de ciclo vital, entre os quais são mais comuns os que seguem.

Atualmente, a classificação das leveduras se baseia nas características reprodutivas (sexuada ou assexuada), bem como, na capacidade de utilização de certos hidratos de carbono.

Durante o século XIX, as leveduras de uso doméstico eram subprodutos das cervejarias e destilarias; era um fermento instável e de qualidade variável

compostas de diversas linhagens. O fermento a partir de cultura pura só veio a ser produzido anos mais tarde. No ano de 1868 os irmãos Fleischman iniciaram a fabricação de leveduras prensadas conhecidas popularmente como fermentos frescos, sendo apresentado oficialmente em 1876 durante a Exposição do Centenário da Filadélfia.

Leveduras ativas são aquelas empregadas para fermentação e como fonte de componente nutricional e "flavor". Enquanto as leveduras inativas não possuem capacidade fermentativa e são empregadas como alimento nutricional e "flavor". (<http://www.consulteme.com.br/1b/biologia/leved.htm>).

2.1.1 – Obtenção da levedura

Vários gêneros de leveduras podem ser cultivados nos mais variados tipos de substrato. serão abordados somente aspectos ligados às leveduras utilizadas na indústria alcooleira.

Segundo BUTOLO (1996) no processo da produção de álcool, as leveduras de recuperação podem ser obtidas, principalmente de duas maneiras: sangria do leite de leveduras e fundo de dorna.

2.1.1.1 – Sangria do leite de levedura

Esta é a prática mais comumente utilizada pelas indústrias sucro-alcooleira e consiste em desviar parte do leite centrifugado (creme de levedura) do processo de produção de álcool. FILHO *et al.* (1996) relatam que ensaios realizados em Usina Cooperada (Coopersucar) e em laboratório indicam que sangrias de creme de leveduras da ordem de 20 a 80 kg.m⁻³ de álcool produzido não acarretam prejuízos no rendimento fermentativo. A prática operacional tem indicado, valores entre 20 a 30 kg.m⁻³ de álcool produzido.

A fermentação deve apresentar-se de uma maneira geral bem conduzida, com eficientes controles de temperatura, livre de infecção e/ou tendência de floculação. Deve-se utilizar caldo decantado para o mosto, obtendo desta maneira

Capítulo II : Revisão bibliográfica

uma levedura seca de coloração clara, tendendo à cor palha, com menor teor de sais (cinzas) e fibra (bagacilho), o que resulte conseqüentemente, em um maior teor percentual de proteína bruta.

2.1.1.2 – Fundo de dorna

Esta opção é interessante porque se trata de uma fonte de levedura que normalmente não se recircula à fermentação e, por isso, pode ser considerada com custo zero. O material que permanece no fundo das domas, após centrifugação do vinho, representa de 0,5 a 1% da capacidade da dorna e contém cerca de 80% de levedura na sua matéria seca (PEIXOTO & MATTOS, 1972). A qualidade é inferior àquela obtida do leite de levedura, devido a alta concentração de minerais e impurezas, além da grande variação na composição química.

2.1.2 – Composição química da levedura

Segundo KRIDER *et al* (1982), a composição química da levedura depende de uma série de fatores, destacando-se: natureza do substrato, grau de aeração do meio, espécie de levedura, tratamentos impostos ao meio de cultura e concentração de sais. Dentre estes fatores o mais importante é o substrato utilizado, isto porque afeta a taxa de crescimento e a composição, principalmente, de proteínas e lipídeos (VANANUVAT & KINSELA, 1975).

A lavagem com água para se eliminar as impurezas do leite de levedura ou fundo de dorna, pode também alterar significativamente a composição da levedura. Em estudos feitos por SALGADO (1976), foi observado um aumento de 33 para 42% de proteína bruta, resultante de quatro lavagens, havendo entretanto, perdas de matéria seca, proteínas e minerais do material original. As Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 mostram características de leveduras em relação a composição bromatológica, composição em aminoácidos, composição em minerais e composição em vitaminas.

Tabela 2.1 – Composição bromatológica da levedura (sangria do leite de levedura)

Parâmetros	Composição %
Umidade (voláteis 105°C)	8,72–10,02
Proteína Bruta	28,70 – 38,28
Extrato Etéreo	0,91–1,03
Fibra Bruta	0,31 – 0,80
Material Mineral	4,36–5,18
Extrato não Nitrogenado	46,43–54,76

FONTE: BUTOLO (1996)

Tabela 2.2 – Composição em aminoácidos da levedura

Parâmetros	Composição %
Arginina	1,312 – 2,150
Metionina	0,380 – 0,580
Cistina	0,300 – 0,474
Lisina	1,790 – 2,541
Treonina	1,590 – 2,316
Valina	1,330 – 1,754
Leucina	1,730 – 2,611
Isoleucina	1,390 – 1,303
Fenilalanina	1,200 – 1,374
Histidina	0,520 – 0,614
Triptofano	0,335 – 0,460
Ácido Aspártico	3,040 – 4,169
Serina	1,460 – 2,307
Prolina	0,660 – 1,589
Glicina	1,270 – 1,636
Alanina	1,740 – 2,628
Tirosina	0,850 – 0,920
Ácido Glutâmico	3,900 – 5,487

FONTE: BUTOLO (1996)

Capítulo II : Revisão bibliográfica

Tabela 2.3 – Composição em minerais da levedura

Parâmetros	Composição
Cálcio (Ca) %	0,20 – 0,25
Fósforo (P) %	0,57 – 0,59
Potássio (K) %	1,02 – 1,29
Magnésio (Mg) %	0,13 – 0,15
Enxofre (S) %	0,35 – 0,37
Ferro (Fe) mg/Kg	480 – 536
Cobre (Cu) mg/Kg	15 – 19
Manganês (Mn) mg/Kg	31 – 45
Zinco (Zn) mg/Kg	83 – 138

FONTE: BUTOLO (1996)

Tabela 2.4 – Composição em vitaminas da levedura

Parâmetros	Composição mg/Kg
Tiamina	120 – 170
Riboflavina	47 – 52
Ac. Pantotênico	80 – 85
Niacina	450 – 470
Piridoxina	45 – 47
Ac. Fólico	12 – 21
Biotina	0,6 – 1,5

FONTE: BUTOLO (1996)

A composição aminoácida da proteína de levedura pode ser empregada como parâmetro inicial para determinar o valor nutricional das proteínas. Na proteína de bom valor nutricional a composição de aminoácidos fundamentais encontra-se em quantidades adequadas e equilibradas, de modo a estarem próximas dos valores estabelecidos pelo padrão de referência da FAO (1985).

Segundo a FAO (1985) a composição aminoácida das proteínas de leveduras, destaca-se por apresentar um alto teor de lisina, teores adequados de

treonina e triptofano. Embora o perfil aminoácido não seja comparável a proteínas de origem animal, ele se iguala as melhores proteínas de vegetal como a soja, na Tabela 2.2 encontram-se as faixas de aminoácidos essenciais encontrados na levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

O emprego de proteínas unicelulares ou leveduras na alimentação animal é muito antigo, encontram-se na literatura trabalhos do início do século passado sobre a adição deste produto em ração de animais domésticos. Dentre os microrganismos, as leveduras tem se destacado como uma excelente fonte de proteínas e por suas características não patogênicas, podem ser utilizadas tanto como alimento humano quanto como ração (MARTINES-FORCE & BENITEZ, 1992). Quando as leveduras são usadas como alimentação animal não há necessidade de remoção dos ácidos nucléicos (SCHRIMSHAW, 1986). Com exceção dos primatas e do homem, onde o ácido úrico é o produto final do metabolismo sendo excretado. Os outros mamíferos e demais animais terrestres, possuem uricase, que degrada o ácido em alantoina e uréias. Nas aves, o principal produto de degradação não é a uréia e sim o ácido úrico, porque nestes animais a uréia não é sintetizada a partir da amônia (CHRISTIAN & WALTHO, 1964).

MATTOS *et al.* (1983) estudaram ratos em crescimento onde a levedura de fundo de doma substituiu, 0, 50 e 100 % de caseína como única fonte protéica, e observaram que o ganho de peso foi significativamente maior para animais que receberam a levedura como única fonte protéica. A taxa de eficiência protéica não diferiu entre os tratamentos. O autor sugeriu que se deve utilizar quantidades semelhantes da fração de nitrogênio protéico da levedura e da caseína. Deve ser observado o teor de nitrogênio, não protéico da levedura quando a levedura for utilizada na alimentação de animais que não possuam a capacidade de utilizar esta forma de nitrogênio. A levedura de leite de levedo e de fundo de doma possui cerca de 80% do nitrogênio, na forma de proteína, tais valores foram encontrados na literatura para outros tipos de leveduras (ROSE & HARRISON, 1970).

MATTOS *et al.* (1983) alimentando fêmeas de ratos em fase de crescimento observaram que não ocorreu nenhuma alteração histológica no fígado, rins, baço

e intestinos dos animais que tinham na sua dieta a levedura como única fonte protéica. Estes autores citaram o emprego de levedura obtida por leite de levedo, para alimentação de ruminantes avaliando uma série de ensaios realizados na ESALQ com vacas em fase de lactação. No primeiro ensaio foram estudados 12 animais da raça holandesa em início de lactação com uma média de produção de leite de 20 kg.dia^{-1} ; a dieta era composta além da silagem de milho por um concentrado que tinha como suplemento protéico o farelo de algodão, nos níveis de 0, 1,2 e 2,4 kg de levedura. As dietas experimentais foram dadas aos animais no período de 30 dias, sendo intercaladas entre estes 30 dias uma dieta pobre de proteína. Foi observado que não teve diferença significativa no teor de proteína do leite nos animais que receberam a levedura como única fonte protéica. Após a adição de levedura seca na silagem foi observado que ocorreu maior digestibilidade da matéria seca, matéria orgânica e da proteína bruta. No segundo ensaio também foram estudadas 12 vacas em fase de lactação, mas o estudo foi realizado em um período mais longo (21 semanas). Os animais foram divididos em dois grupos, onde metade recebia um concentrado, com 40% de levedura, que corresponde a 4 kg de levedura, durante todo período experimental. Foi observado um aumento na produção de $1,7 \text{ kg.cab}^{-1}\text{dia}^{-1}$ nos animais que recebiam a levedura e um aumento de 0,2% no teor de gordura. Em ambos os estudos foram analisados o balanço de nitrogênio, sendo observado a melhor utilização do nitrogênio da levedura quando comparado ao nitrogênio do farelo, indicando um melhor balanceamento em aminoácidos da levedura em relação às exigências para produção do leite.

CAMPOS NETO *et al.*(1996) também fizeram uma avaliação do valor nutritivo da levedura seca, como suplemento alimentar para gado de corte. Os animais eram pesados no início dos experimentos e a cada 28 dias até o final dos testes, foi observado um aumento de 250 g de peso/cab/dia. O autor concluiu que a proteína mineral proporcionava aos animais de corte durante a seca invernal, maior ganhos de peso em função de um maior consumo de gramas de proteína bruta por cabeça dia. Sendo possível a utilização da levedura das usinas sucroalcooleira como suplemento protéico. A levedura deve ser dada aos animais após

o processo de secagem, visto que a levedura no estado natural possui um elevado percentual de água e deteriora-se facilmente. A composição da levedura seca pode variar dependendo das condições durante o processo de fermentação alcoólica, principalmente em relação a proteína bruta e mineral, sendo necessário analisar o produto antes de ser usado. Os resultados destes experimentos mostraram que a adição de leveduras na ração das vacas em fase de lactação, está ligado ao aumento da eficiência digestiva, maior porcentagem de proteína e gordura no leite e conseqüentemente maior produção. O fornecimento de levedura para vacas em fase de lactação, em tomo de no máximo 4 kg por dia, não causa nem um efeito patológico, não ocorrendo nem uma alteração fisiológica nos animais que participaram dos experimentos.

PÁDUA *et al.* (2000) estudaram a importância da parede celular de levedura *Saccharomyces sp* como fonte de fibra na alimentação. Este trabalho tinha como principal objetivo estudar a influência da adição de 10% e 20% da fração parede celular de levedura (*Saccharomyces sp.*), a uma dieta hipercolesterolêmica (5% de gordura de coco mais 2% de colesterol) em ratos Wistar. Utilizou-se como padrão uma dieta de caseína (AIN-93G) com 5% de celulose. Foram também utilizadas dietas hipercolesterolêmicas com 10 ou 20% de celulose, para comparação, sendo avaliados os seguintes índices: digestibilidade, valor biológico e utilização líquida aparente da proteína, quociente de eficiência alimentar, velocidade de trânsito do conteúdo intestinal e as concentrações séricas de lipídios totais, triacilgliceróis e colesterol total. A fração parede celular, assim como a celulose provocou uma diminuição da digestibilidade da proteína e do quociente de eficiência alimentar, mas não se observou influência no valor biológico da proteína e no ganho de peso. A adição de 10 ou 20%, tanto de parede celular como de celulose promoveu aumento da velocidade de trânsito do conteúdo intestinal e aumento no comprimento do intestino delgado. A fração parede celular nas concentrações de 10% (1º ensaio) ou 20% (2º ensaio) promoveu abaixamento nos níveis de triacilgliceróis séricos, contudo não influenciou no abaixamento das concentrações de lipídios totais e de colesterol total.

Dentre as diversas aplicações da levedura seca, pode-se destacar o benefício que ela gera quando é empregada na alimentação animal, com ganho de qualidade e produtividade para o produtor (PEIXOTO & MATTOS, 1972). Em ruminantes como bezeros e gado leiteiro aumenta a taxa de ganho de peso, o rendimento de leite e o conteúdo de proteínas e gordura do leite. Em gado de corte em geral aumenta a eficiência de alimentação e ganho de peso vivo, aumentando também a digestibilidade, principalmente em termos de fibras. Em aves com pintos, galinhas e frangos tanto aumenta o consumo de alimentos e ganho de massa viva, como a eficiência de alimentação e qualidade dos ovos. Em cavalos aumenta a digestibilidade de material hemicelulósico e assimilação de nitrogênio finalmente em suínos aumenta a taxa de alimentação e ganho de peso vivo.

MOREIRA *et al.* (1997) estudaram a utilização da levedura de recuperação (*saccharomyces spp.*) seca por " spray-drying" na alimentação de suínos em fase de crescimento até-terminação, utilizando 32 suínos. Os tratamentos consistiu de 4 níveis de inclusão (0, 7, 14 e 21%). A inclusão da levedura na fase de crescimento levou a piora na conversão alimentar, sem contudo influenciar o consumo de ração e o ganho de peso; na fase de terminação, nenhuma das características estudadas foi influenciada. Os resultados sugerem que a levedura pode ser utilizada na alimentação de suínos até o nível de 21%, dependendo do seu custo, uma vez que não influenciou no ganho de peso do animal.

2.2 - Secagem

A operação de secagem é importante, porque visa preparar o produto para armazenagem. Entretanto, se mal conduzida, poderá prejudicar a qualidade nutricional do produto antes mesmo da armazenagem, ou, por outro lado, acelerar o processo de deteriorização durante a armazenagem.

Secagem é a remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, envolvendo exclusivamente a transferência de calor e massa e apresenta como principal objetivo à remoção de

Capítulo II : Revisão bibliográfica

água do produto através da evaporação. Sendo necessária a utilização de calor para evaporar a umidade da superfície do produto através de um meio de secagem externo, normalmente o ar. O calor é aplicado no material por convecção através do ar, ou por condução através do contato com uma superfície quente. O calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido, ou próximo da superfície se a mudança de estado ocorrer dentro do produto, e esse vapor é retirado pelo fluxo de ar, seja em convecção natural ou forçada.

Apesar de que a secagem tem sido usada por milênios, na conservação de produtos biológicos, isso no passado acontecia de forma empírica, sem levar em conta as diversas variáveis envolvidas no processo. O profissional que realiza processos de secagem de forma puramente empírica, sem entender as diversas variáveis, pode obter um bom produto. Algumas vezes, porém, não tem condição de obter um produto padronizado e nem otimizar o processo, inclusive analisar a possível redução de custos.

Em um produto biológico, parte do líquido encontra-se de forma relativamente livre, dentro de capilares, enquanto que parte se encontra dentro de células, que durante o processo, vai saindo lentamente por difusão de umidade através da membrana celular. A superfície do produto pode estar bastante seca, enquanto que seu interior ainda se encontra com alta umidade, causando uma tensão, que pode ocasionar rachaduras no produto (FIOREZE, 2004).

Existem trabalhos experimentais que demonstram a importância do uso de secagem em diversas situações. Muitas vezes o processo de secagem é utilizado visando o fator econômico do frete e do manuseio; outras vezes o material é seco para depois sofrer um processo de reidratação em níveis desejáveis. Para produtos alimentícios a secagem é utilizada para preservação, permitindo também o transporte sem necessidade de refrigeração (KEEY, 1992; DAUDIN, 1983).

Vários mecanismos físicos foram propostos (BROOKER *et al.*, 1974; FORTES & OKOS, 1980) para descrever a transferência de umidade nos produtos capilares porosos entre os quais se destacam:

- movimento de líquido devido as forças superficiais (difusão capilar);

- movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão líquida);
- movimento de líquido devido a difusão da umidade na superfície dos poros (difusão de superfície);
- movimento de vapor devido a diferenças de concentração de vapor (difusão de vapor);
- movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica);
- movimento de água e de vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

De acordo com KEEY (1992) o fenômeno de secagem não pode ser generalizado, principalmente quando se trata de materiais biológicos que possuem características intrínsecas muito diferentes entre si, como a existência da contribuição do soluto durante a secagem e o encolhimento do produto, devido à mudança de pressão entre o líquido e a parede celular.

Para DAUDIN (1983) tanto os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e dimensões, como as condições de secagem também são muito diversas, dependendo das propriedades do ar de secagem e da forma como se faz o contato ar-produto. Quando o produto é colocado em contato com ar quente promove uma transferência do calor do ar para o produto, enquanto simultaneamente o efeito da diferença de pressão parcial de vapor de água, existente entre o ar e a superfície do produto ocorre a transferência de massa para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água. Parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. De acordo com a evolução dos processos de transferências de calor e massa, a secagem pode transcorrer em três períodos distintos. O primeiro é período de aquecimento; o segundo, período de secagem a taxa constante e o terceiro, período de taxa decrescente. Sobre o tema HALL (1971) afirma que se a umidade inicial do produto for menor que a crítica, todo o processo de secagem se processará no período a taxa decrescente. A evolução de um processo de secagem pode ser visto nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente.

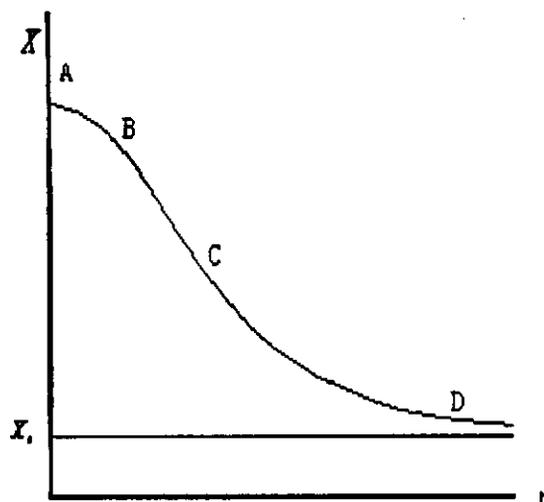


Figura 2.1. Curva característica da cinética de secagem

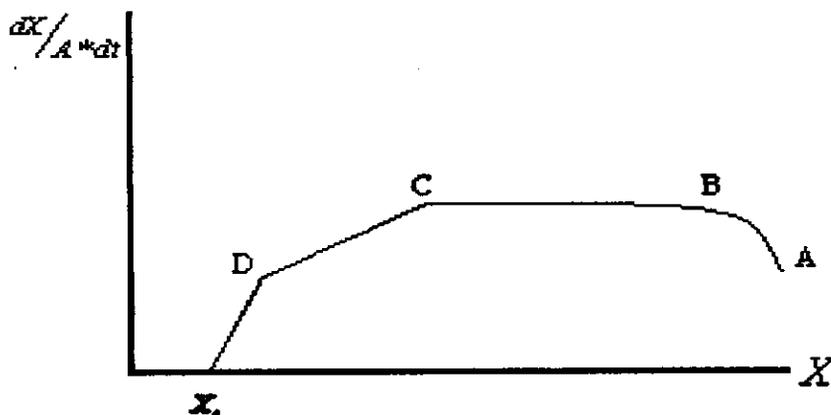


Figura 2.2 - Taxa de secagem em função da umidade.

Na secagem de alimentos, entretanto, algumas vezes é difícil determinar o teor de umidade crítica. Uma das razões é o uso de uma velocidade de secagem que não leva em consideração a área superficial do encolhimento dos alimentos durante o processo de secagem (CHARM, 1991).

2.2.1. Equações empíricas

Alguns modelos matemáticos que descrevem a secagem em camada fina são muito comuns. Eles são usados para preverem o comportamento cinético de grãos e frutas. Os modelos matemáticos são apresentados na Tabela 2.5 (OZDEMIR & DEYRES, 1995; YALDIZ *et al.*, 2001; BASUNIA & ABE, 2001).

Tabela 2.5 - Modelos para cinética de secagem

Equação	N ^o	Modelo
$\bar{X}^* = e^{(-K_1 t)}$	01	De Newton
$X^* = e^{(-K_1(t)^N)}$	02	De Page
$\bar{X}^* = A_1 e^{(-K_1 t)}$	03	De Henderson and Pabis
$X^* = A_1 e^{(-K_1 t)} + A_2$	04	Logarítmico
$X^* = A_1 e^{(-K_0 t)} + A_2 e^{(-K_1 t)}$	05	Dois termos
$\bar{X}^* = A_1 e^{(-K_1 t)} + (1 - A_2) e^{(-K_2 A_1 t)}$	06	Dois termos exponenciais
$\bar{X}^* = 1 + A_1 t + A_2 t^2$	07	De Wang e Singh

Nestes modelos K_0 , K_1 , A_1 , A_2 e N são parâmetros do modelo que serão ajustados com os dados experimentais.

Alguns destes modelos foram aplicados a tipos específicos de produtos. A Tabela 2.6 mostra alguns estudos de secagem realizados e os respectivos modelos aplicados de acordo com OZDEMIR & DEYRES (1995).

Tabela 2.6 - Modelos e respectivos materiais de estudos

Modelo	Aplicação
Henderson e Pabis	Milho, arroz, trigo, amendoim.
Dois termos	Milho feijão branco, noz de macadamia, uvas.
Newton	Cevada, trigo, milho descascado, castanha de caju, noz.
Page	Arroz de grãos pequenos e grandes, feijão branco, milho descascado, cevada, semente de girassol.
Wang e Singh	Arroz

2.2.2 - Período a taxa constante

A taxa de secagem neste período pode ser calculada utilizando a equação de transferência de massa e a equação de transferência de calor. Devido a superfície do material estar úmida e a temperatura do material ser igual a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem despreza-se a transferência de calor por condução e radiação e a taxa de secagem é dada por:

$$m_{ss} \frac{dX}{dt} = h * A * (U_s - U_{\infty}) \quad (08)$$

$$m_{ss} \frac{dX}{dt} = \frac{h * A * (T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \quad (09)$$

Onde:

m_{ss} massa de sólido seco,

dX/dt = taxa de secagem,

X = umidade (base seca) do sólido, kg/kg^{-1}

h = coeficiente de transferência de calor, $W/m^2 \cdot ^\circ C^{-2}$

A = área da superfície exposta, m^2 ;

T_a = temperatura ambiente, $^\circ C$;

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido, $^\circ C$;

H_{vap} = calor de vaporização, $J.mol^{-1}$

U_s = umidade de saturação (T_{bu}), kg de vapor. $(kg$ de ar seco) $^{-1}$

U_{∞} = umidade ambiente do ar, kg de vapor. $(kg$ de ar seco) $^{-1}$

A velocidade de secagem durante o período a taxa constante depende de três fatores: dos coeficientes de transferência de massa e energia; da área da superfície onde ocorre a troca de energia e de massa e da diferença entre as temperaturas (ou as pressões de vapor) do ar que envolve o produto e da superfície desse produto. O mecanismo interno de migração de água não

influencia a velocidade de secagem durante esse período (FORTES & OKOS, 1980).

Normalmente a equação de transferência de calor dá uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa. Embora correlações para calcular o coeficiente de transferência de calor e massa tenham sido propostas na literatura (TREYBAL, 1968), poucos são disponíveis para permitir que as constantes nestas relações sejam fixadas com segurança. Estes coeficientes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e desta forma são afetados pela velocidade do ar e o seu ângulo de colisão sobre a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar (G), o coeficiente de transferência para fluxo de ar paralelo a superfície do produto é dado por:

$$h=C_1(G)^{0,8} \quad (10)$$

Para o fluxo de ar no ângulo reto da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado por:

$$h=C_2(G)^{0,4} \quad (11)$$

Onde:

C_1 e C_2 são constantes

As equações acima indicam que aumentando o fluxo de massa de ar acelera a taxa de secagem. Adicionalmente uma velocidade mais alta minimiza as diferenças de umidade entre o interior e o exterior de um sistema de secagem e desta forma um produto é obtido com teor de umidade mais uniforme.

2.2.3 - Período a taxa decrescente

Este período é muito observado na secagem de produtos agrícolas. No momento em que a quantidade de água diminui na superfície ocasiona um

Capítulo II : Revisão bibliográfica

decréscimo da velocidade de secagem, dando início ao período de taxa decrescente.

A previsão da taxa de secagem dos produtos biológicos durante o período de taxa decrescente é mais complexo do que durante o período de taxa constante, por isso, deve-se considerar não somente os mecanismos de transferência externa, mas também os mecanismos de transferência do interior do produto como difusão de calor e massa (MARTINS & CAVALCANTI MATA, 1984).

CRANK (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade pode variar de forma linear ou exponencial com a concentração de umidade. Porém, estas situações se aplicam a sólidos com formas geométricas simples e regulares. Em sistema de coordenadas retangulares, a equação de difusão, pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla [D_{ef} \nabla X] \quad (12)$$

Onde o coeficiente de difusão é um coeficiente que representa a difusividade efetiva e engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais.

Assumindo a forma geométrica de uma placa infinita onde a transferência interna de umidade durante a secagem é apenas em uma direção, a equação acima se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (13)$$

Considerando o coeficiente de difusão efetivo constante e o encolhimento do produto durante a secagem desprezível, a equação 13 pode ser expressa da seguinte forma:

Capítulo II : Revisão bibliográfica

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (14)$$

Quando o coeficiente de difusão D_{ef} é considerado constante, o conteúdo de umidade inicial X_i é distribuído uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas a transferência de massa. O teor de umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao teor de umidade de equilíbrio X_e , do produto.

São as seguintes condições de contorno:

$$X = X_i \quad \text{em } t = 0 \quad 0 < y < L$$

$$X = X_e \quad \text{em } y = L \quad t > 0$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 0 \quad \text{em } y = 0 \quad t > 0$$

Integrando a solução para obter a umidade média em função do tempo

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (15)$$

Onde:

\bar{X} = conteúdo de umidade médio, $g \cdot g^{-1}$;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio, $g \cdot g^{-1}$;

X_o = conteúdo de umidade inicial, $g \cdot g^{-1}$;

$(\bar{X} - X_e)/(X_o - X_e)$ = razão de umidade, adimensional;

D_{ef} = difusividade efetiva, $(cm^2 \cdot s^{-1})$;

t = tempo, s;

L = espessura média da amostra, cm.

2.3 - Atividade de água

A atividade de água (a_w), é um parâmetro que determina a quantidade de água disponível para o crescimento microbiano (deteriorantes e ou não deteriorantes) e para o aparecimento de reações deteriorantes e indesejáveis, entre tais pode-se citar: o escurecimento, a oxidação e a hidrólise (VITTALI, 1987).

Uma grande quantidade de alimentos tradicionais, são conservados através do abaixamento da atividade de água, mediante desidratações e possuem uma faixa de a_w considerada baixa ($a_w < 0,60$).

A atividade de água é uma propriedade fundamental para a conservação e armazenamento de um produto sendo um parâmetro mais importante que pH, teor de umidade e outras propriedades estudadas nos alimentos. Ela não é só função do conteúdo de água, mas também função das substâncias dissolvidas as quais exercem o efeito de ligação de água na estrutura do alimento. Desta forma alimentos que possuem em sua estrutura a mesma quantidade de umidade podem deste modo, possuir diferentes atividades de água dependendo, do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura (HEIDELBAUG & KAREL, 1975).

Para TEIXEIRA NETO & QUAST (1997) a relação existente entre a água e outros compostos de um produto definem a sua higroscopicidade e toma-se uma característica essencial que vai influenciar em diferentes etapas do processamento, armazenamento e consumo de materiais biológicos.

Estes estudos concluem que a maior ou menor intensidade com que a água se liga ao alimento pode ser expressa pela chamada atividade de água, a qual pode ser definida como a relação entre a pressão do vapor de água no ar e a pressão de vapor de água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Quando se refere à atividade de água de um alimento, isto significa a relação entre a pressão de vapor de água no alimento e a pressão de vapor de água pura, medidas à mesma temperatura.

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (16)$$

Em que:

Capítulo II : Revisão bibliográfica

p = pressão parcial de vapor d'água de um produto;
 p_0 = pressão de vapor d'água pura a mesma temperatura T;
 a_w = atividade de água.

Em conseqüência, seu valor pode ser determinado a partir da umidade relativa da camada de ar em equilíbrio com o alimento:

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (17)$$

Onde:

a_w = atividade de água

UR = umidade relativa percentual de equilíbrio exercida pelo alimento.

"Sabe-se que todos os alimentos contém água, no entanto, a água não se encontra ligada do mesmo modo. SANCHEZ citado por GOUVEIA (1999) cita que em alguns casos, a água pode estar relativamente livre e em outros estar ligada a estrutura do alimento, não ficando disponíveis para o processo de deterioração. Assim sendo, o conceito de atividade de água em um alimento permite quantificar o grau de liberdade de água contida no mesmo. Portanto, o controle de atividade de água é muito importante na preservação e desenvolvimento de novos produtos alimentícios." (GOUVEIA, 1999).

A atividade de água de um alimento não é somente função do conteúdo de água, mas também de substâncias as quais exercem o efeito de ligação da água na estrutura do alimento.

2.3.1 - Isotermas de sorção

As isotermas são representações gráficas da dependência da atividade de água e o teor de umidade de um produto alimentício a temperaturas e pressões definidas, e são determinadas experimentalmente.

Capítulo II : Revisão bibliográfica

As isotermas são classificadas em isotermas de adsorção e de dessorção, de acordo com a determinação da umidade do produto, seja durante o processo de umedecimento ou de secagem.

As isotermas de sorção de umidade dão informações indispensáveis ao processo, como por exemplo, a concentração e a desidratação, etc. É através da isoterma que se determina o valor da monocamada da água ligada ao alimento. Segundo TEIXEIRA NETO, citado por SANTINI (1996) não se deve retirar água em quantidade inferior a monocamada, visto que este é o limite abaixo do qual se iniciam as reações químicas indesejáveis no produto, além de ser esta região onde irá ocorrer um desperdício maior de energia para retirada da água residual do produto.

2.3.2 - Descrição das isotermas

Os modelos matemáticos que representam as isotermas de dessorção são de fundamental importância, visto que através de um certo número de pontos experimentais é possível ajustar uma isoterma e assim fazer a correspondência entre teor de umidade do produto analisado X (bs) e atividade de água (a_w) sendo possível fazer extrapolações de valores de difícil determinação experimental.

Existem vários modelos propostos na literatura, entre eles podem ser citados: BET, GAB e HENDERSON.

A equação de BET é o modelo bastante utilizado, fornecendo um ajuste dos dados para uma grande variedade de alimentos que possuam uma atividade de água na região de $0,05 < a_w < 0,45$, sendo representada pela Equação 18.

$$\frac{a_w}{(1-a_w)X} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} a_w \quad (18)$$

onde:

a_w = atividade de água

X = conteúdo de umidade de equilíbrio, base seca

X_m = o conteúdo de umidade na monocamada, base seca

Capítulo II : Revisão bibliográfica

$C = \text{constante} = \alpha \exp(\Delta H_{\text{BET}}/RTk)$

$R = \text{constante universal dos gases}$

$Tk = \text{temperatura, K}$

$\alpha = \text{coeficiente do calor de sorção}$

$\Delta H_{\text{BET}} = \text{entalpia de sorção}$

A equação de GAB (Guggenheim-Anderson-Boer) com três parâmetros é um melhoramento das teorias de BET e Langmuir e tem sido sugerida por diversos estudiosos (SCHAR & RUERG, 1984; LOMAURO et al., 1984; BIZOT, 1985). A equação é expressa como:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{kCa_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (19)$$

Onde:

$C = \text{constante de Guggenheim:} = C_0 \exp[(H_i - H_m)/RT]$

$K = \text{fator de correção das propriedades das moléculas multicamada com relação ao volume de líquido}$

$K = K_0 \exp[(H_i - H_n)/RT]$

$H_i = \text{calor de condensação do vapor de água pura}$

$H_m = \text{calor de sorção da primeira camada nos sítios primários}$

$H_n = \text{calor de sorção das moléculas de água nas multicamadas}$

Este modelo apresenta uma boa descrição para uma grande variedade de isotermas de alimentos na faixa de atividade de água de 0 a 0,90. Os parâmetros determinados através da equação de GAB podem ser obtidos diretamente através da regressão não-linear.

O modelo de HENDERSON é expresso através da equação:

$$1 - a_w = \exp(B_2 \cdot X_{(bs)}^{B_1}) \quad (20)$$

Capítulo II : Revisão bibliográfica

Onde:

a_w =atividade de água

B_1 e B_2 são constantes do modelo que dependem da temperatura

$X_{(bs)}$ = umidade em base seca

2.4 – O LEITO DE JORRO

O comportamento de um leito depende sensivelmente da natureza das partículas que o constitui. GELDART (1973), sugeriu uma classificação de partículas em quatro categorias onde, na maioria dos casos as partículas classificadas na categoria D, apresentam uma fluidização instável e são adequadas para leitos de jorro. Estas partículas possuem diâmetros elevados, geralmente maiores que 600 μm , ou seja, grandes valores do número de Arquimedes.

$$Ar = d_p^3 \cdot g \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) / \mu_g^2 \quad (21)$$

Objetivando promover o contato íntimo entre um fluido e partículas razoavelmente grandes que apresentam um fluidização incipiente, a tecnologia do leito de jorro tem evoluído significativamente desde a sua descoberta por MATHUR & GISHLER na década de 1950, ocupando um lugar relevante nas operações envolvendo contato entre um fluido e partículas sólidas. Ao invés de múltiplos orifícios para distribuição de 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.

O leito de jorro é utilizado 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, redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação de carvão, moagem e mistura de sólidos e pirólise de

Capítulo II : Revisão bibliográfica

parafuso; e o vibratório, cuja base cônica é flexível e vibra provocando o movimento do leito. Quanto à entrada do gás (mecanismo pneumático), que tanto pode ser o ar como outro gás ou vapor superaquecido, esta se dá na forma convencional através do orifício de entrada na base, com aeração complementar na região anular, com múltiplas entradas (diversos arranjos), ou combinadas com outros mecanismos tipo mecânico e vibro-jorrado. Nos processos de secagem a vácuo, usa-se comumente o jorro vibratório.

Quanto às modificações internas sofridas pelo leito de jorro, com objetivo de superar as limitações já citadas, uma de grande destaque foi a introdução de um tubo central (tubo "draft"), separando a região do jorro da região do anel. Algumas vantagens desta configuração foram destacadas por MUJUMDAR (1989):

- Pode ser aplicado a sólidos que possam ser arrastados pneumaticamente, numa larga faixa de tamanho e uniformidade de partículas;
- Requerem menores quedas de pressão para iniciar a circulação de partículas sólidas;
- A altura e o diâmetro do leito podem ser alterados substancialmente;
- Menores vazões de ar são requeridas para uma dada circulação de sólidos;
- Independentemente do diâmetro da coluna, altura do leito de tamanho das partículas a taxa de recirculação de sólidos pode ser variada.

Entre as desvantagens, o autor cita:

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

Capítulo II : Revisão bibliográfica

5. Capacidade limitada por unidade de espaço (devido aos limites sobre as dimensões do secador e à altura máxima de carga capaz de manter o jorro estável);
6. Dificuldade de mudança de escala.

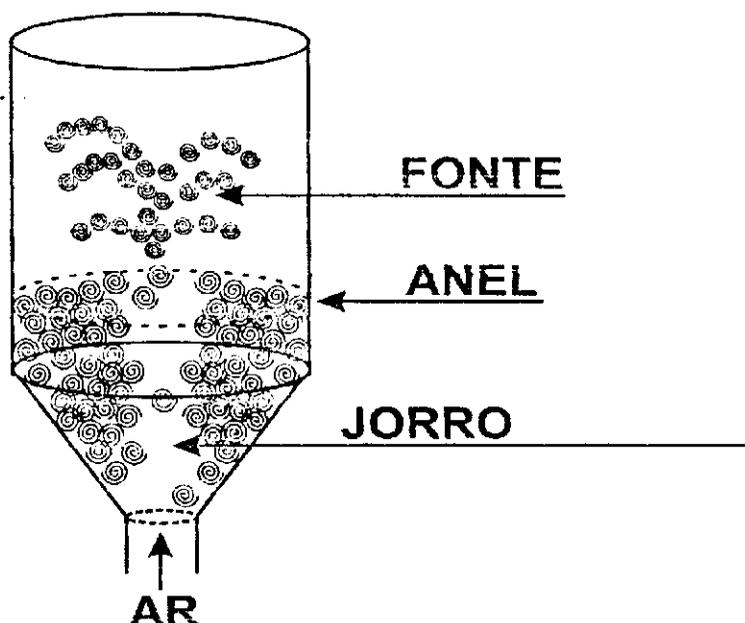


Figura 2.3 – Diagrama esquemático do leito de jorro convencional

Visando superar essas limitações, o leito de jorro convencional passou a sofrer modificações, surgindo diversos tipos de jorro, dentre os quais pode-se destacar o leito de jorro cônico, muito usado nos países europeus (MATHUR & GISHLER, 1974). No Brasil, o jorro cônico tem sido estudado por vários pesquisadores ao longo das últimas décadas, (CREMASCO *et al.* 1987, SILVA & FREIRE, 1989, ALSINA *et al.* 1995, ALSINA *et al.* 1996).

Segundo LIMA (1992), em relação à geometria, além do convencional e cônico, vem sendo estudado, como uma possível solução para o problema da capacidade do leito de jorro tradicional, o leito bidimensional ou retangular. Dados existentes na literatura, entretanto, ainda são escassos em termos da dinâmica desse tipo de leito. Quanto ao mecanismo que promove o jorro, pode-se citar o pneumático, comumente utilizado nos leitos convencionais; o mecânico, onde o deslocamento das partículas é realizado por um transportador mecânico tipo

Capítulo II : Revisão bibliográfica

xisto. No que diz respeito a secagem de suspensões em leite de jorro, tem-se a secagem de lacas e tintas, de sangue animal, pasta de tomate, extratos farmacológicos vegetais, carbonato de cálcio, polpa de frutas tropicais e leite.

O leite de jorro (Figura 2.3), 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 leite 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.

O gás é fornecido através do orifício com uma velocidade alta. Contudo, no topo do leite a velocidade do gás cai abaixo desta velocidade devido ao aumento do diâmetro desta parte da câmara. Nestas condições as partículas se separam e caem, o tempo de contato das partículas com o ar quente é curto e o dano térmico é mínimo. Contudo, a partícula pode circular no leite por um tempo largo suficiente para remover toda a umidade.

O sólido flui da forma muito dependente da razão do comprimento cone-cilindro. Em leitos com pequenos ângulos do cone, o fluxo tem forma muito semelhante com a fluidização. O leite de jorro convencional apresenta algumas limitações, entre elas:

1. Elevada perda de carga antes de atingir o jorro estável;
2. Dimensões geométricas limitadas para uma operação eficiente;
3. Vazão de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
4. Faixa operacional limitada;

Capítulo II : Revisão bibliográfica

CLAFIN & FANE (1984) e KHOE & VAN BASHEL (1989) estudaram o leito de jorro com um tubo central na secagem e desinfecção térmica do trigo, observando um melhor controle no tempo de residência da partícula e maior economia térmica. Mas, a utilização dessa técnica limita necessariamente o fluxo de gás no anel. SILVA & FREIRE (1989) determinando o coeficiente de transferência de calor parede-fluido, constataram um melhor desempenho técnico no secador com tubo central do que no convencional. De acordo com BERRUTI *et al.*), as informações disponíveis, referente a hidrodinâmica do leito de jorro com tubo central é bastante limitada.

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 e bandejas.

A compreensão do mecanismo de terminação do jorro é de fundamental importância, pois o mesmo está relacionado com a altura máxima capaz de se manter um jorro estável, H_{max} . Qualquer equação obtida para o cálculo de H_{max} deve vir acompanhada da descrição deste mecanismo. PASSOS (1991) demonstrou que, qualquer que seja a geometria do leito, o mecanismo de terminação do jorro pode ser identificado por faixas distintas do parâmetro A. Esse parâmetro, definido, inicialmente, por MORGAN & LITTMAN (1982) para a geometria cone-cilíndrica, representa a relação entre a energia mínima necessária para formar o jorro e a requerida para mantê-lo ao longo do leito nas condições de jorro mínimo, em $h_L = H/H_{max} = 1$, ou seja:

$$A = \rho_g U_t U_{mf} / (\rho_s - \rho_g) \cdot g \cdot D_i \quad (22)$$

Em que:

U_t = velocidade terminal da partícula, m/s

U_{mf} = velocidade de mínima fluidização, m/s

ρ_g = massa específica do ar

ρ_s = massa específica da partícula

D_i = diâmetro do orifício de entrada do ar

Capítulo II : Revisão bibliográfica

Sendo a velocidade mínima de fluidização (V_{mf}) obtida através de ensaios experimentais ou calculada a partir de correlações empíricas.

Com base nos dados e observações experimentais, MORGAN & LITTMAN (1982), concluíram que, para o leito de jorro convencional, o mecanismo de terminação do jorro é o de fluidização no topo da região anular quando $A > 0,02$ e o de pistonagem do jorro quando $A < 0,014$. Percebe-se que o mecanismo de pistonagem no jorro ocorre em leitos com baixo valor de A , uma vez que o jato de fluido na entrada do leito, em $h = 1$, não possui energia suficiente para formar o jorro.

De acordo com MATHUR & EPSTEIN (1974), os mecanismos de terminação de jorro, podem ser classificados como:

i) Fluidização no topo da região anular

A fluidização no topo da região anular tem sido considerada como mecanismo de terminação do jorro quando o leito convencional é formado de partículas grandes ($d_p > 1\text{mm}$) jorradas com o ar. Neste mecanismo, o jorro termina devido a fluidização do topo da região anular. Neste ponto onde $H = H_{\max}$, a velocidade mínima de jorro torna-se igual à velocidade de mínima fluidização (LITTMAN & MORGAN, 1988).

ii) Pistonagem do jorro

Este mecanismo foi observado em leitos de jorro convencionais formados de partículas pequenas ($d_p < 1\text{mm}$) jorradas pelo ar. Neste mecanismo, o jorro termina quando a cavidade interna degenera-se em bolhas que se movimentam, ascendentemente, em direção à região anular. A condição mínima necessária para ocorrência de jorro estável nestes sistemas e a condição de contorno, para este mecanismo de obstrução do jorro são descritas por EPSTEIN & CHANDANANI (1987), como:

$$D_i / d_p < 25 \text{ e } 0,55 < U_{jm} / U_{mf} < 0,70 \text{ para } h = 1.$$

2.5 – Curvas características do leito de jorro

O mecanismo de transição do leito fixo para o jorro convencional foi descrito por MATHUR & EPSTEIN (1974), através da curva característica de queda de pressão em função da velocidade do gás. Foram utilizados dados experimentais obtidos por LAMA *et al.*(1961), de ensaios feitos com sementes de trigo, em leito de jorro com diâmetro da coluna de 15,2 cm, diâmetro do orifício de entrada igual a 1,27 cm e ângulo da base cônica de 60°. A curva obtida encontra-se na Figura 2.4, com as seguintes considerações:

1. Inicialmente, para pequenas vazões, o gás não perturba as partículas do sistema, apenas circula entre elas fazendo com que este comporte-se como leito fixo;
2. Aumentando a vazão, as partículas que estão próximas ao orifício de entrada do gás, deslocam-se, surgindo uma cavidade acima desta região, circundada por uma camada sólida compacta, ainda mais resistente à passagem do gás, causando assim um aumento na queda de pressão no leito;
3. À medida que a vazão aumenta, a cavidade interna vai se alongando, havendo formação de um jorro interno, a queda de pressão continua aumentando até atingir um valor máximo (ΔP_M), no ponto B;
4. Quando a velocidade é aumentada acima do ponto B, o efeito do jorro interno é maior que o da camada sólida que limita a cavidade e a queda de pressão passa a diminuir ao longo de BC;
5. No ponto C, a quantidade de partículas deslocadas no núcleo central já é suficiente para provocar uma expansão do leito. Esta expansão pode ser acompanhada por expansões e contrações alternadas do jorro interno, resultando em instabilidade e flutuações na queda de pressão e, no caso de cargas mais profundas, fluidização de partículas na região adjacente ao jorro interno;

Capítulo II : Revisão bibliográfica

- Um pequeno incremento na vazão do gás acima do ponto C, corresponde ao jorro incipiente, faz com que a queda de pressão caia até o ponto D, no qual o jorro aflora à superfície;
- Com o aumento da velocidade além do ponto D, apenas aumenta a altura da fonte, sem que grandes alterações na queda de pressão sejam observadas.

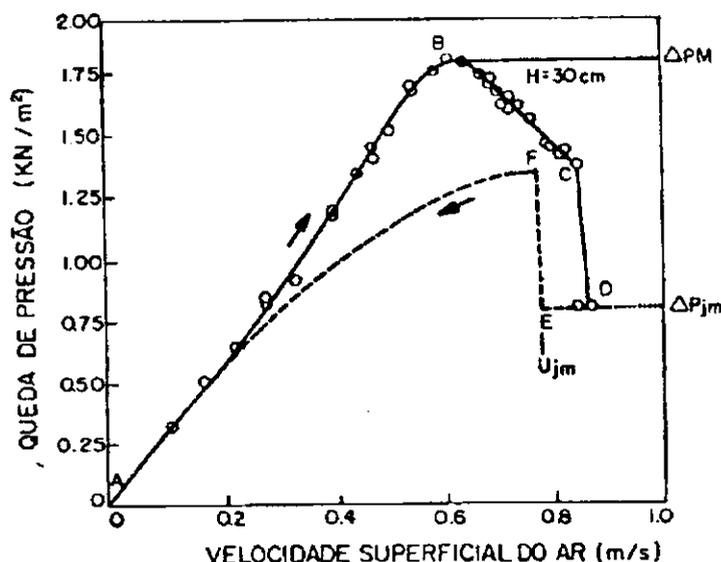


FIGURA 2.4 – Curva característica da queda de pressão

Fonte: MATHUR & EPSTEIN, 1974

As velocidades nos pontos C e D, que correspondem respectivamente às velocidades de jorro incipiente e de início de jorro estável, não são reprodutíveis. Isto se dá, devido a instabilidade gerada pela ação da ruptura do jato através do leito. A velocidade possível de ser reproduzida é a obtida a partir do processo inverso, diminuindo lentamente a velocidade do gás até o ponto E, onde se observa a menor velocidade do gás (U_{JM}) com a qual se pode obter o jorro estável. Continuando a redução na velocidade do gás, a queda de pressão cresce bruscamente até o ponto máximo F, localizado abaixo do ponto B. Uma diminuição da velocidade além deste ponto causa um declínio na queda de pressão ao longo do segmento FA (MATHUR & EPSTEIN, 1974).

Diversas correlações para determinação dos parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro são encontradas na literatura, tais como, queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade mínima de jorro. A seguir apresentamos algumas correlações aplicadas neste trabalho. Estes parâmetros são de fundamental importância no projeto de unidades industriais de leito de jorro, pois a partir deste pode-se especificar a potência do soprador para aflorar a superfície de partículas. Estas correlações aplicadas para comparar com os dados experimentais implicam em diversas limitações, ou seja, é necessário uma comparação dos dados experimentais e os dados calculados e saber se podemos aplicar dentro das condições impostas no nosso sistema experimental.

Tabela 2.7 - Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão máxima

Autor	Nº	Equação	Observação
THORLEY <i>et al.</i> (1959)	23	$\Delta P_M = (\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)H \cdot g$	$D_c = 71$ cm $D_c/D_i = 6,0$ cm $H/D_c = 10$ $\theta = 60^\circ$
GRBAVCIC <i>et al.</i> (1976)	24	$\Delta P_M = 1,2 \cdot H \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)$	$D_c = 61$ cm $D_i = 10,2$ cm $H = 183$ cm $\theta = 60^\circ$
SAMPAIO <i>et al.</i> (1984)	25	$\frac{\Delta P_M}{H \cdot g \cdot \rho_m} = 1 + 0,055 \left(\frac{H}{D_i} \right) - 0,018 \left(\frac{D_i}{d_m} \right)$	$\theta = 60^\circ$ $2,5 \leq D_i \leq 3,8$ cm
OGINO <i>et al.</i> (1993)	26	$\frac{\Delta P_M}{H \cdot g \cdot \rho_m} = 1,15 \left(\frac{H}{D_c} \right)^{1/2} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3}$	$D_c = 10-15-20$ cm $H = 20-50$ cm

Tabela 2.8 - Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão de jorro mínimo

Autor	Nº	Equação	Observação
MALEK <i>et al.</i> (1955)	27	$\Delta P_{jM} = 2M.g/3.A_C$	
NASCIMEN TO <i>et al.</i> (1976)	28	$\Delta P_{jm} = 0,67.(1 - \epsilon_m).H.\rho_m.g$	D _C = 32 cm D _i = 5,08 cm $\theta = 35^\circ$

Tabela 2.9 - Resumo das correlações para o cálculo da velocidade mínima de jorro

Autor	Nº	Equação	Observação
MATHUR & GISHLER (1955)	29	$U_{jm} = \left(\frac{d_m}{D_C}\right)\left(\frac{D_i}{D_C}\right)^{1/3} \left[\frac{2.g.H(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/2}$	D _C = 15,2 cm D _i = 0,95 cm $\theta = 85^\circ$
ABDELRAZ EK (1969)	30	$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left\{ \left(\frac{d_m}{D_C}\right)\left(\frac{D_i}{D_C}\right)^{1/3} \left[\frac{2.g.H(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right] \right\}$	D _C = 5-10 cm D _C /D _i = 12 cm H/D _C = 1-3
BRUNELLO <i>et al.</i> (1974)	31	$U_{jm} = 0,0143.d_m^{0,741}.H^{0,592} \left[\frac{2.g.H(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/2}$	

2.6 – O leito fluidizado

O termo "leito fluidizado" é usado geralmente para designar um sistema multifásico em que uma carga de partículas sólidas é suspensa por uma corrente de gás ou líquido. É denominada "fluidização" porque neste estado as duas fases

do sistema sólido/fluido comportam-se de forma similar a um líquido homogêneo, MARTIN (1982).

A fluidização pelo gás é um processo realizado para manter um contato gás e partículas sólidas. O leito fluidizado consta basicamente de uma coluna vertical, tendo em sua parte inferior, uma placa porosa, que sustenta o leito de partículas para realizar a fluidização. Ao introduzir o ar, as partículas comportam-se como leito fixo a baixas velocidades. À medida que a velocidade aumenta as partículas se rearranjam oferecendo menor resistência a passagem do ar. O leito subitamente se expande. Todavia, a perda de carga equilibra-se ao peso das partículas. Acima desta velocidade o leito comporta-se como um fluido. Com o contínuo aumento da velocidade do ar nota-se a formação de cavidades gasosas, denominadas de bolhas, que crescem com a elevação da velocidade do ar e altura do leito. Quando o diâmetro das bolhas é comparável ao da coluna o leito comporta-se como regime de pistonagem. Quando a velocidade é muita elevada, as partículas são arrastadas pelo gás e escapam da coluna, ocorrendo um transporte pneumático. Na Figura 2.5 é mostrado este comportamento.

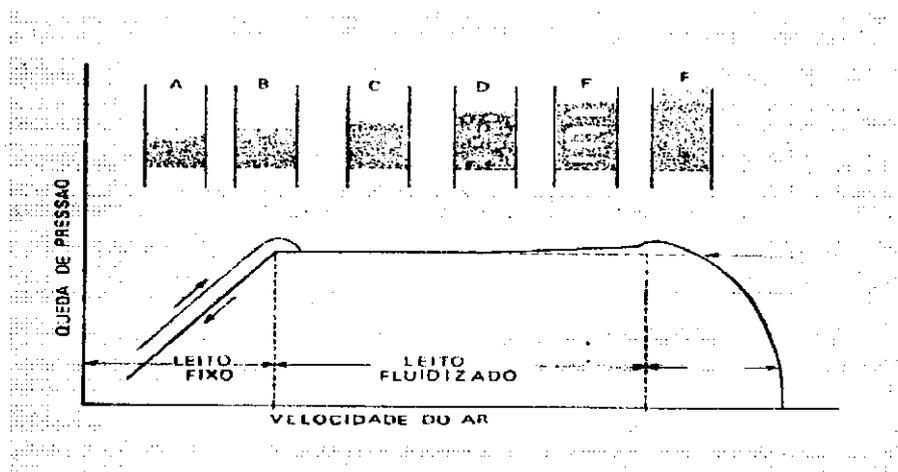


Figura 2.5. Descrição de um fenômeno de fluidização por um gás

2.6.1 Velocidade mínima e porosidade mínima de fluidização

Um grande número de correlações é proposto para determinar a velocidade mínima de fluidização. A Tabela 2.7, mostra algumas correlações encontradas na

literatura. Contudo, geralmente utiliza-se o método clássico proposto por RICHARDSON, citado por MURACHMAN (1990), que consiste na intersecção de duas retas, a primeira reta obtida da aproximação dos pontos iniciais e a segunda reta uma aproximação nos pontos finais. Neste encontro das retas, tem-se a velocidade mínima de fluidização.

TABELA 2.10 - Resumo das correlações empíricas para determinação da velocidade mínima de fluidização (V_{mf})

AUTOR	Nº	CORRELAÇÃO
Babu et al (1978)	32	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (25,25)^2 + 0,0651 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 25,25$
Bourgeois & Grenier (1968)	33	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (25,46)^2 + 0,0382 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 25,46$
Ergun (1951, 1952a e b)	34	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left[\left(4285 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi} \right)^2 + \epsilon_{mf}^3 \cdot \phi \cdot Ar^{1,75} \right]^{1/2} - 4285 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\phi}$
Grace (1982)	35	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (27,20)^2 + 0,0408 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 27,20$
Lucas et al. (1986b)	36	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (29,50)^2 + 0,0357 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 29,50$
Saxena et al. (1977)	37	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (25,28)^2 + 0,0571 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 25,28$
Thonglimp et al. (1984)	38	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ 2,79 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{0,63} \right\}^1$
Wen & Yu (1966)	39	$U_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_m \cdot d_m} \left\{ (33,70)^2 + 0,0408 \cdot Ar \right\}^{1/2} - 33,7$

A porosidade mínima de fluidização para diversas partículas sólidas foi determinada por BOTTERIL et al. (1982a e b) e LUCAS et al. (1986), através das medidas de perda de carga e expansão do leito realizadas à diferentes velocidades do ar. Os primeiros autores propuseram traçar uma curva $\epsilon = f(\ln U/U_{mf})$ e o segundo autor a curva de $\ln[(\epsilon^3/1 - \epsilon)] = f(\ln(U/U_{mf}))$. O valor da porosidade mínima de fluidização é obtido por extrapolação dos resultados para

U/U_{mf} igual a 1. MURACHMAN (1990) propôs a determinação da porosidade mínima de fluidização à partir da expansão do leito, utilizando a seguinte equação:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - [(W/A_c) / H_{mf}(\rho_p - \rho_g)] \quad (40)$$

Em que:

W = massa do leito

A_c = área da seção transversal do escoamento

H_{mf} = expansão total do leito obtida utilizando uma escala graduada na parte interior da parede da coluna

2.7 - Secagem de leveduras

A seguir são apresentados resumos de alguns trabalhos que envolvem secagem de leveduras.

SANTINI (1996) efetuaram uma série de análises relativas ao processo de secagem de leveduras conduzidas em estufa com circulação forçada de ar, determinando curvas de secagem nas seguintes faixas de temperaturas 55, 65, 75 , 90 e 120 °C, colocando em evidência o efeito da autólise das células de leveduras. Os testes realizados demonstram que a secagem de leveduras com inativação simultânea não deve ser conduzido em temperaturas muito elevadas (acima de 75 °C). Não foi constatada alteração importante no valor nutritivo do produto, mas verificaram alterações indesejáveis no aspecto, como odor e estrutura do produto comprometendo desta forma a viabilidade de comercialização.

RHEINBOLDT *et al.* (1987) descrevem sobre o processo de recuperação de levedura na fermentação alcoólica, apresentando aspectos característicos do balanço de leveduras em destilarias, da geração de biomassa e da sangria potencial sem queda do rendimento fermentativo, e manutenção da estabilidade

Capítulo II : Revisão bibliográfica

do processo. Apresentam um processo que consiste em três etapas principais: recuperação do etanol, desaguamento mecânico, termólise e secagem via secador leito fluidizado horizontal (capacidade 10 ton/dia). Apresenta um consumo total de energia inferior ao processo com tambores rotativos, inferior mão de obra, ocupação de menor área e instalações mais simples, substituindo uma rede de secadores por apenas um de maior capacidade e eficiência.

MAIALLE *et al.* (1999) analisaram a fluidodinâmica e a secagem em um secador de leito de jorro bidimensional contínuo com suspensão de leveduras a 10%, taxa de alimentação do líquido entre 6,26 e 20 g.min⁻¹, com temperatura do ar de entrada de 70 °C e mediu a taxa de circulação de partículas, o perfil de temperaturas no interior do leito, queda de pressão no jorro e na região anular. Amostras do material foram retiradas em diferentes posições no interior do leito para estimar a umidade da pasta e também foi medida a umidade final do produto. Os pós-obtidos foram microfotografados para análise de tamanho de partícula e estrutura. A partir dos dados da fluidodinâmica e de secagem, analisou-se o comportamento de diversas regiões do leito, bem como as condições de colapso. As micrografias indicam, em função da morfologia do pó obtido, zonas preponderantes de secagem.

OLIVEIRA *et al.* (1996) realizaram estudo experimental da secagem, em "spray drying" piloto, de levedo termolisado proveniente de usinas de álcool, com temperaturas de 73 a 140 °C. Os resultados obtidos mostram as propriedades do levedo seco: umidade, distribuição granulométrica, morfologia das partículas sólidas obtidas, bem como o teor de proteínas solúveis. O teor de umidade variou de 7,7 até 11,21%, e o de proteínas solúveis apresentou-se com valor médio de 26,75% (em base seca). O diâmetro médio obtido em função da eficiência do ciclone foi de 29,3 µm, numa amostragem total de 1838 partículas.

SANTOS *et al.* (1993) apresentaram um estudo do consumo energético na secagem de levedura termolisada, proveniente das dornas de fermentação do processo de produção de álcool etílico, processada em secador de tambor, turbo secador e secador rotativo com recheio de inertes. O consumo específico de energia para o secador rotatório com recheio de inertes, operando com ar de

Capítulo II : Revisão bibliográfica

secagem à temperatura de 130 °C, foi cerca de 3,4% superior àquele verificado no turbo secador, e de 38,7% inferior ao correspondente ao secador de tambor. A produção de partículas aumentou com a elevação da temperatura do ar para a variação de 80 para 130 °C, o aumento na produção de partículas grossas foi de 150% e na de finas de 120%. Para a mesma variação na temperatura do ar, as partículas finas e as grossas tiveram um mesmo acréscimo nos seus diâmetros médios da ordem de 34%.

GRABOWSKI *et al.* (1997) estudaram em escala experimental a secagem de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em secadores em leito fluidizado e leito de jorro. As amostras de fermento com umidade inicial em torno de 70% (b.u.), foram preparadas para obter uma granulometria com diâmetro de 0,8 a 1 mm, Inicialmente foram submetidas a secagem em leito fluidizado (temperaturas de 40 e 60 °C e altura de leito de 10, 20 e 30 cm) para caracterizar suas propriedades fluidodinâmicas e de secagem. De acordo com os resultados da caracterização sugeriram um processo que fosse iniciado com secador em leito fluidizado e em seguida em leito de jorro. Os parâmetros examinados durante o processo foram as possíveis causas da inativação térmica e inativação devido a desidratação (umidade final obtida em torno de 6 a 8%).

FREIRE *et al.* (1990) estudaram a secagem de pasta de leveduras em secador de leito de jorro em temperaturas de ar de entrada de 100, 120 e 140 °C, e ar de saída de 60, 79 e 80 °C e velocidades de jorro mínimo com variações nas concentrações da pasta de 10 , 15 e 20% e encontraram viabilidade no produto seco.

ALPAS *et al.* (1996) estudaram modelos matemáticos para a secagem de pastas de leveduras durante a secagem entre temperaturas de 40 a 60 °C e variando a velocidade do ar observaram a existência dos dois períodos de secagem, concluindo que no primeiro período ocorre a inativação das leveduras e no segundo período o processo é controlado por difusão e que os resultados experimentais mostraram que a velocidade do ar de secagem não afeta a constante de velocidade no segundo período de secagem. Enquanto que.

Capítulo II : Revisão bibliográfica

BAYROCK & INGLEDEW (1997) estudaram a secagem de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em leito fluidizado com temperaturas diferentes, observando os efeitos de misturas, velocidades de secagem e viabilidade durante a secagem.

SÁ(2002) estudou a secagem de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* em estufa com a finalidade de seu aproveitamento como fonte protéica em ração animal em temperaturas de até 70 °C, determinando as isotermas de dessorção e avaliando os coeficientes de transferência de massa e energia e os coeficientes de difusão.

2.8 – Eficiência energética

Segundo CALÇADA *et al.* (1996) os secadores convectivos têm seu aproveitamento energético fortemente influenciado pelas variáveis temperatura e velocidade mássica do ar de secagem, uma vez que estas afetam diretamente as taxas de transferência de massa, e conseqüentemente, de energia. A eficiência de um secador, é definida pela razão entre a energia absorvida pelo leito, na forma de calor sensível e calor latente, e a energia alimentada ao secador.

$$\eta = Q_{ab} / Q_a \quad (41)$$

Em que:

Q_{ab} = calor latente para evaporar a água mais o calor sensível consumido no processo para elevar a temperatura do sólido (kJ/kg de material seco);

Q_a = energia total fornecida ao secador (kJ/kg de material seco).

O calor sensível é considerado na equação (41) uma vez que a vaporização da água ocorre após o aquecimento da fase sólida, devido ao calor sensível cedida pela fase gasosa.

A energia absorvida pelo leito pode ser obtida pela equação:

Capítulo II : Revisão bibliográfica

$$Q_{ab} = Q_a - Q_s \quad (42)$$

Onde Q_s é a energia total transportada pela corrente de ar na saída do secador (kJ/kg de material seco). Sendo que a equação pode ser escrita na forma:

$$\eta = 1 - \frac{Q_s}{Q_a} \quad (43)$$

em que:

$$Q_s = g_a \cdot C_{pg} \cdot \int (T_{gs}(t) - T_r) dt \quad (44)$$

$$Q_a = g_a \cdot C_{pg} \cdot \int (T_{go}(t) - T_r) dt \quad (45)$$

portanto:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\Delta t_0} \int T^*(t) dt \quad (46)$$

com

$$T^*(t) = \frac{T_{gs}(t) - T_r}{T_{go} - T_r} \quad (47)$$

A eficiência instantânea global é definida por:

$$\eta_G = 1 - T^*(t) \quad (48)$$

onde:

T_{gs} = temperatura do gás na saída do secador, °C

T_{go} = temperatura do gás na entrada do secador, °C

T_r = temperatura de referência, °C

CALÇADA *et al.* (1996) estudaram a otimização do consumo de energia em secadores convectivos do tipo leito fixo deslizante com fluxos cruzados. As variáveis operacionais temperatura e velocidade mássica do ar alimentado no secador foram escolhidas de forma que a energia consumida no processo de secagem seja mínima. O programa desenvolvido visa estabelecer condições ótimas de operação, definida as condições do secador e a produção desejada, visando um melhor aproveitamento da energia fornecida ao secador. Para ambos

os casos, secador de leite fixo e secador de leite deslizante com fluxos cruzados, o método de otimização foi aplicado com sucesso.

2.9 – Planejamento experimental e otimização de processos

O planejamento experimental consiste em projetar um experimento de forma que seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informações que se procura, utilizando para isto princípios estatísticos que levam a extrair do sistema em estudo o máximo de informações úteis, realizando um mínimo de experimentos e atingindo mais rapidamente os objetivos a um menor tempo e custo (BARROS NETO *et al.* 1995).

Um dos problemas mais comuns em planejamento experimental é a determinação da influência de uma ou mais variáveis de entrada sobre uma outra de interesse.

Inicialmente, devem-se determinar quais são os fatores experimentais (variáveis de entrada) e as respostas (variáveis de saída) importantes para o sistema em estudo. As variáveis de entrada, ou controladas pelo experimentador, podem ser qualitativas e/ou quantitativas, assim como as respostas.

O segundo passo é definir claramente o objetivo a ser alcançado com os experimentos realizados, uma vez que estes determinarão o tipo de planejamento a ser utilizado, pois cada objetivo requer um tipo de planejamento.

Os métodos de planejamento experimental mais conhecidos para otimização do processo são o simplex, o planejamento fatorial e análise de superfície de resposta.

2.9.1 – Planejamento fatorial e análise de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta é uma técnica baseada no emprego de planejamentos fatoriais e que tem sido largamente utilizada com

Capítulo II : Revisão bibliográfica

bastante sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BOX *et al.* citado por BARROS NETO *et al.* (1995), sendo possível à realização de vários experimentos ao mesmo tempo, obtendo resultados estatisticamente confiáveis. O principal objetivo do planejamento fatorial é relacionar empiricamente as variáveis dependentes (respostas) com as variáveis independentes (entrada), além de se poder determinar estatisticamente o efeito de cada variável na(s) resposta(s) desejada(s).

Para a utilização deste método é necessário determinar em primeiro lugar às variáveis controladas e as respostas que se quer estudar. Em seguida, definir claramente qual o objetivo que se quer conseguir através dos experimentos, para se determinar que tipo de planejamento fatorial deve ser utilizado.

Inicialmente, seleciona-se um número fixo de níveis para cada uma das variáveis de entrada e, posteriormente, realizam-se os experimentos com todas as combinações possíveis. Se n fatores estão contidos no estudo, o planejamento fatorial necessitará da realização de 2^n ensaios diferentes, cobrindo todas as combinações possíveis. Para obtenção do erro experimental é necessário que se faça a realização de pelo menos 2 ensaios no ponto central (nível 0), correspondendo a média aritmética dos níveis -1 e + 1.

Para obter um modelo de 2ª ordem e percorrer outros níveis ou condições experimentais não pressupostas pelo planejamento fatorial inicial, que apenas oferece modelo de 1ª. ordem, pode-se ampliar o planejamento realizando experimentos nos pontos axiais, ou seja, completar o planejamento fatorial inicial com mais $2n$ experimentos. Este planejamento fatorial + configuração estrela pode também ser realizado apenas com fatores que apresentaram efeitos significativos no planejamento fatorial inicial mais os experimentos deslocados axialmente (níveis $-\delta$, -1, +1, $+\delta$). O cálculo do valor δ é feito através da equação de BOX & WILSON citado por BARROS NETO *et al.* (1995).

$$\delta = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (49)$$

onde k = número de variáveis (fatores) independentes.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

3.1- Material

3.1.1- Matéria-prima

A matéria-prima utilizada na alimentação do secador, foi a levedura do gênero *Saccharomyces cerevisiae* prensada do tipo comercial (fermento biológico fresco da marca Fleischmann), com umidade média de 70% em base úmida, teor de proteína bruta de 50%, apresentando cor característica creme e sem granulometria definida.

3.1.2- Partículas inertes

Como material inerte, foram utilizadas partículas de poliestireno do tipo 849, produzido pela EDN, Camaçari – Bahia, cuja caracterização e algumas propriedades estão relacionadas na Tabela 3.1. Segundo ALMEIDA, 1991 este material é aprovado para uso em alimentos.

TABELA 3.1 – Propriedades físicas do poliestireno

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

FONTE: (ALSINA *et al.* 1996)

3.2 - Equipamentos

3.2.1.- Secador de leite de jorro

O secador em leite de jorro utilizado, mostrado na Figura 3.1, é constituído de uma base cônica de acrílico, com ângulo interno de 60°, acoplada a uma coluna cilíndrica também em acrílico, com 10,3 cm de diâmetro interno e 25,3 cm de altura.

Na parte superior interna da coluna, acima do leite, é colocada uma placa defletora metálica, impedindo o arraste das partículas de poliestireno, permitindo apenas a passagem das partículas finas. Na lateral superior é conectado um ciclone com a finalidade de separar e coletar as partículas finas em embalagens plásticas. O secador possui orifícios que permitem tomadas de temperatura e pressão. A alimentação da levedura é feita por gravidade na parte superior da coluna.

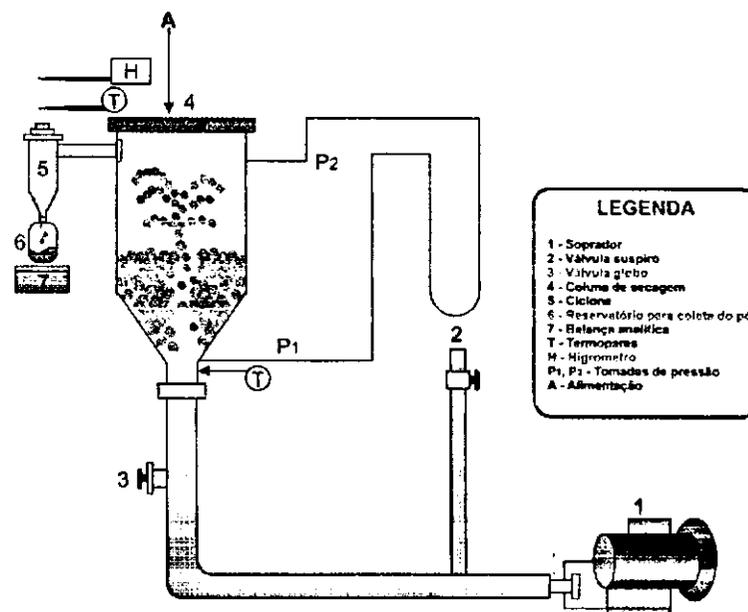


Figura 3.1 – Secador de leite de jorro cone-cilíndrico convencional

3.2.2 - Equipamentos auxiliares

- Anemômetro digital, MOD. AM 4201, marca LUTRON, com sensor tipo hélice de baixa fricção, para medidas de velocidade do ar de 0,4 a 30 m/s;
- Manômetro diferencial tipo tubo em “U”, cujo líquido manométrico é óleo com densidade igual a 870,0 kg/m³, para medidas de pressão;
- Cronômetro marca Gallempkanp, referência TKM 340 Y;
- Higrômetro/Termômetro, modelo HT-3003 com medidores de umidade relativa entre 10 a 95 % e temperatura de 0 a 50 °C fabricado pela LUTRON;
- Balança Mettler PC 440, capacidade 0,440 kg, com precisão de leitura de 0,001g, fabricada pela Mettler Instrument, AG, Suíça;
- Balança AND, capacidade 0,210 kg, com precisão de leitura 0,0001 g, fabricada pela A & D Company Limited – Japão.
- Estufa com renovação e circulação de ar, modelo MA 035, fabricada pela Marconi.

3.3 - Metodologia

3.3.1 - Preparação da levedura para estudo em leito de jorro

A levedura utilizada neste trabalho foi adquirida em distribuidores de produtos para panificação, sempre observando o prazo de validade da mesma. Separada uma certa quantidade desta levedura, que se encontrava compacta, com umidade inicial em torno de 70% em base úmida, prensava-se em peneira de 0,991 mm de abertura, com o objetivo de diminuir o tamanho dos aglomerados.

3.3.2 - Obtenção das curvas características em leito de jorro

Inicialmente, o inerte era introduzido no secador, cuja quantidade em todos os experimentos foi fixada em 8 cm na altura da coluna de secagem ou 0,250 kg. Em seguida, o soprador era acionado injetando ar através do orifício localizado na base do leito, propiciando a formação do jorro. Estabelecido o jorro, fazia-se a alimentação da levedura para toda a faixa de concentração e acompanhava-se a secagem por 0, 5, 10 e 15 min. Após a secagem, o equipamento era desligado e procedia-se um novo empacotamento do material contido na coluna. Em seguida acionava-se o compressor, aumentando-se gradativamente a vazão do gás e registrando-se a queda de pressão correspondente. Este procedimento era realizado até total abertura da válvula. No momento da formação do jorro interno, registrava-se a queda de pressão máxima. Quando alcançado este ponto fazia-se o procedimento inverso, variando-se cautelosamente a vazão do ar para obtenção da curva a velocidade decrescente. No momento em que observa-se o menor

valor da velocidade para o qual ainda verificava-se o jorro estável, anotava-se a U_{JM} e prosseguia-se o experimento até interrupção completa da vazão de gás.

Algumas observações devem ser feitas:

1. Durante a obtenção das curvas características de queda de pressão a temperatura foi mantida em torno de 40 °C;
2. Foi subtraída a perda de carga no distribuidor na determinação da queda de pressão no leito;
3. Os experimentos realizados sem a presença de levedura seguiram o mesmo procedimento descrito nos parágrafos anteriores.

3.3.3 - Delineamento da matriz de planejamento experimental para o estudo de secagem em leito de jorro

Visando obter um melhor estudo sobre a otimização do processo e analisar a influência das variáveis independentes, concentração de levedura e velocidade do ar na entrada do secador, sobre as variáveis de saída, assim como as interações entre elas, escolheu-se a metodologia de planejamento fatorial 2^2 mais configuração estrela, com a realização de 3 experimentos no ponto central, o que permite uma estimativa da variabilidade em função do erro experimental, resultando desta forma em 11 experimentos.

A Tabela 3.2 mostra os valores da concentração de levedura, definida pela razão entre a massa de levedura alimentada ao secador e a massa de inertes (expressa em porcentagem), e velocidade do ar na entrada da coluna nos diferentes níveis utilizados nas corridas experimentais. A Tabela 3.3, apresenta a matriz de planejamento experimental, que mostra de maneira clara e organizada a quantidade de experimentos a serem realizados.

A faixa de concentração empregada neste trabalho foi obtida com base em trabalhos anteriores realizados com frutas, podendo-se citar MORAIS (1996) e LIMA (1996). Quanto à variação das velocidades, fixadas em 1,1; 1,2 e 1,3 da vazão de jorro mínimo foram realizados testes preliminares, e estes mostraram

Capítulo III: Material e Métodos

que no caso das leveduras para a quantidade fixa de inerte utilizada U_{JM} fica em torno de 0,177 m/s.

Tabela 3.2 – Níveis reais e codificados das variáveis independentes para o leito de jorro

Variáveis	Níveis (-1,414)	Níveis (-1)	Níveis (0)	Níveis (+1)	Níveis (+1,414)
% (g leveduras/100 g de inertes)	1,2	2,0	4,0	6,0	6,8
Velocidade do Ar (m/s)	0,185	0,199	0,213	0,227	0,241

Tabela 3.3 – Matriz de planejamento experimental fatorial 2^2 + configuração estrela em leito de jorro

Experimentos	Concentração de Levedura (%)	Velocidade do Ar (m/s)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1,414	0
9	+1,414	0
10	0	+1,414
11	0	-1,414

3.4 - Ensaios de secagem em leito de jorro

As condições de trabalho para a secagem foram determinadas através de testes preliminares, com o objetivo de obter parâmetros que propiciassem o bom

funcionamento do leito de jorro com base nos testes preliminares. Este trabalho foi realizado com uma altura fixa de inertes, completa na região cônica mais 2 cm na região cilíndrica, correspondendo a uma altura de 8 cm e sem aquecimento. As variáveis estudadas foram a vazão do ar e a concentração de levedura alimentada.

O procedimento de secagem está descrito a seguir:

- Enchimento da coluna com as partículas inertes na quantidade equivalente a altura do leito desejada (8 cm), procurando-se obter um empacotamento uniforme;
- Acionamento do soprador e ajuste da velocidade desejada, medida com um anemômetro digital na extremidade superior do ciclone;
- Leitura das temperaturas na entrada e saída da coluna de secagem e da umidade relativa na saída do ciclone.
- Alimentação da levedura na proporção desejada, ou seja, $M_L/M_I = 0,012$, $M_L/M_I = 0,02$, $M_L/M_I = 0,04$ ou $M_L/M_I = 0,06$ e $M_L/M_I = 0,068$
- Após 20 min de secagem, efetuava-se nova alimentação seguindo o procedimento anterior. O processo era repetido até cinco alimentações.
- Depois da última alimentação, decorridos 20 min o equipamento era então desligado;
- Finalizado o experimento, o pó coletado era quantificado e submetido à análise de umidade.

3.5- Secador de leito fluidizado

O secador em leito fluidizado é o mesmo mostrado na Figura 3.1. Entretanto, o sistema de distribuição do ar foi adaptado com uma tela instalada na base da coluna cilíndrica, e partículas de polipropileno distribuída em toda a região cônica, com o objetivo de fornecer uma distribuição do ar na coluna que permitisse a fluidização do leito nas condições estabelecidas.

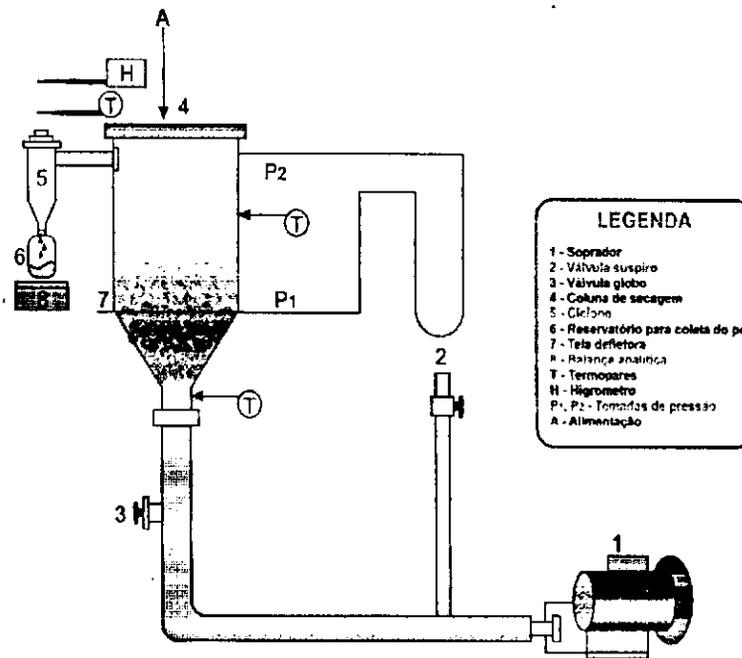


FIGURA 3.2 – Secador de leite fluidizado

3.5.1 - Equipamentos auxiliares

Os equipamentos auxiliares são os mesmos utilizados para o leite de jorro.

3.5.2 - Preparação da levedura para estudo em leite fluidizado

Foi utilizado o mesmo procedimento realizado para o estudo com leite de jorro.

3.5.3 - Obtenção das curvas características em leite fluidizado

Inicialmente, introduziam-se as partículas de polipropileno na parte cônica do secador com o objetivo de melhorar a distribuição do fluido, seguido do inerte, separados de uma tela defletora, cuja quantidade em todos os experimentos foi

fixada em 0,250 kg e da levedura, observando-se as proporções estabelecidas, Em seguida, o soprador era acionado injetando ar através do orifício localizado na base do leito. Estabelecido o regime, aumentava-se gradativamente a vazão do gás e registrava-se a queda de pressão correspondente. Este procedimento era realizado até total abertura da válvula. Alcançado este ponto fazia-se o procedimento inverso, diminuindo-se cautelosamente a vazão do ar para obtenção da curva de velocidade decrescente. Registrava-se a velocidade em que ainda verificava-se a fluidização e prosseguia-se o experimento até interrupção completa da vazão de gás.

As observações feitas são as mesmas registradas para o leito de jorro, com apenas uma modificação, não foi considerada a perda de carga no distribuidor na determinação da queda de pressão.

3.5.4 - Delineamento da matriz de planejamento experimental para o estudo da secagem em leito fluidizado

Os resultados da Tabela 3.4 mostram os valores correspondentes a concentração de levedura alimentada ao secador, e a velocidade do ar na entrada da coluna nos diferentes níveis utilizados nas corridas experimentais. Os dados descritos na Tabela 3.5, apresenta a matriz de planejamento experimental fatorial 2^2 + configuração estrela.

A faixa de concentração empregada neste trabalho foi obtida com base na fluidodinâmica do leito fluidizado descrita anteriormente. Quanto à variação das velocidades, fixadas em 1,25; 1,40 e 1,56 da velocidade mínima de fluidização, foram realizados testes preliminares, e estes mostraram que no caso das leveduras com uma quantidade fixa de inerte o U_{mf} na presença e na ausência de leveduras fica em torno de 0,227 m/s.

Tabela 3.4 - Níveis reais e codificados das variáveis independentes para o leito fluidizado

Variáveis	Níveis (-1,414)	Níveis (-1)	Níveis (0)	Níveis (+1)	Níveis (+1,414)
% (g leveduras/100 g de inertes)	0,5	3	9	15	17,5
Velocidade do Ar (m/s)	0,270	0,284	0,320	0,355	0,370

Tabela 3.5 – Matriz de planejamento experimental fatorial 2² + configuração estrela em leito fluidizado

Experimentos	Concentração de Levedura (%)	Velocidade do Ar (m/s)
1	-1	-1
2	-1	+1
3	+1	-1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	-1,414
9	+1,414	0
10	0	+1,414
11	-1,414	0

3.6.- Ensaios de secagem em leito fluidizado

As condições de trabalho para a secagem foram determinadas através de testes preliminares, com o objetivo de obter parâmetros que propiciassem o bom funcionamento do leito fluidizado. Este trabalho foi realizado com uma altura fixa de inertes (poliestireno) na região cilíndrica de 6 cm e sem aquecimento. As

variáveis estudadas neste trabalho serão a vazão do ar e a quantidade de levedura alimentada.

O procedimento de secagem está descrito a seguir:

- Enchimento da coluna com as partículas inertes de polipropileno na região cônica, seguida da introdução de uma tela defletora, procurando uma melhor distribuição do ar;
- Enchimento da coluna com as partículas inertes de poliestireno na quantidade equivalente a altura do leito desejada (6 cm), procurando-se obter um empacotamento uniforme;
- Acionamento do soprador e ajuste da velocidade desejada, medida com um anemômetro digital na extremidade superior do ciclone;
- Leitura das temperaturas na entrada e saída da coluna de secagem e umidade relativa na saída do ciclone.
- Alimentação da levedura na quantidade desejada, ou seja, $M_L/M_I = 0,005$, $M_L/M_I = 0,03$, $M_L/M_I = 0,090$ ou $M_L/M_I = 0,015$ e $M_L/M_I = 0,0175$
- Após 20 min de secagem, efetuava-se nova alimentação seguindo o procedimento anterior. O processo era repetido até cinco alimentações.
- Depois da última alimentação, decorridos 20 min o equipamento era então desligado;
- Finalizado o experimento, o pó coletado era quantificado e submetido à análise de umidade.

3.7- Caracterização físico-química da levedura

Na caracterização da levedura *in natura* e seca foram utilizados os seguintes métodos analíticos:

3.7.1 – Umidade

Para determinar o teor de umidade das leveduras (in natura e seca), foi utilizada a metodologia descrita pela AOAC (1992). A amostra era pesada e colocada em uma estufa de secagem a 70 °C, em presença de sílica gel durante 24 horas, tempo suficiente para peso constante. Durante o acompanhamento do decréscimo de umidade, as amostras eram retiradas da estufa e colocadas em um dessecador até atingir a temperatura ambiente, quando então se procedia à pesagem. Todas as determinações de umidade foram feitas em duplicata. Os teores de umidade foram calculados em base úmida ou em base seca mediante as equações 50 e 51, respectivamente:

$$X_{(b.u.)} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \quad (50)$$

$$X_{(b.s)} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} \quad (51)$$

Em que:

$X_{(bu)}$ = umidade em base úmida do pó

$X_{(bs)}$ = umidade em base seca do pó

m_i = massa inicial da amostra, g

m_f = massa final da amostra, g

m_{ss} = massa de sólido seco da amostra, g

3.7.2 - Proteínas totais

As análises de proteínas totais foram realizadas no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas/DEAg/CCT/UFMG. A determinação das proteínas totais foi obtida através da determinação da dosagem de nitrogênio total. O método utilizado foi o Método de Kjeldahl (AOAC., 1992).

3.8 - Rendimento

O rendimento foi definido como sendo a razão entre a massa do pó coletado no ciclone após o período de secagem e a massa total que foi alimentada no secador. Todas as massas em base seca. Sendo assim, pode-se escrever:

$$R(\%) = \frac{M_{LO} \cdot (1 - X_{S(b,u)})}{M_L \cdot (1 - X_{E(b,u)})} \cdot 100 \quad (52)$$

Em que:

R = rendimento do pó (%)

M_{LO} = massa de pó obtida, g

M_L = massa da amostra alimentada no secador, g

$X_{S(b,u)}$ = umidade do pó na saída do secador em base úmida

$X_{E(b,u)}$ = umidade da amostra na entrada do secador em base úmida

3.9 - Levedura retida

Após o término do experimento de secagem todo o leito era descarregado e colocado em uma peneira de plástico sobre um prato fundo com o objetivo de separar a levedura impregnada no inerte. Esta separação era feita facilmente já que a levedura não ficava aderida ao inerte, comportando-se como um leito formado por mistura de partículas. Feito isto, o material obtido no peneiramento era pesado e submetido a análise de umidade. Então, define-se a retenção como a relação entre a massa do pó retido e a massa total que foi alimentada no secador (em base seca):

$$r(\%) = \frac{M_R \cdot (1 - X_{S(b.u.)})}{M_L \cdot (1 - X_{E(b.u.)})} \cdot 100 \quad (53)$$

Em que:

r = retenção do pó (%)

M_R = massa do pó retida no secador, g

M_L = massa da amostra alimentada no secador, g

$X_{S(b.u.)}$ = umidade do pó na saída do secador em base úmida

$X_{E(b.u.)}$ = umidade da amostra na entrada do secador em base úmida.

3.10 - Cinética de produção

A cinética de produção de pó foi avaliada em todos os ensaios de secagem. O procedimento experimental foi o mesmo descrito anteriormente. Foram feitas 5 alimentações variando a quantidade de levedura alimentada de acordo com o percentual definido para cada um dos 11 experimentos. A alimentação era feita em intervalos regulares de 20 min, totalizando o tempo do experimento em 100 min. Durante os ensaios foi colocada uma balança abaixo do ciclone acompanhando-se desta forma a produção de levedura seca em intervalos de 2, 3 e 5 min.

3.11- Curvas de secagem: evaporação de água

A partir dos dados de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar, foi possível construir as curvas de evaporação de água. Estes dados foram obtidos durante todo o tempo de secagem, em intervalos regulares de 2, 3 e 5

min. A metodologia utilizada no levantamento das curvas de taxa de evaporação e umidade está descrita abaixo:

1. Estabilizado o sistema nas condições de trabalho requeridas (vazão do ar) e antes de fazer a primeira alimentação, registrava-se a umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na entrada e saída do secador.
2. Como não ocorre o processo de secagem na ausência de levedura, pode-se considerar que a umidade absoluta do ar na saída do secador é a mesma do ar de entrada. Então, com a umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar na saída, determinou-se através do programa PSYCRO em Fortran., a umidade absoluta e densidade do ar.
3. Quando feita a alimentação da levedura, registrava-se a cada 2 min a temperatura e umidade relativa na saída do secador. Utilizando o programa PSYCRO, obteve-se os dados necessários para construção das curvas de umidade e determinação da taxa de evaporação durante todo o processo de secagem.
4. Empregou-se a seguinte metodologia:

A partir dos dados psicrométricos do ar na saída do secador e da velocidade do ar no jorro, calculou-se o fluxo de massa de ar isento de umidade, de acordo com a Equação 45:

$$W_s = \frac{\pi \cdot D_{sc}^2 \cdot v \cdot \rho_{gs}}{4 \cdot (U_{gs} + 1)} \quad (54)$$

Em que:

W_s = fluxo de massa de ar seco, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

D_{sc} = diâmetro da saída do ciclone, m;

v = velocidade do ar da saída do ciclone, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

ρ_{gs} = densidade do ar na saída do ciclone, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

U_{gs} = umidade absoluta do ar na saída do ciclone, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

As taxas de evaporação de água foram calculadas em função da Equação 46.

$$W_{EV} = W_S \cdot (U_{gs} - U_{gc}) \quad (55)$$

Em que:

W_{EV} = taxa de evaporação de água em $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

U_{gs} e U_{gc} = umidades absolutas do ar na saída do ciclone e entrada do secador em $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

3.12 - Eficiência energética

Como citado na revisão bibliográfica, CALÇADA *et al* (1996), determinaram a eficiência energética instantânea global do secador (η_G) através da equação:

$$\eta_G = 1 - (T_{gs} / T_{go}) \quad (56)$$

3.13 - Isotermas de dessorção

Para o levantamento das isotermas de dessorção, foi utilizada a levedura tipo comercial, do gênero *Saccharomyces cerevisiae*. Foram estabelecidas as temperatura de 25, 30, 40 e 49 °C para obtenção dos dados de atividade de água.

3.13.1 - Atividade de água (a_w)

Materiais:

Balança analítica (marca HR-200)

Estufa com remoção e circulação de Ar (MA-035)

Thermoconstanter Novasina (TH-200)

Leveduras in natura *saccharomyces cerevisiae*

3.13.2 - Procedimento

As amostras eram pesadas em células plásticas, aproximadamente 8,000g, utilizando-se balança analítica com precisão de 0,0001 g e levadas à estufa com circulação forçada de ar, na temperatura de 60 °C por um período de 2 h. Após este tempo era feito à primeira leitura da atividade de água (a_w) por medida direta no NOVASINA. Após a leitura da a_w quantificava-se a amostra e retomava novamente a estufa. Procedia-se novas leituras em intervalos de tempo de 30 min. Este procedimento foi feito nas temperaturas de 25, 30, 40 e 49 °C.

3.13.3 - Thermoconstanter novasina (TH-200)

Para o levantamento dos dados experimentais das isotermas de dessorção de levedura seca, foi utilizado um Thermoconstanter Novasina (TH-200), que é um equipamento específico para se determinar a_w (atividade de água) com temperatura controlada.

Neste equipamento a temperatura da câmara é regulada por meio de um controlador localizado no painel frontal do Novasina, que serve para fixar o valor da temperatura ajustada, com variações inferiores a 0,2 °C. A escala de trabalho corresponde a temperaturas na faixa de 0 à 50 °C. A câmara de medição combinada com o regulador de temperatura, formam uma pequena câmara climática.

A cabeça de medição contém um sensor de umidade e temperatura. O BSK Novasina, é o sensor que mede a umidade de equilíbrio e temperatura de

Capítulo III: Material e Métodos

pequenas amostras que neste trabalho foi de aproximadamente 8,0000 g, na forma de sólidos (é possível determinar a umidade de equilíbrio de sólidos, líquidos e gel no Novasina). Este equipamento possui um transmissor RTD -20, que converte os sinais da célula de medição. Os valores medidos de UR (a_w) e de temperatura, podem ser lidos diretamente no mostrador frontal do mesmo.



Figura 3.3 - Thermoconstanter Novasina

CAPÍTULO IV

ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

4.1 - Resultados das isotermas de dessorção

Neste capítulo apresentam-se os resultados do levantamento das isotermas de dessorção, que estabelecem a relação entre a quantidade de água retida na amostra e a umidade relativa do ar em equilíbrio com a mesma.

O levantamento das isotermas de dessorção foi realizado, tendo em vista que, na obtenção dos produtos com baixa atividade de água (a_w), o estado da umidade presente é importante tanto para o processamento como para a estabilidade e também para determinação do valor da monocamada de água ligada ao produto.

Os dados experimentais da atividade de água com suas respectivas umidades de equilíbrio obtidos nas temperaturas de 25, 30, 40 e 49 °C para a levedura *Saccharomyces cerevisiae* estão apresentados na Tabela 4.1. As isotermas de dessorção foram obtidas para a levedura *in natura* em intervalos de tempos diferentes. Os valores dos conteúdos de umidade de equilíbrio são valores obtidos a partir das amostras em duplicata para cada atividade de água.

Tabela 4.1- Atividade de água e umidade de equilíbrio para as leveduras *Saccharomyces cerevisiae*

25°C		30°C		40°C		49°C	
a_w	X_e	a_w	X_e	a_w	X_e	a_w	X_e
0,891	0,935	0,974	0,937	0,950	1,433	0,856	0,943
0,868	0,853	0,958	0,920	0,945	1,198	0,853	0,927
0,838	0,790	0,920	0,700	0,940	1,076	0,820	0,684
0,837	0,623	0,820	0,430	0,897	0,974	0,812	0,689
0,820	0,598	0,711	0,239	0,865	0,804	0,787	0,519
0,764	0,446	0,631	0,137	0,845	0,719	0,780	0,515
0,733	0,313	0,544	0,085	0,830	0,627	0,732	0,372
0,714	0,309	0,281	0,031	0,811	0,442	0,720	0,344
0,662	0,217	0,245	0,030	0,753	0,273	0,665	0,236
0,634	0,212	0,195	0,019	0,633	0,128	0,607	0,138
0,614	0,163	0,192	0,016	0,544	0,092	0,455	0,096
0,571	0,108	0,159	0,010	0,321	0,045	0,398	0,071
0,520	0,075			0,206	0,032	0,248	0,045
0,467	0,059			0,204	0,033	0,161	0,040
0,322	0,031			0,170	0,025	0,150	0,035
0,250	0,022			0,254	0,019	0,140	0,033
0,120	0,011			0,136	0,015		
				0,129	0,012		

Através dos valores contidos na Tabela 4.1, foi verificado que a umidade de equilíbrio é maior para uma maior de atividade de água. No entanto observaram-se flutuações tanto de aumento quanto de diminuição para a mesma atividade de água em determinada temperatura. Estes resultados divergem em parte dos dados de sementes de algodão herbáceo obtidos por CORRÊA & ALMEIDA (1999) e KECHAOU & MAALEJ (1999), estudando frutos de banana concluíram que a umidade de equilíbrio deste material em estudo aumenta com o aumento da atividade de água para uma temperatura constante e que esta atividade de água

aumenta com a temperatura para umidade de equilíbrio constante. Os dados encontrados para a levedura *Saccharomyces cerevisiae* mostraram algumas flutuações das umidades com a variação de temperatura para uma atividade de água fixa.

A fim de se descrever os dados experimentais de equilíbrio ar-umidade, foram selecionados os modelos de BET de dois parâmetros e de GAB (Guggenheim - Anderson - Boer) de três parâmetros. Para realizar o ajuste do modelo de GAB utilizou-se regressão não-linear, obtendo-se assim os valores dos parâmetros X_m , C e k . Na Tabela 4.2 estão apresentados os parâmetros e os coeficientes de determinação, encontrados nos ajustes das isotermas de dessorção com regressão não-linear utilizando o modelo de GAB.

Tabela 4.2- Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção do modelo de GAB

Parâmetros do modelo de GAB	Temperatura (°C)			
	25	30	40	49
X_m	0,061	0,128	0,078	0,052
C	1,041	0,070	1,381	5,779
k	1,113	0,930	1,017	1,136
R^2 (%)	94,51	96,53	92,00	94,00

Tabela 4.3 Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção do modelo de BET

Parâmetros do modelo de BET	Temperatura (°C)			
	25	30	40	49
X_m	0,166	0,045	0,090	0,129
C	0,349	2,245	1,044	1,238
R^2	82,56	46,94	5,12	24,04

Pode-se observar pela Tabela 4.2 que o conteúdo de umidade na monocamada (X_m), e os valores de C e k para o modelo de GAB aplicado neste trabalho, tem valores variáveis nas temperaturas estudadas. Observa-se, neste caso, que a temperatura afeta o valor da umidade de monocamada. A 49 °C a umidade é menor que para as demais temperaturas indicando que um maior fornecimento de energia ao processo faz com que o teor de água residual seja menor, reduzindo assim a umidade, e podendo ainda significar a ocorrência de transformações químicas no produto. Pelos valores indicados na Tabela 4.3 aplicando o modelo de BET, concluímos que o modelo não ajustou bem aos dados experimentais. Como sabemos que o modelo de BET é bem ajustado para materiais em que a atividade de água entre 0,045 e 0,45, isto pode justificar nossas conclusões acerca da aplicação deste modelo. Estes resultados diferem dos resultados obtidos por MOURA *et al.* (2001) e GABAS (1998) que obtiveram comportamento crescente com a temperatura para o conteúdo de umidade na monocamada em seus trabalhos com secagem de caju e uva. SÁ (2002) no seu estudo de isotermas das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C encontrou valores da umidade de monocamada alternados com o aumento da temperatura. No que diz respeito ao parâmetro k , ele aumenta gradativamente com a temperatura a partir de 30 °C, mas os valores encontrados estão próximos da unidade, que é o encontrado para grande maioria dos materiais estudados. Uma justificativa para estes valores de k próximos de 1, deve-se ao fato de se esperar uma pequena diferença entre a entalpia de condensação e a entalpia das multicamadas pois o modelo está promovendo uma correção das propriedades das moléculas das multicamadas com relação ao volume de líquido presente. Ao contrário, o coeficiente de Guggenheim, C , possui um comportamento não linear com a temperatura, apresentando tendência a valores crescentes dentro da faixa estudada, exceto para isoterma de 30 °C. SÁ (2002) secando leveduras *Saccharomyces cerevisiae* observou aumento do valor de C com aumento da temperatura e flutuações nos valores de k . GABAS (1998) em estudos realizados com a secagem de uva e MOURA (2001) sobre a secagem de caju, observaram uma diminuição do valor do parâmetro C com aumento da

temperatura. Provavelmente, esta divergência seja proveniente das diferenças de estabilidade tanto físicas quanto químicas destes produtos desidratados e das condições psicrométricas do ar de secagem.

Com relação aos ajustes dos modelos matemáticos avaliados, observa-se que, para a levedura *Saccharomyces cerevisiae* (Tabela 4.2), o modelo de GAB apresentou valores para os coeficientes de determinação (R^2) entre 92 e 96,53%. ARAÚJO (2001) determinou as isotermas de dessorção do fruto da goiabeira e observou que o modelo de GAB apresentou os melhores ajustes aos dados experimentais para as temperaturas mais elevadas entre as estudadas. O mesmo comportamento foi observado para banana-maçã. Outros modelos como de BET para ajuste das isotermas foram testados, entretanto, pode-se afirmar que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais para a levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi o modelo de GAB. Assim, dentro das condições estudadas, este modelo é indicado para representar as isotermas de dessorção deste produto.

SANTINI (1996) estudou as isotermas de adsorção de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* em diversas temperaturas e mostrou que a higroscopicidade das leveduras secas diminui à medida que a temperatura de secagem aumenta. A equação de GAB se ajustou de forma satisfatória aos dados experimentais nas condições estabelecidas e os valores dos parâmetros C , k e X_m sofreram variações com a temperatura.

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, e 4.5 são apresentadas às curvas de equilíbrio para leveduras *Saccharomyces cerevisiae* com os dados obtidos de atividade de água e umidade de equilíbrio para as temperaturas estudadas.

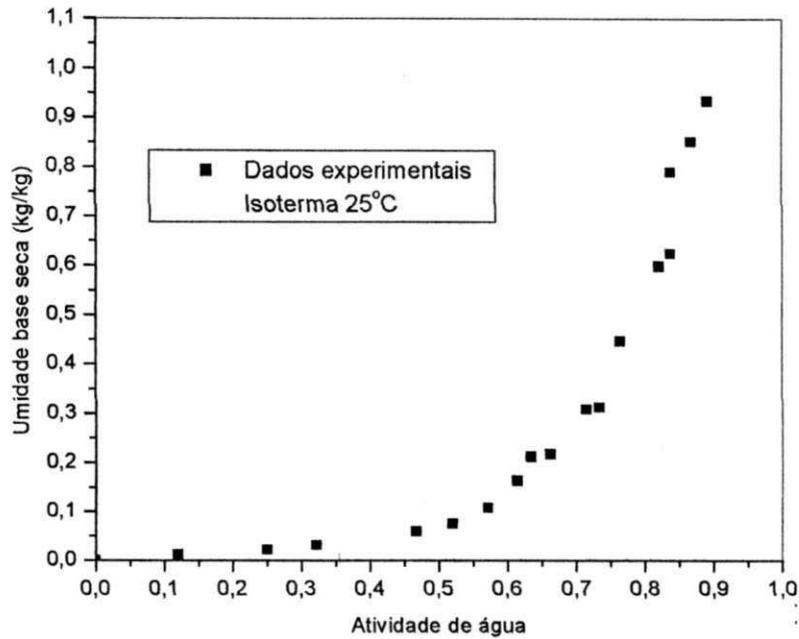


Figura 4.1. Isotermas de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para temperatura de 25 °C.

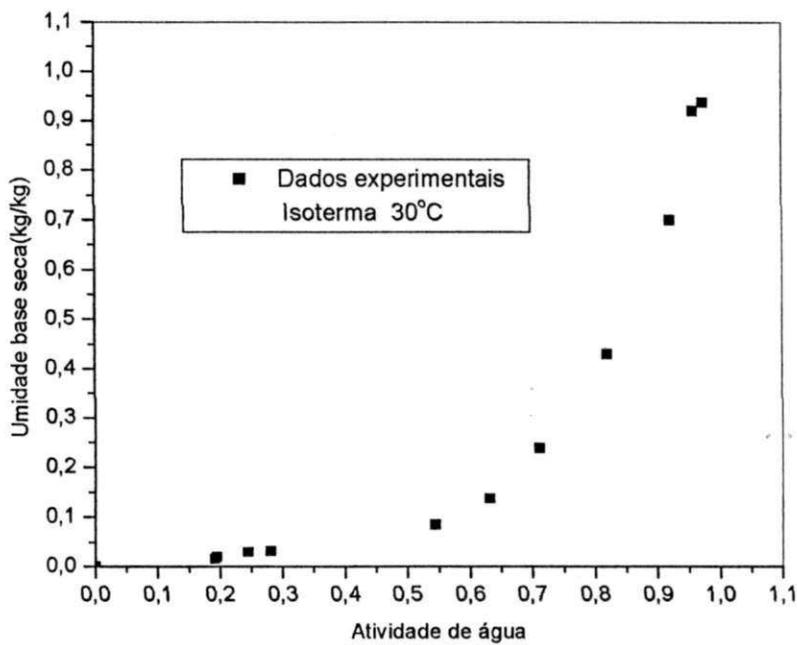


Figura 4.2. Isotermas de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para temperatura de 30 °C.

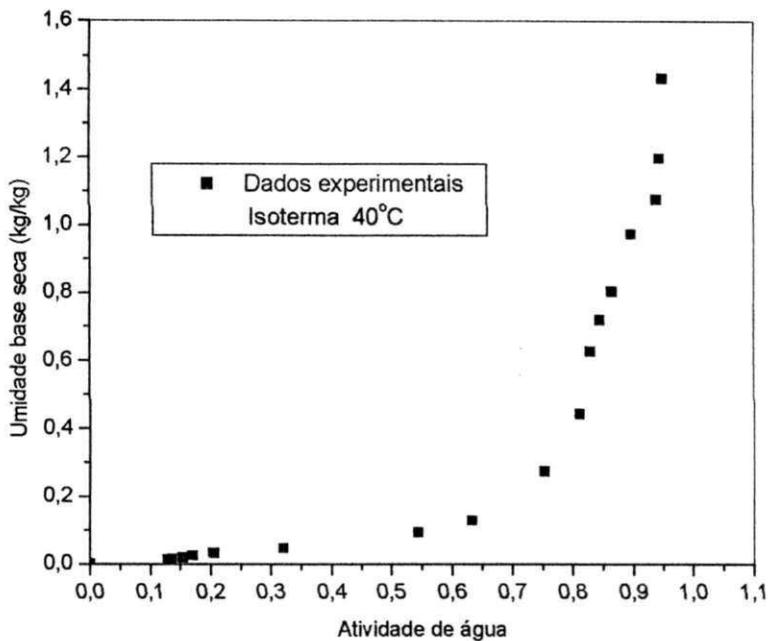


Figura 4.3. Isotermas de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para temperatura de 40 °C

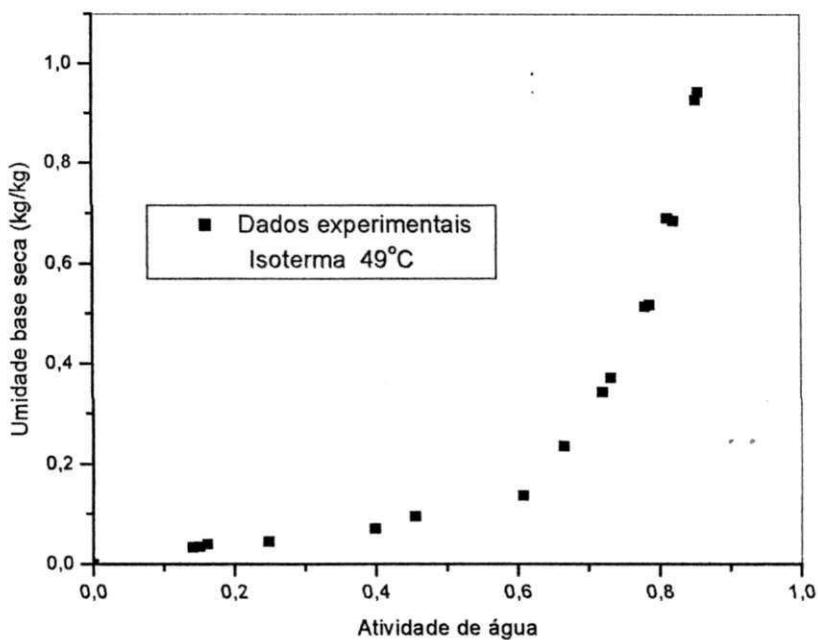


Figura 4.4. Isotermas de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para temperatura de 49 °C

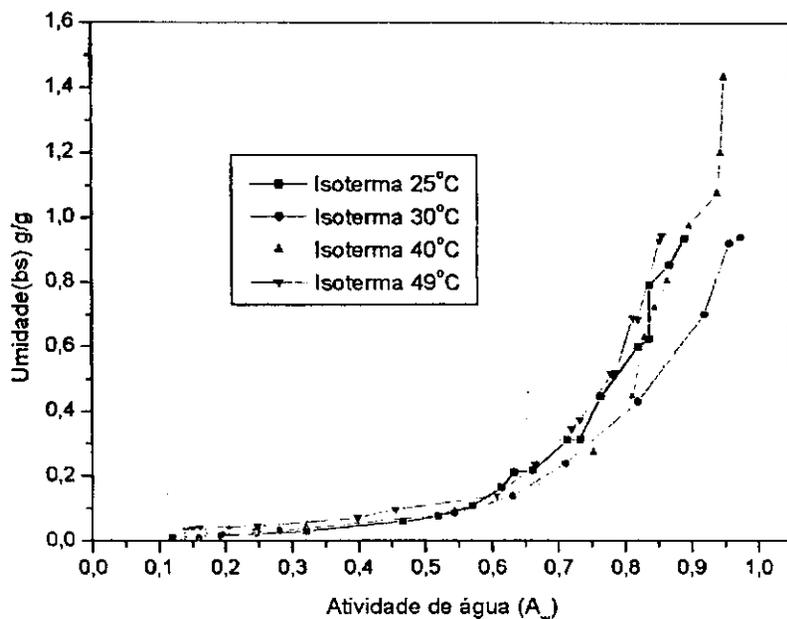


Figura 4.5. Isotermas de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para temperaturas de 25, 30, 40 e 49 °C.

Analisando as Figuras 4.1 a 4.4, nota-se que a taxa de equilíbrio de dessorção é maior no início do processo e que a mesma diminui à medida que se aproxima da umidade, ou seja, com a diminuição da taxa de equilíbrio de dessorção ocorre em função da diminuição da umidade. Nota-se na Figura 4.5 que, com o aumento da temperatura ocorre tendência a um aumento da atividade de água para a mesma umidade de equilíbrio, podendo ocorrer flutuações em alguns casos. Observando-se ainda as figuras relacionadas anteriormente, verifica-se que a umidade de equilíbrio aumenta com o aumento da atividade de água para todas as temperaturas e que há um aumento da umidade de equilíbrio para a mesma atividade de água à medida que a temperatura aumenta dentro de uma faixa de atividade de água que corresponde a valores acima de 0,80. Para atividades abaixo de 0,60 praticamente não há influência da temperatura na umidade de equilíbrio. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por CORREA & ALMEIDA (1999), KECHAOU & MAALEJ (1999) e CORREA *et al.* (2001) que concluíram em seus trabalhos para sementes de algodão herbáceo,

banana e polpa cítrica peletizada, respectivamente, que a umidade de equilíbrio aumenta quando há um aumento da atividade de água à mesma temperatura e que a mesma diminui quando a temperatura aumenta para a mesma atividade de água.

Com os resultados da atividade de água e umidade, foram calculadas as entalpias de dessorção da monocamada e multicamada a partir dos ajustes feitos pelo modelo de GAB nas temperaturas citadas anteriormente e os resultados encontram-se na Tabela 4.4. Verifica-se que a entalpia de multicamada de água é menor que do calor de condensação de água. Isto pode ser explicado por ser uma quantidade menor de energia envolvida na dessorção de água em relação a total vaporização, ou seja, a retirada de água da primeira camada requer um conteúdo menor de energia, e a entalpia de monocamada apresentou um valor bem maior que das multicamadas. Esta diferença é esperada e deve ser explicada pela razão em que estando o material com umidade relativamente baixa, a quantidade de água existente nos poros do material está ligado por fortes forças de ligação e o fenômeno da difusão controlando o processo de dessorção, desta forma é bastante lógica a necessidade de energia mais elevada para retirar a água contida na levedura.

Tabela 4.4 Entalpias de dessorção da levedura *Saccharomyces cerevisiae*

Entalpia de condensação de água	- 43,83 KJ/mol
Entalpia de monocamada de água	- 130,383 KJ/mol
Entalpia de multicamada de água	- 35,321 KJ/mol

CAPITULO V

FLUIDODINÂMICA DE LEITOS DE JORRO E FLUIDIZADO COM LEVEDURAS

Neste capítulo são mostrados os resultados das variáveis fluidodinâmicas obtidas através de métodos experimentais citados no Capítulo III para leito de jorro e leito fluidizado. Os parâmetros como queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo e velocidade de jorro mínimo para leito de jorro e velocidade mínima de fluidização para leito fluidizado, foram determinados através da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar no secador. Com base nos dados recolhidos, serão feitas as discussões referentes a cada variável determinada, estudando o efeito dos mesmos, na dinâmica do secador em leito de jorro e leito de fluidizado, durante o processo.

Para finalização da análise fluidodinâmica dos parâmetros importantes na técnica de secagem, serão testadas equações propostas para estes parâmetros, já existentes na literatura para comparar, com os resultados experimentais deste trabalho.

5.1 - Fluidodinâmica do leito de jorro

As curvas características de queda de pressão em função da velocidade do ar, obtidas através do método clássico citado por MATHUR & EPSTEIN (1974), estão ilustradas nas Figuras 5.1 a 5.10. Para o levantamento dos dados, que deram origem a estas curvas, foi mantida uma massa de 250 g com altura fixa de inerte (8 cm), variando o tempo de secagem em 0, 5, 10 e 15 minutos e a proporção levedura alimentada/inertes em 0, 2, 4 e 6 % em massa. Observando as curvas, nota-se um ponto máximo na curva de velocidade

crescente, denominada de queda de pressão máxima, em seguida um decréscimo até o valor da queda de pressão de jorro mínimo. Nas curvas as velocidades decrescentes, observa-se um leve decréscimo nos valores para queda de pressão em um determinado ponto, denominado de velocidade de jorro mínimo.

5.2 - Efeito da concentração de leveduras na fluidodinâmica do leite de jorro.

Nas Figuras 5.1 a 5.6 estão representadas as curvas de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar, mostrando a comparação das curvas características para uma altura fixa de inerte e quantidades de levedura alimentada igual a 0, 2, 4 e 6 % da massa de inertes. Na secagem de pastas e suspensões com inertes, tem sido publicado acerca da presença de polpa ou suspensões sobre a fluidodinâmica (LIMA, 1996; MORAIS, 1996). Há uma grande dificuldade experimental, devido à variação da umidade durante o levantamento das curvas características. Por este motivo foi realizado, neste trabalho, um estudo sistemático de modo a melhor avaliar o efeito de umidade sobre os parâmetros fluidodinâmicos. Pode-se observar que cada um dos grupos de curvas foram construídos para uma variação do tempo de secagem de 0, 5, 10 e 15 minutos.

Analisando essas curvas, percebe-se que a presença da levedura afeta o valor da queda de pressão máxima, já que para razão de leveduras/inertes 2, 4 e 6%, observa-se uma diminuição no valor da queda de pressão máxima, em relação ao leite apenas com inertes. Por outro lado, as curvas para as diferentes proporções de leveduras apresentadas são quase coincidentes mostrando que apesar da presença de levedura afetar o comportamento do leite, não há grande influência de concentração presente sobre as curvas características para as razões utilizadas, ou nas condições de trabalho.

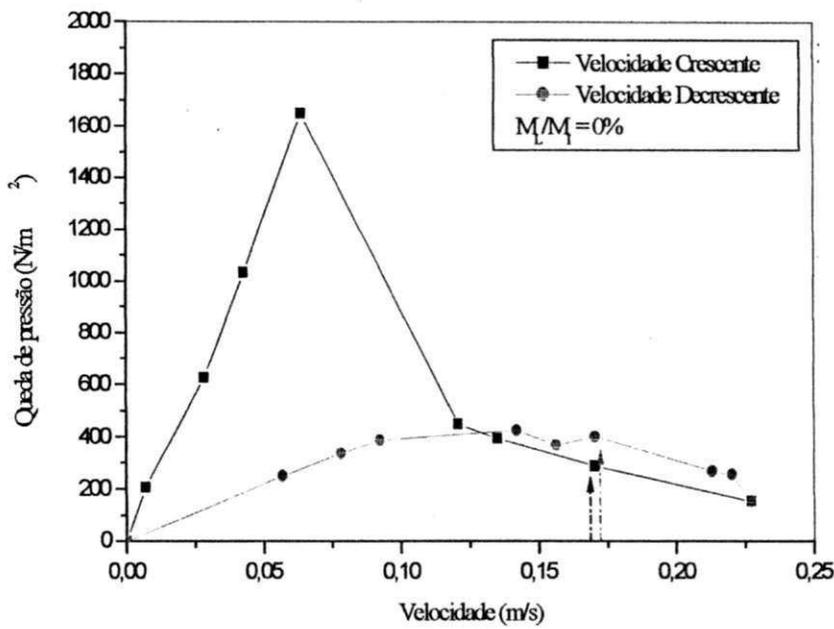


Figura 5.1 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade $M_L/M_I = 0\%$

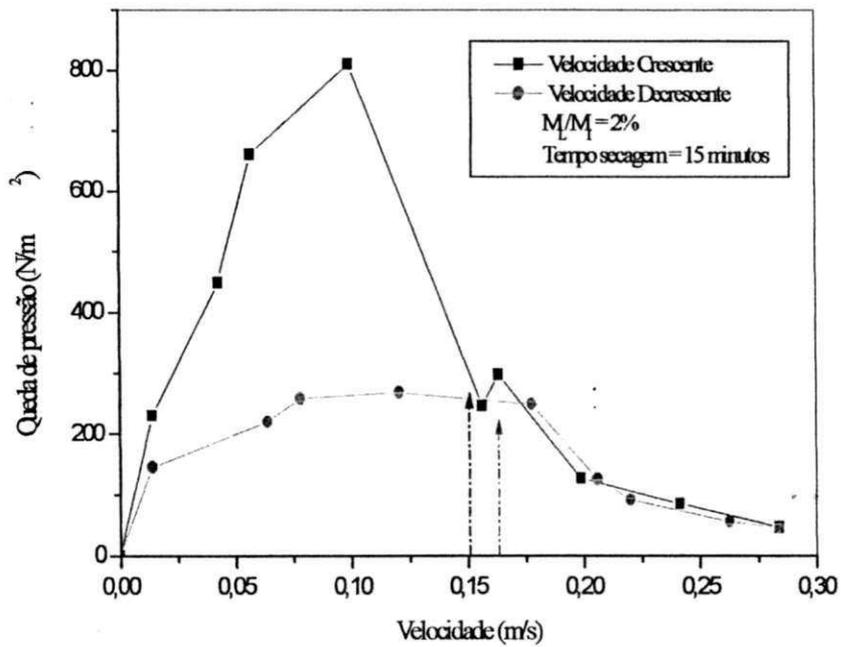


Figura 5.2- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade. $M_L/M_I = 2\%$; Tempo de secagem = 15 min

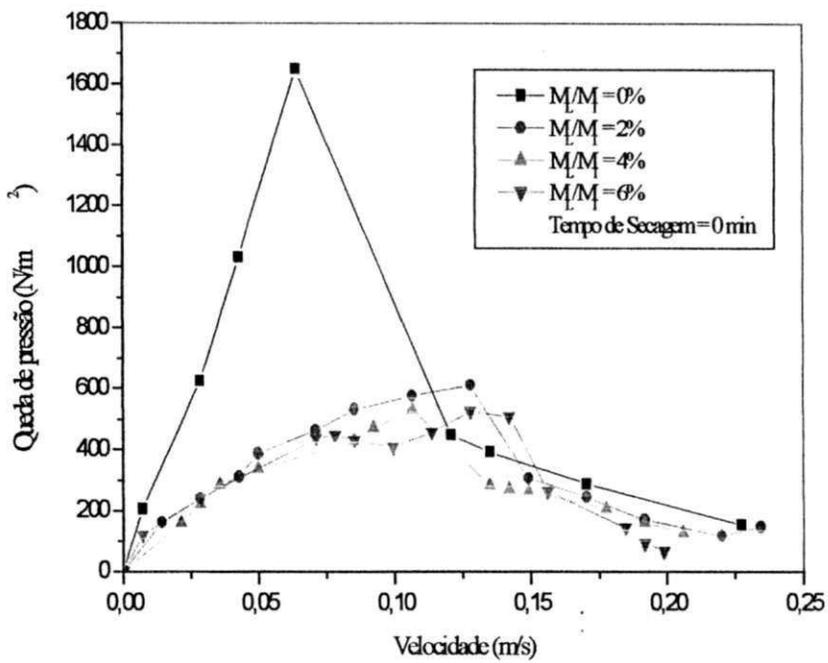


Figura 5.3 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem: 0 min

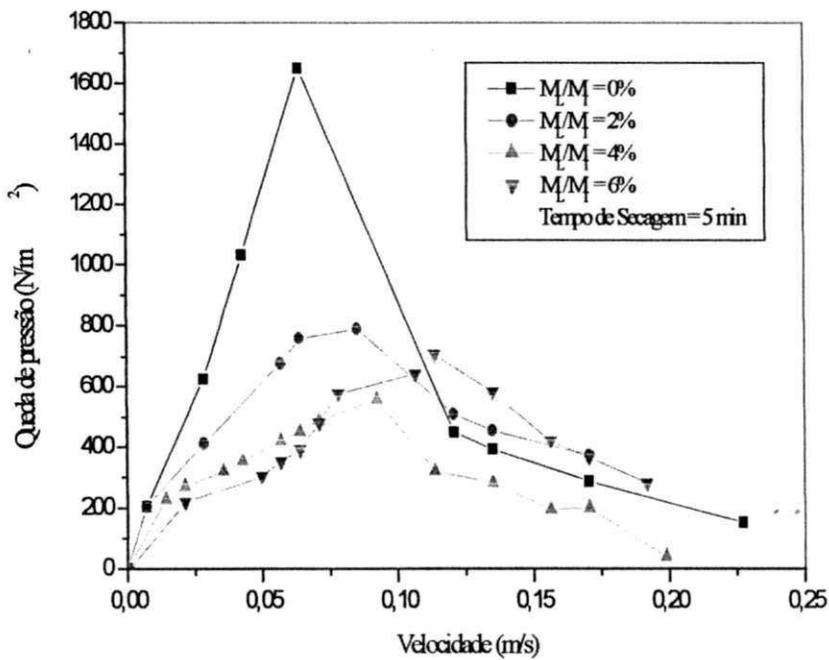


Figura 5.4 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem: 5 min.

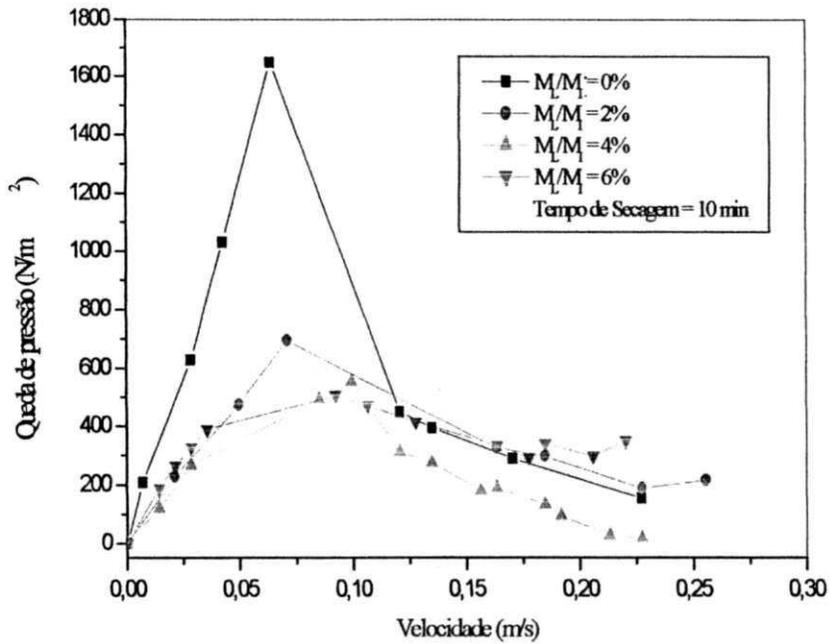


Figura 5.5 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem: 10 min.

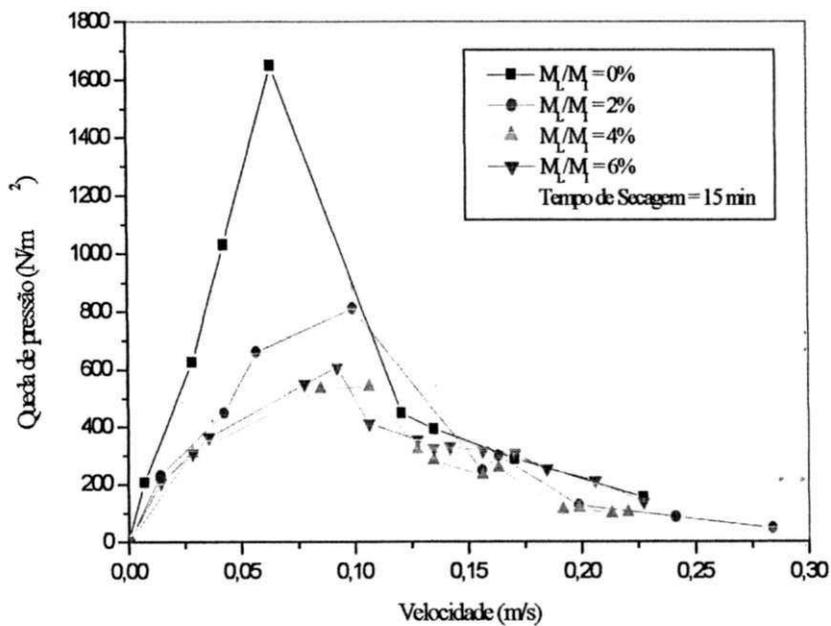


Figura 5.6- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar. Tempo de secagem: 15 min

Para as curvas de queda de pressão em função da velocidade decrescente, mostradas nas Figuras 5.7 a 5.10, verifica-se que a presença de levedura provoca uma diminuição para os valores da queda de pressão máxima. Através da Tabela 5.1 pode-se observar que os dados de queda de pressão de jorro mínimo diminuíram com a elevação da quantidade de levedura alimentada, com algumas exceções. Já para velocidade de jorro mínimo, os valores são praticamente coincidentes à medida que os valores de M_L/M_i aumentaram.

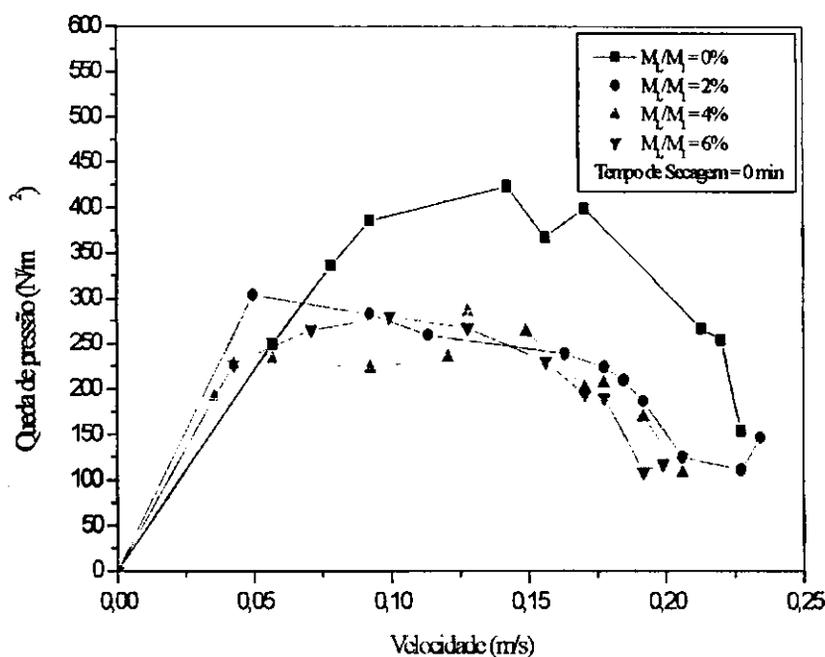


Figura 5.7 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem: 0 min.

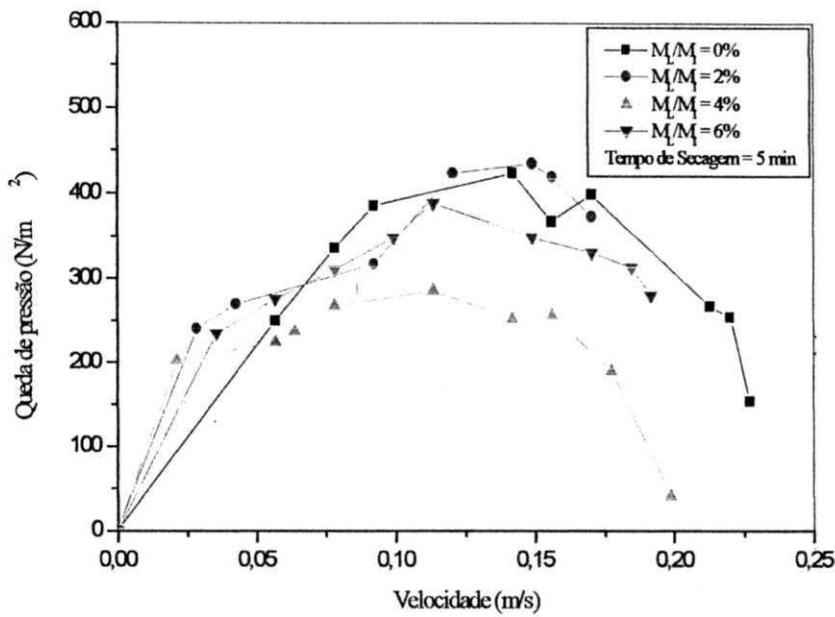


Figura 5.8 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem: 5 min.

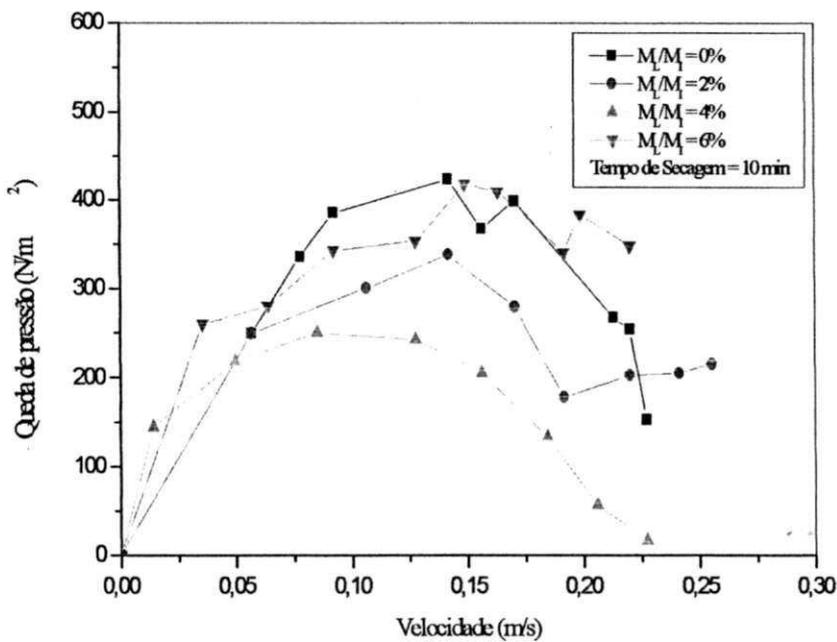


Figura 5.9 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem: 10min

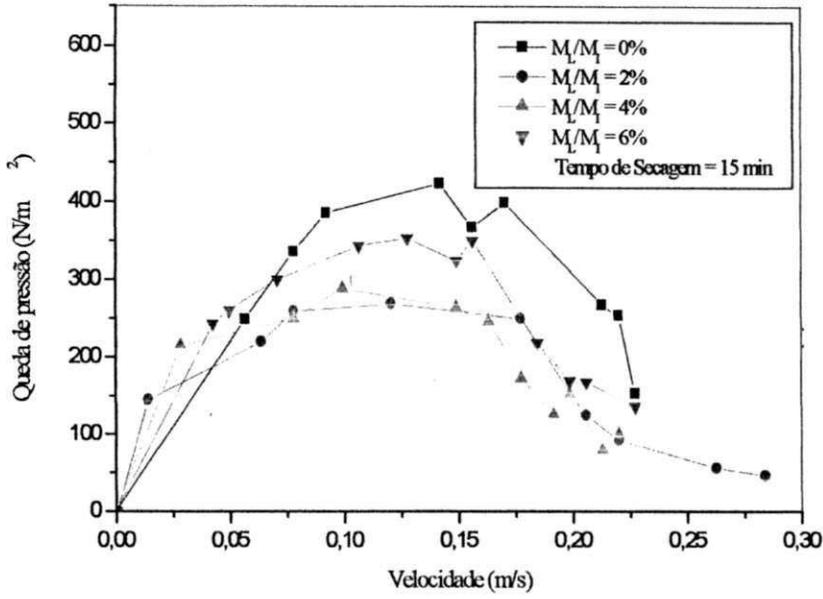


Figura 5.10 - Curva característica de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar. Tempo de secagem: 15 min.

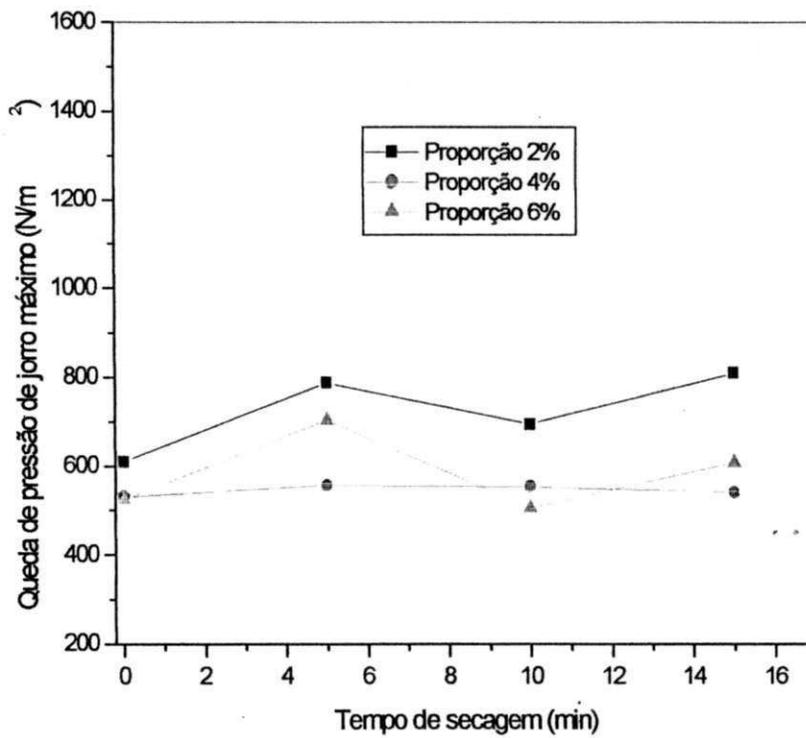


Figura 5.11- Influência do tempo de secagem na queda de pressão de jorro máximo

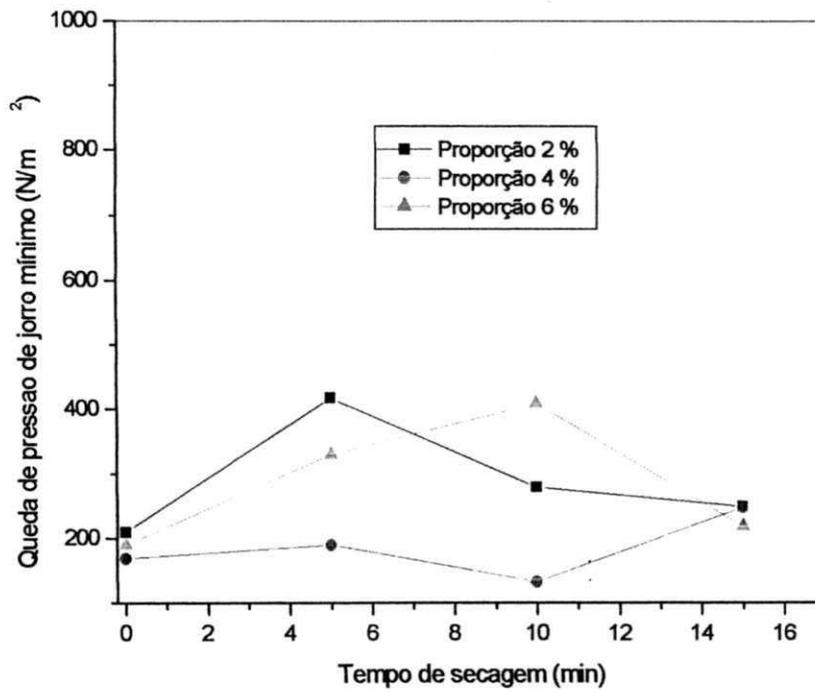


Figura 5.12- Influência do tempo de secagem na queda de pressão de jorro mínimo

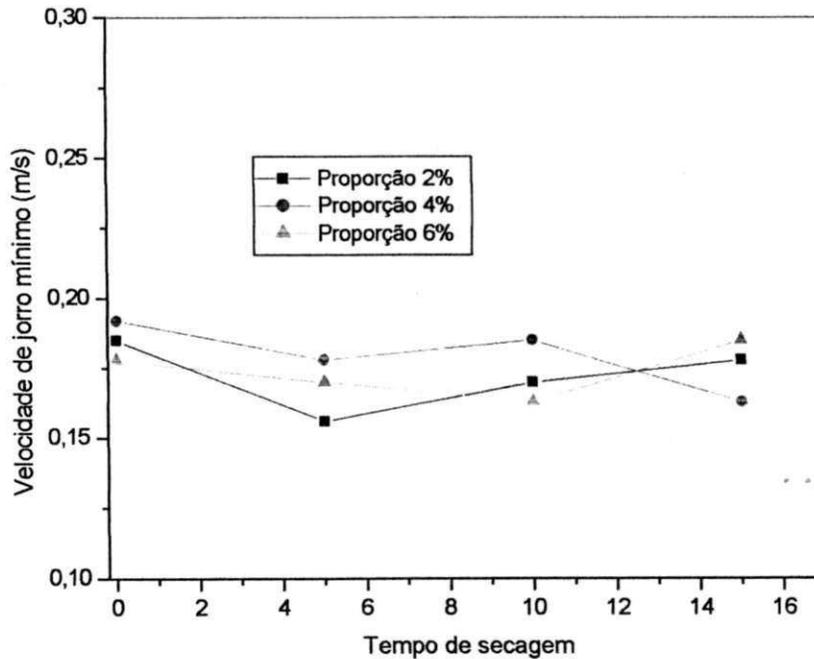


Figura 5.13 - Influência do tempo de secagem na velocidade de jorro mínimo

leito constituído por leveduras e partículas de poliestireno. Em relação a queda de pressão máxima, a correlação de SAMPAIO *et al.* (1984) mostrou-se satisfatória para o estudo no sistema massa de leveduras/inertes 4 e 6% em tempo de secagem 0, 5 10 e 15 minutos de secagem, exceto na condição massa levedura/inertes 6% em 5 minutos de secagem. No tocante a queda de pressão de jorro mínimo, os valores encontrados nas correlações citadas estão próximos nas condições de 4 e 6% em tempo de secagem 0, 4% em cinco minutos de secagem. Finalmente, na velocidade de jorro mínimo, a correlação de ABDELRAZEK (1969) mostrou-se boa aproximação em praticamente todas as condições estudadas.

Tabela 5.2 – Queda de pressão máxima determinada por correlações ($N.m^{-2}$)

Autor	Número	ΔP_M
THORLEY <i>et al.</i> (1959)	23	284,5
GRBAVCIC <i>et al.</i> (1976)	24	341,4
SAMPAIO <i>et al.</i> (1984)	25	561,4
OGINO <i>et al.</i> (1993)	26	118,8

Tabela 5.3 – Queda de pressão de jorro mínimo determinado por correlações ($N.m^{-2}$)

Autor	Número	ΔP_{JM}
MALEK <i>et al.</i> (1955)	27	196,3
NASCIMENTO <i>et al.</i> (1976)	28	190,6

Tabela 5.4 – Velocidade de jorro mínimo determinado por correlações ($m.s^{-1}$)

Autor	Número	U_{JM}
MATHUR & GISHLER (1955)	29	0,59
ABDELRAZEK (1969)	30	0,195
BRUNELLO <i>et al.</i> (1974)	31	0,0014

Percebe-se que a presença da levedura afeta o valor da queda de pressão máxima, já que para razão de levedura/inertes 2, 4 e 6%, observa-se uma diminuição no valor da queda de pressão máxima, em relação a situação apenas com as partículas inertes. Fato que estaria relacionado a uma melhor circulação de sólidos, o que teria facilitado o escoamento do gás diminuindo a resistência ao escoamento havendo assim, uma menor perda de carga. Este comportamento é diferente do observado com polpas de frutas, onde a adição de polpa era acompanhada por instabilidades na fonte associadas à queda de pressão.

5.3 - Fluidodinâmica do leito fluidizado

As curvas características de queda de pressão para um leito fluidizado determinadas pelo método à velocidade crescente são ilustrados nas Figuras 5.14 a 5.19. O estudo das variáveis fluidodinâmicas em leito fluidizado, principalmente a velocidade mínima de fluidização, tornou-se essencial nesta parte do trabalho, pois através destes resultados foi possível definir os níveis de velocidade para o estudo da secagem de leveduras neste tipo de secador.

5.4 Efeito da concentração de leveduras na fluidodinâmica do leito fluidizado

As curvas características referem-se às medidas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar no secador. Para o levantamento dos dados, que deram origem a estas curvas, foi mantida uma altura fixa de inerte (6 cm), totalizando uma massa de 250 g, partindo-se da região cilíndrica do secador, variando a proporção de leveduras alimentada em 0, 2, 4, 6, 10 e 15% da massa de inertes conforme metodologia descrita. Inicialmente foi obtida a curva característica do leito formado apenas por partículas inertes, mostrado na

Figura 5.14, obtendo uma velocidade mínima de fluidização de 0,229 m/s para queda de pressão de 260 Pa. Empregando-se a mesma metodologia, acompanharam-se as mudanças no comportamento fluidodinâmico do leito devido à presença de leveduras.

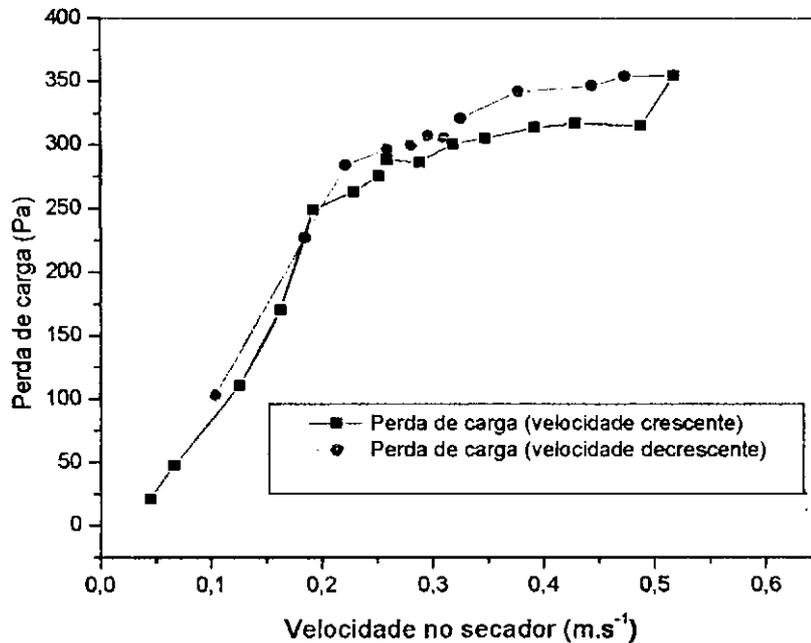


Figura 5.14 – Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_I = 0\%$

Conforme mostrado na Figura 5.15, para uma proporção de leveduras igual a 2% da massa de inertes, tem-se uma queda de pressão em início de fluidização em torno de 280 Pa e velocidade mínima de fluidização observada neste experimento de 0,237 m/s. Para velocidade maiores que a citada, a fluidização verifica-se num intervalo da perda de carga entre 280 e 330 Pa conforme mostra a Tabela 5.5.

Para as proporções de leveduras de 4, 6, 10 e 15 % da massa de inertes, o mesmo comportamento foi observado percebendo-se entretanto, diferentes intervalos de pressão. Isto leva a concluir que durante a fluidização, o leito apresentou uma dinâmica em que ocorreram flutuações nas perdas de carga, sem modificações na forma da fluidização.

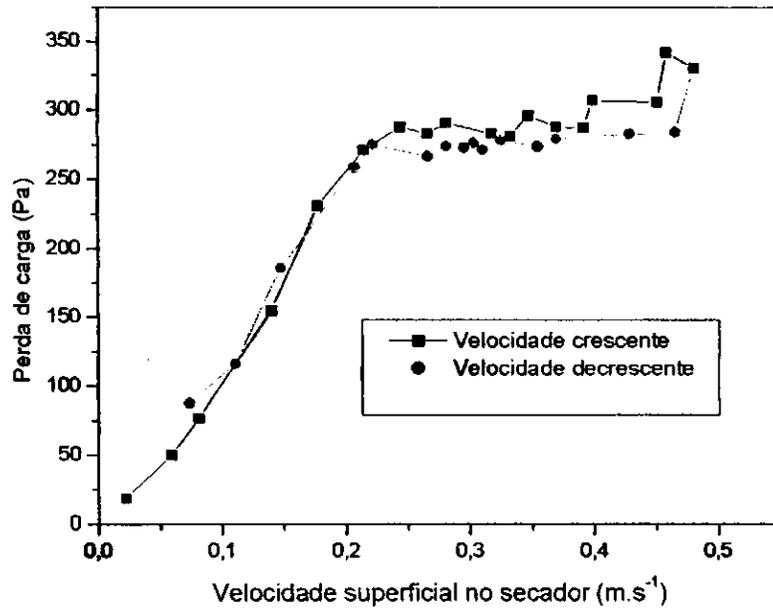


Figura 5.15 – Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_I = 2\%$

As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram os comportamentos das curvas características referentes às proporções leveduras/inertes 4 e 6%. Estas curvas apresentam comportamentos que se assemelham a proporção de 2%, mostrando algumas mudanças nas velocidades mínimas de fluidização e em intervalos de queda de pressão durante a fluidização conforme mostrado na Tabela 5.5. Em relação a porosidade de leito fixo observou-se flutuações com aumento na quantidade de leveduras utilizadas e no leito em início de fluidização ocorreu oscilações. Em relação a proporção de 15% a porosidade ficou acima das demais, isto pode ser explicado porque não houve uma mistura das leveduras com os inertes, caracterizando um sistema como de duas fases e deixando o leito mais poroso.

Tabela 5.5 – Parâmetros fluidodinâmicos em leito fluidizado

ϵ_{fixo}	ϵ_{mf}	M_L/M_I (%)	U_{mf} $m.s^{-1}$	ΔP_{mf} (Pa)	Intervalo de ΔP (Pa)
0,425	0,52	0	0,229	260	260-350
0,414	0,51	2	0,237	280	280-330
0,450	0,50	4	0,237	275	250-285
0,391	0,53	6	0,222	270	250-275
0,426	0,47	10	0,237	280	280-300
0,450	0,64	15	0,244	330	310-360

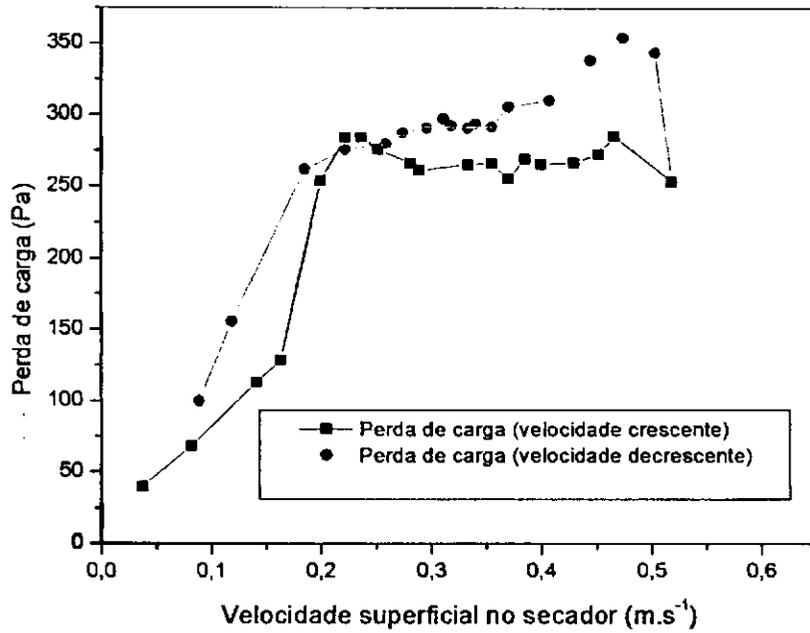


Figura 5.16 – Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_I = 4\%$

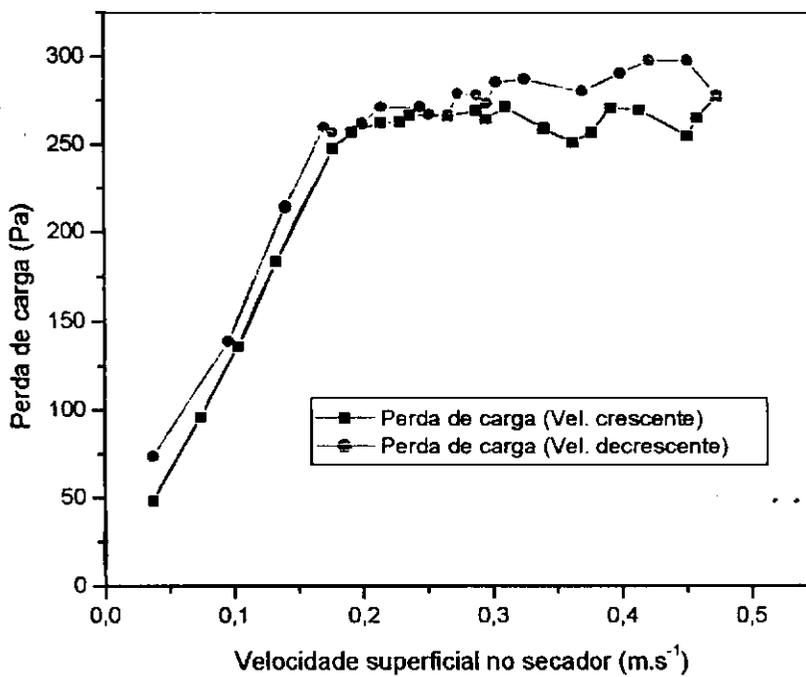


Figura 5.17 – Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_I = 6\%$

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram o comportamento na queda de pressão em função da velocidade do ar para uma proporção de leveduras igual a 10 e 15 % da massa de inertes, com velocidades mínima de fluidização de 0,237 e 0,244 m/s, respectivamente, para queda de pressão máxima de 300 e 330 Pa.

Estes resultados mostram diferenças na queda de pressão quando da adição de leveduras aos inertes, enquanto as velocidades mínima de fluidização apresentam variações menores do que 7 % em relação ao leito com inertes.

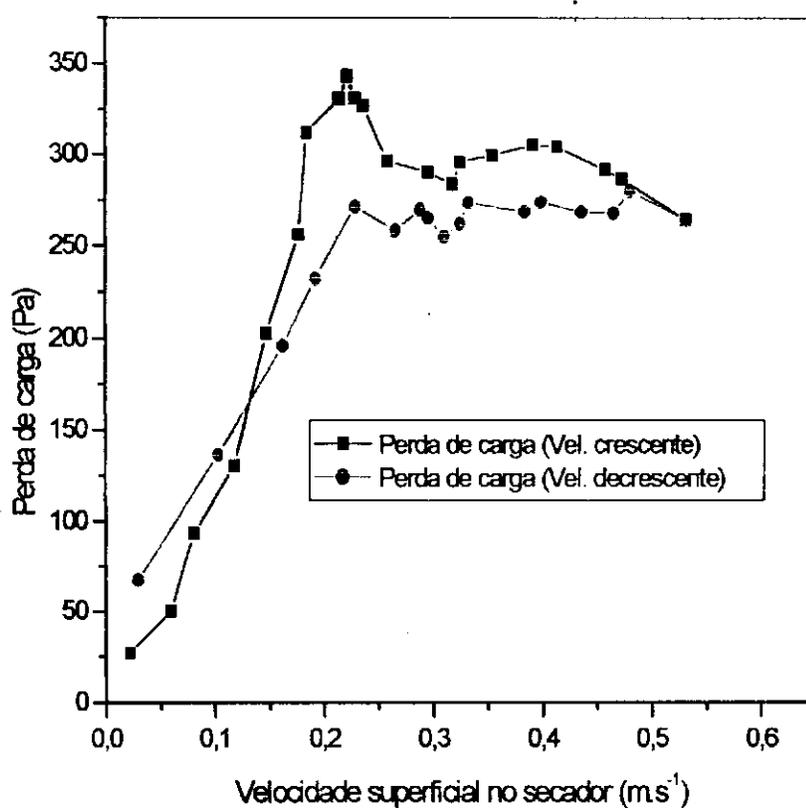


Figura 5.18 –Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_I = 10\%$

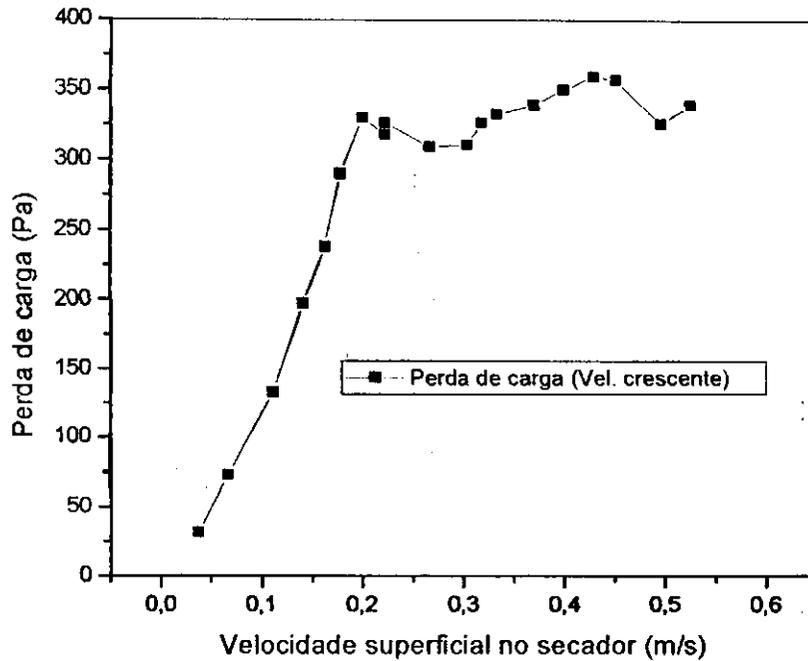


Figura 5.19 – Curva característica de queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado para $M_L/M_i = 15\%$

Um grande número de correlações tem sido propostas para determinar a velocidade mínima de fluidização U_{mf} . Os resultados da Tabela 2.7 mostram algumas correlações utilizadas no trabalho. A velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) foi estimada a partir das curvas experimentais, aproximando um comportamento linear aos pontos iniciais e finais do processo e determinando a interseção das duas retas, de acordo com o método clássico proposto por RICHARDSON e citado por MURACHARM (1990).

Em relação à velocidade mínima de fluidização para o leito formado apenas de inertes, foram aplicadas correlações empíricas para comparar com os resultados experimentais. As correlações de BABU *et al.* (1978) e SAXENA *et al.* (1977) descritas na Tabela 2.10 apresentaram valores de 1,3 e 1,2 m/s que comparados aos valores experimentais, não apresentaram resultados satisfatórios.

5.5 - Comparação nas fluidodinâmicas dos leitos de jorro e fluidizado

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram os resultados dos parâmetros fluidodinâmicos obtidos na fluidodinâmica do leito de jorro e leito fluidizado, destacando para o leito de jorro, a perda de carga de jorro mínimo e velocidade mínima de jorro, e para leito fluidizado, a perda de carga em início de fluidização e velocidade mínima de fluidização. As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 mostram a influência da adição das leveduras sobre estes parâmetros, procurando relacionar as perdas de carga nos leitos de jorro e fluidizado, a velocidade de jorro mínimo e velocidade mínima de fluidização com as proporções leveduras/inertes. Procurou-se analisar a influência destes fatores a fim de comparar a fluidodinâmica dos dois tipos de secadores.

Tabela 5.6 - Parâmetros fluidodinâmicos em leito de jorro em função da proporção M_L/M_i : Tempo de secagem 0 min.

M_L/M_i (%)	ΔP_{jm} ($N.m^{-2}$)	U_{jm} ($m.s^{-1}$)
0	399,107	0,170
2	210,400	0,185
4	169,287	0,192
6	190,003	0,178

Tabela 5.7 - Parâmetros fluidodinâmicos em leito fluidizado em função da proporção M_L/M_i

M_L/M_i (%)	ΔP_{mf} ($N.m^{-2}$)	U_{mf} ($m.s^{-1}$)
0	260	0,229
2	280	0,237
4	275	0,237
6	270	0,222
10	280	0,237
15	330	0,244

A Figura 5.20 apresenta a relação da perda de carga com a proporção massa de levedura/inertes. Estes resultados mostraram para o leito de jorro uma diminuição na perda de carga com o aumento da proporção leveduras/inertes até 4%, enquanto que, para o leito fluidizado, os valores decrescem de 2 a 6%, seguida de aumento até a proporção de 15%. Comparando estes resultados percebe-se que, apenas com inertes, a perda de carga é menor em leito fluidizado. Quando na presença de leveduras, para a faixa estudada, registra-se perda de carga, em início de fluidização, no leito fluidizado maior que no leito de jorro, mesmo concluindo que a presença das leveduras no leito de jorro tem um comportamento "lubrificante", isto é justificado pela diminuição da perda de carga. No caso do leito fluidizado, este comportamento é inverso, acredita-se que, pela geometria do sistema experimental, a perda de carga existente na região cônica, que apresenta característica de leito fixo, terá efeito na perda de carga do leito fluidizado.

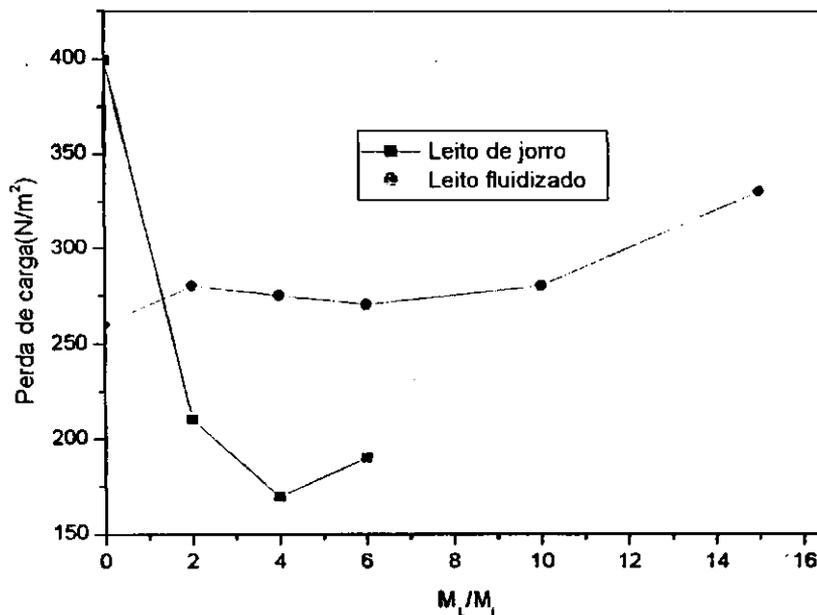


Figura 5.20 – Correlação entre a perda de carga e a proporção M_L/M_i

A Figura 5.21 apresenta a variação nas velocidades de jorro mínimo e de mínima fluidização com a proporção levedura/inertes. Estes resultados indicaram que para igual proporção leveduras/inertes, a velocidade mínima de

fluidização é maior do que a velocidade de jorro mínimo para a faixa de condições estudada. Acredita-se que este comportamento tende a manter-se para outras proporções, isto leva a concluir que este comportamento está associado a uma maior perda de carga registrada no leito fluidizado.

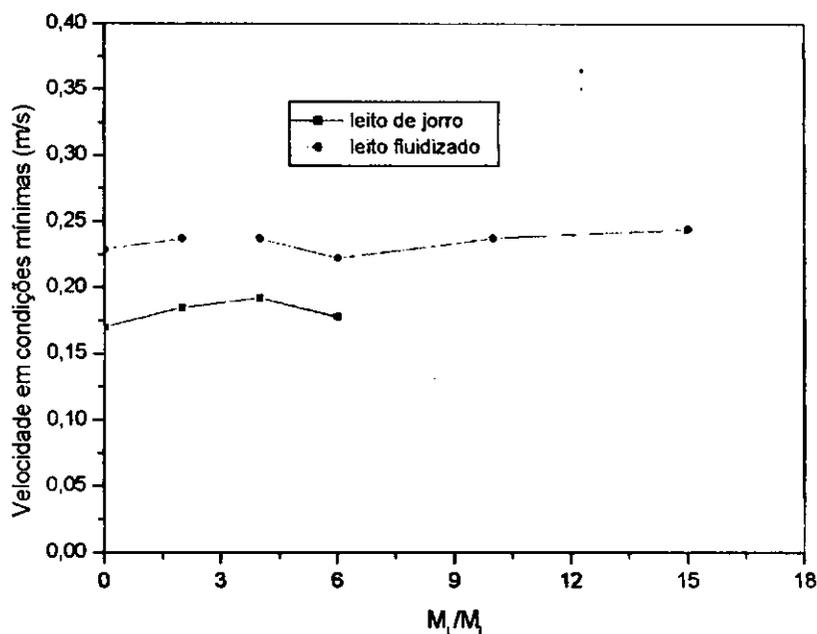


Figura 5.21 – Correlação entre a velocidade em condições mínimas e a proporção M_L/M_i

A Figura 5.22 mostra a influência da perda de carga com a velocidade em condições mínimas para proporção M_L/M_i 0 a 6% no tempo de secagem de 0 min no leito de jorro e proporção de 0 a 15% no leito fluidizado. Os resultados para o leito de jorro apresentam uma tendência decrescente da velocidade mínima de jorro com aumento na perda de carga. No caso do leito fluidizado, observa-se comportamento inverso, ou seja, tendência a aumento da velocidade mínima de fluidização, com aumento na perda de carga.

Os comportamentos mostrados nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 influenciaram nos parâmetros estudados. Estes resultados estão associados à geometria do leito, mesmo trabalhando com igual massa de inertes nas geometrias dos leitos de jorro e fluidizado, a modificação feita na coluna de leito de jorro para leito fluidizado, isolando a região cônica e adicionando

polipropileno em toda região cônica, com a finalidade de auxiliar a distribuição do ar na coluna. Fazendo analogia, verifica-se tendência de maior perda de carga em leito fluidizado. Enquanto que, velocidades em condições mínimas, velocidade de jorro mínimo e velocidade mínima de fluidização, são maiores no leito fluidizado.

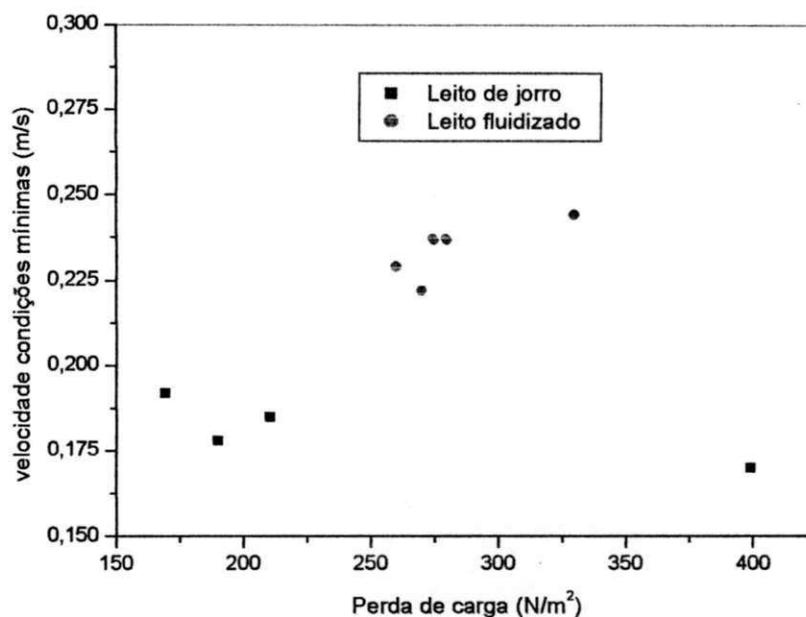


Figura 5.22- Correlação entre a perda de carga e a velocidade em condições mínimas.

CAPÍTULO VI

DESEMPENHO DOS SECADORES

Os ensaios foram realizados em condições estabelecidas num planejamento experimental fatorial conforme metodologia proposta, condições estas, que foram obtidas no estudo da fluidodinâmica do leito de jorro e leito fluidizado, discutida no Capítulo V. Foram estabelecidas para cada ensaio cinco alimentações em intervalos de 20 minutos, totalizando 100 minutos de secagem. Os resultados foram quantificados em termos do produto obtido, onde foram analisadas as umidades médias do pó coletado, teor de proteínas determinado pela dosagem do nitrogênio, acompanhamento da massa coletada de pó e as condições do ar na saída do secador. Para estas determinações foram acompanhadas a evolução das variáveis como umidade relativa na saída do secador e temperaturas na entrada e saída.

Aqui discute-se a evolução da taxa de evaporação de água com o tempo, eficiência energética de secagem, cinética de produção e qualidade do produto obtido. Faz-se necessária uma análise em todos os experimentos devido às diferenças entre as condições estabelecidas.

6.1 – Taxas de evaporação de água

6.1.1- Leito de jorro

As Figuras 6.1 a 6.3 mostram comportamentos típicos dos valores instantâneos das taxas de evaporação. Pelas figuras pode-se constatar a presença de um pico correspondente à elevada taxa de evaporação no início de

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

cada alimentação, seguido de queda com flutuações que acompanham o caráter caótico do movimento e distribuição de finos no leito de jorro. Os outros experimentos realizados apresentaram comportamentos semelhantes e os resultados se encontram no apêndice I. Analisando os aspectos gerais, pode-se distinguir nos três casos apresentados, uma tendência crescente nas sucessivas alimentações da Figura 6.1, a presença de um mínimo na Figura 6.2 e de um máximo na Figura 6.3. Estas diferenças de comportamentos parecem estar associadas às variáveis M_L/M_i e velocidades do ar. Para avaliar melhor essas tendências, nas Figuras 6.4 e 6.5 são apresentados os valores médios para cada alimentação, descontado o primeiro ponto (pico da taxa de alimentação) que estão representados também nas Figuras 6.6 e 6.7. Resultados semelhantes foram observados nos demais ensaios e encontram-se no Apêndice I.

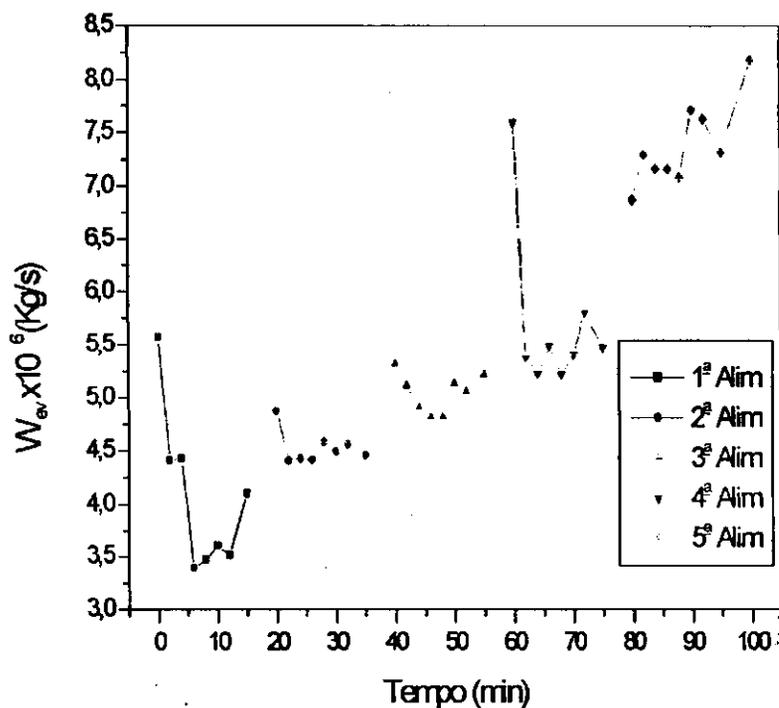


Figura 6.1 - Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 6,0\%$ e velocidade $0,227$ m/s

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

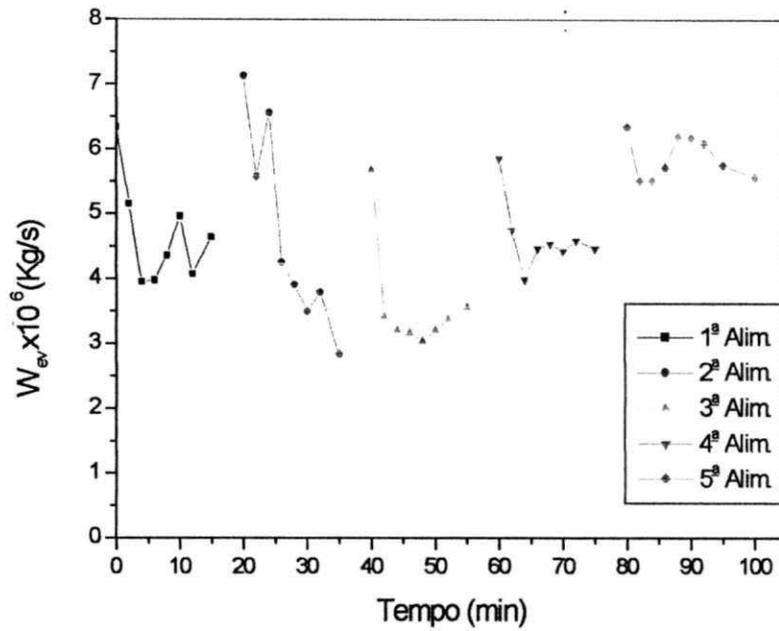


Figura 6.2 - Taxa de evaporação de água : $M_L/M_i = 4,0\%$ e velocidade $0,213 \text{ m/s}$.

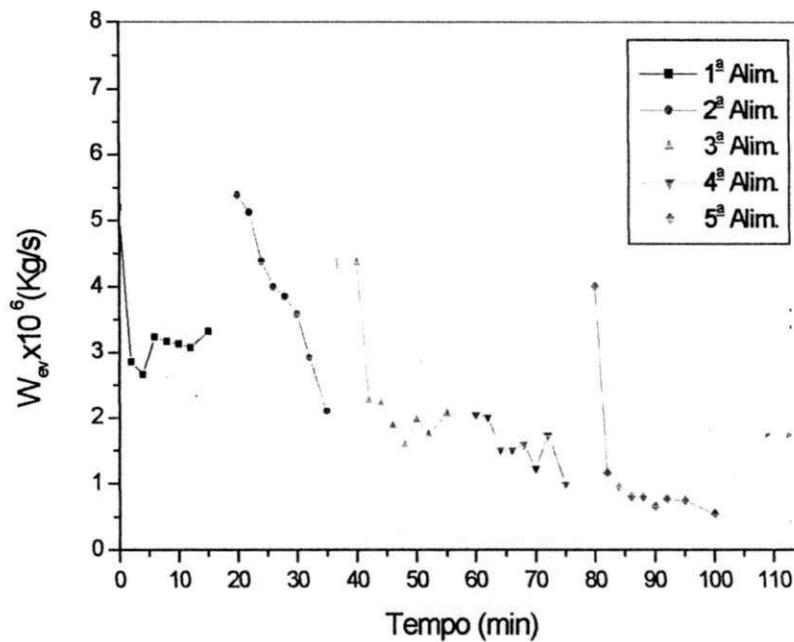


Figura 6.3 - Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 4,0\%$ e velocidade $0,213 \text{ m/s}$.

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

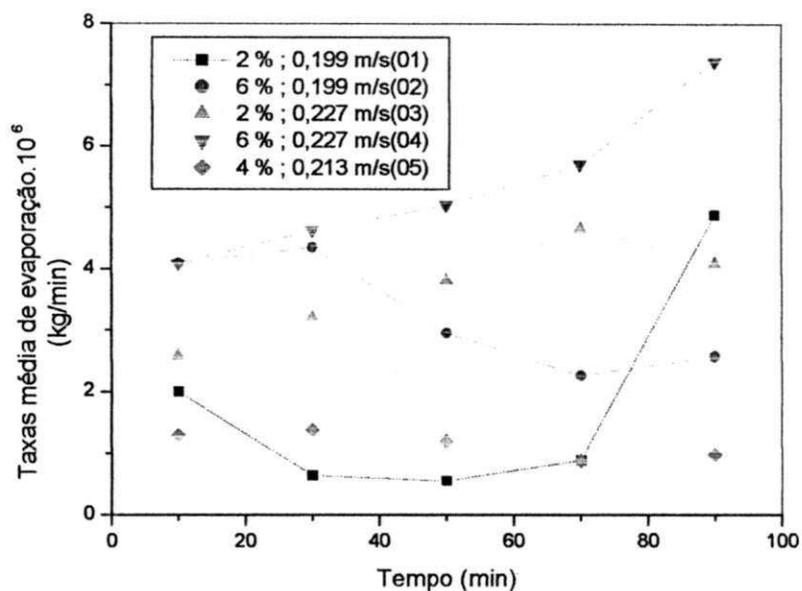


Figura 6.4 - Taxas médias de evaporação de água: exp: 1, 2, 3, 4, 5

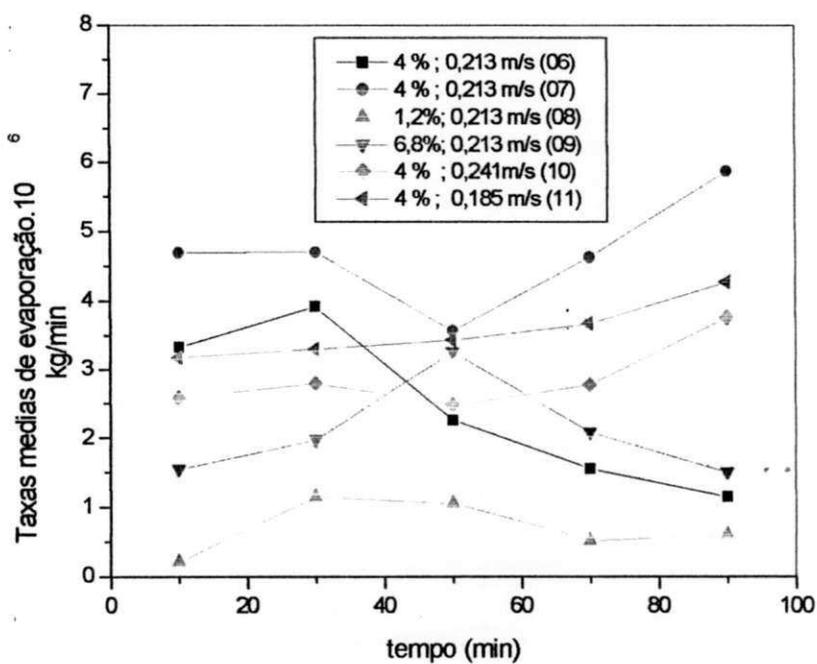


Figura 6.5 - Taxas médias de evaporação de água: exp: 6, 7, 8, 9, 10, 11

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

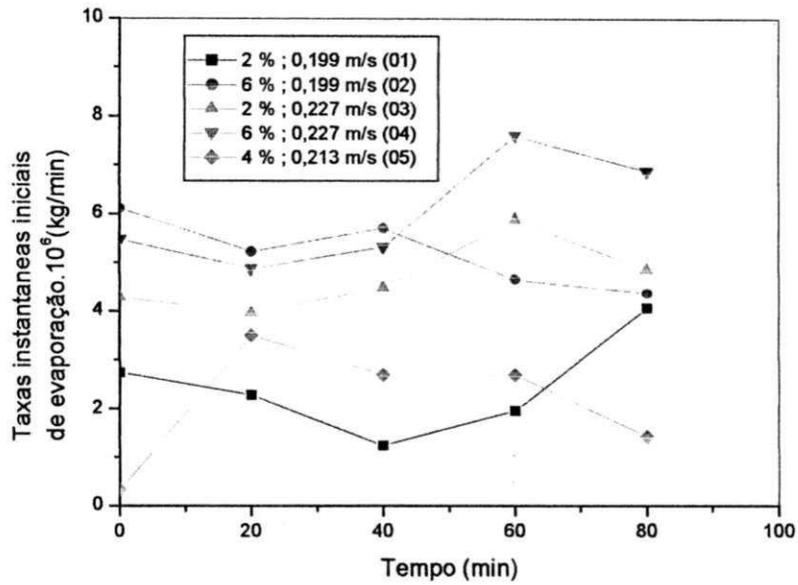


Figura 6.6 - Taxas iniciais instantâneas de evaporação de água: exp: 1, 2, 3, 4, 5

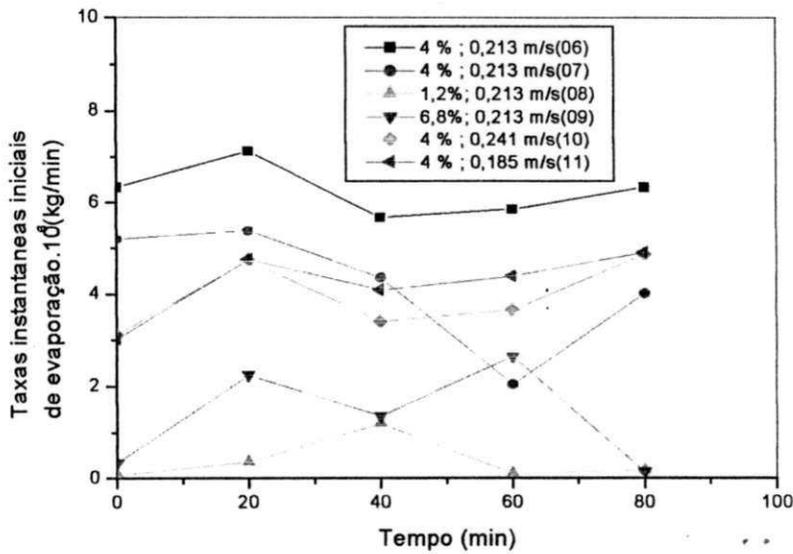


Figura 6.7 - Taxas iniciais instantâneas de evaporação de água: exp: 6, 7, 8, 9, 10, 11

Fica evidente nas análises das Figuras 6.4 a 6.7 em relação as taxas médias de evaporação de água e as taxas iniciais instantâneas de evaporação

que há comportamentos distintos entre os experimentos. Observou-se nos ensaios 1 e 2 onde a velocidade do ar foi de 0,199 m/s que na proporção de leveduras/inertes de 6%, há tendência de aumento passando por um máximo no início, seguido de diminuição, enquanto para proporção de 2%, as taxas de evaporação diminuem para um mínimo, seguida de aumentos. Para velocidade de 0,227 m/s, que está representada nos experimentos 3 e 4, observou-se que na proporção de 6% um comportamento crescente e a 2% os pontos seguem tendência a aumento, passando por um máximo, depois começou a diminuir. Quanto a velocidade de 0,213 m/s, as taxas de evaporação são mais elevadas quando aumenta a proporção leveduras/inertes atingindo um máximo e com 1,2% de leveduras, observou-se aumento gradativo, passando a atingir um ponto máximo.

Dos resultados encontrados e pelas observações experimentais sugere-se que é necessário encontrar a forma de alimentação das leveduras no secador em leito de jorro para que possa distribuir uniformemente o produto. Isto pode ter provocado estas flutuações. Como uma das características observadas no leito de jorro é que há um escoamento preferencial do ar na região do jorro, enquanto na região anular, há predominância de um escoamento de movimento descendente das partículas inertes e influenciando no movimento das leveduras, como se verificou que em determinados instantes as leveduras formavam um aglomerado juntamente com os inertes e concentrava-se nas paredes da coluna, impedindo sua circulação, por isto, em determinados instantes, há uma diminuição na taxa de evaporação e quando este comportamento deixa de existir, tem-se uma melhora na circulação do material, fazendo com que as taxas apresentem valores mais elevados. ROCHA (2002) mostrou que na grande maioria dos experimentos realizados, a eficiência de produção mantém-se praticamente constante a partir da segunda alimentação, com isso as irregularidades nestas taxas devem ser relacionadas a forma como as leveduras são alimentadas e distribuídas no secador, fazendo com que seja difícil estabelecer uma alimentação uniforme em todas as alimentações.

Esperava-se um comportamento nas taxas de evaporação que indicasse uma taxa próximo de zero, para propor uma redução no intervalo das alimentações, como isto não foi possível, os resultados da cinética de produção poderiam apresentar tal justificativa. Estes resultados são importantes do ponto de vista operacional, porque permitem escolher melhor as condições do processo e especialmente definir o número de alimentações que otimizam a taxa de evaporação global no regime intermitente.

6.1.2 - Leito fluidizado

Nas Figuras 6.8 a 6.10 estão sendo mostradas as evoluções observadas nas taxas de evaporação medidas instantaneamente no secador de leito fluidizado. Pelas Figuras pode-se observar a presença de um pico que equivale a taxas de evaporação máximas no tempo inicial de cada alimentação, seguido de decréscimos com flutuações que acompanharam um comportamento desordenado do movimento e distribuição de finos no leito. Os outros experimentos que foram realizados apresentaram dinâmicas semelhantes e encontram-se no Apêndice I. Estudando os aspectos gerais, pode-se diferenciar que nos casos apresentados, uma tendência crescente nas seqüências das alimentações representada pela Figura 6.8, a existência de uma taxa de evaporação mínima na Figura 6.9 e de taxa máxima na Figura 6.10. Estas diferenças de comportamentos devem ser influenciadas pelas variáveis de entrada, velocidades do ar e M_L/M_I . Para avaliar melhor essas tendências, nas Figuras 6.11 e 6.12 representamos os valores médios para cada alimentação, descontando o primeiro ponto.

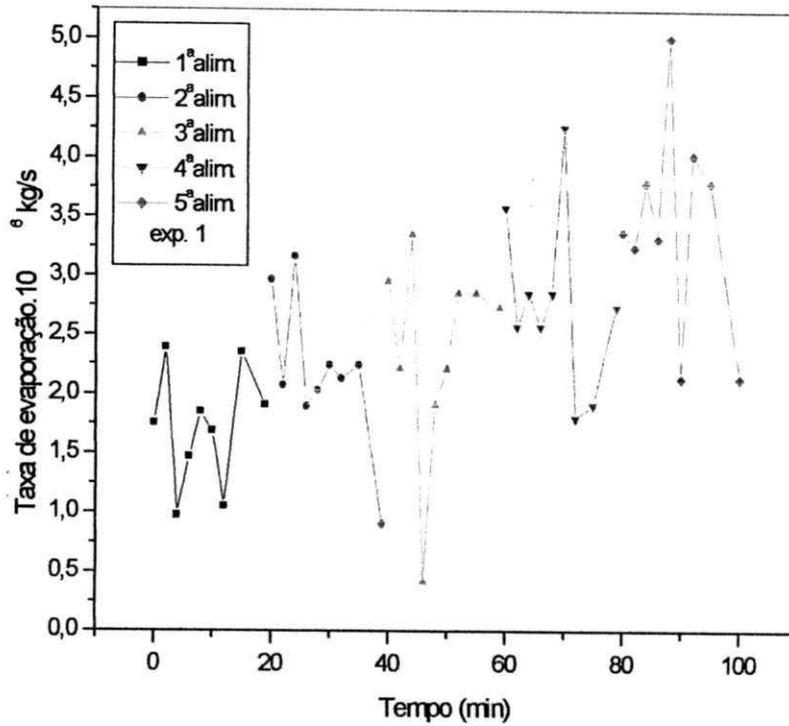


Figura 6.8 - Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,284 m/s

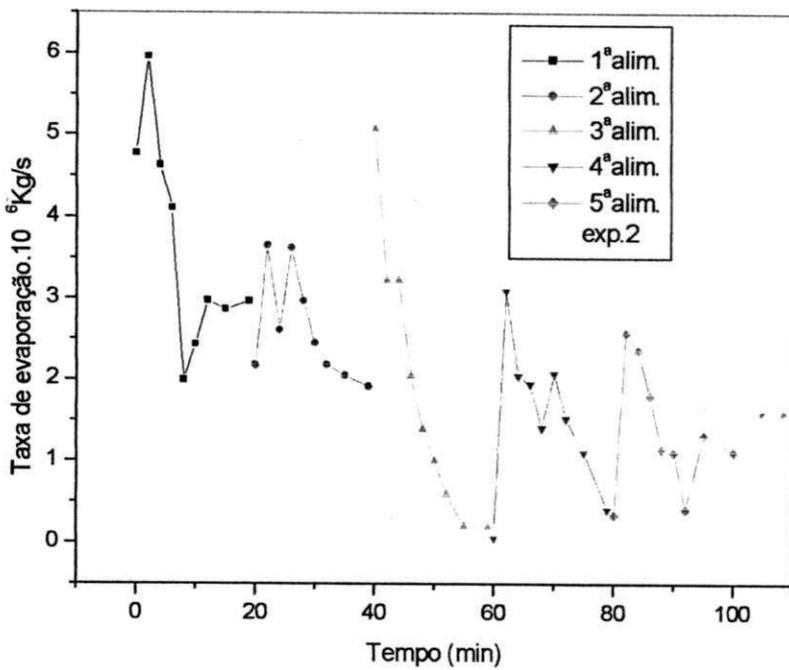


Figura 6.9 - Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,355 m/s

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

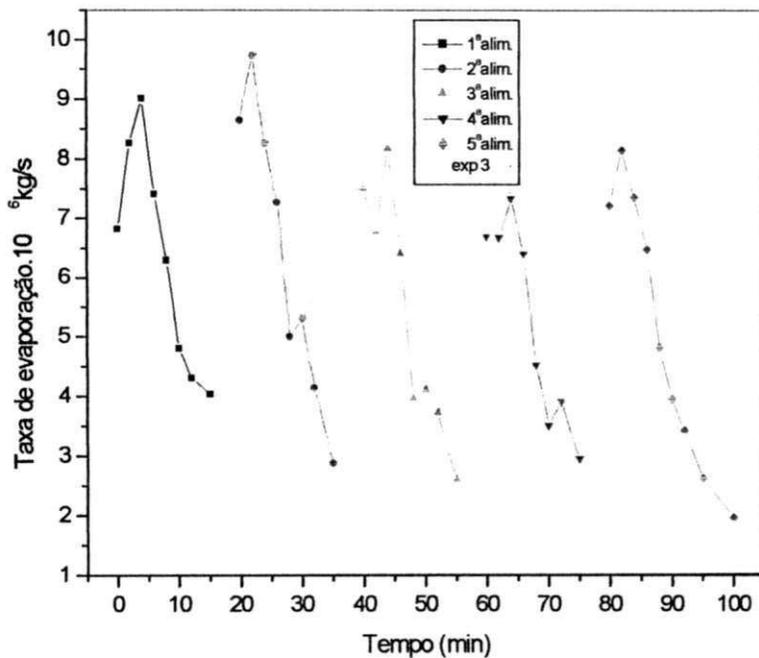


Figura 6.10 - Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade $0,284 \text{ m/s}$

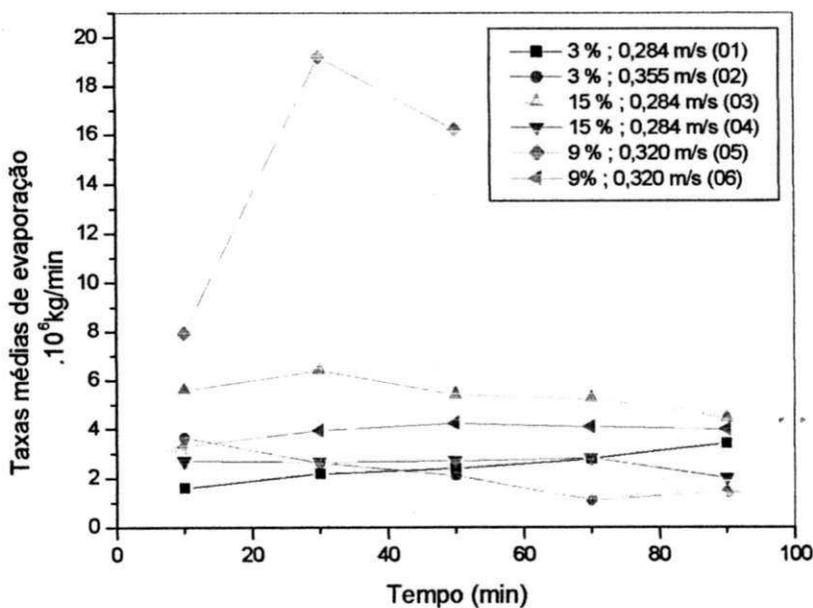


Figura 6.11 – Leito fluidizado:taxas médias de evaporação de água, exp. 1, 2, 3 4, 5, 6

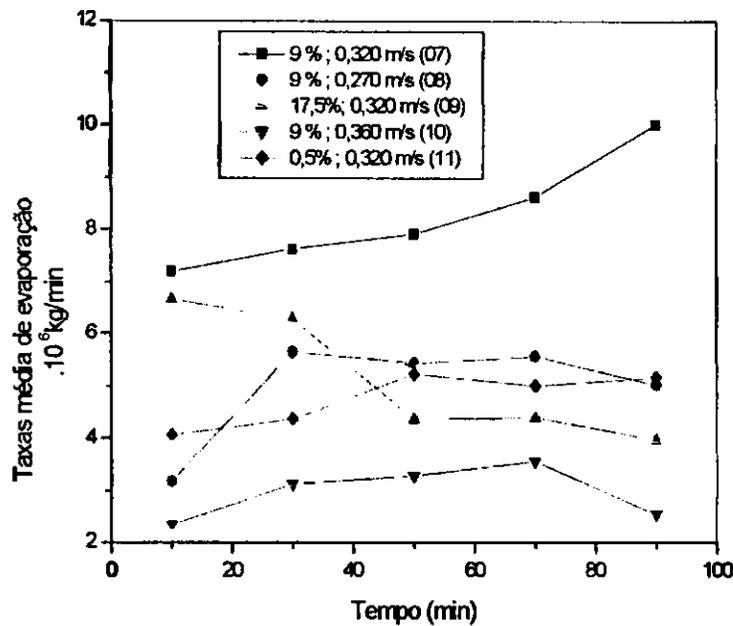


Figura 6.12 - Leito fluidizado:taxas médias de evaporação de água, exp 7, 8, 9, 10, 11

Com base nos resultados obtidos e nas observações experimentais sugere-se encontrar uma forma de alimentação das leveduras que otimize as condições de operação neste tipo de secador. A não uniformidade nas condições de alimentação das leveduras deve ter provocado a aleatoriedade dos comportamentos e as flutuações nas taxas de evaporação, conforme as Figuras 6.8 a 6.10 e Apêndice I.

6.2 - Eficiência energética

6.2.1 - Leito de jorro

Neste item procura-se relatar o comportamento em termos de eficiência energética do secador de leito de jorro nos experimentos realizados segundo a matriz de planejamento fatorial experimental seguida neste trabalho.

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

Para as condições de secagem representadas nas Figuras 6.13 a 6.15, observa-se baixas eficiências energéticas globais. Como pode ser visto para as situações apresentadas, as maiores concentrações de leveduras observa-se uma maior eficiência energética, ou seja, a aplicação de uma quantidade maior de leveduras favorece a um melhor aproveitamento energético no processo de secagem, uma vez que a maior taxa de evaporação faz com que o ar que sai do secador apresente uma maior umidade. Observa-se que a eficiência energética cai rapidamente nos primeiros minutos, podendo-se afirmar que a partir de certo instante o processo torna-se ineficiente do ponto de vista energético. VILAR (1996) estudou o desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas, e concluiu que as eficiências registradas foram baixas e que as melhores eficiências foram observadas de uma velocidade do ar mais baixa. O autor também observou que a eficiência energética cai rapidamente nos primeiros minutos. Neste trabalho, foram observados comportamentos semelhantes aos obtidos por esse autor.

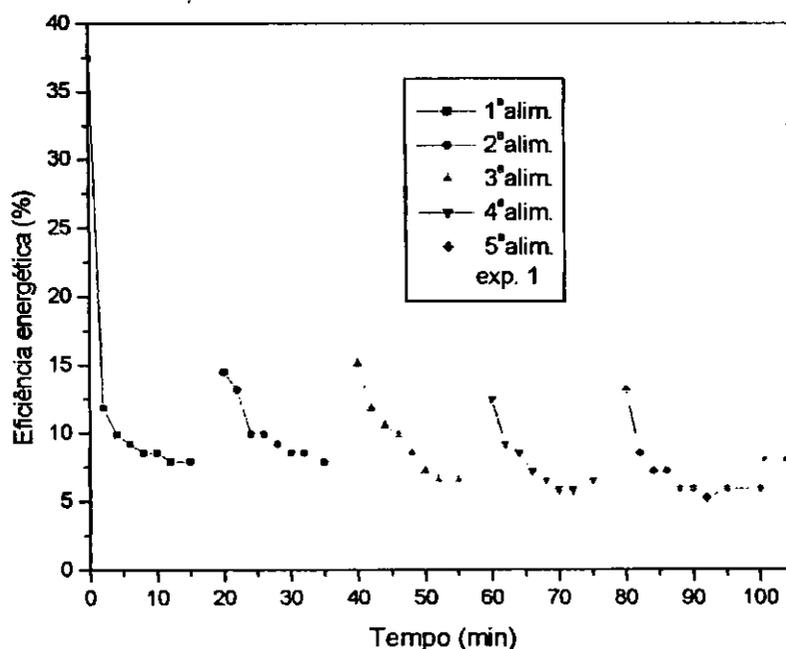


Figura 6.13 – Eficiência energética: $M_L/M_i = 2\%$ e velocidade $0,199 \text{ m/s}$

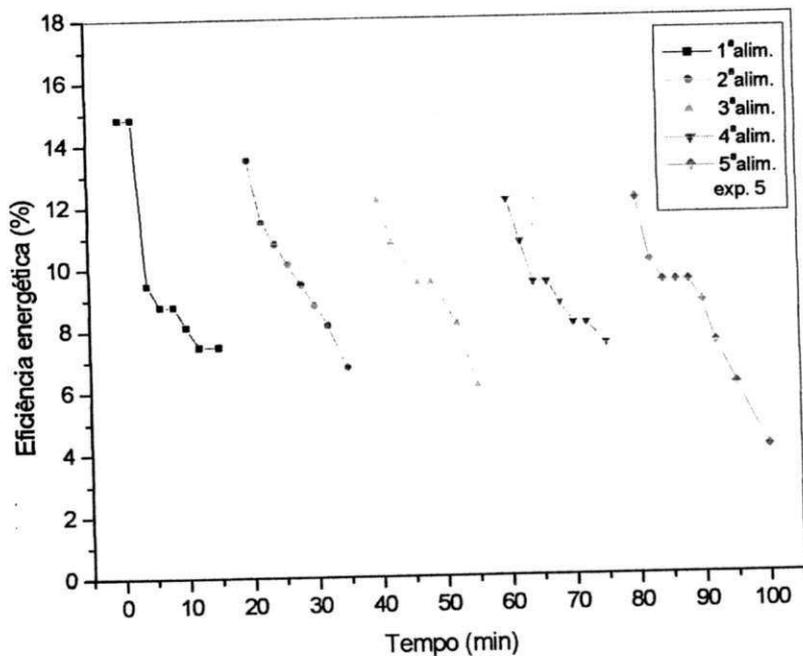


Figura 6.14 – Eficiência energética: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade 0,213 m/s.

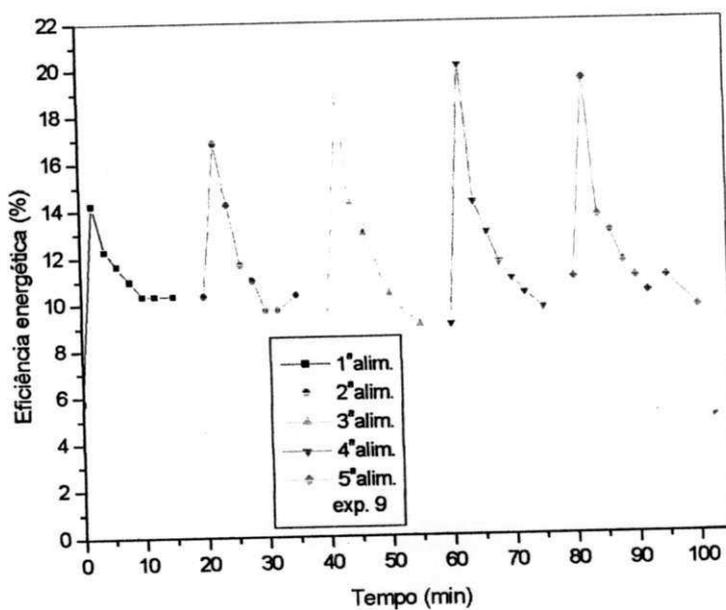


Figura 6.15 – Eficiência energética: $M_L/M_i = 6,8\%$ e velocidade 0,213 m/s

6.2.2 - Leito fluidizado

As Figuras 6.16 a 6.18 apresentam as eficiências energéticas obtidas dos ensaios realizados segundo a matriz de planejamento fatorial experimental proposta no trabalho. As condições de cada experimento encontram-se expostas nos títulos das Figuras relacionadas a seguir.

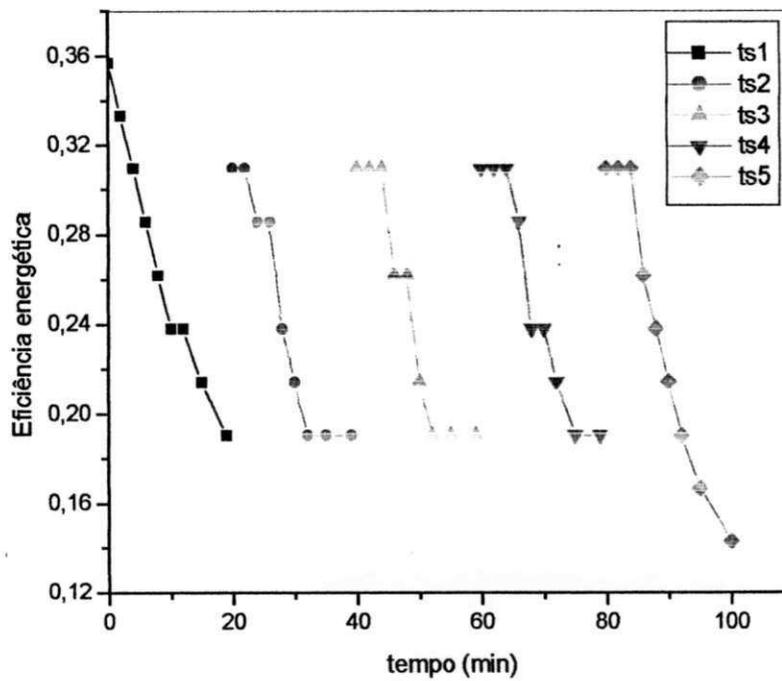


Figura 6.16 – Eficiência energética: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,284 m/s

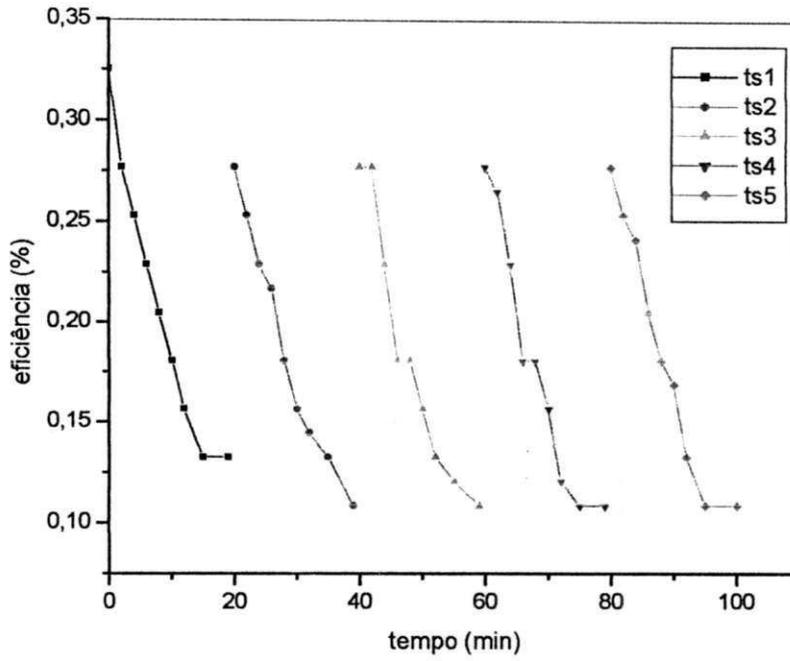


Figura 6.17– Eficiência energética: $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade 0,284 m/s

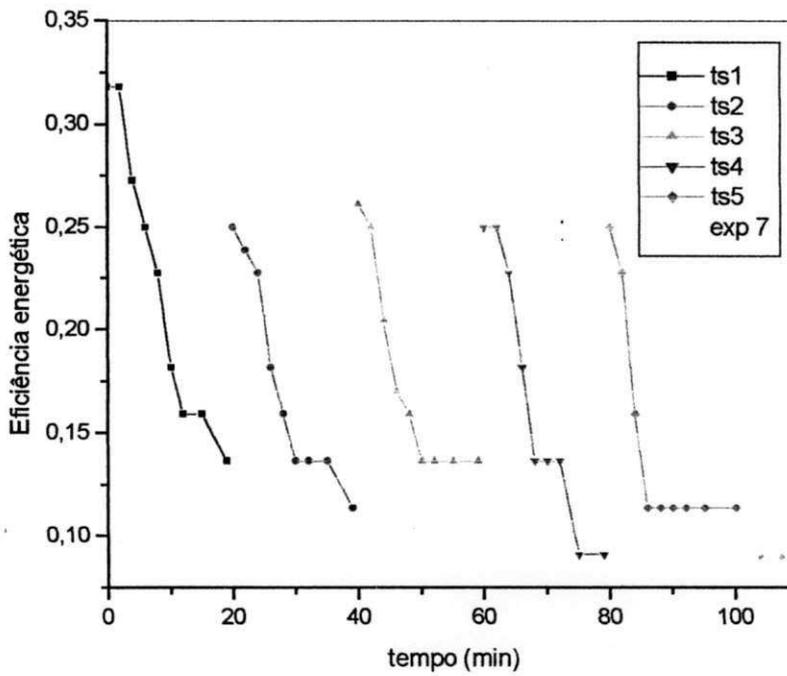


Figura 6.18 – Eficiência energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320 m/s

Fica evidente que as variáveis tais como proporção leveduras/inertes, velocidade superficial, umidade do ar e temperatura na entrada do secador que estão envolvidas no acompanhamento destes ensaios, explicariam o comportamento deste parâmetro (eficiência energética). Observou-se que o aumento da velocidade superficial mostrou uma tendência a maior eficiência energética, enquanto que, a variação na proporção leveduras/inertes não tem grande influência na resposta.

Em comparação aos ensaios com leito de jorro, têm-se observado semelhanças nos comportamentos das curvas obtidas. Como no leito fluidizado, as proporções e velocidades envolvidas são maiores do que no leito de jorro não encontrando diferenças significativas na eficiência energética.

6.3- Leito fluidizado: cinética de produção de pó

Os resultados obtidos através dos ensaios realizados em condições estabelecidas conforme planejamento experimental fatorial descrito no capítulo III são apresentados a seguir. Os dados serão analisados dentro de todas as condições estabelecidas e comparados com a cinética de produção em leito de jorro para avaliação e comparação do desempenho destes secadores.

A Figura 6.19 apresenta os resultados do experimento 2 realizado nas condições em que a proporção leveduras/inertes é de 3% e a velocidade superficial no secador de 0,355 m/s. Os resultados mostram valores crescentes com rápida descontinuidade, explicada em razão da abertura do equipamento para nova alimentação. O coeficiente de correlação com a equação ajustada encontra-se na Tabela 6.3, sendo a taxa de produção maior do que a obtida no 1º experimento, que é justificada pela maior velocidade superficial. Enquanto a Figura 6.20 ilustra os resultados dos ensaios realizados na mesma proporção leveduras/inerte, alterando apenas a velocidade superficial, conforme mostrado. Observa-se que, as curvas apresentam semelhanças no tocante ao

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

comportamento crescente e a massa obtida é maior quando aumenta a velocidade superficial, mantendo-se a proporção leveduras/inertes. Em relação a eficiência de produção, os dados mostram comportamentos semelhantes, mas a eficiência é maior para maior velocidade do ar. Em termos do ajuste linear verifica-se um coeficiente de correlação acima de 0,99, considerado satisfatório em termos estatísticos, e taxa de produção maior para maior velocidade superficial. Estas confirmações foram verificadas em ensaios anteriores com outras proporções leveduras/inertes. Para a eficiência de produção de pó, os resultados mostram uma eficiência crescente até a 3ª alimentação, seguida de eficiência aproximadamente constante até o término da secagem, como se observa na Figura 6.21

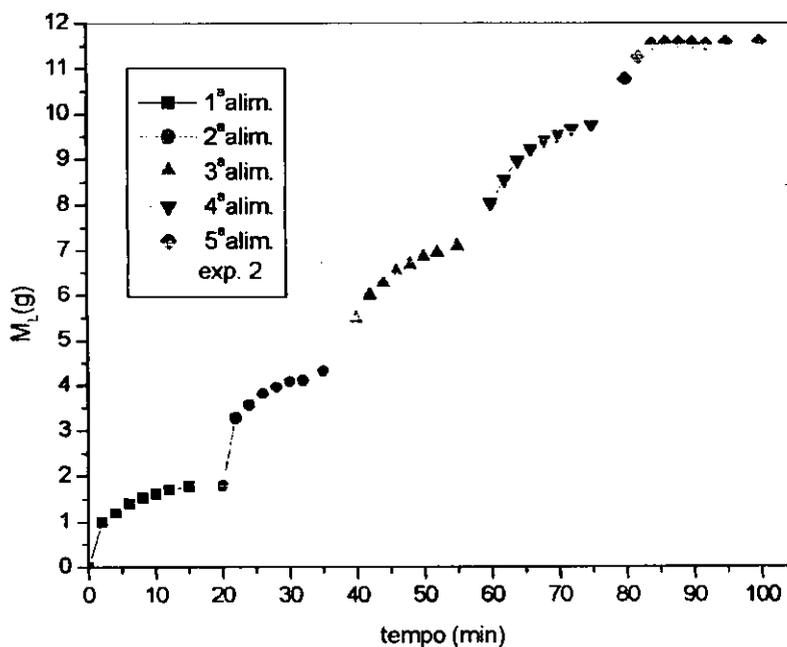


Figura 6.19 – Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,355 m/s

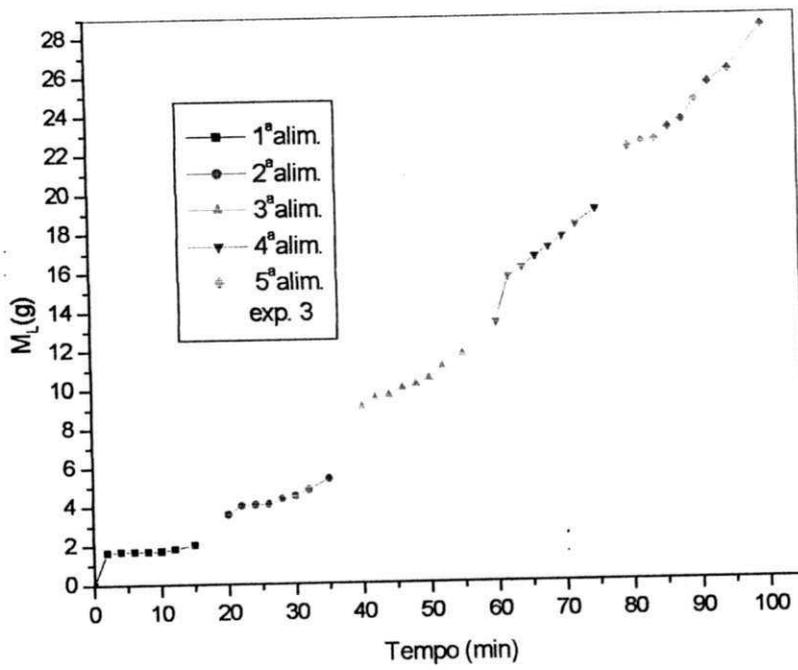


Figura 6.20 – Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,284 m/s

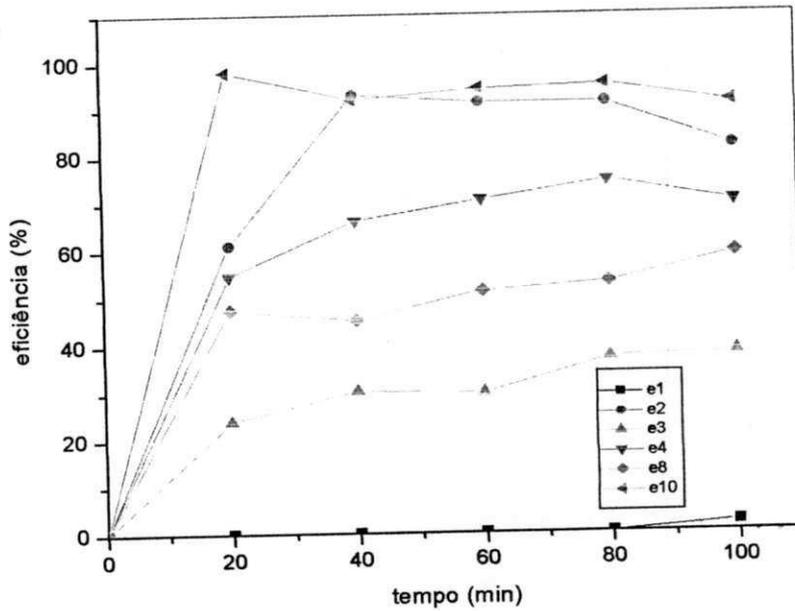


Figura 6.21 - Eficiência de produção de levedura em função do tempo: exp.: 1, 2, 3, 4, 8, 10

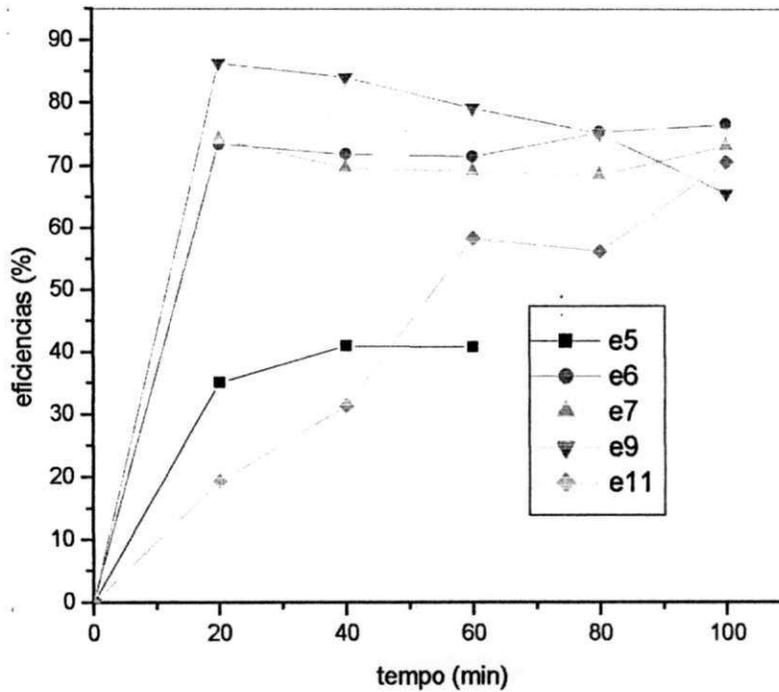


Figura 6.22 - Eficiência de produção de levedura em função do tempo: exp.: 5, 6, 7, 9, 11

Os resultados do ajuste linear dos dados da massa acumulativa de pó em função do tempo para todos os ensaios foram feitos tomando como base a massa acumulada nos tempos de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 minutos, estes dados foram ajustados linearmente e as equações com os coeficientes de correlação encontram-se na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados da regressão linear de massa acumulativa em função do tempo

Exp.	M _L /M _i (%)	Velocidade do ar (m/s)	Coefficiente de correlação	Equação ajustada	Taxa de produção (g/min)
1	3	0,284	0,65465	m =0,007*t	0,007
2	3	0,355	0,99303	m =0,128*t	0,128
3	15	0,284	0,99062	m =0,289*t	0,289
4	15	0,355	0,99761	m =0,804*t	0,804
5	9	0,320	0,99863	m =0,166*t	0,166
6	9	0,320	0,99913	m =0,386*t	0,386
7	9	0,320	0,99850	m =0,308*t	0,308
8	9	0,270	0,99370	m =0,237*t	0,237
9	17,5	0,320	0,98896	m =0,758*t	0,758
10	9	0,369	0,99931	m =0,444*t	0,444
11	0,5	0,320	0,97255	m =0,015*t	0,015

ROCHA (2002) estudou a cinética de produção no planejamento fatorial aplicado neste trabalho para o tipo de secador citado. Os resultados mostraram um comportamento linear e crescente de massa acumulativa de levedura seca com o tempo, indicando que as taxas de produção de pó são praticamente constantes, com pequenos desvios das curvas que representam os experimentos 9 e 11 da matriz experimental executada neste trabalho. A autora também concluiu que as eficiências de produção de leveduras durante todos os ensaios são constantes a partir da terceira alimentação, ou seja, a partir deste ponto o leito passa a operar em regime estacionário.

Em relação às eficiências de produção de pó, estes comportamentos estão de acordo com o que foi observado em leito fluidizado, às eficiências de produção de levedura em leito de jorro, durante todos os ensaios, são constantes a partir da terceira alimentação, este comportamento também foi observado em vários experimentos com o leito fluidizado. No leito de jorro, o planejamento foi analisado usando o software Statistica, versão 5.0 para realizar a regressão. O modelo foi analisado e em função das variáveis de entrada verificou-se que só a relação leveduras/inertes foi estatisticamente significativo.

6.4 - Análise dos efeitos das variáveis: M_L/M_i e velocidade do ar sobre as respostas em leito de jorro e leito fluidizado

Para as diferentes condições entre a proporção M_L/M_i e velocidade superficial do ar utilizados nos experimentos, analisou-se a qualidade do produto ainda o teor de proteínas e umidade do pó coletado. Quantificou-se o rendimento, retenção e perdas. Os resultados são mostrados na Tabela 6.2, onde observa-se que, mantendo-se constante a proporção M_L/M_i e aumentando-se a velocidade do ar, há tendência de aumentar o rendimento, diminuir as perdas e a umidade do produto coletado, exceto os resultados dos experimentos 5, 10 e 11, e mantendo-se velocidade do ar, o rendimento aumentou com a diminuição da proporção M_L/M_i e as perdas e a umidade diminuíram. Em termos de teor de proteínas verificou-se que praticamente não houve dependência com a velocidade do ar e a proporção M_L/M_i .

Tabela 6.2 - Respostas no leito de jorro

Exp.	Velocidade (m/s)	M_L/M_i (%)	Rendimento (%)	Retenção (%)	Perdas (%)	Umidade coletado(%)	Proteínas (bs, %)
1	0,199	2	74,95	0,00	25,10	—	51,82
2	0,199	6	70,7	8,60	20,70	23,7	50,09
3	0,227	2	86,79	0,58	12,63	11,65	50,95
4	0,227	6	79	2,21	18,79	16,25	51,82
5	0,213	4	67,74	23,10	9,16	18,64	51,82
6	0,213	4	86,8	2,10	11,10	11,19	50,95
7	0,213	4	83,4	3,10	13,50	11,65	51,82
8	0,213	1,2	89,31	0,00	10,69	12,59	51,82
9	0,213	6,8	42,52	35,14	22,32	16,20	51,82
10	0,241	4	68,66	2,14	29,20	31,34	52,68
11	0,185	4	52,30	35,20	12,50	13,13	52,68

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

Para o caso do leite fluidizado os resultados dos efeitos de M_L/M_i e velocidade do ar sobre as respostas são mostrados na Tabela 6.3. Como se observa na Tabela os resultados seguem em geral as mesmas tendências que no leite de jorro. O teor de proteínas foi em geral menor e a umidade do coletado maior que no leite de jorro o que pode ser atribuído em parte as condições diferentes de velocidade do ar e M_L/M_i .

Tabela 6.3 - Respostas no leite fluidizado

Exp.	Velocidade (m/s)	M_L/M_i (%)	Rendimento (%)	Retenção (%)	Perdas (%)	Umidade (%)	Proteínas (%)
01	0,284	3	2,00	97,45	0,55	7,98	45,15
02	0,355	3	81,94	5,20	12,86	23,69	46,03
03	0,284	15	38,00	53,10	8,90	24,59	42,00
04	0,355	15	70,19	8,83	20,98	48,72	47,25
05	0,320	9	40,75	33,77	25,48	15,79	46,38
06	0,320	9	76,58	18,28	5,14	33,30	41,33
07	0,320	9	73,17	26,30	0,53	21,72	44,63
08	0,270	9	59,02	34,74	6,26	17,38	46,20
09	0,320	17,5	65,54	32,52	1,94	41,88	40,60
10	0,369	9	91,31	0,00	8,69	30,15	43,05
11	0,320	0,5	70,81	23,24	5,95	9,62	49,70

Em relação ao experimento 1 o comportamento atípico indicando elevadíssima retenção pode ser atribuído a um possível entupimento da tela na saída do leite.

O planejamento fatorial para o estudo dos secadores de leite de jorro e leite fluidizado foi analisado usando o *Software Statística 5.0* para realizar a regressão não linear. Os modelos quadráticos codificados obtidos para rendimento, retenção, perdas, umidades do produto, coletado e do retido, e teor de proteínas, em função das variáveis controladas, são mostrados nas Tabelas 6.4 e 6.5. Os parâmetros estatisticamente significativos para o modelo estão em negrito.

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

Nos dados das Tabelas 6.4 e 6.5 encontram-se os modelos quadráticos estabelecidos para o leito de jorro e leito fluidizado, levando-se em consideração as variáveis de entrada e as respostas como variáveis de saída. Observa-se que os coeficientes de correlação se encontram bem abaixo dos considerados satisfatórios. Portanto, os resultados dos modelos para os dois tipos de secadores, serão utilizados apenas para discutir tendências.

A falta de ajuste pode ser explicada pela existência das variáveis não controladas, temperatura e umidade do ar de entrada que, apesar do intervalo de variação restrito, podem apresentar influência significativa

Nas respostas do leito de jorro, em termos de rendimento, retenção e perdas, o aumento na velocidade e diminuição na proporção leveduras/inertes, tendem a aumentar o rendimento e diminuir a retenção. Em termos das perdas, há tendência de aumento com aumentos nestas duas variáveis. Este comportamento para o leito fluidizado foi observado com algumas alterações, ou seja, aumentando-se a velocidade e a proporção leveduras/inertes, ocorreram aumentos no rendimento e nas perdas, enquanto que com aumento na proporção leveduras/inertes e diminuição na velocidade do ar, tende-se a diminuir a retenção de pó. Em termos de umidades do pó, coletado e retido, uma diminuição na proporção leveduras/inertes e na velocidade, tende a diminuir na umidade do produto coletado e a umidade do retido. Nas proteínas, os resultados mostraram tendência a aumentar com aumentos na velocidade do ar e diminuição na proporção leveduras/inertes para o leito fluidizado e o leito de jorro. As tendências observadas quando consideramos a velocidade do ar podem ser atribuídas a, com o aumento da velocidade, tem-se aumento nos coeficientes de transferência de calor e massa e diminuição no tempo de residência do material no secador, uma destes dois fatores é o que predomina em determinada situação.

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

Tabela 6.4 - Modelos para variáveis em leito de jorro

variação explicada % (R ²)	Modelo	Equação
54	Rendimento. = $79,31 + 10,82*U - 19,55 * M_L/Mi - 11,5 *U^2 - 6,1*M_L/Mi^2 - 1,77*U*M_L/Mi$	(57)
41	Retenção = $9,4 - 13,14*U + 14,98 * M_L/Mi + 1,6 *U^2 + 0,5* M_L/Mi^2 - 3,5*U*M_L/Mi$	(58)
51	Perdas. = $11,25 + 2,31*U + 4,6 * M_L/Mi + 9,91 *U^2 + 5,56 M_L/Mi^2 + 5,28*U*M_L/Mi$	(59)
39	Umidade coletado. = $3,8 + 3,1*U + 3,95 * M_L/Mi + 7,93 *U^2 + 0,09 M_L/Mi^2 - 0,75*U*M_L/Mi$	(60)
75	Umidade retido. = $10,97 + 8,55*U + 9,48 * M_L/Mi + 8,17 *U^2 - 5,44 M_L/Mi^2 - 7,28*U*M_L/Mi$	(61)
47	Proteínas. = $51,53 + 0,22*U - 0,22 * M_L/Mi + 0,61 U^2 - 0,25* M_L/Mi^2 + 1,3*U*M_L/Mi$	(62)

TABELA 6.5 Modelos para variáveis em leito fluidizado

variação explicada % (R ²)	Modelo	Equação
70	Rendimento = $74,88 + 19,72*U + 2,1 * M_L/Mi - 5,76 *U^2 - 9,26* M_L/Mi^2 - 11,94*U*M_L/Mi$	(63)
72	Retenção = $22,29 + 23,21*U - 3,45 * M_L/Mi + 2,17 *U^2 + 7,43 M_L/Mi^2 + 12*U*M_L/Mi *$	(64)
50	Perdas. = $2,84 + 3,5*U + 1,35 * M_L/Mi + 3,6 *U^2 + 1,83* M_L/Mi^2 + 0,058*U*M_L/Mi$	(65)
91	Umidade coletado = $27,51 + 7,24*U + 10,91 * M_L/Mi - 1,5 *U^2 - 0,51 M_L/Mi^2 + 2,11*U*M_L/Mi$	(66)
37	Umidade retido = $5,77 + - 0,2*U - 0,62 * M_L/Mi - 0,74 *U^2 + 1,65 M_L/Mi^2 - 0,55*U*M_L/Mi$	(67)
53	Proteínas = $43,23 + 0,21*U - 1,85 * M_L/Mi + 0,75 *U^2 + 1,02 M_L/Mi^2 + 1,09*U*M_L/Mi$	(68)

6.5 - Análise da taxa de produção

O modelo quadrático codificado obtido para taxa de produção em leite fluidizado em função das variáveis estudadas, é mostrado na equação 60, sendo que os parâmetros estatisticamente significativos para o modelo estão em negrito.

$$M = \mathbf{0,29} + \mathbf{0,25} \cdot M_L/M_i + \mathbf{0,12} \cdot U + 0,036 \cdot M_L/M_i^2 + 0,013 \cdot U^2 + 0,1 \cdot U \cdot M_L/M_i \quad (69)$$

A análise de variância (ANOVA) para a taxa de produção é mostrada na Tabela 6.6. Para a taxa de produção o coeficiente de correlação que explica a qualidade do ajuste entre as respostas observadas e os valores determinados pelo modelo ajustado é de 0,933. Com relação ao teste F, que é utilizado para investigar se o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos valores experimentais, pode-se considerar que o modelo obtido é estatisticamente significativo com 95% de confiança, já que o F calculado foi maior que o F tabelado. Entretanto, o modelo não pode ser considerado preditivo, uma vez que o F calculado sobre o F tabelado é menor que 4 conforme BARROS NETO *et al.* (1995).

Tabela 6. 6 - Análise de variância para taxa de produção

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média da soma dos quadrados	Teste F regressão	Teste F falta de ajuste
Regressão	0,6587	5	0,13174	13,95	6,8
Resíduo	0,047227	5	9,445.10 ⁻⁴		
Total	0,705986	10			
Falta de ajuste	0,022333	3	7,44.10 ⁻³		
Erro puro	0,024894	2	0,012447		
Qual. Do ajuste	89,19%				
Coef.	0,933				
Correlação					
F tabelado (95%)				5,05	19,16
Fcal/Ftab				2,76	

A Figura 6.23 apresenta os pontos experimentais de taxa de produção em boa concordância com os valores previstos pelo modelo, sendo a visualização gráfica da percentagem da variação explicada.

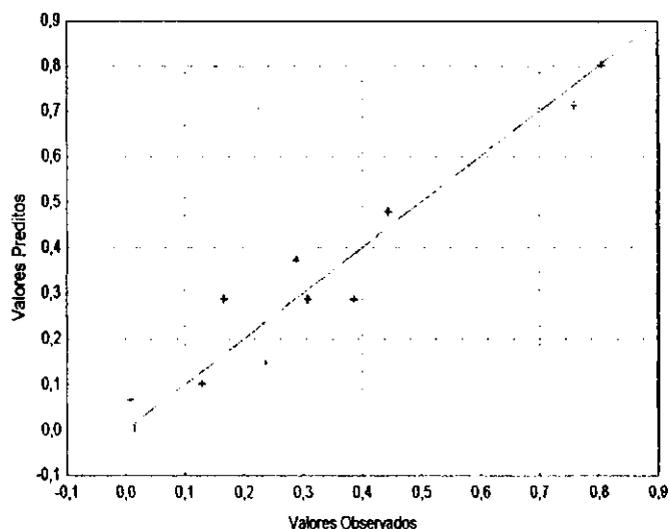


Figura 6.23 Valores observados versus valores preditos da taxa de produção

A Figura 6.24 mostra a superfície que apresenta os efeitos das variáveis, proporção leveduras/inertes e velocidade do ar, sobre a resposta taxa de produção. Observa-se que com os aumentos M_L/M_i e velocidade do ar, ocorre um aumento na taxa de produção. Operando o leito fluidizado em M_L/M_i acima de 15% e velocidade acima de 0,32 m/s, obtém-se taxa de produção acima de 1 g/min.

ROCHA (2002) estudou a secagem em leito de jorro com as mesmas condições aplicada neste trabalho no mesmo tipo de secador, e analisou a taxa de produção, utilizando um planejamento fatorial. Obteve o coeficiente de correlação de 0,944 com 95% de confiança, concluindo que o modelo foi estatisticamente significativo pelas mesmas razões explicadas anteriormente, já que a razão entre o F calculado e F tabelado foi maior do que 1. A taxa de produção apresentou um valor superior a 0,2 g/min operando com as variáveis otimizadas, ou seja, percentual de leveduras maior que 6% para qualquer valor de velocidade do ar. A equação do modelo quadrático codificado obtido por ROCHA para taxa de produção em leito de jorro em função das variáveis estudadas, é mostrada na

equação 61 e os parâmetros estatisticamente significativos para o modelo estão em negrito.

$$M = \mathbf{0,1366} + \mathbf{0,051} \cdot M_L/M_i + 0,0194 \cdot U + 0,015 \cdot M_L/M_i^2 + 0,0012 \cdot U^2 + 0,0079 \cdot U \cdot M_L/M_i \quad (70)$$

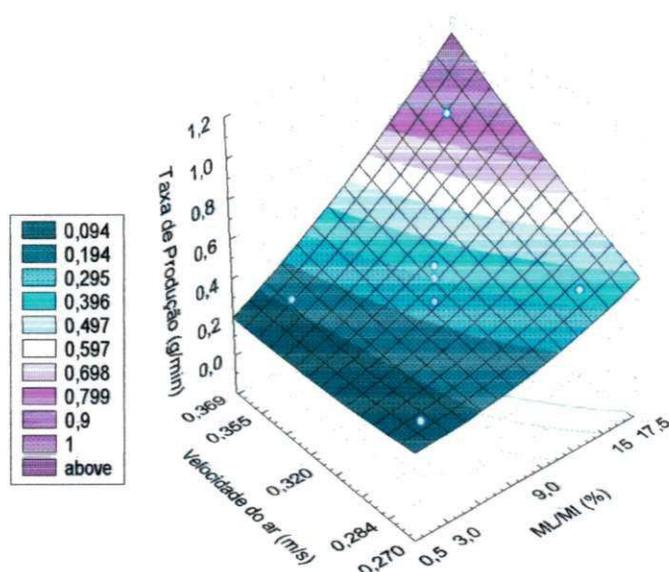


Figura 6.24 - Superfície de resposta para taxa de produção de pó em leito fluidizado

6.6 – Comparação dos secadores de leito de jorro e leito fluidizado

Para efeito de comparação do desempenho dos secadores, objeto principal deste trabalho, foi realizado um estudo bastante detalhado, desde a fluidodinâmica para definição dos parâmetros necessários ao funcionamento destes secadores até a determinação das curvas de evaporação de água, eficiência térmica, cinética de produção e qualidade do produto obtido.

Dentro das condições estabelecidas as observações relativas a fluidodinâmica, indicam uma verifica-se uma performance satisfatória para ambos os secadores. O secador de leito de jorro mostrou-se bastante satisfatório até

Capítulo VI Desempenho dos Secadores

proporções de 7% de leveduras/inertes, acima da qual, ocorreram colapsos com a introdução de leveduras e uma velocidade mínima de jorro praticamente independente da proporção estudada. As curvas de evaporação de água em todos os ensaios realizados, mostraram flutuações no andamento da secagem, que podem ser explicadas pela forma como as leveduras encontram-se distribuídas no secador. As curvas de eficiências energéticas apresentaram comportamentos sempre decrescentes, com valores relativamente baixos e a cinética de produção apresentou comportamento praticamente linear em todos os ensaios, com eficiência de produção praticamente constante a partir da 2ª alimentação. Nos ensaios realizados no leito fluidizado, o ponto de partida foi o estudo bastante detalhado da fluidodinâmica, com o objetivo de definir as condições mínimas de fluidização para elaboração da matriz de planejamento. Os resultados mostraram que é possível alimentar o secador com quantidades de leveduras maiores que as utilizadas no leito de jorro, mas as velocidades de trabalho são superiores quando comparadas com as do leito de jorro. Em relação às taxas de evaporação, as flutuações permaneceram nos dois secadores e as eficiências energéticas apresentaram valores relativamente mais elevados para o leito fluidizado. A cinética de produção no leito fluidizado apresentou comportamento idêntico ao leito de jorro, com eficiências de produção constantes em quase todas os ensaios. Finalmente, com relação a qualidade do produto menores teores de umidade foram obtidos no leito de jorro. Evidencia-se a entretanto a necessidade do aquecimento do ar para que o produto atenda as especificações de mercado. O teor de proteínas ficou acima do mínimo necessário, observando-se que os resultados dos ensaios em leito de jorro ficaram acima do leito fluidizado. Diante de todas as observações, pode-se recomendar a operação de leito de jorro como a mais adequada, comparada com o leito fluidizado para estudos de secagem de leveduras, dentro das condições estabelecidas.

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 — Resumo dos resultados obtidos

A partir dos dados obtidos, pode-se concluir que:

- Dos modelos estudados, o de GAB ajustou-se melhor aos dados experimentais das isotermas de dessorção;
- Foi observado que as constantes C , K e X_m na equação de GAB dependem da temperatura;
- As entalpias de sorção de monocamada e multicamadas, apresentaram valores que condizem com valores esperados;
- As curvas características do leito de jorro apresentam comportamentos semelhantes à curva típica de um leito de jorro convencional. No entanto, a presença de levedura, modificam os parâmetros fluidodinâmicos;
- No leito de jorro, há uma diminuição no valor da queda de pressão máxima devido à presença da leveduras comparadas a situação apenas com as partículas inertes, com algumas exceções;
- As curvas com diferentes proporções de leveduras são semelhantes, mostrando que apesar da presença de levedura afetar o comportamento do leito de jorro, não há grande influência da concentração;
- Quanto a U_{jm} não houve variação significativa em função do seu aumento observou-se um valor médio em torno de $0,1676 \pm 0,0086$ m/s;
- Em leito fluidizado, as curvas características apresentaram comportamentos típicos de um leito em fluidização;

Capítulo VII Considerações Finais

- A presença de leveduras não alterou significativamente a velocidade mínima de fluidização;
- Dentro das proporções estudadas, a velocidade mínima de fluidização foi maior do que a velocidade mínima de jorro;
- As perdas da carga registradas no leito fluidizado foram maiores que no leito de jorro para presença de leveduras em qualquer proporção;
- As taxas de evaporação de água mostraram comportamentos flutuantes nas condições estabelecidas no planejamento experimental fatorial, tanto para leito de jorro como para leito fluidizado;
- As eficiências energéticas mostraram comportamentos decrescentes nos experimentos realizados nos dois secadores;
- A produção de pó mostrou comportamento crescente e praticamente linear em todos os ensaios realizados, tanto em leito de jorro como em leito fluidizado e a análise estatística indicou que a proporção leveduras/inertes e velocidade do ar são parâmetros estatisticamente significativos que favorecem a cinética de produção;
- Em relação às respostas na qualidade do produto, o secador em leito de jorro, mostrou um melhor desempenho frente ao leito fluidizado

7.2 – Contribuição do trabalho

Vários pesquisadores têm estudado a secagem de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* nos mais diversos tipos de secadores com o objetivo de usar o produto como suplemento protéico para ração animal, mostrando a viabilidade do processo de obtenção no que diz respeito a comercialização do produto. Estes trabalhos têm sido desenvolvidos nos mais diversos objetivos, entre os quais, pode-se citar: secagem com o uso de secadores de leito de jorro e leito fluidizado, alternando-se estes secadores, para verificar a melhor seqüência de obter um produto com características que atendam as especificações de

Capítulo VII Considerações Finais

mercado, secagem da levedura em estufa, enfocando as isotermas de dessorção e determinando períodos de secagem, secagem de leveduras em "spray-drier", estudo das leveduras em secadores rotatórios provenientes das indústrias sucroalcooleiras, em que as referências encontram-se citadas na revisão bibliográfica.

Este trabalho procura acrescentar informações que complementem os trabalhos realizados até o presente momento, porque relata além das informações sobre as isotermas de dessorção, aplicando modelos matemáticos que descrevem seu comportamento, procura fazer um estudo bastante detalhado sobre a fluidodinâmica dos leitos de jorro e fluidizado, entre os aspectos como percentual de levedura em relação ao inerte e tempo de secagem, analisando os parâmetros que dão as informações sobre as condições que mantêm a estabilidade dos secadores, além da obtenção das taxas de evaporação de água, eficiência energética de secagem e cinética de produção de pó nos dois tipos de secadores aqui estudados.

Conclui-se que este trabalho contribuiu para um avanço nas pesquisas com este tipo de matéria prima, especialmente na secagem para obtenção de um produto que possa ser utilizado como suplemento protéico. Este trabalho mostrou uma análise do desempenho de secadores em todos os aspectos relatados que até o presente não se encontram em publicações que proponha esta forma de estudar o desempenho de secadores numa performance de avaliar a eficiência de secagem.

7.3 - Conclusões

De maneira geral pode-se dizer que no que diz respeito ao estudo comparativo dos secadores de leito de jorro e leito fluidizado, ambos apresentaram bom desempenho, mostrando inicialmente uma fluidodinâmica bastante estável, sendo que o secador de leito fluidizado permitiu trabalhar com quantidades maiores de leveduras e maiores velocidades do ar. Em relação ao rendimento, retenção e perdas e qualidade de produto, ambos apresentaram resultados satisfatórios. Na comparação entre os secadores, percebeu-se que

ambos apresentaram vantagens e desvantagens em alguns pontos, ou seja, no tocante às taxas de evaporação, o secador de leite fluidizado apresenta taxas maiores que no leite de jorro em virtude das maiores quantidades de leveduras empregadas e velocidade do ar. Em relação às eficiências, observou-se que no leite fluidizado foram maiores e o rendimento, retenção e perdas observadas em alguns experimentos foram maiores para cada tipo de secador. Em termos da qualidade do produto, o secador de leite de jorro apresentou teores de proteínas maiores que o leite fluidizado e umidades menores. Diante do que foi observado, percebe-se que o leite de jorro apresentou, de maneira geral, desempenho superior comparado ao leite fluidizado, mas com algumas alterações ambos podem ser utilizados como uma alternativa viável para obtenção deste tipo de produto.

7.4 - Perspectivas

- Realizar modificações no leite de jorro, em relação às dimensões do secador para observar a viabilidade de aumentar a proporção leveduras/inertes;
- Alterar a forma de alimentação de leveduras para verificação do desempenho dos secadores;
- Realizar estudos com outros materiais, de secagem ou inertes, e analisar o desempenho dos secadores;
- Estudar o efeito da temperatura sobre o desempenho e a qualidade do produto;
- Executar estudos com a levedura industrial nestes secadores;
- Estudar a qualidade nutricional e a desativação das leveduras;
- Desenvolver um sistema contínuo de alimentação de levedura industrial;
- Simular e otimizar o sistema
- Realizar o “scale-up” do processo.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. M. **Desidratação de polpa de umbu**, 1991. Relatório de Iniciação Científica. Universidade Federal da Paraíba , Campina Grande -PB,

ALMEIDA, M. M. **Processamento de Urucum em leite de jorro: Estudos fluidodinâmicos** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Campina Grande – PB, UFPB, 1993.

ALPAS, H.; OZILGEN, M. ; BOZOGLU, T.F. e KATNAS, S. Mathematical modeling of survival and weight loss of Baker's yeast during drying, **Enzyme and Microbial Technology** , v. 19: p. 348-351, 1996.

ALSINA, O. L. S, 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**. X International Drying Symposium (IDS-96). Kraków, Poland, vol. B, p.865-872,1996

ALSINA, O.L.S. , LIMA, L.M.R., MORAIS, V.L.M. & NOBREGA, E. S. **Estudo da circulação de sólidos em um leito de jorro convencional para secagem de polpa da acerola**. In I CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS (Anais), Campinas-SP. 1995.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

ANDRIETTA M. G. S. **Novas alternativas para subprodutos da cana-de-açúcar**. Campinas- SP, 1998, p 10 , STAB, v 16 nº 4.

ARAÚJO, M.A.R. **Predição da cinética de secagem do fruto da goiabeira (*Psidium guajava L.*)**. Pós-graduação em Engenharia Agrícola - Dissertação de Mestrado, , Campina Grande, PB, p.45-49, 2001.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J. S. ; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Editora da Unicamp. Campinas - SP, 1995.

BASUNIA, M.A., ABE, T., Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 295-301, 2001.

BAYROCK, D., INGLEDEW, W.M. **Fluidized bed drying of baker's yeast: moisture levels, drying rates, and viability changes during drying**, Food Research International, v. 30, n. 6 , p. 407-415, 1997.

BERRUTI, F.; MUJR, J. R. e BEHIE, L. A. **Solids circulation in a spout – fluid bed with draft tube**, 1990. In LIMA, M. F. M. Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro -Estudos fluidodinâmicos e térmicos. Campina Grande - PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, pp. 6, 1992.

BOTTERIL, J.S.M., TEOMANY, Y. and YUREGIR, K. R **The Effect of Operating Temperature on the velocity of Minimum Fluidization, Bed-Voidage and general Behaviour**, citado por MURACHARM, B. Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les lits Fluidisés par les Gaz. Tese de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990. (b)

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

BOTTERIL, J.S.M., TEOMANY, Y. and YUREGIR, K. R.. **Comments on Minimum Fluidisation at high Temperaturas** citado por MURACHARM, B. Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans lês lits Fluidisés par lês Gaz. Tese de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990. (a)

BOX, G. E. P. e WILSON, K. B. **On the experimental attainment of optimum conditions**, 1951. In BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J. S. & BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Editora da Unicamp. Campinas – SP, 1995.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building**, 1978. Citado por BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J. S. & BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Editora da Unicamp. Campinas – SP, 1995.

BROOKER, D.B.;BAKKER-ARKEMA, F.W. E HALL, C.W. **Drying Cereal Grains** Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc., 1974. 265 p.

BUTOLO J. E. **Uso da Biomassa de Levedura em Alimentação Animal: Propriedades, custo relativo e outras formas de nutrientes**, In: ITAL Instituto Tecnológico de Alimentos. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – SP, pp. 74- 75, 1996.

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

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

CAMPOS NETO, O., BUTOLO, J.E., PINTO, R.C. **Valor nutritivo da levedura seca (*Saccharomyces cerevisiae*) resíduo na produção de álcool e olaquinox 98,5 % misturado ao sal mineral para novilhos da raça nerole,(1986)**, citado por BUTOLO, J.E. Uso de biomassa de levedura em alimentação animal: Propriedades, custo relativo a outras fontes de nutrientes. In: ITAL. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – São Paulo, pp.77, 1996.

CHARM, S. E. **Dehydration of foods. The fundamentals of food engineering**, AVI USA,1991.

CHRISTIAN, J. H. B.;WALTHO, J. A. **The composition of *Staphylococcus aureus* in relation to the water activity of the growth medium**. Journal os genetic Microbiology. V.35, p. 205-213 , 1964

CLAFLIN, J. K. e FANE, A. G. **Gas distribution and heat transfer in a draft-tube spouted bed**, 1984. Apud LIMA, M. F. M. Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro -Estudos fluidodinâmicos e térmicos. Campina Grande -PB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB, pp.10, 1992.

CORRÊA, C.P.; AFONSO Jr., P.C.; ANDRADE, E.T. **Modelagem matemática da atividade de água em poupa cítrica peletizada**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.283-287, Campina Grande, PB, 2001.

CORREIA, P.C., ALMEIDA, F. de A.C. **Comparação de modelos matemáticos de equilíbrio higroscópico para semente e fibras de algodão herbáceo, cultivar redenção**. Revista Oleaginosas e Fibrosa, Campina Grande, EMBRAPA-CNPA, v.3, n. 1, p. 7-12, 1999.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, 2ª edition ., Clarendon Press, p. 414 , 1975.

CREMASCO, M. A.; ROCHA, S. C. S. e MASSARANI, G. **Secagem de milho em leito de jorro**. In: XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Anais, Uberlândia – MG, Volume 2, pp. 382- 393, 1987.

DAUDIN , J.D., **Calcul dès cinétiques de séchage par lair chaudes**, Science Aliments ., vol 3 , n 1 , p. 1-36 , 1983.

EPSTEIN, N. & CHANDNANI, P.P. **Gás spouting characteristics of fine particles**. Chem Eng. Science, vol. 42, p. 2977-2981, 1987.

FAO/WHO/UNU **Energy and protein requeriments**. 1985.

FIGUEIREDO, R.. **Princípios de secagem de produtos biológicos**- João Pessoa: Editora Universitária/ UFPB, 2004, 229p.

FORTES, M. e OKOS. M. **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains**, In: Advances in Drying, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington. Vol 1 , p. 119-154, 1980.

FRAZIER W. C. e WESTHOFF D. C. **Microbiologia de los Alimentos**. Editorial Acribia S.A., Espanha, 1985.

FREIRE, J.T.; MORRIS. J.A. , **Drying of yeast paste in a spouted bed dryer**, Drying 90,

GABAS, A.L. **Secagem de uva Itália em leito fixo**. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas)

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

GELDART, D. **Type of gás fluidization**, Powder Technology, vol. 7, p. 285-292, 1973

GRABOWSKI, S.; MUJUMDAR, A. S.; RAMASWAMY, H. S. e STRUMILLO, C. **Evaluation of fluidized versus spouted bed drying of baker's yeast**. In: Drying Technology, pp. 625-634, 1997.

HALL, C. W. **Drying farm crops**. Ann Arbor, Edwards Brophers, 1971, 336 p.

HEIDELBAUG, N. D. e KAREL, M. **Stability of low and intermediate moisture foods**. In: GOLDBLITH, S. A. ; REY, L. , ROTHMAYR, W. W. Freeze Drying and Advance Food Technology. New York: Academic Press, 1975, p. 643-674.

[Http://www.consulteme.com.br/1b/biologia/leved.htm](http://www.consulteme.com.br/1b/biologia/leved.htm). Arquivo consultado em 28 de janeiro de 2002..

KECHAOU, N.; MAALEJ, M. **Desorption isotherms of imported banana**. Drying Tecnology, New York, v.17, n.6, p.1201-1213, 1999.

KEEY, R. B. **Moisture: solid relationships . Drying principle and practices**. Oxford, p.19-49 , 1972.

KHOE, G. K. e VAN BRAKEL, J. **Solids Sep. Processes, I**. In MUJUMDAR, A. S. Spouted beds: Principles and recent developments. In VII Encontro sobre escoamento em meios porosos (Anais). Volume 1, São Carlos- SP, pp. 3- 13, 1989.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

KRIDER, J. L.; CONRAD, J. H.; CARROL, W. W. **Swine production**. 8a. ed. New York, MacGraw, 1982. In BUTOLO I. E. Uso da Biomassa de Levedura em Alimentação Animal: Propriedades, custo relativo e outras formas de nutrientes, In: IT AL. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – São Paulo, pp. 72, 1996.

LAHR FILHO, D. ; GHIRALDINI, J. A. e ROSSEL, C. E. V. **Estudos de otimização da recuperação de biomassa de levedura em destilarias**, In: ITAL Instituto Tecnológico de Alimentos. Produção de Biomassa de levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas -SP , pp.59 e 63, 1996.

LAMA, R. F.; MADONNA, L. A. e BRISSON, W. L. **Solids-air jets**, 1961. In MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N., Spouted Beds. Academic Press, New York, 1974.

LIMA, L. M. R. **Estudos das variáveis fluidodinâmicas na secagem de polpa de acerola em leito de jorro convencional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Campina Grande – PB, UFPB, 1996.

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

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. **Moisture transfer properties of dry and semi moist foods**. Journal of Food Science. v. 50, p.397-400, 1985.

LUCAS, A., ARNALDOS, J., CASAL, J. & PUIGJANER, L. **High temperature incipient fluidization in mono and polydisperse systems**, Chem Eng. Communications, vol. 41, p 121-132, 1986.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

MAIALLE, K. G.; CUNHA, R. L. e MENEGALLI, F. C. **Secagem de suspensão de levedura em leito de jorro fluidizado bidimensional: Influência da reologia do produto.** In ENEMP (Resumos), 1999.

MARTINES-FORCE, E. ; BENITEZ, T. Changes in yeast amino acids pool with respiratory versus fermentative metabolism. *Biotechnology and Bioengineering*. New York, v. 40, p. 643-649, 1992.

MARTINS, J.H., CAVALCANTE MATA, M.E.R.M. **Introdução a teoria e simulação matemática de secagem de grãos.** Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. Campina Grande-PB, UFPB. 1984.

MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N., **Spouted Beds.** Academic Press, New York, 1974.

MATHUR, K. B. e GISHIER, P. E., **A technique of contacting gases with coarse solid particles.** In MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N., *Spouted Beds*, Academic Press. New York, 1974.

MATTOS, W. R. S. ; D'ARCE, R. D. ; MACHADO, P. F. & MARCOS, A.L. M. **Avaliação da qualidade da proteína de Levedura Seca (*Saccharomyces spp*).** In: Reunião Anual da S.B.Z., 20, Pelotas, 1983. Anais, pelotas, SBZ, 1983, p.119.

MEDEIROS, M. F. D. , **Influência da composição química dos materiais do desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro.** Tese de doutorado, Unicamp, Campinas – SP, 2001.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

MORAIS, V. L. M. **Estudo do Desempenho de um Leito de Jorro Convencional para Secagem de Polpa de Acerola.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFPB. Campina Grande –PB, 1996.

MOREIRA, I, ANDREOTTI, F.L. FURLAN, A.C., MARTINS, E.N., SCAPINELLO, C. **Níveis crescentes de leveduras de recuperação (*Saccharomyces spp.*) seca pelo método “spray-dray” na alimentação de leitões.** On-line: disponível na internet via <http://www.sbz.org.br/anais1997/Nnr/bnnr397.pdf>

MORGAN, M H. & LITTMAN, H. **Predicting the maximum spoutable height in spouted beds os irregularly shaped particles,** Ind. Eng. Chem. Fundamental, vol. 21, p.23-26. 1982

MOURA, R. S. F. **Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium occidentale L.*) em leito fixo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas), Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Federal da Paraíba, Campina grande. 2001, 80f.

MUJUMDAR, A. S. **Spouted beds: Principles and recent developments.** In : XVII Encontro sobre escoamento em meios porosos (Anais). Volume 1, São Carlos – SP, p. 3 – 13,1989.

MURACHARM, B. **Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans lés lits Fluidisés par lés Gaz.** Tese de Doutorado. Toulouse: I.N.P., 1990.

NONHEBEL, G. e MOSS, A. A. H. **El Secado de Sólidos em La Industria Química.** Editora Reverte S.A., 1979.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

OLIVEIRA, C. A.; LIEBSCH, A. E. GIMENES, M. L. **Características de leveduras secas obtidas em spray dryer**. In XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Uberlândia – MG, pp. 259 – 264, 1996.

OZDEMIR, M. and DEYRES, Y.O. **The thin layer characteristics of hazelnuts during roasting**, Journal of Food Engineering, v.42, p.225-233, 1995.

PADUA, E. A. **Importância da parede celular de leveduras (*Saccharomices sp.*) como fonte de fibra na alimentação**, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas: 20(2), p. 233-239, 2000.

PASSOS, M.L.A. **Flow characteristics at two-dimensional spouted and spout-fluidized beds of particles**. PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada. Citado por SOUZA, C.C., Programa simulador para o dimensionamento ótimo de unidades de leito de jorro na secagem de grãos, dissertação de Mestrado, UFMG- Belo Horizonte, 1993, 154p.

PEIXOTO, A. M. e MATTOS, W. R. S. **Observações sobre o valor alimentar do lodo residual das dornas de fermentação alcoólica em usinas de açúcar**. O solo, 1972. In BUTOLO J. E. Uso da Biomassa de Levedura em Alimentação Animal: Propriedades, custo relativo e outras formas de nutrientes, In: ITAL. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – São Paulo, p.71, 1996.

QUADRI, M. G. N.; SANTIN, A. P. e QUADRI, M. B. **Secagem e inativação de leveduras (*S. cerevisiae*)**. In XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (Anais), Uberlândia – MG, p. 208- 213, 1996.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

RHEINBOLDT, R. H. H.; LEIMER, K. H. e ROSSELL, C. E. V. **Sangria e secagem de levedura – Processo CTC**. Boletim técnico Copersucar, São Paulo, 1987.

RICHARDSON, J. F. **Incipient Fluidization and Particles System**. Citado por MURACHMAN, B. "Hydrodynamique et Transferts Thermiques dans les Lit Fluidisés par les Gaz". Dissertação de Doutorado.. Toulouse: I.N.P., 1990.

ROCHA, A. P. T **Estudo do desempenho de um leito de jorro convencional para secagem de leveduras** Dissertação de Mestrado, UFCG. Campina Grande-PB, 2002 , 87p.

ROSE, H. & HARRISON, J. N. **The Yeasts**. London, Academic Press , v. 3. 1970.

SÁ, S. N. **Estudo da cinética da secagem de leveduras Saccharomyces cerevisiae para uso como fonte protéica ração animal**. Dissertação de Mestrado-UFCG- Campina Grande-PB. 2002. 81p.

SALGADO, J. M. A. **Alguns fatores que afetam a qualidade do concentrado protéico obtido em destilarias de álcool**, 1976. In BUTOLO J. E. Uso da Biomassa de Levedura em Alimentação Animal: Propriedades, custo relativo e outras formas de nutrientes, In: ITAL. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – São Paulo, pp.72, 1996.

SANCHEZ, C. V. **Modelagem e predição da atividade de água em produtos alimentícios**. Exame de qualificação de área. Campinas: UNICAMP, 1994. 31p.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

SANTINI, A. P. **Estudo da Secagem e da Inativação de Levedura (*S. Cerevisiae*)**, Dissertação de Mestrado, Santa Catarina, 1996.

SANTOS, V. M.; CAIXETA, A. O.; BURJAILI, M. M.; LIMAVERDE, J. R. E FINZER, J. R. D. **Análise energética de secadores no processamento de levedura termolizada**. In XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos (Anais). Ouro Preto – MG, p. 533 – 544, 1993.

SCHRIMSHAW, N. S. **Nutricional and tolerance considerations in the feedings of single cell protein**. In. International Symposium on Food and Biotechnology, Proceedings of the International Symposium on food Biotechnology. Quebec, 1986.

SILVA, E. L. E FREIRE, J. T. **Transferência de calor em leite de jorro cônico: Determinação do coeficiente de troca térmica parede – leite**. In: XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos (Anais). Volume 1, São Carlos – SP, pp. 163 – 174, 1989.

SILVA, O. S. **Comportamento fluidodinâmico em leite de jorro constituído por mistura de partículas** Dissertação de Mestrado , UFPB, Campina Grande – PB, 1996.

SOUZA, C.C., **Programa simulador para o dimensionamento ótimo de unidades de leite de jorro na secagem de grãos**, Dissertação de Mestrado, UFMG- Belo Horizonte, 1993, 154p.

TEIXEIRA NETO, R. O. e QUAST, D. G. **Isotermas de adsorção de umidade em alimentos**. Coletânea do ITAL, Campinas, v.8, p.141-197, 1977.

Capítulo VIII Referências Bibliográficas

TREYBALL, R. E. Drying. In: **Mass transfer operations**, New York , McGraw-Hill, p.569-75, 1968.

VANANUVAT, P. e KINSELLA, J. E. **Aminoacid composition of protein isolates form *Saccharomyces fragilis***.J. Agric. Food Chem., 1975. Apud BUTOLO J. E. Uso da Biomassa de Levedura em Alimentação Animal: Propriedades, custo relativo e outras formas de nutrientes, In: ITAL. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Animal. Workshop, Campinas – São Paulo, pp.72, 1996.

VILAR, G. C. **Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de banana: Análise da influência das variáveis operacionais**. Dissertação de Mestrado. UFPB. Campina Grande-PB, 1999. 71p.

VITTALI, A . A , **Importância da atividade de água em alimentos** , In: Seminário sobre atividade de água em alimentos, Vol. 1, Campinas, ITAL , 1987.

YALDIZ, O., ERTEKIN, C., UZUN H. I., **Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes**. Energy, v.26, p. 457–465, 2001.

APENDICE I

LEITO DE JORRO E LEITO FLUIDIZADO

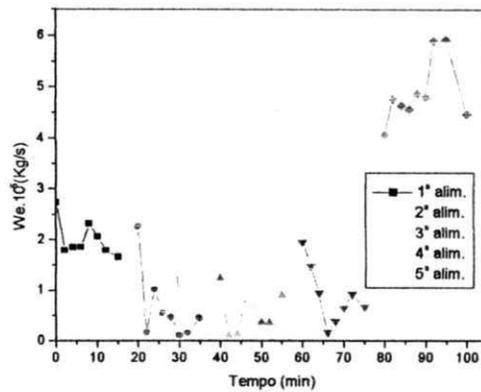


Figura I.1: Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 2\%$ e velocidade 0,199 m/s

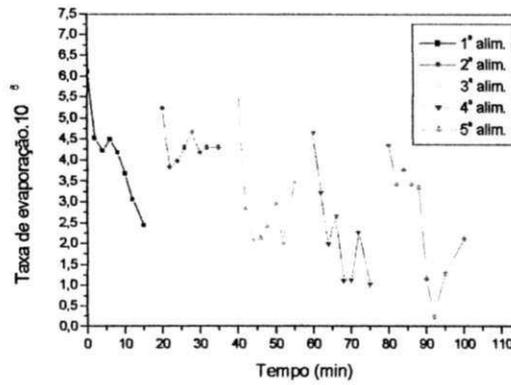


Figura I.2: Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 6,0\%$ e velocidade 0,199 m/s

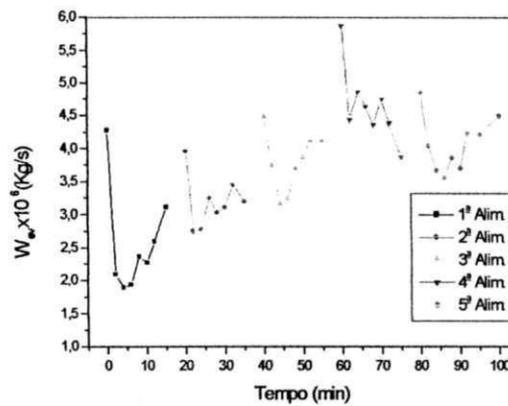


Figura I.3: Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 2,0 \%$ e velocidade 0,227 m/s

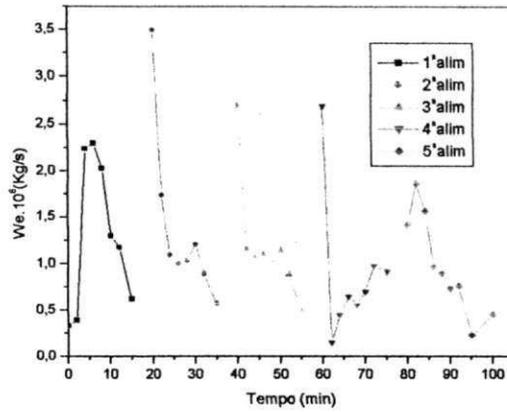


Figura I.4 Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade a 0,213 m/s

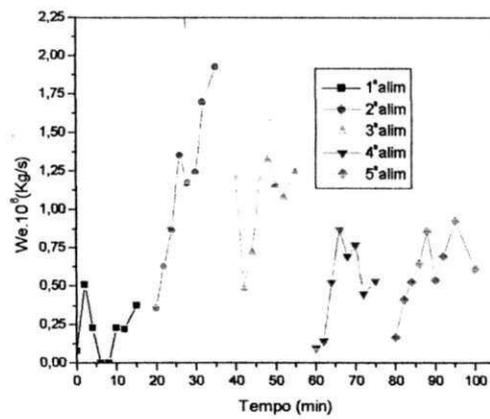


Figura I.5: Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 1,2\%$ e velocidade 0,213 m/s

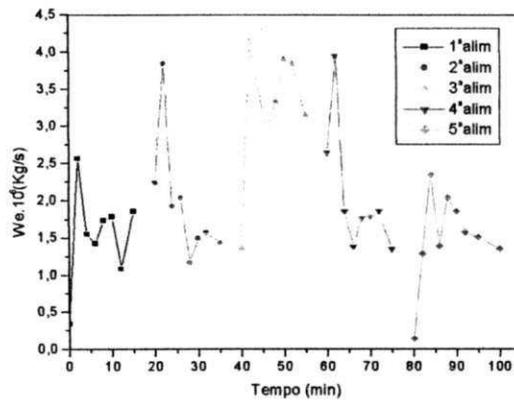


Figura I.6 Taxa de evaporação de água $M_L/M_i 6,8\%$ e velocidade 0,213 m/s

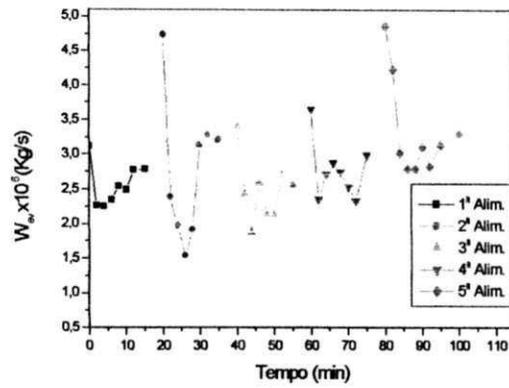


Figura I.7 Taxa de evaporação de água $M_L/M_i = 4,0\%$ e velocidade de $0,241 \text{ m/s}$

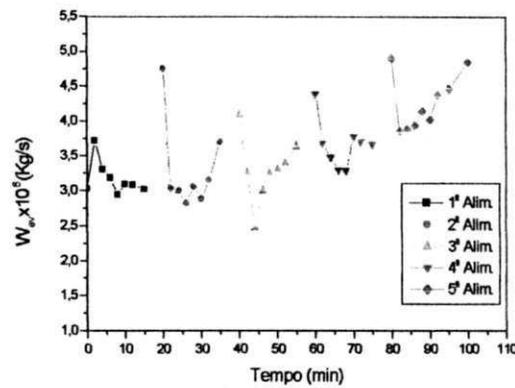


Figura I.8 Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 4,0\%$ e velocidade $0,185 \text{ m/s}$

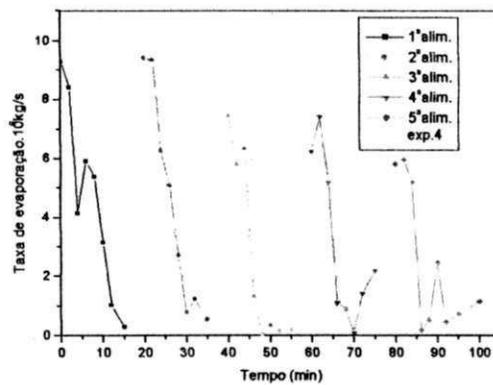


Figura I.9 Taxa de evaporação de água : $M_L/M_i = 15 \%$ e velocidade $0,355 \text{ m/s}$

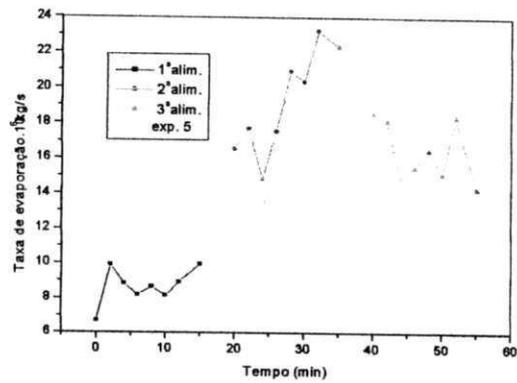


Figura I.10- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade de 0,320 m/s

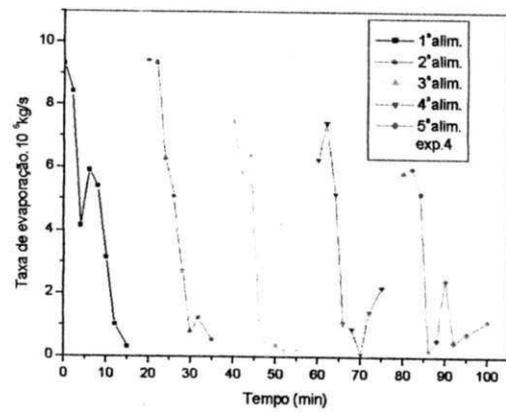


Figura I.11 Taxa de evaporação de água : $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade 0,355 m/s

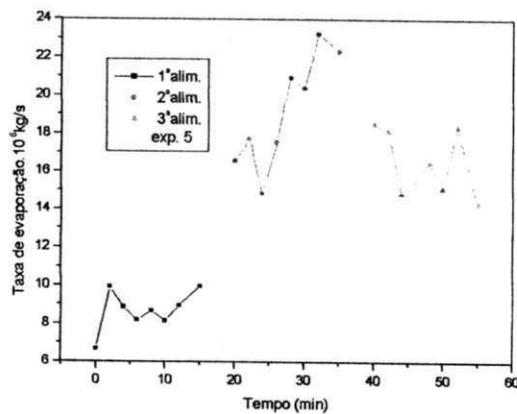


Figura I.12 Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade de 0,320 m/s

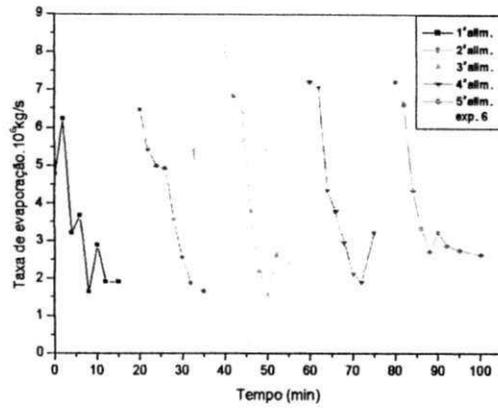


Figura I.13- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade de 0,320 m/

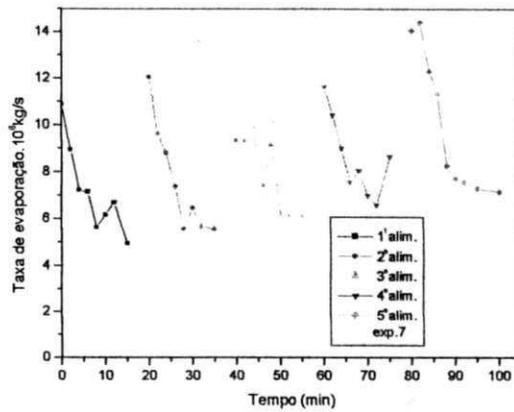


Figura I.14- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320 m/s

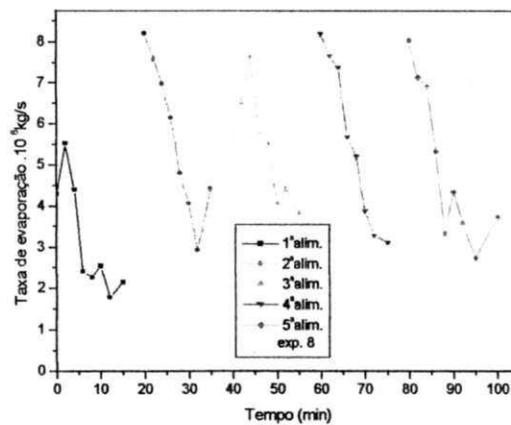


Figura I.15- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,270 m/s

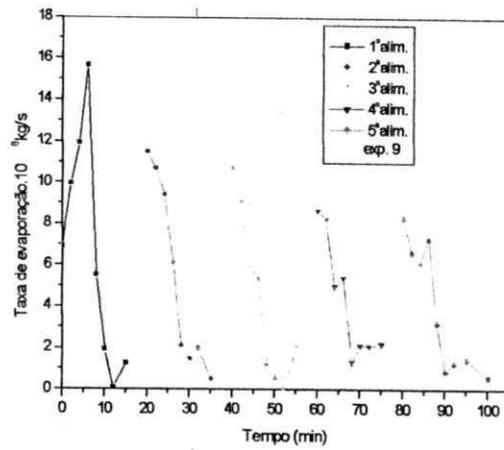


Figura I.16- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 17,5 \%$ e velocidade $0,320 \text{ m/s}$

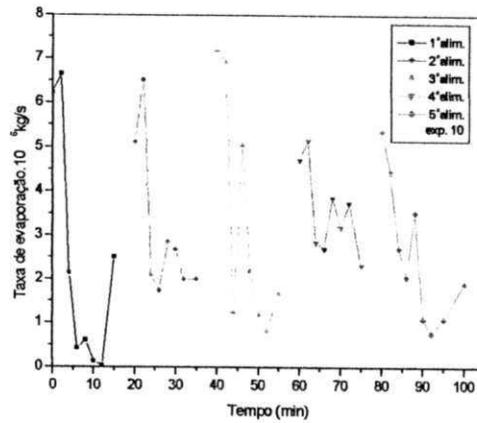


Figura I.17- Taxa de evaporação de água : $M_L/M_i = 9 \%$ e velocidade $0,369 \text{ m/s}$

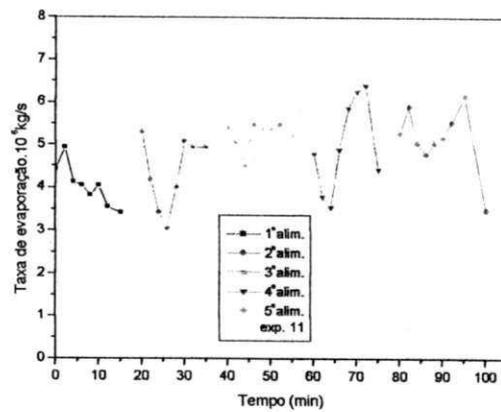


Figura I.18- Taxa de evaporação de água: $M_L/M_i = 0,5 \%$ e velocidade $0,320 \text{ m/s}$

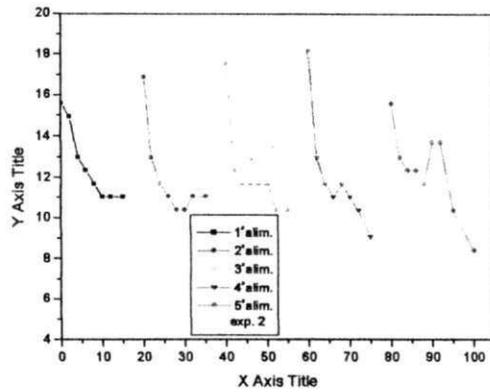


Figura I.19 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 6\%$ e velocidade 0,199 m/s

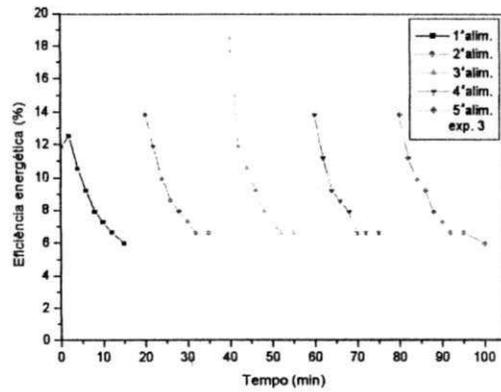


Figura I.20-Eficiência Energética: $M_L/M_i = 2\%$ e velocidade 0,227 m/s

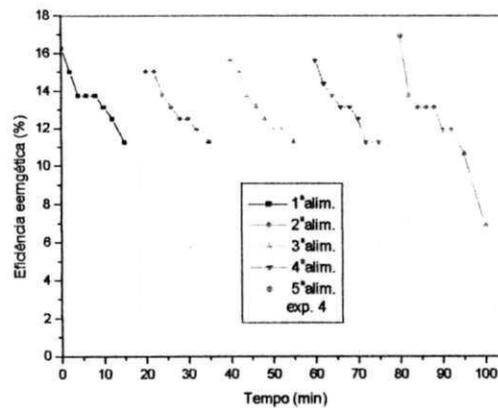


Figura I.21 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 6\%$ e velocidade 0,227 m/s.

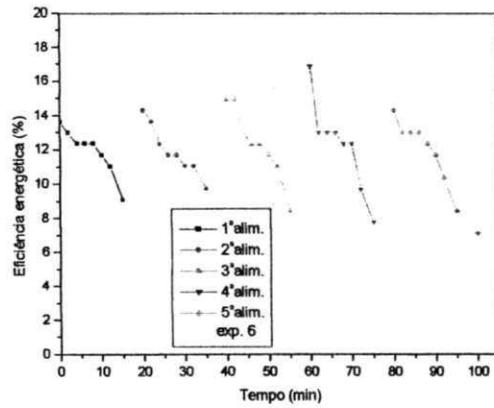


Figura I.22 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade 0,213 m/s

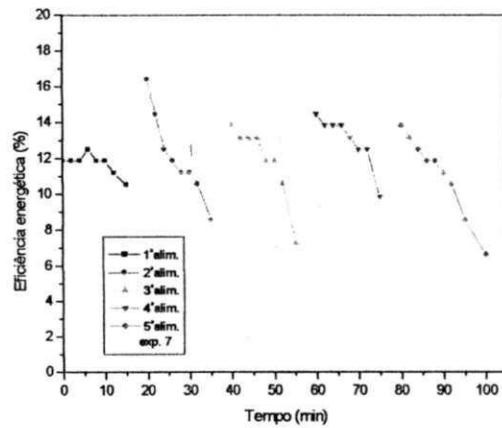


Figura I.23 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade 0,213 m/s

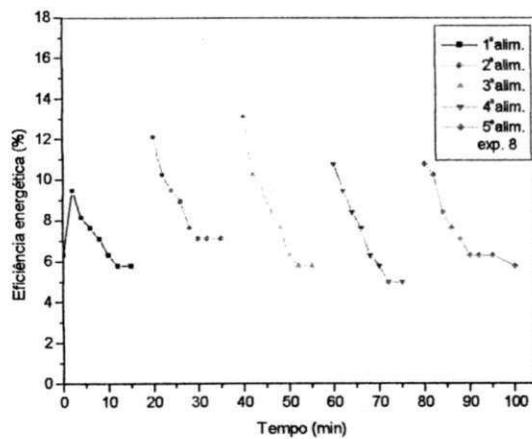


Figura I.24 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 1,2\%$ e velocidade 0,213 m/s.

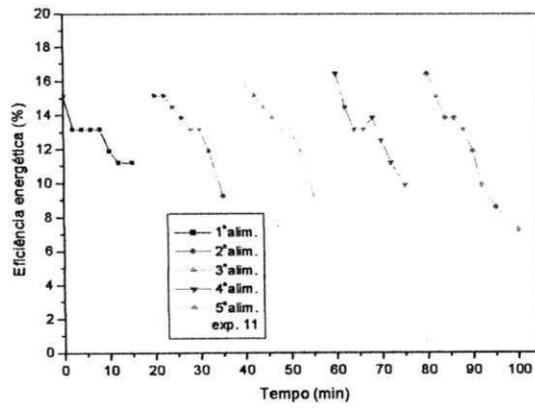


Figura I.25 – Eficiência Energética: $M_L/M_i = 4\%$ e velocidade 0,185 m/s

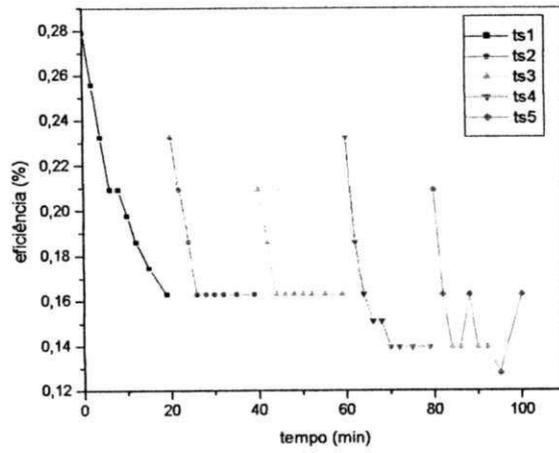


Figura I.26 Eficiência Energética: $M_L/M_i = 3\%$ e velocidade 0,355 m/s

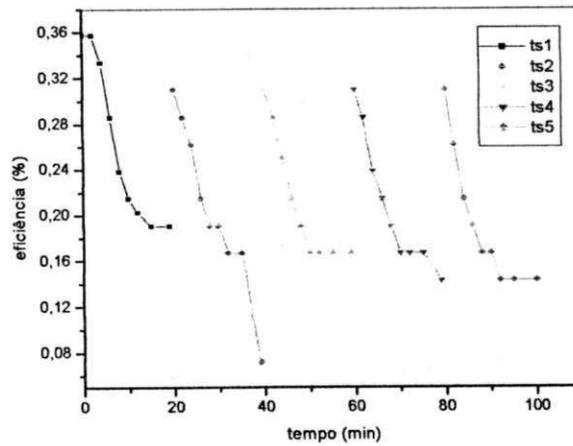


Figura I.27 Eficiência Energética: $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade 0,355 m/s

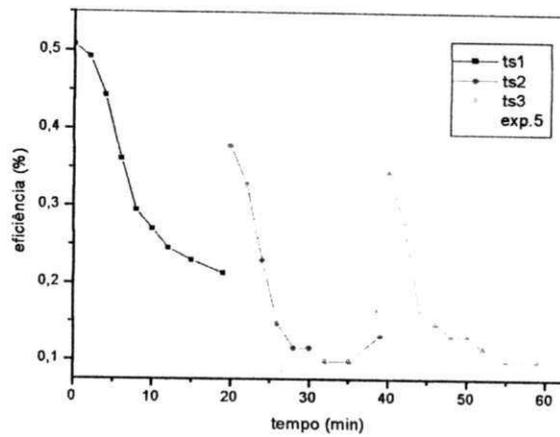


Figura I.28- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320

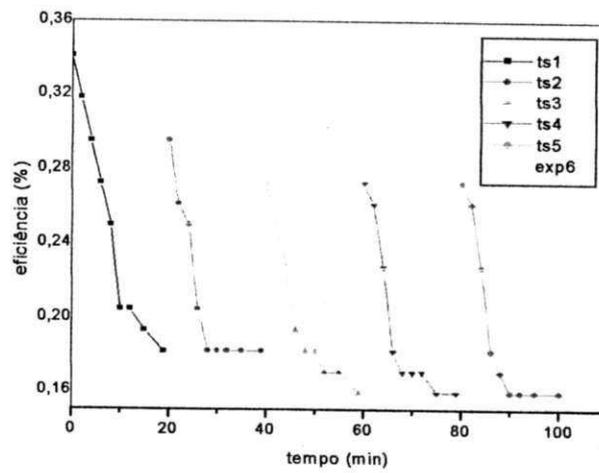


Figura I.29- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320 m/s

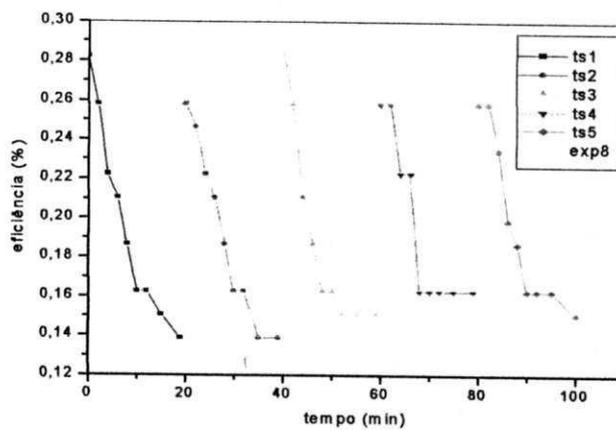


Figura I.30- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,270 m/s

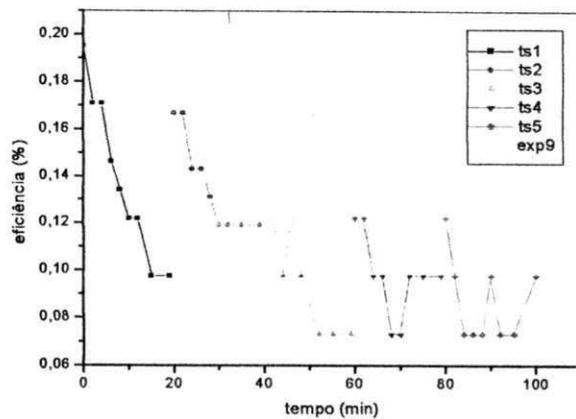


Figura I.31- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 17,5\%$ e velocidade 0,320 m/s

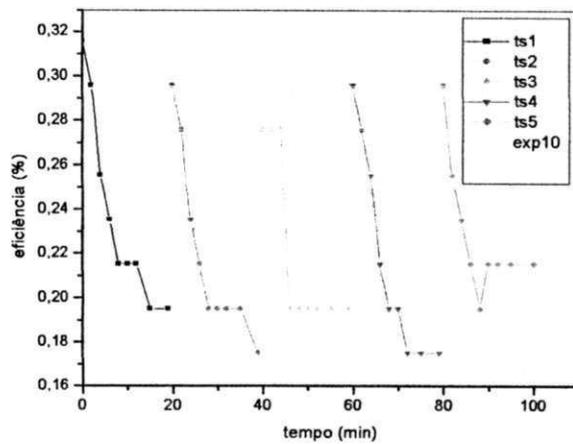


Figura I.32- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,369 m/s

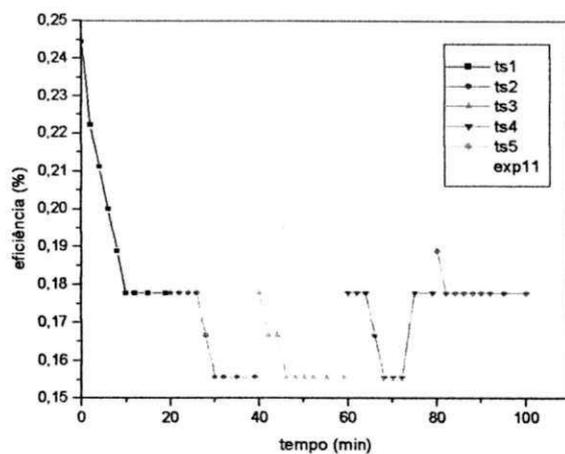


Figura I.33- Eficiência Energética: $M_L/M_i = 0,5\%$ e velocidade 0,320 m/s

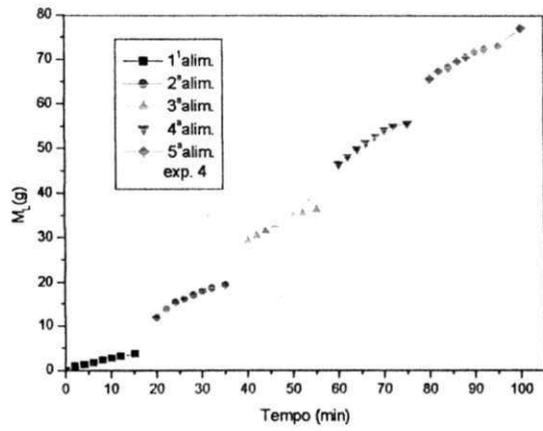


Figura I.34- Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 15\%$ e velocidade 0,355 m/s

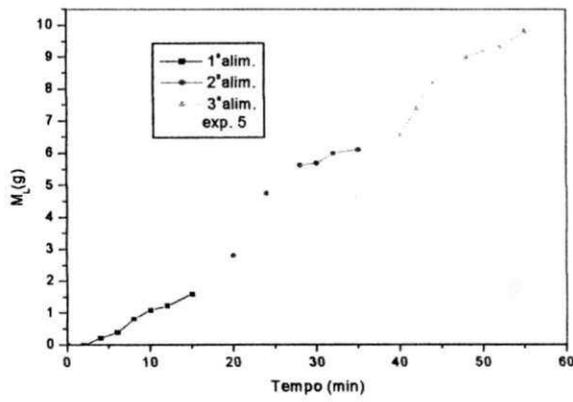


Figura I.35- Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320 m/s

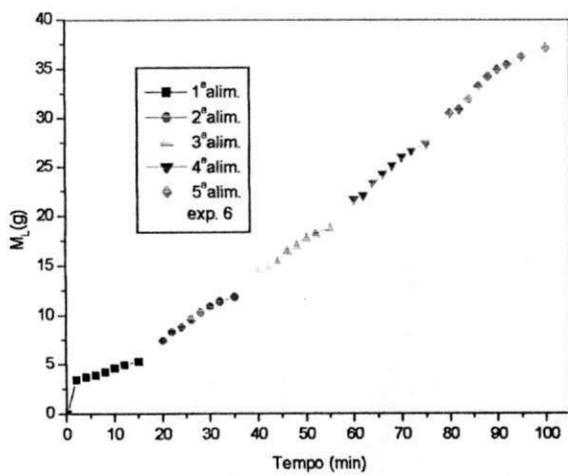


Figura I.36- Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade 0,320 m/s

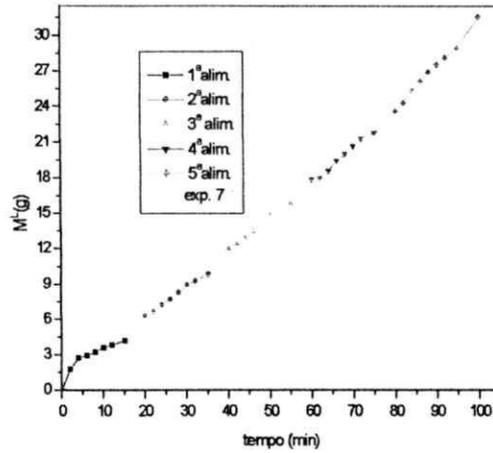


Figura I.37– Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade $0,320$ m/s

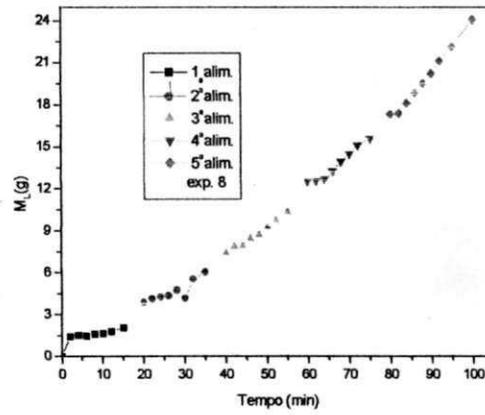


Figura I.38– Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade $0,270$ m/s

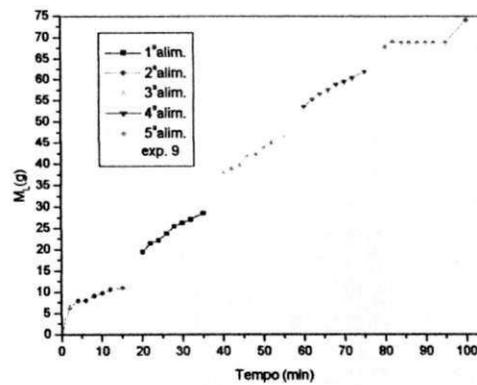


Figura I.39– Massa acumulativa de pó para $M_L/M_i = 17,5\%$ e velocidade $0,320$ m/s

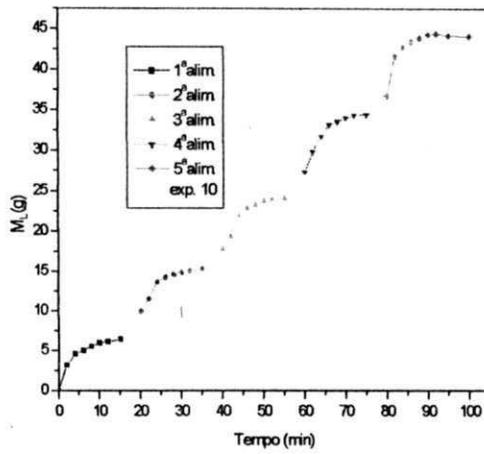


Figura I.40– Massa acumulativa de pó: $M_L/M_i = 9\%$ e velocidade de 0,369 m/s

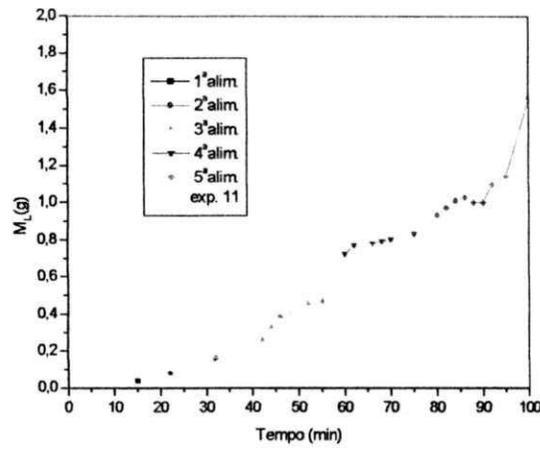


Figura I.41– Massa acumulativa de pó $M_L/M_i = 0,5\%$ e velocidade de 0,320 m/s

APENDICE II

Determinação de proteínas

Proteínas totais

Método de Kjeldahl (A. O. A. C., 1992).

Dosagem de nitrogênio total

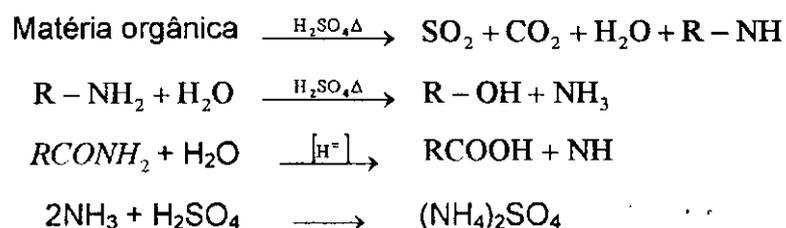
As etapas para a determinação do nitrogênio total foram as seguintes:

1. Digestão

Em um tubo de ensaio próprio para digestão foram adicionados 0,5 g de amostra de levedura seca, 1 g de mistura catalítica (sulfato de potássio e sulfato de cobre) e 10 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 96-98 % , $d = 1,87$), levando-se a digerir por 4 horas e 30 minutos em um digestor Modelo Kjeldatherm, Marca Gerhardt.

A digestão ácida ocorreu em um conjunto fechado para digestão, a uma temperatura de $350^\circ C$. O nitrogênio orgânico é transformado em amônia e os demais componentes orgânicos são convertidos em CO_2 , H_2O , etc. No final da digestão a amostra torna-se incolor, diferente do início da digestão onde apresenta uma cor escura.

As reações químicas que ocorrem durante esta etapa são as seguintes:



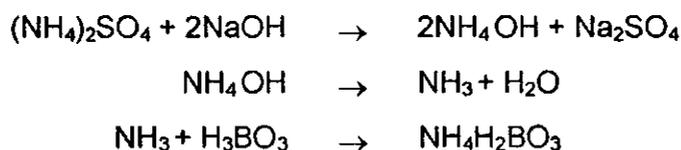
2. Destilação

O tubo contendo a amostra digerida é conectado ao aparelho de destilação (Tecnal, TE - 036/1) adicionando-se 150 ml de água destilada e duas gotas de

fenolftaleína. Para garantir um ligeiro excesso de base, o sulfato de amônio é então saturado com solução de NaOH a 50 % por/volume, ocorrendo a liberação de NH₃. O NH₃ despreendido é recebido em um erlenmeyer previamente adaptado ao conjunto de destilação, contendo solução de H₃BO₃ a 4 % por/volume com indicadores vermelho de metila e verde de bromocresol.

A solução receptora tem a finalidade de fixar o NH₃ para que se proceda a titulação, sendo que o ácido bórico, quando em contato com NH₃, forma o sal NH₄H₂BO₃, o qual possui uma constante de dissociação alta. Esta solução que inicialmente possui cor de rosa adquire cor verde à medida que se forma o NH₄H₂BO₃. A destilação para quando se obtém o triplo do volume inicial do erlenmeyer.

As reações químicas durante o processo de destilação são:



3. Titulação

A quantidade de amônia contida na solução receptora de NH₄H₂BO₃ é determinada através da titulação com solução padrão de HCl 0,1N, com fator de correção previamente determinado, até viragem da cor verde para cor rosa.

A reação química que ocorre durante a titulação é:



A porcentagem de nitrogênio na amostra é dada por:

$$\%N = \frac{V \cdot f \cdot 0,0014 \cdot 100}{m}$$

Onde:

V = volume da solução de HCl;

f = fator de correção para o HCl;

m = massa da amostra.

Sendo a porcentagem de proteína bruta expressa por:

$$\%N \cdot 6,25 = \% \text{ Proteína Bruta}$$

A determinação do fator de correção para o HCl é feita através da titulação do HCl com carbonato de sódio anidro, e deve estar próximo a 1.

O fator de conversão 6,25 é usado para transformar a porcentagem de nitrogênio em proteína. Para tanto, considera-se que as proteínas possuem uma porcentagem de nitrogênio quase constante (em torno de 16 %), ou seja:

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ g de proteína} & \rightarrow & 16 \text{ g N} \\ x \text{ g de proteína} & \rightarrow & 1 \text{ g N} \\ x & = & (100/16) = 6,25 \end{array}$$

O valor de 0,0014 um fator devido ao fato de que 1ml de ácido 0,1N titula 1,401mg N, ou seja, 0,0014 g N (PELLET & YOUNG, 1978)