

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE  
JORRO CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE  
LEVEDURAS**

**ANA PAULA TRINDADE ROCHA**

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA**

**Agosto - 2002**

---

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE JORRO  
CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE LEVEDURAS**

**ANA PAULA TRINDADE ROCHA**

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

Área de Concentração: Operações e Processos

Orientadores: Prof<sup>ª</sup> D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina.

Prof<sup>º</sup> Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva.

---

Campina Grande – Paraíba

Agosto – 2002

---

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**

R 672 e Rocha, Ana Paula Trindade

2002 Estudo do desempenho de um leito de jorro convencional para secagem de leveduras/ Ana Paula Trindade Rocha.- Campina Grande: UFCG, 2002.

87 p.: il.

Dissertação (mestrado) UFCG/Deq

1 – Secagem de Leveduras

CDU: 66.047:664.642

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM LEITO DE JORRO  
CONVENCIONAL PARA SECAGEM DE LEVEDURAS**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15 / 08 /2002.



---

Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina.

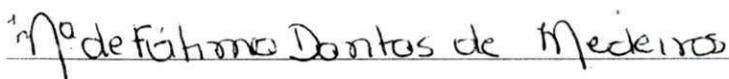
Orientadora



---

Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato Silva.

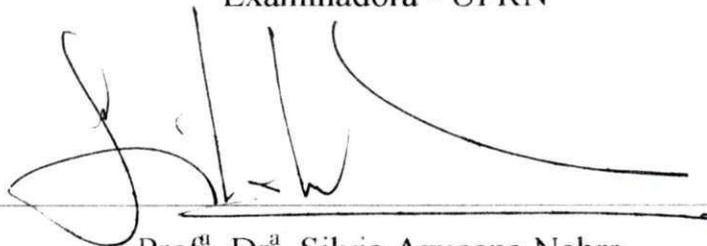
Orientador



---

Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Maria de Fátima Dantas de Medeiros.

Examinadora - UFRN



---

Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Silvia Azucena Nebra.

Examinadora - UNICAMP

Campina Grande, Agosto de 2002.

A Laís, Vinícius e Vitor,

A Flávio,

A meus pais.

Olhar o mundo  
Com a coragem do cego  
Ler da tua boca as palavras  
Com a atenção do surdo  
Falar com os olhos e as mãos  
Com fazem os mudos.

(Cazuza, 1978)

## AGRADECIMENTOS

---

A Deus, minha força, por ser maior que as dificuldades encontradas;

A Professora Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina pela orientação, compreensão e dedicação, não somente neste trabalho, mas durante toda a minha formação profissional. Muito obrigado!

Ao Professor Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva pela orientação e dedicação durante a realização deste trabalho;

Ao Professor Vimário Simões Silva pela contribuição em todo o tempo na elaboração desta dissertação, pelos experimentos realizados em conjunto e pela grande dedicação durante toda a minha vida acadêmica;

A José Lopes pelo auxílio em todos os momentos de trabalho;

A Coordenação de Pós-graduação, em especial a Maria José Bezerra e Maricé Pereira da Silva, pelos serviços prestados;

A CAPES pelo apoio financeiro;

## RESUMO

---

Com finalidade de aproveitar a levedura obtida como sub produto no processo de fabricação de álcool na alimentação animal, foi realizado estudo relacionado à secagem de leveduras, observando-se o desempenho em secador de leito de jorro. O secador utilizado com diâmetro interno 10,3 cm e 25,3 cm de altura e ângulo interno de 60°, é constituído de uma base cônica acoplada a uma coluna cilíndrica em acrílico. Partículas de poliestireno ( $d = 0,326$  cm,  $\rho = 1,045$  g/m<sup>3</sup>) formam o leito de partículas inertes com altura de 8 cm, envolvendo a região cônica e cilíndrica. Inicialmente, foi feito o levantamento das curvas características e a partir dos resultados de velocidade de jorro mínimo definiu-se o nível das velocidades no estudo da secagem de leveduras. Observou-se que a presença da levedura afeta os parâmetros fluidodinâmicos: O valor da queda de pressão máxima diminui em relação à situação apenas com as partículas inertes, este fato está relacionado a uma melhor circulação de sólidos. A queda de pressão de jorro mínimo diminuiu com o aumento da quantidade de levedura alimentada. Quanto à velocidade de jorro mínimo, não houve variação significativa com o aumento da proporção, e até mesmo com a presença da levedura. Foi realizado um estudo sobre a influência das variáveis, velocidade do ar na entrada do secador (0,185, 0,199, 0,213, 0,227 e 0,241m/s) e o percentual de levedura alimentada (1,2, 2, 4, 6 e 6,8% da massa de partículas inertes), na secagem. Avaliou-se a eficiência de produção de levedura seca, a retenção de partículas no leito e as perdas de sólidos após a secagem. De acordo com os resultados obtidos, a eficiência de produção de pó foi alta em todos os experimentos se comparada à secagem de polpas de frutas (MEDEIROS, 2001; MORAIS, 1996). A retenção de sólidos no leito foi baixa, com uma variação de 0% a 23,1%, no entanto as perdas foram elevadas, sugerindo a necessidade de melhorar o método de alimentação. Com relação à cinética de produção de levedura, os resultados indicam que as taxas de produção de pó são praticamente constantes. A análise estatística dos resultados das taxas de produção de levedura seca mostrou que esta aumenta com o aumento do percentual de levedura, para qualquer velocidade, nas

condições estudadas neste trabalho. Quanto à qualidade do produto final, foram feitas determinações de umidade e valor nutricional da levedura seca. A medida do teor protéico nas condições estudadas apresenta valores muito próximos, com os teores de proteínas totais se mantendo praticamente constante, em torno de um valor médio de 51,53%, nível dentro da legislação, que especifica um teor mínimo de proteínas de 25%. O teor de umidade do coletado aumentou com o aumento do percentual de levedura para uma mesma velocidade. Verificou-se que o teor de umidade variou entre 11,19 e 31,34%, sendo que para a maioria dos experimentos ficou acima do exigido pela legislação que é de no máximo 12%. Os resultados encontrados no presente trabalho apontam para a viabilidade do processo proposto, sugerindo, porém a necessidade de maiores estudos visando a otimização das condições operacionais.

## ABSTRACT

---

With the purpose of using the yeast obtained as by-product in the alcohol production on the animal feeding, a study related to the drying of yeasts was carried out. It was observed the performance of a spouted bed dryer. The dryer, whose internal diameter is 10,3 cm, 25,3 cm tall and internal angle 60°, is formed by a conical basis united to an acrylic cylindrical column. Polystyrene particles ( $d = 0,326$  cm,  $\rho = 1,045$  g/m<sup>3</sup>) made the bed of still particles (8 cm tall), involving both the conical and cylindrical regions. At the beginning, it was noted the characteristic curves survey and then with the minimum spouted bed results, the speed level of the yeast drying study was defined. It was observed that the presence of yeast affects the fluidity parameters: the maximum pressure falling was regarding the situation only with the still particles. This fact is related to a better solids circulation. The minimum spouted pressure was reduced with the increase of the amount of yeast fed. Regarding to the minimum jet speed, no significant variation was noticed with the proportion increasing, even on the presence of yeast. A study showed the variable influence, the dryer air entry (0,185, 0,199, 0,213, 0,227 and 0,241m/s) and the fed yeast percentage (1,2, 2, 4, 6 e 6,8% of still particles mass) in the drying. We evaluated the efficiency of dry yeast production, the retention of particles on the bed and the solids tenor after drying. According to the results obtained the efficiency of powder production was high in all the experiments when compared to the fruit pulp drying (MEDEIROS, 2001; MORAIS, 1996). The retention of solids on the bed was low, with a variation from 0% to 23,1%, however the losses were high, suggesting the necessity of improving the feeding method. Regarding to the yeast production kinetic, the results show that the powder production taxes are practically the same. The statistic analysis of the dry yeast production taxes showed that it increases with the yeast percentage increasing, at any speed, under the condition studied. Regarding to the final product quality, it was determined the dampness and nutritional values of the dry yeast. The tenor of protein measure under the condition studied presents very closed values with the total proteins tenors practically constant, at

a medium value of 51,53%, an accepted level according to the legislation that specifies a protein minimum tenor of 25%. The dampness tenor increased with the increasing of yeast percentage at the same speed. It was verified that the dampness tenor varied between 11,19% and 31,34%, with most of them above what is demanded by the legislation (a maximum of 12%). The results obtained show the viability of the process, suggesting, however, the necessity of complementary studies with the purpose of improving the operational condition.

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

A	Área da superfície exposta, (m <sup>2</sup> )
A <sub>c</sub>	Área da seção transversal da coluna (cm <sup>2</sup> )
a <sub>p</sub>	Área específica da partícula inerte (m <sup>-1</sup> )
D <sub>ef</sub>	Coefficiente de difusão (m <sup>2</sup> /h)
D <sub>i</sub>	Diâmetro do orifício de entrada do ar (cm)
d <sub>m</sub>	Diâmetro médio da mistura (cm)
D <sub>c</sub>	Diâmetro da coluna (cm)
d <sub>v</sub>	Diâmetro da esfera de igual volume (m)
f	Fator de correção para o HCl
G	Aceleração da gravidade (981 cm/s <sup>2</sup> )
h	Coefficiente de transferência de calor (W/m <sup>2</sup> . °C)
h <sub>u</sub>	Coefficiente de transferência de massa (kg/m <sup>2</sup> s)
H <sub>vap</sub>	Calor de vaporização (J/mol)
H	Altura do leito (cm)
L	Espessura média (m)
m	Massa seca de sólido (kg)
m <sub>i</sub>	Massa inicial da amostra (g)
m <sub>f</sub>	Massa final da amostra após a secagem em estufa (g)
m <sub>ss</sub>	Massa de sólido seco (g)
M <sub>g</sub>	Massa do leito (g)
M	Taxa de produção (g/min)
M <sub>I</sub>	Massa de inerte (g)
M <sub>L</sub>	Massa de levedura (g)
ΔP <sub>M</sub>	Queda de pressão máxima (N/m <sup>2</sup> )
ΔP <sub>jm</sub>	Queda de pressão de jorro mínimo (N/m <sup>2</sup> )

P	Perdas (%)
R	Eficiência de produção (%)
r	Retenção (%)
t	Tempo (min)
T <sub>a</sub>	Temperatura ambiente, (°C)
T <sub>bu</sub>	Temperatura de bulbo úmido, (°C)
T <sub>S</sub>	Tempo de Secagem (s)
U	Velocidade (m/s)
U <sub>jm</sub>	Velocidade de jorro mínimo (m/s)
V	Volume da solução de HCl (ml)
X <sub>i</sub>	Conteúdo de umidade inicial (g/g)
X <sub>(I,S)</sub>	Umidade da levedura seca (g/g)
X <sub>(L)</sub>	Umidade da levedura (g/g)
X <sub>(R)</sub>	Umidade da levedura retida no leito(g/g)
X <sub>e</sub>	Umidade de equilíbrio
dX/dt =	Taxa de secagem
X <sub>(b,u)</sub>	Umidade em base úmida (g/g)
X <sub>(b,s)</sub>	Umidade em base seca (g/g)

## SÍMBOLOS GREGOS

$\phi$	Esfericidade da partícula inerte
$\epsilon_l$	Porosidade do leito
$\epsilon_m$	Porosidade da mistura
$\rho_l$	Densidade aparente do leito (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	Densidade do inerte (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	Densidade do ar (Kg/m <sup>3</sup> )

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1	Micrografia do fermento biológico	4
Figura 2.2	Propagação do fermento	5
Figura 2.3	Curva característica da cinética de secagem.	11
Figura 2.4	Taxa de secagem em função da umidade.	12
Figura 2.5	Diagrama esquemático do leito de jorro convencional	18
Figura 2.6	Curva característica da queda de pressão	22
Figura 3.1	Fermento biológico fresco (Fleischmann)	33
Figura 3.2	Secador de leito de jorro cone-cilíndrico convencional	35
Figura 4.1	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade. $M_1/M_1 = 0\%$	45
Figura 4.2	Curva característica de queda de pressão em função da velocidade. $M_1/M_1 = 2\%$	45
Figura 4.3	Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar.	46
Figura 4.4	Queda de pressão máxima em função de $M_1/M_1$	47
Figura 4.5	Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar.	48
Figura 4.6	Velocidade de Jorro Mínimo em função de $M_1/M_1$	48
Figura 4.7	Massa de levedura coletada em função do tempo	54
Figura 4.8	Eficiência de produção de levedura em função do tempo	54
Figura 4.9	Valores observados versus valores preditos	58
Figura 4.10	Superfície de resposta para taxa de produção	59
Figura 4.11	Umidade em função da velocidade do ar. Sobre os pontos estão indicados o número do experimento.	61

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1	Composição em Minerais	7
Tabela 2.2	Composição Bromatológica da Levedura (Sangria do Leite de Levedura)	8
Tabela 2.3	Composição em Aminoácidos	8
Tabela 2.4	Composição em Vitaminas	9
Tabela 2.5	Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão máxima	24
Tabela 2.6	Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão de jorro mínimo	24
Tabela 2.7	Resumo das correlações para o cálculo da velocidade de jorro mínimo	25
Tabela 3.1	Propriedades Físicas do Poliestireno	34
Tabela 3.2	Valores reais e codificados das Variáveis do Planejamento Fatorial $2^2$ + Configuração Estrela	37
Tabela 3.3	Matriz de Planejamento Experimental Fatorial $2^2$ mais Configuração Estrela	38
Tabela 4.1	Valores dos parâmetros fluidodinâmicos em função da concentração de levedura alimentada.	49
Tabela 4.2	Queda de pressão máxima determinada por correlações e experimentalmente ( $N/m^2$ )	50
Tabela 4.3	Queda de pressão de jorro mínimo determinado por correlações e experimentalmente ( $N/m^2$ )	50
Tabela 4.4	Velocidade de jorro mínimo determinado por correlações e experimentalmente (m/s)	51
Tabela 4.5	Resultados de secagem	52
Tabela 4.6	Resultados da regressão linear de massa acumulativa em função do tempo	55

Tabela 4.7	Taxas de produção da levedura seca	56
Tabela 4.8	Análise de variância para a taxa de produção	57
Tabela 4.9	Resultados do teor de umidade e proteína	60
Tabela 4.10	Resultados do teor de umidade e proteínas totais da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , comparados com valores da literatura.	62
Tabela A.1	Valores de queda de pressão e velocidade obtidas. Mp/Mi = 0 %	73
Tabela A.2	Valores de queda de pressão e velocidade obtidas. Mp/Mi = 2 %	74
Tabela A.3	Valores de queda de pressão e velocidade obtidas. Mp/Mi = 4 %	75
Tabela A.4	Valores de queda de pressão e velocidade obtidas. Mp/Mi = 6 %	76
Tabela B.1	Condições ambiente nos experimentos	77
Tabela B.2	Cinética de Produção – Experimento 1	78
Tabela B.3	Cinética de Produção – Experimento 2	78
Tabela B.4	Cinética de Produção – Experimento 3	78
Tabela B.5	Cinética de Produção – Experimento 4	78
Tabela B.6	Cinética de Produção – Experimento 5	79
Tabela B.7	Cinética de Produção – Experimento 6	79
Tabela B.8	Cinética de Produção – Experimento 7	79
Tabela B.9	Cinética de Produção – Experimento 8	79
Tabela B.10	Cinética de Produção – Experimento 9	80
Tabela B.11	Cinética de Produção – Experimento 10	80
Tabela B.12	Cinética de Produção – Experimento 11	80

# SUMÁRIO

---

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - LEVEDURAS	3
2.1.1 – OBTENÇÃO DA LEVEDURA	5
2.1.1.1 – Sangria do Leite de Levedura	6
2.1.1.2 – Fundo de Dorna	6
2.1.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LEVEDURA	7
2.2 – SECAGEM	9
2.2.1 – PERÍODO DE VELOCIDADE CONSTANTE	12
2.2.2 – PRIMEIRO PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE	14
2.2.3 – SEGUNDO PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE	16
2.3 – O LEITO DE JORRO	17
2.4 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DO LEITO DE JORRO	21
2.4.1 – QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA ( $\Delta P_M$ )	23
2.4.2 – QUEDA DE PRESSÃO DE JORRO MÍNIMO ( $\Delta P_{jm}$ )	24
2.4.3 – VELOCIDADE DE JORRO MÍNIMO ( $U_{jm}$ )	25
2.5 – SECAGEM DE LEVEDURAS	26
2.6 – UTILIZAÇÃO DA LEVEDURA NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL	29
2.7 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	30
2.7.1 – PLANEJAMENTO FATORIAL E ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	31
CAPÍTULO III - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS	33
3.1 – MATERIAIS	33
3.1.1 – MATÉRIA PRIMA	33
3.1.2 – PARTÍCULAS INERTES	34
3.2 - EQUIPAMENTOS	35

3.2.1 – SECADOR EM LEITO DE JORRO	35
3.2.2 – EQUIPAMENTOS AUXILIARES	36
3.3 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	37
3.3.1 – PREPARAÇÃO DA LEVEDURA	38
3.3.2 – ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS	38
3.3.3 – ENSAIOS DE SECAGEM	39
3.3.4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA LEVEDURA	40
3.3.4.1 – Umidade	41
3.3.4.2 – Proteínas Totais	41
3.3.5 – DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO	42
3.3.6 – DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ACUMULATIVA DE PRODUÇÃO	42
3.3.7 – DETERMINAÇÃO DO MATERIAL RETIDO NO LEITO	42
3.3.8 – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS	43
3.3.9 – CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE LEVEDURA SECA	43
CAPÍTULO IV - RESULTADO E DISCUSSÃO	44
4.1 – ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS	44
4.1.1 – EFEITO DA PRESENÇA DE LEVEDURAS NOS PARÂMETROS FLUIDODINÂMICAS	46
4.1.2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS CORRELAÇÕES PROPOSTAS	49
4.2 – DESEMPENHO DO SECADOR	51
4.2.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SECAGEM	51
4.2.2 – CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE LEVEDURA SECA	53
4.2.2.1 – Superfície de Resposta – Taxa de Produção	56
4.3 - QUALIDADE DO PRODUTO FINAL	59
4.3.1 – TEOR DE UMIDADE E PROTEÍNAS TOTAIS	59
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	64
CAPÍTULO VI - SUGESTÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	68
APÊNDICE	72

# CAPÍTULO I

---

## INTRODUÇÃO

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, e isto ocorre devido ao constante aumento nos preços dos cereais e suplementos protéicos. Atualmente, existe uma tendência mundial das indústrias de alimentos em substituir as proteínas de origem animal pelas proteínas vegetais. Quatro categorias de microrganismos são cultivadas como fonte de proteína para consumo humano e animal: bactérias, algas, fungos e leveduras (PACHECO, 1996).

As leveduras são microrganismos que possuem uma elevada velocidade de crescimento, possibilidade de ser cultivados em diversos tipos de substratos além de possuir um elevado teor de proteínas (45 – 65%), sendo por isso considerados uma boa fonte protéica “não convencional”;

Segundo GHIRALDINI et alli (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 cana-de-açúcar, a exemplo da levedura, para produção de álcool utiliza-se à espécie *Saccharomyces cerevisiae*, que pode ser usada como fonte de proteínas, vitaminas, principalmente do complexo B, palatilizante, além de melhorar a conversão alimentar. 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).

Embora a utilização da proteína de levedura seja promissora, há alguns fatores que limitam seu uso por humanos: resistência da parede celular à ação de enzimas digestivas, tornando os componentes intracelulares parcialmente indisponíveis; os altos teores de ácidos nucléicos, principalmente o ácido ribonucléico (RNA) que se ingerido

em quantidades superiores a 2g/dia podem causar formação de cálculos renais e deposição de ácido úrico nas juntas ósseas, causando a doença conhecida por gota.

Para que seja comercializado a produtores de ração animal é necessário que as leveduras encontrem-se dentro das especificações exigidas pelo mercado, principalmente nos aspectos relacionados à cor, à granulometria, ao teor de proteína (mínimo: 25%) e o teor de umidade (máximo: 12%), que estando abaixo de 12% evita o aparecimento de bolores e “empedramento” do produto. Dentro do que foi exposto, observa-se que a operação de secagem torna-se indispensável, pois coloca a biomassa de leveduras sob a forma física que facilita o armazenamento, o transporte e, conseqüentemente a comercialização.

Durante a realização deste trabalho, foram feitos estudos relacionados à secagem de leveduras, observando-se o desempenho em secador de leito de jorro variando as seguintes condições de operação: vazão do ar na entrada do secador e percentual de levedura alimentada. Foram avaliados fatores como rendimento, retenção e desempenho do processo, através do levantamento das curvas de cinética e eficiência de produção em diversas condições operacionais, visando a qualidade do produto final obtido, tendo em vista seu aproveitamento como complemento protéico em alimentação animal.

## CAPÍTULO II

---

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - LEVEDURAS

A levedura é o mais importante e o mais utilizado microrganismo na indústria. É produzida para ser aplicada na produção de pães e biscoitos, na produção de álcool, como fonte de matéria-prima alimentar, como fonte de vitaminas e outros fatores de crescimento.

Os dois processos industriais mais conhecidos são a produção da levedura para panificação e produção de álcool e bebidas alcoólicas. As bebidas alcoólicas mais conhecidas são: cervejas, vinhos e licores.

Classificam-se fundamentalmente por suas características morfológicas, como a forma e a estrutura. Entretanto para os microbiólogos dos alimentos são mais importantes certas propriedades fisiológicas, como atividade de água, temperatura ideal para o crescimento e concentração de solutos no meio (FRAZIER & WESTHOFF, 1985).

A maior parte da levedura empregada na indústria é a *Hemiascomycetes* do gênero *Saccharomyces* (*Saccharo* vem de doce e *myces* de fungo). As células deste gênero de leveduras podem ser redondas, ovuladas ou alargadas. Tecnicamente é chamada de levedura sendo cientificamente denominada *Saccharomyces cerevisiae*. Espécies deste tipo são organismos microscópicos de célula única, viva e tem as mesmas funções de qualquer ser vivo: respira, se alimenta, excreta, dentre outras funções vitais. A Figura 2.1 apresenta uma microfotografia de fermento biológico. Uma levedura tem, geralmente, 100 vezes o tamanho de uma bactéria, sendo seu tamanho muito próximo ao de uma hemácia (célula da corrente sanguínea). As 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 se apresentem com cápsula, constituída de hidratos de carbono.

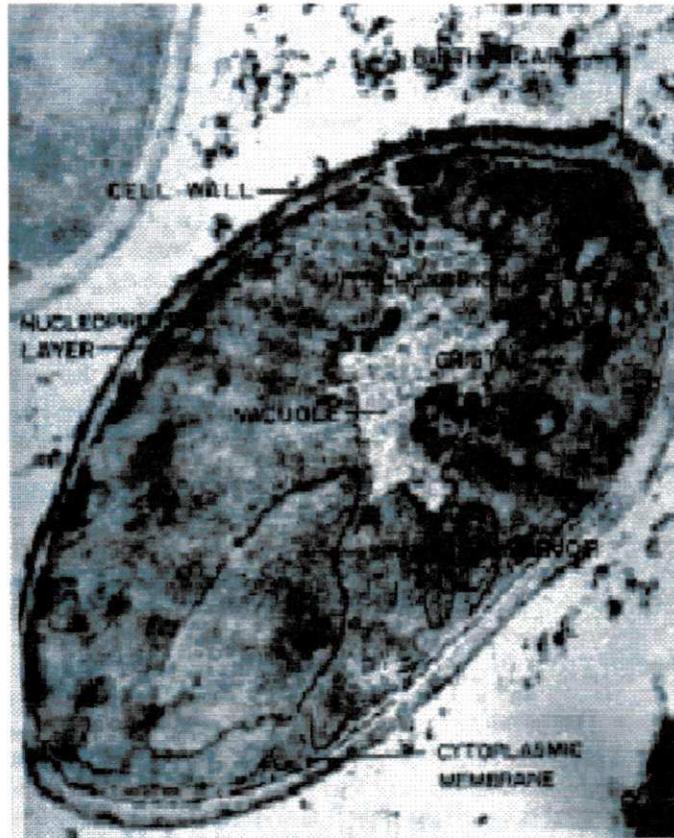


Figura 2.1 – Micrografia do fermento biológico

Geralmente, a levedura se reproduz de forma assexuada chamada gemulação ou brotamento, também sendo chamada de reprodução vegetativa. É um processo onde a levedura duplica o material de seu interior e se divide em duas. Na Figura 2.2 tem-se uma seqüência de microfotografias onde se percebe a reprodução do fermento. Na foto 1 tem-se o fermento. Na primeira fileira de fotos o fermento inicia a duplicação do material de seu interior e conseqüentemente aumenta de tamanho. Logo após o fermento inicia o brotamento e na terceira fileira vê-se o crescimento da gêmula, até que se atinja

duas células de levedura independentes. Este processo se repete continuamente, dependendo da disponibilidade de nutrientes. Deve-se atentar somente ao fato de que existe um número máximo de células que podem brotar de uma célula “mãe”.

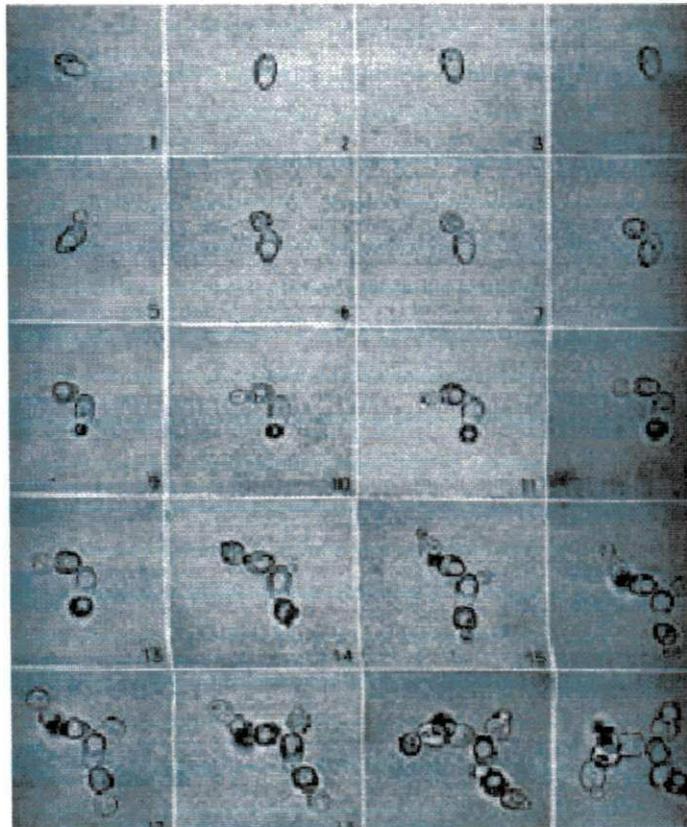


Figura 2.2 – Propagação do fermento

### 2.1.1 – OBTENÇÃO DA LEVEDURA

Segundo BUTOLO (1991) no processo da produção de álcool, as leveduras de recuperação podem ser obtidas 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 usinas e consiste em desviar parte do “leite” centrifugado do processo de fabricação alcoólica. GHIRALDINI et alli (1996) relata que ensaios realizados em Usina Cooperada e em laboratório apontam que sangrias da ordem de 20 a 80 Kg/m<sup>3</sup> de álcool produzido não acarretam prejuízos no rendimento fermentativo. A prática operacional tem indicado valores entre 20 a 30 Kg/m<sup>3</sup> de álcool produzido.

A fermentação deve apresentar-se de uma maneira geral bem conduzida, com eficientes controles de temperatura e tratamento do pé-de-cuba, livre de infecção e/ou tendência de floculação. Deve-se utilizar caldo decantado para o mosto, desta maneira será obtida uma levedura seca de coloração clara, tendendo à cor palha, com menor teor de sais (cinzas) e fibra (bagacilho), resultando 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 a custo zero. O material que permanece no fundo das dornas, 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, 1972). A qualidade é inferior àquela obtida do leite de levedura, devido à alta concentração de minerais e impurezas, além da grande variação na composição química.

## 2.1.2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LEVEDURA

Segundo KRIDER et alli (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. Sendo o mais importante o substrato utilizado, isto porque afeta a taxa de crescimento e a composição, principalmente, de proteínas e lipídeos (VANANUVAT & KINSSELA, 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), observou-se que há um aumento de 33 para 42% de proteína bruta, resultante de quatro lavagens, entretanto, houve perdas de matéria seca, proteínas e minerais do material original.

Tabela 2.1 – Composição em Minerais

<b>Parâmetros</b>	<b>Composição</b>
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 2.2 – Composição Bromatológica da Levedura (Sangria do Leite de Levedura)

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

FONTE: BUTOLO (1996)

Tabela 2.3 – Composição em Aminoácidos

<b>Parâmetros</b>	<b>Composição %</b>
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)

Tabela 2.4 – Composição em Vitaminas

<b>Parâmetros</b>	<b>Composição mg/Kg</b>
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 Tabela 2.1 mostra a composição das leveduras com relação aos minerais, apresentam variação de 4 a 7%, sendo o potássio e o fósforo os maiores componentes. A Tabela 2.2 apresenta a composição bromatológica das leveduras. Os carboidratos representam 45 a 55% do peso da levedura. A fração de extrato etéreo é baixa e compreende aproximadamente proporções iguais de triglicérides e fosfolipídeos. Os ácidos graxos são de cadeias longas, saturadas e insaturadas de número par e ímpar de átomos de carbono (KANEKO et alii, 1976). Segundo BUTOLO (1996) a composição em aminoácidos (Tabela 2.3) das leveduras é bem balanceada. Quanto às vitaminas, mostrada na Tabela 2.4, afirma-se que as leveduras são fontes muito ricas do complexo B. Embora a levedura tenha sido pesquisada como fonte de proteínas, ela pode ser utilizada como suplemento vitamínico.

## 2.2 – SECAGEM

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

Desta forma, a secagem tem como objetivo principal remoção de água do produto através da evaporação. Por isso, é necessária a utilização de calor para evaporar a umidade da superfície do produto através de um meio de secagem externo, normalmente o ar.

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, 1972; DAUDIN, 1983).

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

- Movimento de líquido devido às forças superficiais (difusão capilar);
- Movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão líquida);
- Movimento de líquido devido à 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 (1972) o fenômeno de secagem não pode ser generalizado, uma vez que se trata de materiais biológicos e possuem características intrínsecas as quais podem ser diferentes entre si, com 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) os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e dimensões, além das condições de secagem serem muito diversas,

conforme as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto quando colocado em contato com ar quente promove uma transferência do calor do ar ao produto o que sob o efeito da diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água, uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. A evolução destas transferências de calor e massa provoca a existência de três períodos de secagem. O primeiro é chamado de período de aquecimento; o segundo período de secagem a taxa constante e o terceiro, é o 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 de taxa decrescente. Estes períodos estão ilustrados nas Figuras 2.3. e 2.4.

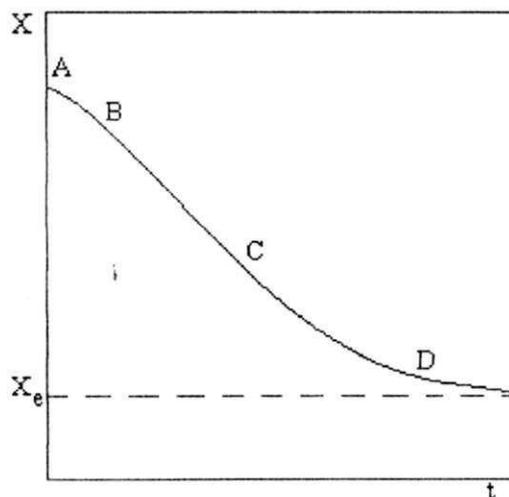


Figura 2.3. Curva característica da cinética de secagem.

Onde:  $X$ : teor de umidade (massa de líquido/massa de sólido seco)

$X_e$ : teor de umidade de equilíbrio

$t$ : tempo (horas)

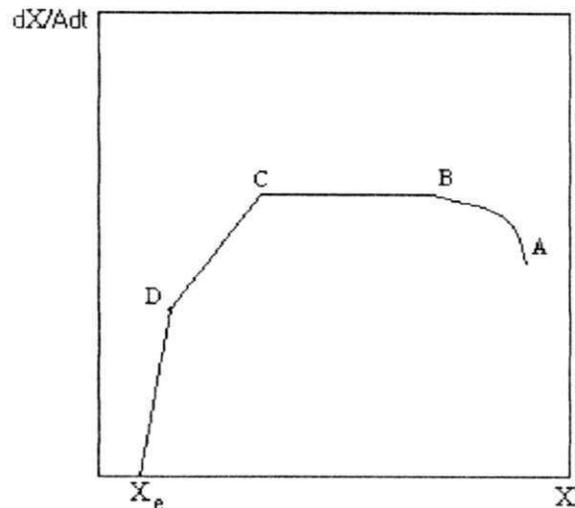


Figura 2.4 - Taxa de secagem em função da umidade.

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, 1963).

### 2.2.1 – PERÍODO DE VELOCIDADE CONSTANTE

“O período de velocidade constante (trecho BC das Figuras 2.3 e 2.4) é caracterizado pelo fato da velocidade de secagem ser independente da umidade total do material em cada instante. Durante este período, a superfície exposta do material está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o sólido, que age como se não existisse o sólido. Assim sendo, o mecanismo de secagem é semelhante ao mecanismo de evaporação de água num reservatório. Nessas condições, a temperatura da superfície do material alcança a temperatura de bulbo úmido do gás.

Se o sólido não é poroso, a água removida neste período é principalmente a água superficial. Se, por outro lado, o sólido é poroso, o período de velocidade constante continua durante um tempo maior, com a água removida da superfície sendo substituída pela água do interior do sólido. O mecanismo através do qual o líquido é levado até a

superfície e, conseqüentemente, a velocidade deste mecanismo varia fortemente com a estrutura do sólido. Em sólidos que possuem espaços vazios relativamente grandes, o mecanismo provavelmente é controlado pela tensão superficial e por forças de gravidade no seu interior. Em sólidos fibrosos ou de estrutura amorfa, o movimento do líquido através do sólido é devido à difusão. Como a velocidade de difusão é muito menor que a velocidade decorrente do mecanismo de capilaridade ou de gravidade, os sólidos em que o movimento do líquido é controlado por difusão têm um período de velocidade constante menor, ou mesmo podem secar sem passar pelo período de velocidade constante.” (ITAL, 1997).

O período de velocidade constante pode não existir se o sólido a ser secado contiver um teor de umidade inferior à umidade crítica.

A taxa de secagem neste período pode ser calculada utilizando a equação de transferência de massa e de transferência de calor. Devido a superfície do material estar úmida e a temperatura do material ser igual à 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:

$$m \cdot \frac{dX}{dt} = h_u \cdot A \cdot (U_s - U_a) \quad (2.1)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h \cdot A \cdot (T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \quad (2.2)$$

Onde:

X = umidade (base seca) do sólido, kg/kg;

h = coeficiente de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>. °C);

h<sub>u</sub> = coeficiente de transferência de massa (kg/m<sup>2</sup> s)

A = área da superfície exposta, (m<sup>2</sup>);

T<sub>a</sub> = temperatura ambiente, (°C);

T<sub>bu</sub> = temperatura de bulbo úmido, (°C);

H<sub>vap</sub> = calor de vaporização (J/mol).

U<sub>s</sub> e U<sub>a</sub> = umidades de saturação (na T<sub>bu</sub>) e do ar ambiente

m = massa seca de sólido (kg)

A velocidade de secagem durante o período de 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 e 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), poucas 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.

## **2.2.2 – PRIMEIRO PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE**

O primeiro período de velocidade decrescente (trecho CD das Figuras 2.3 e 2.4) começa no instante em que o material atinge o ponto de umidade crítica. Este ponto, também chamado de ponto crítico, indica o instante em que o movimento do líquido do interior do sólido para a superfície é insuficiente para manter um filme contínuo sobre a superfície do sólido. Desta forma, a superfície do material torna-se cada vez mais seca. No ponto D, praticamente não há nenhuma parte da superfície saturada de líquido. Durante este período tem-se dois mecanismos: o mecanismo que existia no período de velocidade constante continua a existir, enquanto houver líquido saturando nas regiões da superfície. Ao mesmo tempo, o vapor proveniente dos níveis mais baixos se difunde através do sólido para as regiões da superfície que não estão saturadas, tendo, em seguida, que se difundir no seio da corrente gasosa. Este mecanismo de difusão é muito lento em comparação com o mecanismo de evaporação de água num reservatório. Por esta razão, a velocidade de secagem diminui rapidamente à medida que a umidade diminui.

Para estimar o tempo médio de secagem durante o primeiro período de taxa decrescente a segunda lei de Fick tem sido usada em diversos trabalhos (CHEN e JONHSON, 1969; VACAREZZA et alli, 1974; MOWLAH et alli, 1983).

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. A equação de difusão pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla * [D_{ef} \nabla X] \quad (2.3)$$

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:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

Quando o coeficiente de difusão  $D_{ef}$  é considerado constante a equação (2.4) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.5)$$

Se o conteúdo de umidade inicial  $X_0$  é distribuída uniformemente no interior do produto e desprezando as resistências externas à transferência de massa, o teor de umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio  $X_0$ , do produto; se tem as seguintes condições de contorno:

Com as seguintes condições de contorno:

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

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

$$X/ t = 0 \quad \text{em } y = 0, t > 0$$

Considerando ainda que o encolhimento do produto é desprezível durante a secagem, a solução analítica de Lei de Fick para uma placa plana infinita é dada na forma de séries (BROOKER et alli, 1974; CRANK, 1975):

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 * \pi^2 * D_{ef} * t}{4 * L^2} \right] \quad (2.6)$$

Onde: X = conteúdo de umidade, g/g;

$X_e$  = conteúdo de umidade de equilíbrio, g/g;

$X_i$  = conteúdo de umidade inicial, g/g;

$(X - X_e)/(X_o - X_e)$  = razão de umidade, decimal base seca;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva, (m<sup>2</sup>/h)

t = tempo, h;

L = espessura média, m.

### 2.2.3 – SEGUNDO PERÍODO DE VELOCIDADE DECRESCENTE

O conteúdo de umidade do material do ponto D (Figuras 2.3 e 2.4) em diante é tal que toda evaporação ocorre no interior do material. Neste ponto começa o segundo período de velocidade decrescente. Neste período, todo o vapor que é retirado do sólido deve difundir-se através do sólido até a superfície e, em seguida, através da corrente gasosa. Isto faz com que a velocidade de secagem diminua ainda mais.

Os períodos de velocidade decrescente podem ser maiores que o período de velocidade constante, apesar da umidade que deve ser removida ser, na maioria das vezes, menor.

Quando se atinge a umidade de equilíbrio, não se tem mais secagem e a velocidade de secagem cai a zero. A umidade de equilíbrio é alcançada quando a pressão parcial do vapor na superfície do sólido for igual à pressão do vapor na fase gasosa.

### **2.3 – O LEITO DE JORRO**

A tecnologia do leito de jorro tem evoluído significativamente desde a sua descoberta por MATHUR & GISHLER na década de 1950, ocupando 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, na redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação de carvão, moagem e mistura de sólidos e pirólise de xisto. No que diz respeito à secagem de suspensões em leito 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 leito de jorro (Figura 2.5), 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 descendentes comportam-se como leito deslizante. A maioria das partículas sólidas retorna ao jorro

pela região inferior da base tronco-cônica invertendo o sentido do movimento, deslocando-se de maneira ascendente, completando assim o movimento cíclico dos sólidos.

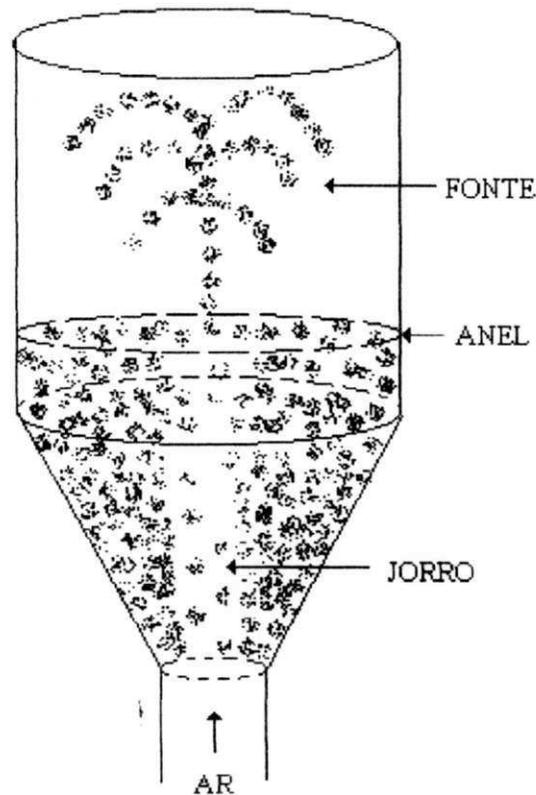


Figura 2.5 – Diagrama esquemático do leito de jorro convencional

O gás é fornecido através do orifício com uma velocidade alta. Contudo, no topo do leito 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 leito 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 leito 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. Fluxo de gás limitado mais pelas exigências de estabilidade do jorro que pelas necessidades de transferência de calor e massa;
4. Faixa operacional limitada;
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.

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 ao longo dos últimos quize anos por vários pesquisadores, entre os quais estão CREMASCO et alli (1987), SILVA & FREIRE (1989) e ALMEIDA (1993).

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 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):

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

Entre as desvantagens, o autor cita:

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

CLAFIN & FANE (1983) e KOE & VAN BASKEL (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,

constatarem um melhor desempenho técnico no secador com tubo central do que no convencional. LIMA (1992) cita que segundo BERRUTI & BEHIE (1990), as informações disponíveis sobre a hidrodinâmica do leito de jorro com tubo central são bastante limitadas.

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.

O leito de jorro pode operar de forma contínua, intermitente ou em batelada.

### **2.3 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DO LEITO DE JORRO**

Para projetar um leito de jorro é necessário que se conheça previamente a altura máxima jorrável no leito e os parâmetros fluidodinâmicos: queda de pressão máxima, queda de pressão de jorro mínimo, velocidade de jorro mínimo e a caracterização do sistema particulado.

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 alii (1961), de ensaios feitos com sementes de trigo, em leito de jorro com diâmetro da coluna de 15,2cm, diâmetro do orifício de entrada igual a 1,27cm e ângulo da base cônica de 60°. A curva obtida encontra-se na Figura 2.6, 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 se comporte 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 ( $\Delta P_M$ ), 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  $\overline{BC}$ ;
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;
6. 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;
7. 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.

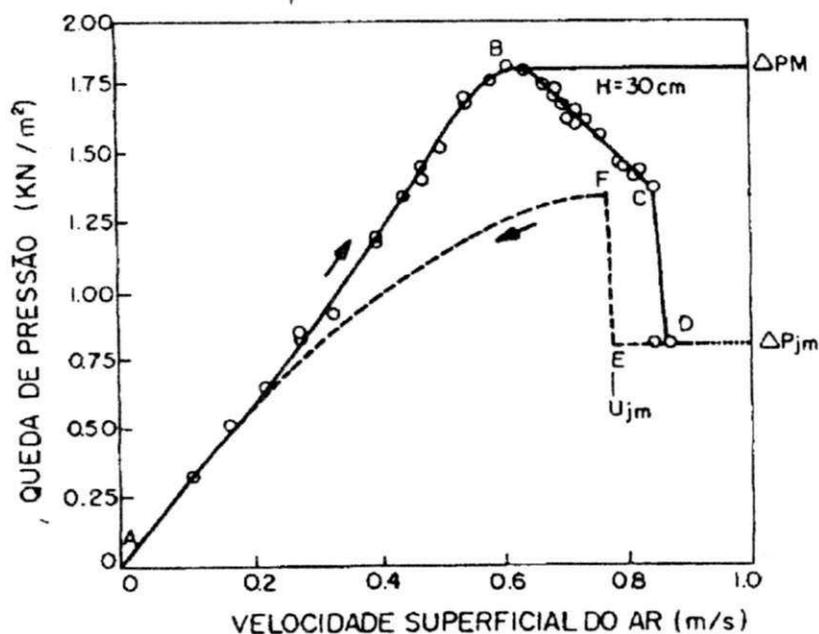


FIGURA 2.6 – Curva característica da queda de pressão

Fonte: MEDEIROS (2001)

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 à 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 de  $\overline{FA}$ .

### 2.3.1 – QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA ( $\Delta P_M$ )

Trata-se de um parâmetro 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 à superfície de partículas. Na Figura 4.2, pode ser observado este parâmetro no ponto B.

Segundo MATHUR & EPSTEIN (1974) o máximo grau na queda de pressão que ocorre pouco antes do afloramento do jorro é uma característica única de uma camada jorrável, porém, está associada geralmente com a entrada do jato de gás em alta velocidade na camada de partículas sólidas.

Segundo SILVA (1996), muitos pesquisadores têm feito estudos para prever a queda de pressão máxima através de correlações. THORLEY et alli (1959) e GRBAVCIC (1976) propuseram uma correlação para este parâmetro, sendo a queda de pressão máxima igualada ao peso do leito por unidade de área da seção transversal (Equações 2.1 e 2.2). MATHUR & EPSTEIN (1974), compararam alguns resultados experimentais de  $\Delta P_M$ , obtidos por outros autores, com os calculados pela Equação 2.1, e observaram que estes são ligeiramente menores que os obtidos experimentalmente, atribuindo esta diferença ao fato da tomada de pressão, nestes trabalhos, terem sido feitas 2,5cm acima do orifício de entrada do ar.

Tabela 2.5 – Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão máxima

Autor	Nº	Equação	Observação
THORLEY et alli (1959)	2.1	$\Delta P_M = (\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)Hg$	$D_C = 71\text{cm}$ $D_C/D_i = 6,0$ $H/D_C = 10$ $\theta = 60^\circ$
GRBAVCIC et alli (1976)	2.2	$\Delta P_M = 1,2Hg(\rho_m - \rho_g)(1 - \epsilon_m)$	$D_C = 61\text{cm}$ $D_i = 10,2\text{cm}$ $H = 183\text{cm}$ $\theta = 60^\circ$
SAMPAIO et alli (1984)	2.3	$\frac{\Delta P_M}{Hg\rho_m} = 1 + 0,055\left(\frac{H}{D_i}\right) - 0,0018\left(\frac{D_i}{d_m}\right)$	$\theta = 60^\circ$ $2,5 \leq D_i < 3,8\text{cm}$

### 2.3.2 – QUEDA DE PRESSÃO DE JORRO MÍNIMO ( $\Delta P_{jm}$ )

É a perda de carga quando do jorro constante e desenvolvido. Este parâmetro fornece a energia utilizada durante a operação do jorro. SILVA (1996), fala que NASCIMENTO et alli (1976) obtiveram valores da queda de pressão através do leito constituído de partículas homogêneas e mistura de partículas submetidas a condições mínimas de jorro. Os resultados foram comparados com os já existentes na literatura, e discussões foram feitas com correlações obtidas por outros pesquisadores.

Tabela 2.6 – Resumo das correlações para o cálculo da queda de pressão de jorro mínimo

Autor	Nº	Equação	Observação
MALEK et alli (1955)	2.5	$\Delta P_{jm} = 2Mg / 3A_c$	
NASCIMENTO et alli (1976)	2.6	$\Delta P_{jm} = 0,67(1 - \epsilon_m)H\rho_m g$	$D_C = 32\text{cm}$ $D_i = 5,08\text{cm}$ $\theta = 35^\circ$

### 2.3.3 – VELOCIDADE DE JORRO MÍNIMO ( $U_{jm}$ )

Foi definida por MATHUR & EPSTEIN (1974) como sendo a menor velocidade para que o jorro exista. Este parâmetro depende das propriedades físicas do fluido e das partículas, como também da geometria do leito. A velocidade de jorro mínimo aumenta em leitos cônicos, com o aumento da altura do leito e com a diminuição do diâmetro da coluna cilíndrica. O diâmetro do orifício de entrada de ar, não tem grande efeito na velocidade de jorro mínimo.

BRUNELLO et alli (1974) estudam a velocidade mínima de jorro para leitos de misturas de grãos de soja e sorgo contidos numa coluna com 30 cm de diâmetro. A validade de algumas correlações utilizadas para leito de partículas uniformes foi verificada com os dados experimentais obtidos e propuseram a correlação empírica da Equação 2.10, para este caso específico.

A Tabela 2.7 mostra as correlações utilizadas neste trabalho para a velocidade de jorro mínimo, modificadas para um sistema binário. Todas as correlações foram extraídas de SILVA (1996).

Tabela 2.7 – Resumo das correlações para o cálculo da velocidade de jorro mínimo

Autor	Nº	Equação	Observação
MATHUR & GISHLER (1955)	2.7	$U_{jm} = \left(\frac{d_m}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^3 \left[ \frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}$	$D_c = 15,2\text{cm}$ $D_i = 0,95\text{cm}$ $\theta = 85^\circ$
ABDELRAZEK (1969)	2.8	$U_{jm} = \frac{1}{1,74} \left\{ \left(\frac{d_m}{D_c}\right) \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^3 \left[ \frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}} - 0,25 \right\}$	$D_c = 5-10\text{cm}$ $D_c/D_i = 12$ $H/D_c = 1-3$
BRUNELLO et alli (1974)	2.9	$U_{jm} = 0,0143d_m^{0,741} \cdot H^{0,592} \left[ \frac{2gH(\rho_m - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{\frac{1}{2}}$	

## 2.4 – SECAGEM DE LEVEDURAS

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

RHEINBOLDT et alli (1987) estudaram 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 do processo. Apresentam um processo que consiste em quatro etapas principais: recuperação do etanol, desaguamento mecânico, termólise e secagem via secador em leito fluidizado horizontal (capacidade 10 t/dia). Apresenta um consumo total de energia inferior ao processo com tambores rotativos, menor necessidade de mão de obra, ocupação de menor área e instalações mais simples, substituindo uma rede de secadores por apenas um de mais capacidade e eficiência.

MORRIS & FREIRE (1990) desenvolveram e construíram um secador de leito de jorro para estudar a secagem de pasta de fermento. O pó obtido foi analisado com relação à quantidade de células vivas, e a performance do secador foi comparada à secagem realizada apenas com água. A temperatura do ar de entrada foi 100, 120 e 140°C e na saída 60, 79 e 80°C. A vazão do ar na alimentação foi mantido em 4,6 m<sup>3</sup>/min, correspondendo a 2 vezes o valor de jorro mínimo. A concentração de sólidos na pasta variou em 10, 15 e 20%. Para altas taxas de alimentação, surgiram problemas operacionais, devido à aglomeração de partículas inertes, que foram relacionados a mudanças nas propriedades físicas do fermento.

SANTOS et alli (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 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 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 o mesmo acréscimo nos diâmetros médios da ordem de 34%.

SANTIN et alli (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 conduzida 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.

OLIVEIRA et alli (1996) realizaram estudo experimental da secagem, em spray dryer 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.

GRABOWSKI et alli (1997) estudaram em escala experimental a secagem de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em secadores de leito fluidizado e leito de jorro. As amostras de fermento com umidade inicial em tomo de 70% (b.u.), foram preparadas para obter uma granulometria com diâmetro de 0,8 a 1 milímetro, secas primeiramente em leito fluidizado (temperaturas de 40°C 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 iniciando com secador em leito fluidizado e em seguida com 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 tomo de 6 a 8%).

BAYROCH & INGLEDEW (1997) determinaram o teor de umidade, taxas de secagem e número de células vivas para dois tipos de fermentos comerciais, secos em leito fluidizado. Utilizaram uma faixa de temperatura de 35 a 80°C. Ambos os fermentos mostraram decréscimo da viabilidade de células vivas para todas as temperaturas de

secagem. O valor de  $z$  para os fermentos 1 e 2 foram 28,4 e 27,5°C, respectivamente. O valor de  $D$  para ambos os fermentos demonstrou uma relação linear com a temperatura. O teor de umidade, em todos os ensaios, ficou em torno de 10%.

MAIALLE et alli (1999) analisaram a fluidodinâmica e a secagem em um secador de leite de jorro bidimensional contínuo com suspensão de levedura a 10%, taxa de alimentação do líquido entre 6,26 e 20 g/min, com temperatura do ar de entrada de 70°C. Mediu a taxa de circulação de partículas, o perfil de temperaturas no interior do leite, queda de pressão no jorro e no ânulo. Amostras do material foram retiradas em diferentes posições no interior do leite 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 leite, bem como as condições de colapso. As micrografias indicam, em função da morfologia do pó obtido, zonas preponderantes de secagem.

NICACIO (2002) realizou um estudo sobre a secagem de leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*) em estufa tendo como variáveis de entrada a temperatura de operação (34 a 70°C) e a velocidade do ar (0,1 a 0,6 m/s). Realizou estudo do equilíbrio higroscópico desta espécie de leveduras nas temperaturas de 30, 40 e 45°C e os modelos de Henderson e de GAB mostraram-se adequados para representar as isotermas nas faixas estudadas. Quanto à secagem, as curvas apresentaram de forma bem definida os períodos de pré-aquecimento, taxa constante e taxa decrescente. A análise granulométrica pode ser representada pelo modelo de distribuição de Gates-Gaudin-Schumann. O teor de proteínas mostrou independência estatística da velocidade e da temperatura. As leveduras secas estão dentro dos padrões exigidos pelo mercado com teor de umidade de 12%.

## 2.5 – UTILIZAÇÃO DA LEVEDURA NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL

BUTOLO (1996) descreve sobre um estudo realizado na ESALQ com vacas em lactação e em manutenção para avaliar a utilização de leveduras por ruminantes. No primeiro experimento foram utilizados 12 animais da raça holandesa em início de lactação com produção média de 20,0 kg/dia; os animais receberam, além da silagem de milho, um concentrado que possuía como suplemento protéico o farelo de algodão ou levedura, nos níveis de 0, 12 e 30%. As dietas experimentais foram fornecidas aos animais por períodos médios de 30 dias, intercalando-se entre eles um período de fornecimento de uma dieta deficiente em proteína. Os dados de produção e composição do leite mostram que não houve diferença significativa nos níveis de produção, havendo, no entanto um aumento significativo no teor de proteína do leite dos animais que receberam a levedura como única fonte suplementar de proteína. As digestibilidades da matéria seca, matéria orgânica e da proteína bruta também foram elevadas significativamente com a inclusão da levedura no concentrado.

GRANGEIRO (2000) realizou um estudo utilizando 672 pintos machos de um dia de idade, com o objetivo de estudar o efeito da inclusão da levedura de cana-de-açúcar (*Saccharomyces cerevisiae*), proveniente da indústria de aguardente, em dietas para frangos de corte. As aves foram distribuídas em um delineamento inteiramente casual, constituído de 6 tratamentos com 112 aves por tratamento, sendo oito repetições por tratamento com 14 aves cada. Os tratamentos constaram de seis dietas isoprotéicas (22% e 20% de proteína para as fases inicial e de engorda, respectivamente) formuladas à base de milho, farelo de soja e níveis crescente de inclusão de levedura de cana-de-açúcar (LCA). Através da análise estatística não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos para as variáveis ganho de peso, consumo de ração, conversão alimentar, rendimento de carcaça, percentagem de gordura abdominal e umidade da cama nas diferentes fases de criação das aves, alimentadas com níveis de inclusão de até 7,5% de LCA. Com base nos dados afirma-se que é possível a inclusão de até 7,5% de LCA em dietas para frangos de corte sem afetar o seu desempenho zootécnico.

PÁDUA et alli (2000) realizaram um estudo sobre a influência da edição de 10% e 20% da fração parede celular de levedura (*Saccharomyces sp.*), a uma dieta

hipercolesterolêmica (5% gordura de coco mais 2% colesterol) em ratos Wistar. Utilizou-se como padrão uma dieta de caseína (AIN-G) com 5, 10 e 15 % de celulose. Avaliaram-se os índices: digestibilidade, valor biológico e utilização líquida aparente da proteína, quociente da eficiência alimentar, velocidade de trânsito do conteúdo intestinal, comprimento do intestino delgado e as concentrações séricas de lipídeos totais, triacilgliceróis e colesterol total. A fração parede celular e a celulose provocam 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% promoveu aumento da velocidade de trânsito do conteúdo intestinal e do comprimento do intestino delgado. A fração parede celular nas concentrações de 10% ou 20% promoveu abaixamento nos níveis de triacilgliceróis séricos, contudo não influenciou no abaixamento das concentrações de lipídeos totais e de colesterol total.

## **2.6 – 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 custo (BARROS NETO, 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, deve-se determinar quais são os fatores experimentais (variáveis de entrada) e as respostas (variáveis de saída) importantes para o sistema em estudo, de forma a obter o maior número possível de experimentos. 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.

#### **2.4.1 – PLANEJAMENTO FATORIAL E ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

O método de planejamento fatorial por análise de superfície de resposta tem como princípio a técnica de planejamento fatorial, onde os experimentos são programados através de um planejamento fatorial (BOX et alli, 1978), sendo possível a realização de vários experimentos ao mesmo tempo.

O principal objetivo do planejamento fatorial é relacionar empiricamente as variáveis dependentes (respostas) com as variáveis independentes (de 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 as 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. Tendo o objetivo de realizar o mínimo de experimentos e determinar preliminarmente os fatores (variáveis de entrada) que tenham ou não influencia significativa sobre a resposta, faz-se um planejamento fatorial com dois níveis (nível -1 e nível + 1) para cada fator. Se n fatores estão contidos no estudo, o planejamento fatorial necessitará da realização de  $2^n$  ensaios diferentes, cobrindo todas as combinações possíveis. Para a obtenção do erro experimental é necessária a realização

de pelo menos 2 ensaios no ponto central (nível 0), correspondendo à 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  $\delta$  é feito através da equação de BOX & WILSON (1951):

$$\delta = \left(2^k\right)^{\frac{1}{4}}$$

Onde K = número de variáveis (fatores) independentes.

## CAPÍTULO III

---

### MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 – MATERIAIS

##### 3.1.1 – MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima utilizada na alimentação do secador foi à levedura do gênero *Saccharomyces cerevisiae* prensada, do tipo comercial fermento biológico fresco da marca Fleischmann (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Fermento biológico fresco (Fleischmann)

### 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, material este aprovado para uso em alimentos (ALMEIDA, 1991).

Tabela 3.1 – Propriedades Físicas do Poliestireno

Propriedades	Valores obtidos	Método de Determinação
$d_v$	0,3260 cm	Pelo volume de líquido deslocado
$\rho_l$	0,6511 g/cm <sup>3</sup>	Determinação da massa contida num recipiente de volume conhecido
$\rho_s$	1,0450 g/cm <sup>3</sup>	Picnometria líquida
$\varepsilon_l$	0,411	Picnometria de comparação a ar
$\phi$	0,8673	Considerando a partícula como um cilindro elíptico
$a_p$	2101,6 m <sup>-1</sup>	Considerando a partícula como um cilindro elíptico

FONTE: ALSINA et alli (1996)

## 3.2 - EQUIPAMENTOS

### 3.2.1 – SECADOR EM LEITO DE JORRO

O secador em leito de jorro utilizado, mostrado na Figura 3.2, é constituído de uma base cônica de acrílico, com ângulo interno de 60°, acoplada a uma coluna cilíndrica também em acrílico, com diâmetro interno 10,3 cm e 25,3 cm de altura.

Na parte superior interna da coluna, acima do leito, 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 finalidade de separar e coletar as partículas finas em um baker. O secador possui orifícios que permitem tomadas de temperatura e pressão. A alimentação da levedura é feita por gravidade na parte superior da coluna.

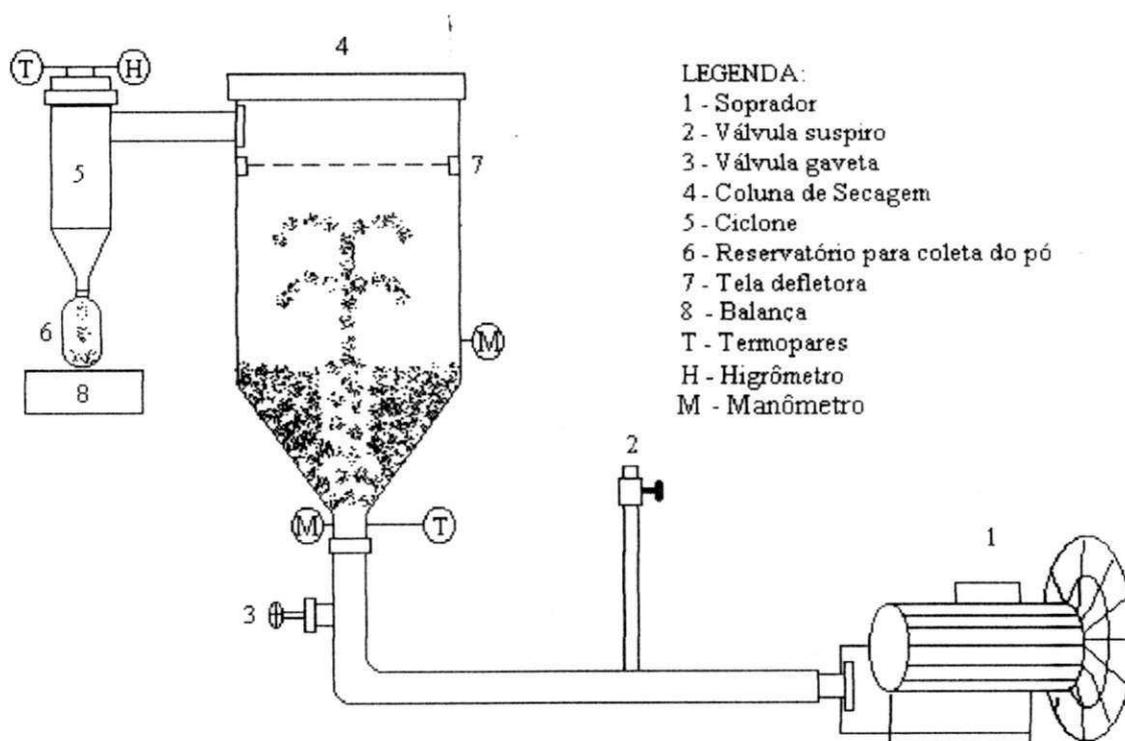


Figura 3.2 – Secador de leito de jorro cone-cilíndrico convencional

### 3.2.2 – EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Além do leito de jorro propriamente dito, foram utilizados os seguintes equipamentos auxiliares:

- Soprador, modelo S100 marca EBERLE com potência de 4 HP, utilizado para distribuir o ar necessário ao processo de secagem. A vazão do ar é controlada por uma válvula tipo gaveta e uma outra válvula para respiro;
- Anemômetro digital, MOD. AM 4201 marca LUTRON, com sensor tipo hélice de baixa fricção, para medidas de velocidade do ar;
- Ciclone, construído em P. V. C. (policloreto de vinila), para coletar o pó;
- Manômetro diferencial tipo tubo em “U”, cujo líquido manométrico é óleo com densidade igual a  $870,0 \text{ Kg/m}^3$ , para medidas de pressão;
- Cronômetro marca Gallemkanp, referência TKM 340 Y;
- Higrômetro/Termômetro, modelo HT-3003 com medidores de umidade relativa entre 10 a 95% e temperatura de 0 a  $50^\circ\text{C}$  fabricado pela LUTRON;
- Balança Mettler PC 440, capacidade 0,440Kg, com precisão de leitura de 0,001g, fabricada pela Mettler Instrument, AG, Suíça, para acompanhar a cinética do arraste das partículas finas;
- Balança AND, capacidade 210g, com precisão de leitura 0,0001g, fabricada pela A & D Company Limited – Japão.
- Estufa com renovação e circulação de ar, modelo MA 035, fabricada pela Marconi;
- Recipiente para recolher o material arrastado.

### 3.3 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

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

A Tabela 3.2 mostra os valores do percentual de levedura alimentada no secador com relação à massa de inerte, e a velocidade do ar na entrada da coluna de secagem com os níveis dos fatores utilizados nas corridas experimentais. Já a TABELA 3.3, é a matriz de planejamento experimental, mostra de maneira clara e organizada a quantidade de experimentos que foram realizados.

A faixa de concentração empregada neste trabalho foi obtida com base em trabalhos anteriores feito com frutas, podendo citar MORAIS (1996) e LIMA (1996). Quanto à variação das velocidades, fixadas inicialmente em 1,1; 1,2 e 1,3 da vazão de jorro mínimo foram realizados testes preliminares, e estes mostraram que no caso das leveduras com uma quantidade fixa de inerte o  $U_{jm}$  fica em torno de  $0,1676 \pm 0,0086$  m/s.

Tabela 3.2 – Valores reais e codificados das Variáveis do Planejamento Fatorial  $2^2$  + Configuração Estrela

Variáveis	Nível (-1,414)	Nível (-1)	Nível (0)	Nível (+1)	Nível (+1,414)
Percentual de Levedura (%)	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

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

### 3.3.1 – PREPARAÇÃO DA LEVEDURA

A levedura utilizada neste trabalho foi adquirida em mercados, sempre observando o prazo de validade da mesma. Separada uma certa quantidade desta levedura, que se encontrava compacta, com aspecto de massa úmida (umidade inicial em torno de 70 % em base úmida), prensava-se em peneira plástica com uma abertura de 17 furos por polegada, com o objetivo de aumentar a área superficial do material.

### 3.3.2 – ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS

Inicialmente, foram introduzidas no secador as partículas inertes, cuja quantidade em todos os experimentos foi fixada em 8 cm na altura da coluna de secagem ou 250g. 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 por gravidade e imediatamente após a alimentação o secador era desligado e a válvula que controla a entrada de ar no leito era fechada. Em seguida acionava-se o compressor, aumentando 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  $\Delta P_M$  e atingida a estabilidade, anotava-se  $\Delta P_{jm}$ . Este procedimento realizava-se até a abertura total da válvula controladora da velocidade do ar. Quando alcançado este ponto fazia-se o procedimento inverso, variando cautelosamente a vazão do ar para obtenção da curva de retorno. No momento que era observado o menor valor da velocidade em que ainda verificava-se o jorro estável, anotava-se a  $U_{jm}$  e prosseguia o experimento até interrupção completa do fluxo 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 45°C;
2. Foi considerada a perda de carga no distribuidor na determinação da queda de pressão;
3. Os experimentos realizados sem a presença de levedura seguiram o mesmo procedimento descrito nos parágrafos anteriores.

### **3.3.3 – ENSAIOS DE SECAGEM**

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. Este trabalho foi realizado com uma altura fixa de partículas inertes completa na região cônica e 2 cm na região cilíndrica e sem aquecimento. As variáveis estudadas foram a vazão do ar, fixada em 0,185, 0,199, 0,213, 0,227 e 0,241, valores obtidos baseados no estudo fluidodinâmico e, a quantidade

de levedura alimentada com percentuais de 1,2, 2, 4, 6 e 6,8% da massa de partículas inertes.

O procedimento de secagem está descrito a seguir:

- Enchimento da coluna com os inertes na quantidade equivalente a altura do leito desejada (8cm), procurando um empacotamento uniforme;
- Acionamento do soprador e ajuste da velocidade desejada, medida com um anemômetro digital na extremidade superior do ciclone;
- Leitura da temperatura do ar na entrada do sistema, temperatura e umidade relativa do ar na saída do ciclone.
- Alimentação da levedura na quantidade desejada, esta alimentação era feita por gravidade;
- Após 20 minutos de secagem, procedia-se nova alimentação seguindo a metodologia anterior. O processo é repetido até cinco alimentações. Este intervalo de 20 minutos foi escolhido baseado em trabalhos com frutas (LIMA, 1996);
- Depois da última alimentação, decorridos 20 minutos o equipamento é desligado;
- Finalizado o experimento, o pó coletado é quantificado e submetido à análise de umidade e proteínas;
- Descarregava-se o leito e coletava-se o material retido, sendo quantificado e submetido à análise de umidade e proteínas.

### **3.3.4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA LEVEDURA**

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

### 3.3.4.1 – Umidade

Para determinar o teor de umidade das leveduras (“in natura” e seca), foi utilizado o método da estufa. A amostra era pesada e colocada em uma estufa de secagem a 70°C 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, com exceção do material retido no leite onde, algumas vezes, a quantidade era tão pequena que impossibilitava a análise. Os teores de umidade podem ser calculados em base úmida ou em base seca mediante as seguintes equações:

$$X_{(b.u.)} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \quad (3.1)$$

$$X_{(b.s.)} = \frac{(m_i - m_{ss})}{m_{ss}} \quad (3.2)$$

### 3.3.4.2 – Proteínas Totais

As análises de proteínas totais foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas de Alimentos/DEA/CCT/UFPB. A determinação das proteínas totais foi obtida através da determinação da dosagem de nitrogênio total. O método utilizado foi o Método de Kjeldahl (A. O. A. C., 1984). A descrição do método encontra-se no Apêndice C.

### 3.3.5 – DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO

A eficiência de produção 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:

$$R(\%) = \frac{M_{L,S} \cdot (1 - X_{(L,S)})}{M_L \cdot (1 - X_{(L)})} \cdot 100 \quad (3.5)$$

### 3.3.6 – DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ACUMULATIVA DE PRODUÇÃO

O cálculo das eficiências acumulativas de produção de levedura seca ao longo dos experimentos foi feito de acordo com a Equação 3.6.

$$\text{Efi}(\%) = \frac{(1 - X_{(L,S)}) \sum_{i=1}^N M_{L,S}^i}{(1 - X_{(L)}) \sum_{i=1}^N M_L^i} \cdot 100 \quad (3.6)$$

### 3.3.7 – DETERMINAÇÃO DO MATERIAL RETIDO NO LEITO

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 retida das partículas de inertes. 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 à análise de umidade. Define-se a retenção, como a relação entre a massa da

levedura seca retida no leito e a massa total que foi alimentada no secador (em base seca):

$$r(\%) = \frac{M_R \cdot (1 - X_{(L,R)})}{M_L \cdot (1 - X_{(L)})} \cdot 100 \quad (3.7)$$

### 3.3.8 – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS

As perdas são calculadas pela diferença entre a quantidade de sólidos alimentados, e a soma das quantidades coletada no ciclone e retida no leito. As perdas foram calculadas pela Equação 3.6, expressa na forma de percentagem:

$$P(\%) = 100 - R(\%) - r(\%) \quad (3.8)$$

### 3.3.9 – CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE LEVEDURA SECA

A cinética de produção de pó foi avaliada em todos os ensaios de secagem. O procedimento experimental foi o mesmo descrito no item 3.3.3. 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 minutos, totalizando o tempo do experimento em 1 hora e 40 minutos. Durante os ensaios foi colocada uma balança abaixo do ciclone fazendo desta forma o acompanhamento da produção de levedura seca nos 12 minutos iniciais era feita a cada 2 minutos. Em seguida, uma leitura com 3 minutos e, outra com 5 minutos até completar os 20 minutos em que nova alimentação era feita.

## CAPÍTULO IV

---

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 – ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS

O estudo das variáveis fluidodinâmicas, principalmente a velocidade de jorro mínimo, tornou-se essencial na fase inicial deste trabalho, pois através deste resultado foi definido o nível das velocidades no estudo da secagem de leveduras.

A curva característica refere-se às medidas de queda de pressão em função da velocidade do ar, obtida através do método clássico citado por MATHUR & EPSTEIN (1974). Para o levantamento dos dados, que deram origem a estas curvas, foi mantida uma altura fixa de inerte (8 cm), partindo-se da entrada do secador, variando a concentração de levedura alimentada em 2, 4 e 6% da massa de inertes conforme metodologia descrita no Capítulo III. Inicialmente foi obtida a curva característica do leito formado apenas por partículas inertes (Figura 4.1) obtendo uma velocidade de jorro mínimo de 0,170 m/s para uma queda de pressão de jorro mínimo de 399,11 N/m<sup>2</sup> e uma queda de pressão máxima de 1649,53 N/m<sup>2</sup>. Empregando-se a mesma metodologia, acompanhou-se a mudança no comportamento fluidodinâmico do leito devido à presença de levedura.

Observando a Figura 4.2, para uma concentração de levedura de 2 %, verifica-se claramente um ponto máximo na curva de velocidade crescente, chamado de queda de pressão máxima. O valor da queda de pressão de jorro mínimo está indicado pela seta preta. Nas curvas de velocidade decrescente, a velocidade de jorro mínimo está indicada pela seta vermelha. Esta curva ilustra o comportamento fluidodinâmico observado nas demais proporções de leveduras estudadas.

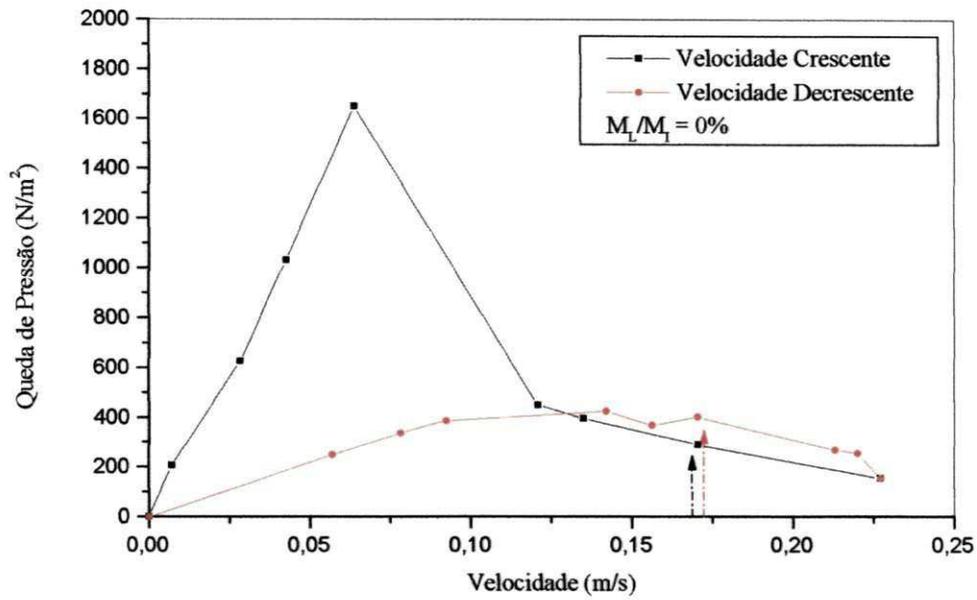


Figura 4.1- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade.  
 $M_L/M_I = 0\%$

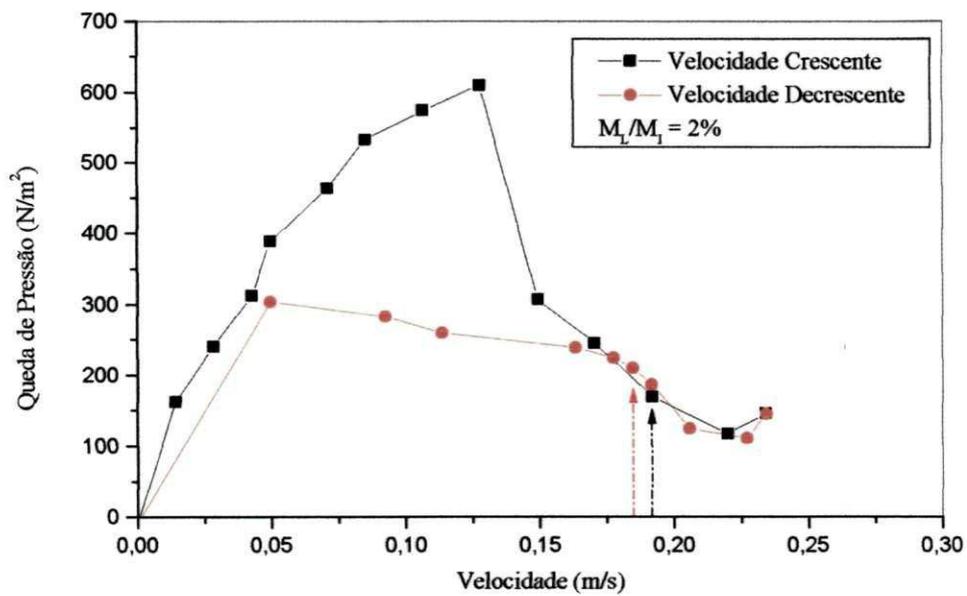


Figura 4.2- Curva característica de queda de pressão em função da velocidade.  
 $M_L/M_I = 2\%$

### 4.1.1 – EFEITO DA PRESENÇA DE LEVEDURAS NOS PARÂMETROS FLUIDODINÂMICAS

Na Figura 4.3 está representada a curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar, mostrando a comparação das curvas características para uma altura fixa de partículas inertes e quantidades de levedura alimentada igual a 0, 2, 4 e 6%. Percebe-se que a presença da levedura afeta o valor da queda de pressão máxima, já que para razão de levedura/inerte 2, 4 e 6%, observa-se uma diminuição no valor da queda de pressão máxima, em relação à situação apenas com as partículas inertes.

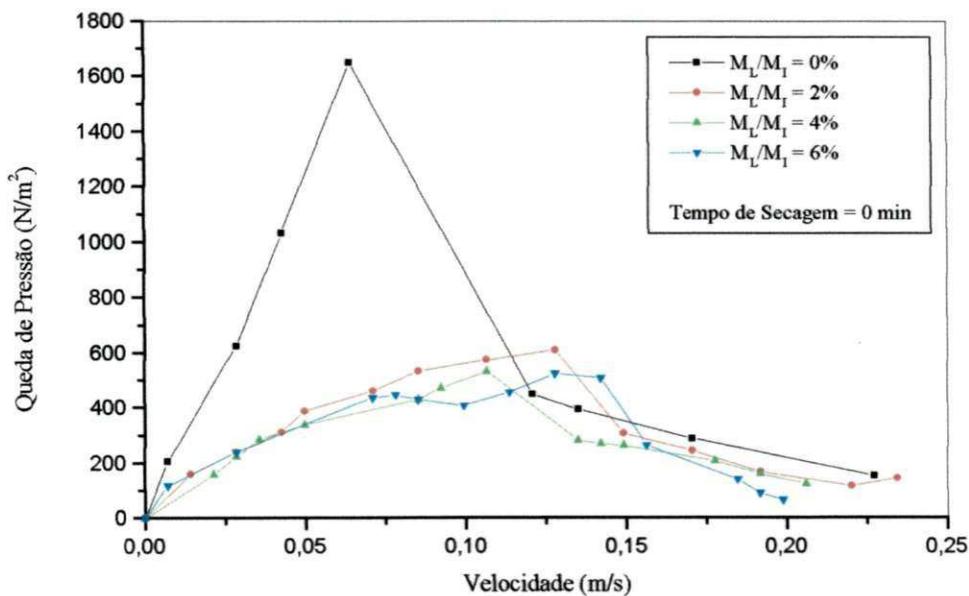


Figura 4.3- Curva de queda de pressão em função da velocidade crescente do ar.

Na Figura 4.4 observa-se que a queda de pressão máxima diminui com o aumento da proporção de leveduras. Entretanto na presença de levedura a variação não é alterada significativamente. Este fato 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. LIMA (1996) observou que, com o aumento da percentagem de polpa de acerola alimentada no secador de leito de jorro os valores da queda de pressão máxima aumentaram mostrando um comportamento contrário ao das leveduras. SILVA (1996) e ALMEIDA (1993) encontraram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho.

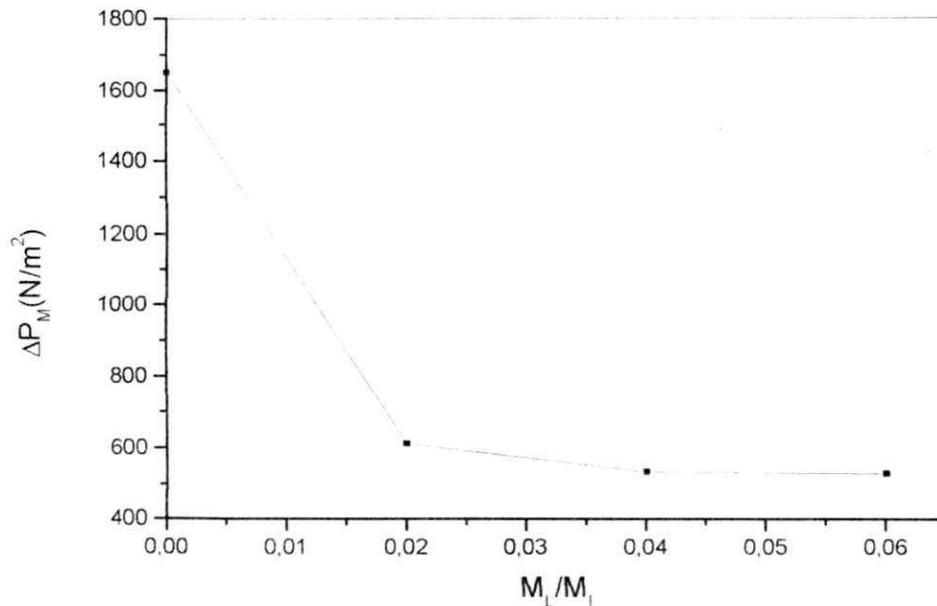


Figura 4.4 – Queda de pressão máxima em função de  $M_L/M_I$

Para as curvas de queda de pressão em função da velocidade decrescente, mostrada na Figura 4.5, verifica-se que a determinação da  $U_{jm}$  a partir destas curvas está sujeita a incertezas devido à dificuldade em observar a região no qual ocorre o colapso do jorro. Contudo, observa-se na Figura 4.6 que não houve variação significativa da  $U_{jm}$  com o aumento da proporção, e até mesmo com a presença da levedura, resultado semelhante ao encontrado por SILVA (1996) trabalhando com um leito formado por partículas de poliestireno e farinha de milho. Em todas as condições estudadas pelo autor, não houve variação de  $U_{jm}$ . Sabe-se que a  $U_{jm}$  é afetada diretamente pela altura do leito de partículas. Segundo SILVA (1996), no caso de um leito formado por partículas homogêneas, este parâmetro é diretamente proporcional à altura do mesmo elevada a 1/2. Analisando a altura do leito formada pela mistura de partículas, neste trabalho, observa-se que esta é predominantemente formada pelas partículas de maior diâmetro,

ou seja, a quantidade de partículas finas (leveduras) presentes na mistura não afeta significativamente a geometria do leito, justificando a independência da  $U_{jm}$  com as frações ponderais de levedura.

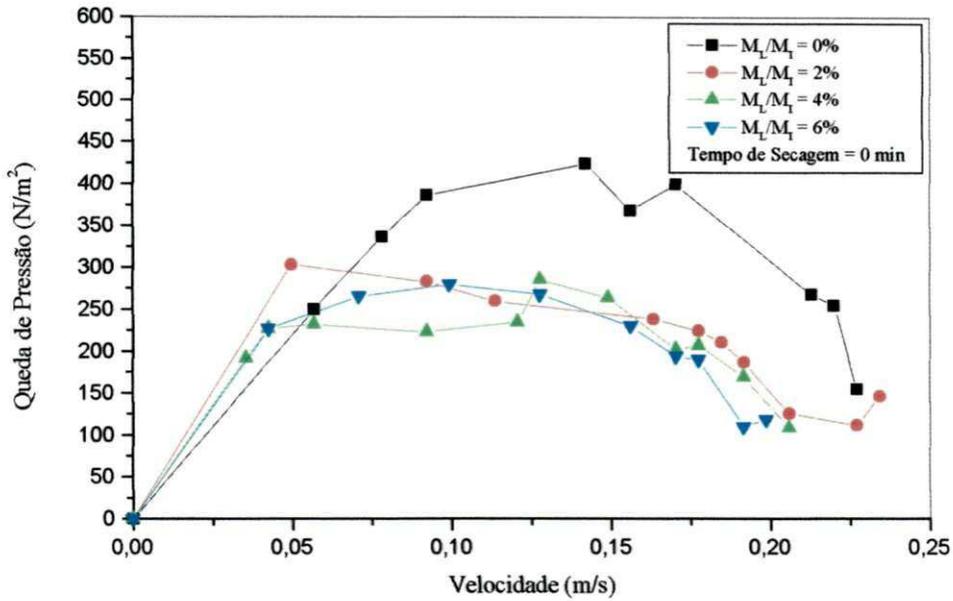


Figura 4.5- Curva de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar.

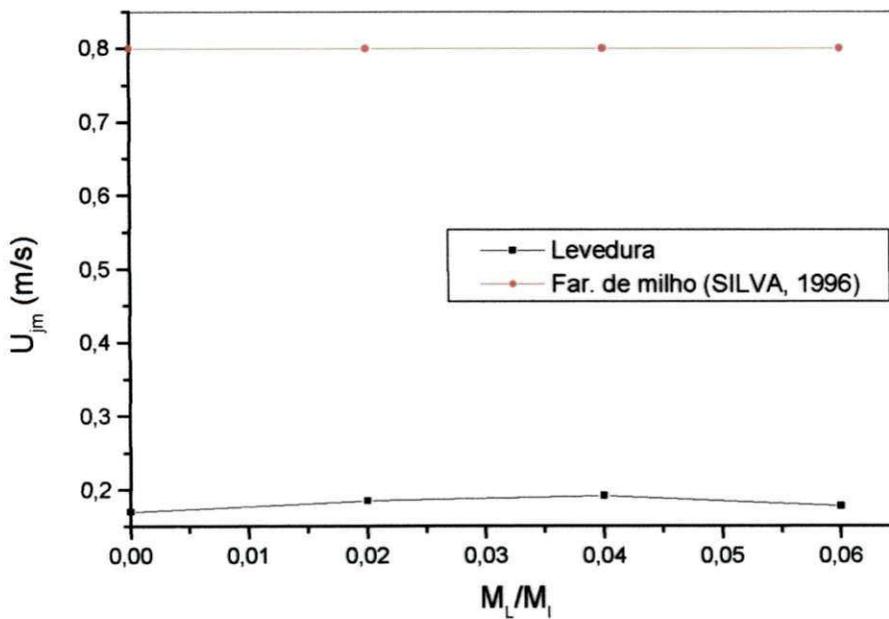


Figura 4.6 – Velocidade de Jorro Mínimo em função de  $M_L/M_I$

Através da Tabela 4.1 pode-se observar que os dados de queda de pressão de jorro mínimo diminuíram com a elevação da quantidade de levedura alimentada, com exceção do percentual de 6%. Comportamento semelhante ao encontrado no presente trabalho foi observado por SILVA (1996), trabalhando com mistura de partículas, finas e jorráveis.

Esta diferença em relação às polpas de frutas e semelhança com a mistura de partículas deve-se a que, no caso das frutas, a polpa alimentada se adere às partículas de inertes. Conforme observado por MEDEIROS (2001), há formação de pontes sólidas, que seriam as principais responsáveis pelos efeitos observados sobre a fluidodinâmica. No caso das leveduras, no entanto, não se observa aderência e/ou formação de película sobre as partículas inertes, o que justificaria o comportamento semelhante ao observado por SILVA (1996) com mistura de partículas.

TABELA 4.1 – Valores dos parâmetros fluidodinâmicos em função da concentração de levedura alimentada

$M_l/M_i$	$\Delta P_M$ (N/m <sup>2</sup> )	$\Delta P_{jm}$ (N/m <sup>2</sup> )	$U_{jm}$ (m/s)
0	1649,5	399,1	0,170
2	610,3	210,4	0,185
4	531,7	169,3	0,192
6	524,71	190,0	0,178

#### 4.1.2 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM AS CORRELAÇÕES PROPOSTAS

Neste trabalho, foram estudadas várias correlações empíricas que predizem os valores dos parâmetros fluidodinâmicos  $\Delta P_M$ ,  $\Delta P_{jm}$  e  $U_{jm}$ , com o objetivo de comparar estes valores com os obtidos experimentalmente.

Nas Tabelas 4.2 a 4.4, faz-se uma análise comparativa dos dados experimentais de  $\Delta P_M$ ,  $\Delta P_{jm}$  e  $U_{jm}$ , respectivamente, obtidos no sistema de leito de jorro convencional

com partículas de poliestireno, com os estimados através das correlações empíricas apresentadas no Capítulo II.

Para o cálculo foram utilizadas propriedades do poliestireno descritas na Tabela 3.1. Como se observa nas Tabelas 4.2 e 4.3, os valores de  $\Delta P_M$  e  $\Delta P_{jm}$  obtidos pelas correlações apresentam desvios consideráveis em comparação com os obtidos experimentalmente, isto pode ser justificado pelo distanciamento da faixa operacional indicada para estas correlações do sistema estudado neste trabalho. Já para as correlações estudadas para  $U_{jm}$  duas apresentaram desvios e a de ABDELRAZEK (1969), em que este trabalho encontra-se dentro da faixa operacional indicada, mostrou-se satisfatória, predizendo o valor bem próximo ao experimental. O uso das correlações, mesmos conhecendo as limitações por estas imposta, ocorreu por falta de correlações, na bibliografia pesquisada, que se enquadrassem ao sistema estudado, tendo sido usadas apenas ao nível de comparação.

Tabela 4.2 – Queda de pressão máxima determinada por correlações e experimentalmente ( $N/m^2$ )

<b>Autor</b>	<b>Nº</b>	<b><math>\Delta P_M</math></b>
THORLEY et alli (1959)	2.1	284,5
GRBAVCIC et alli (1976)	2.2	341,4
SAMPAIO et alli (1984)	2.3	561,4
OGINO et alli (1993)	2.4	118,8
Presente trabalho		1649,529

Tabela 4.3 – Queda de pressão de jorro mínimo determinado por correlações e experimentalmente ( $N/m^2$ )

<b>Autor</b>	<b>Nº</b>	<b><math>\Delta P_{jm}</math></b>
MALEK et alli (1955)	2.5	196,3
NASCIMENTO et alli (1976)	2.6	190,6
Presente trabalho		399,107

Tabela 4.4 – Velocidade de jorro mínimo determinado por correlações e experimentalmente (m/s)

<b>Autor</b>	<b>Nº</b>	<b><math>U_{jm}</math></b>
MATHUR & GISHLER (1955)	2.7	0,59
ABDELRAZEK (1969)	2.8	0,195
BRUNELLO et alli (1974)	2.9	0,0014
Presente trabalho		0,170

## **4.2 – DESEMPENHO DO SECADOR**

### **4.2.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SECAGEM**

A secagem de levedura foi conduzida de acordo com a metodologia descrita no Capítulo III. Durante os experimentos, foram obtidas muitas informações, sendo que serão enfatizados principalmente dados referentes à produção, retenção e as perdas. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados para cada ensaio de secagem de acordo com o planejamento fatorial experimental. A eficiência e retenção foram calculadas utilizando as equações descritas no Capítulo III.

Tabela 4.5 – Resultados de secagem

Experimento	Percentual	Velocidade	Eficiência	Retenção	Perdas
	de Levedura (%)	do Ar (m/s)			
1	2	0,199	74,9	0	25,1
2	6	0,199	70,7	8,60	20,7
3	2	0,227	86,79	0,58	12,63
4	6	0,227	79	2,21	18,79
5	4	0,213	67,74	23,1	9,16
6	4	0,213	86,8	2,1	11,1
7	4	0,213	83,4	3,1	13,5
8	1,2	0,213	89,31	0	10,69
9	6,8	0,213	42,52	35,14	22,32
10	4	0,241	68,66	2,14	29,20
11	4	0,185	52,3	35,2	12,5

Os resultados apresentados na Tabela 4.2 mostram que a eficiência de produção de pó foi alta em todos os experimentos se comparada à secagem com polpas de frutas (MEDEIROS, 2001; MORAIS, 1996). Na maioria dos experimentos, como mostra a Tabela 4.2, há uma tendência ao aumento das eficiências com o aumento das velocidades para um mesmo percentual de levedura alimentada, com exceção dos experimentos 9 e 10. No primeiro, a diminuição da eficiência comparando-se aos outros experimentos pode ser atribuída ao elevado percentual de leveduras alimentadas e velocidade insuficiente para arrastar a levedura seca, e conseqüentemente, aumento da quantidade de partículas sólidas retidas no leito. Já no experimento 10, a velocidade elevada fez com que muito material fosse arrastado mantendo uma eficiência considerada boa, mas aumentando a porcentagem de perdas. No anexo B, podemos verificar a diferença nas condições ambiente em que foram realizados os ensaios referentes ao ponto central (experimentos 5, 6 e 7), justificando a não reprodutibilidade do experimento 5.

A retenção de sólidos no leito foi baixo encontrando-se numa faixa de variação de 0% (experimentos 1 e 8) a 23,1% (experimento 5), excetuando-se o experimento 9, cujo resultado está justificado acima, e o 11 devido a baixa velocidade do ar.

As perdas referem-se à quantidade de sólidos que fica no equipamento, seja aderido ou disperso sobre as paredes da coluna e na saída do leito, ou eventualmente perdida no ciclone. Um outro fator de perda ocorre durante a alimentação que é efetuada retirando-se a tampa do leito, o que provoca o eventual arraste das partículas secas de levedura pelo topo da coluna. Como se observa na Tabela 4.2, as perdas foram elevadas, sugerindo a necessidade de melhorar o sistema experimental, especialmente o método de alimentação.

#### **4.2.2 – CINÉTICA DE PRODUÇÃO DE LEVEDURA SECA**

As cinéticas de produção de levedura seca são mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8 através das curvas relacionando massa acumulativa de levedura produzida e eficiência de produção de levedura com o tempo, para as diferentes condições operacionais mantidas durante a realização dos experimentos. A discussão dos resultados nesta seção será apenas com relação à produção uniforme de levedura seca e a sua evolução ao longo das sucessivas alimentações, como mostra a Figura 4.7. Observa-se neste gráfico a linearidade da massa acumulativa de levedura com o tempo, indicando que as taxas de produção de pó são praticamente constantes, com um pequeno desvio das curvas que representam os experimentos 9 e 11.

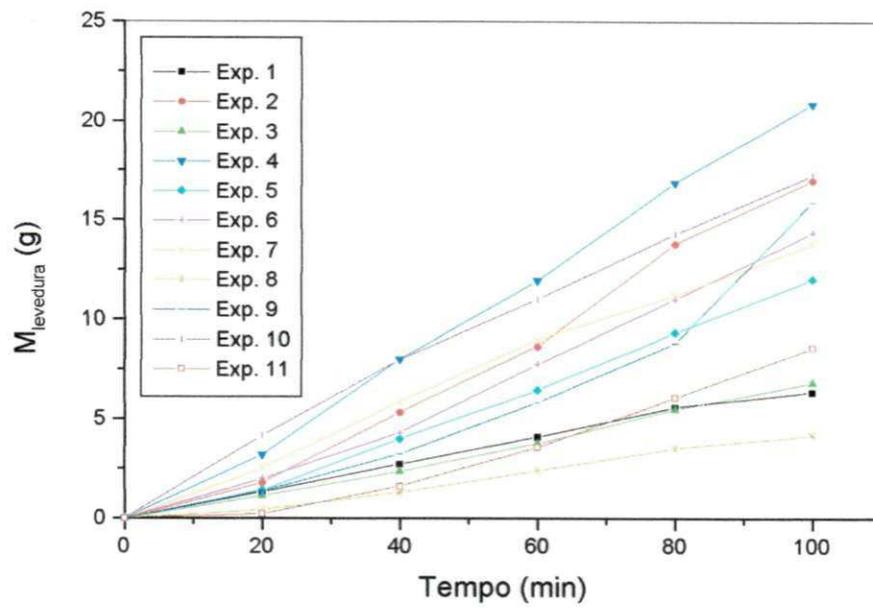


Figura 4.7 – Massa de levedura coletada em função do tempo

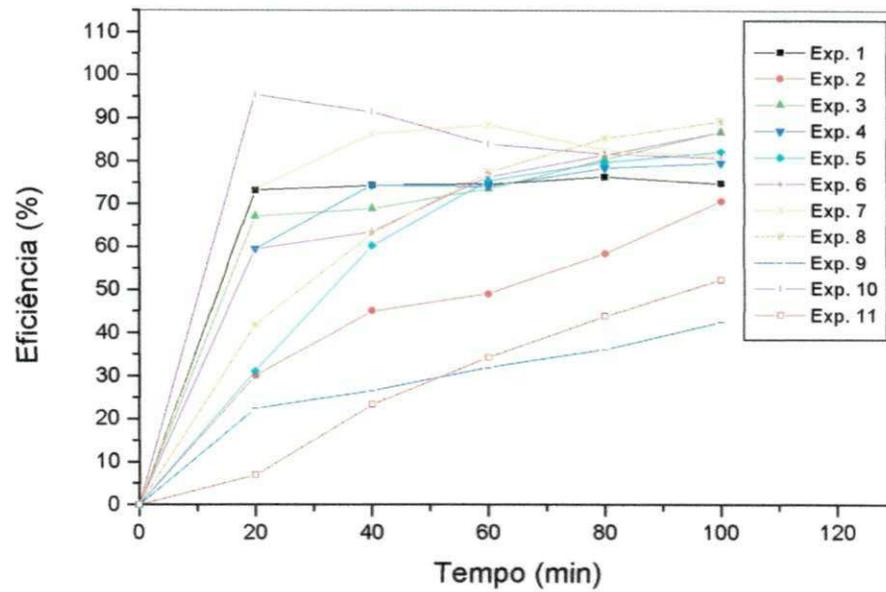


Figura 4.8 – Eficiência de produção de levedura em função do tempo

A Figura 4.8 ilustra que as eficiências de produção de levedura durante todos os ensaios são constantes a partir da terceira alimentação. A partir deste ponto o leito passa a operar em estado estacionário com uma produção uniforme de levedura seca, o que confirma mais uma vez que as taxas de produção são uniformes nas condições aqui estudadas. Ainda neste gráfico, constata-se novamente o comportamento diferenciado dos ensaios 9 e 11, onde não foi observada a uniformidade da eficiência de produção de levedura até a 5ª alimentação. No entanto, fica evidenciada uma tendência da eficiência, com a continuidade do processo, após sucessivas alimentações, possa vir a se tornar uniforme.

Tabela 4.6 – Resultados da regressão linear de massa acumulativa em função do tempo

Experimento	Percentual de Levedura (%)	Velocidade do Ar (m/s)	Equação ajustada	Coefficiente de correlação
1	2	0,199	$M = 0,0654t$	0,99739
2	6	0,199	$M = 0,1777t$	0,99214
3	2	0,227	$M = 0,0692t$	0,99762
4	6	0,227	$M = 0,2133t$	0,99877
5	4	0,213	$M = 0,1234t$	0,99232
6	4	0,213	$M = 0,1461t$	0,99485
7	4	0,213	$M = 0,1403t$	0,99806
8	1,2	0,213	$M = 0,0446t$	0,99287
9	6,8	0,213	$M = 0,1493t$	0,95476
10	4	0,241	$M = 0,1710t$	0,99786
11	4	0,185	$M = 0,0892t$	0,97212

Na Tabela 4.6 são mostrados os resultados do ajuste linear aos dados experimentais de massa acumulativa em função do tempo, confirmando a produção uniforme de levedura seca. Os menores coeficientes de correlação dos experimentos 9 e 11 obtidos a partir do ajuste do modelo linear aos dados destes ensaios, é decorrente de

instabilidades no leito, o primeiro devido ao elevado percentual de levedura alimentada e o segundo, em consequência da baixa velocidade do ar na entrada do secador.

#### 4.2.2.1 – Superfície de Resposta – Taxa de Produção

Sabe-se que a taxa de produção de levedura seca é dada pela derivada das equações ajustadas da Tabela 4.6 em cada um dos experimentos realizados. Utilizando o planejamento fatorial  $2^2 +$  configuração estrela e três repetições no ponto central, proposto neste trabalho, foi feito um estudo da influência das combinações das variáveis percentual de leveduras e velocidade do ar sobre a taxa de produção de levedura seca (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Taxas de produção da levedura seca

<b>Experimento</b>	<b>Percentual de Levedura (%)</b>	<b>Velocidade do Ar (m/s)</b>	<b>Taxa de Produção (g/min)</b>
1	2	0,199	0,0654
2	6	0,199	0,1777
3	2	0,227	0,0692
4	6	0,227	0,2133
5	4	0,213	0,1234
6	4	0,213	0,1464
7	4	0,213	0,1403
8	1,2	0,213	0,0446
9	6,8	0,213	0,1493
10	4	0,241	0,1710
11	4	0,185	0,0892

O planejamento foi analisado usando o software Statistica, versão 5.0 para realizar a regressão. O modelo quadrático codificado obtido para a taxa de produção em

função das variáveis estudadas, é mostrado abaixo. Os parâmetros estatisticamente significativos para o modelo estão em negrito.

$$M = \mathbf{0,1366} + \mathbf{0,051} (M_1/M_1) + 0,0194 U - 0,015 (M_1/M_1)^2 + 0,0012 U^2 + 4.1$$

$$0,0079 (M_1/M_1)U$$

A análise de variância (ANOVA) para a taxa de produção é mostrada na Tabela 4.8. 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 0,944. 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 valor de F calculado foi maior que o tabelado. Entretanto, o modelo não pode ser considerado preditivo, pois o F calculado sobre o F tabelado é menor que 4 conforme BARROS NETO (1995).

Tabela 4.8 – Análise de variância para a 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	0,025296	5	5,0492e-3	8,81	6,8
Resíduo	0,003116	5	6,232e-4		
Total	0,028362	10			
Falta de Ajuste	0,002838	3	9,46e-4		
Erro Puro	0,000278	2	1,39e-4		
Qual. do Ajuste	89,19%				
Coef. correlação	0,944				
F tabelado (95%)				5,05	19,16
F cal./F tab.				1,74	

A Figura 4.9 apresenta os pontos experimentais de taxa de produção em boa concordância com a reta dos valores previstos pelo modelo, sendo a visualização gráfica do coeficiente de correlação.

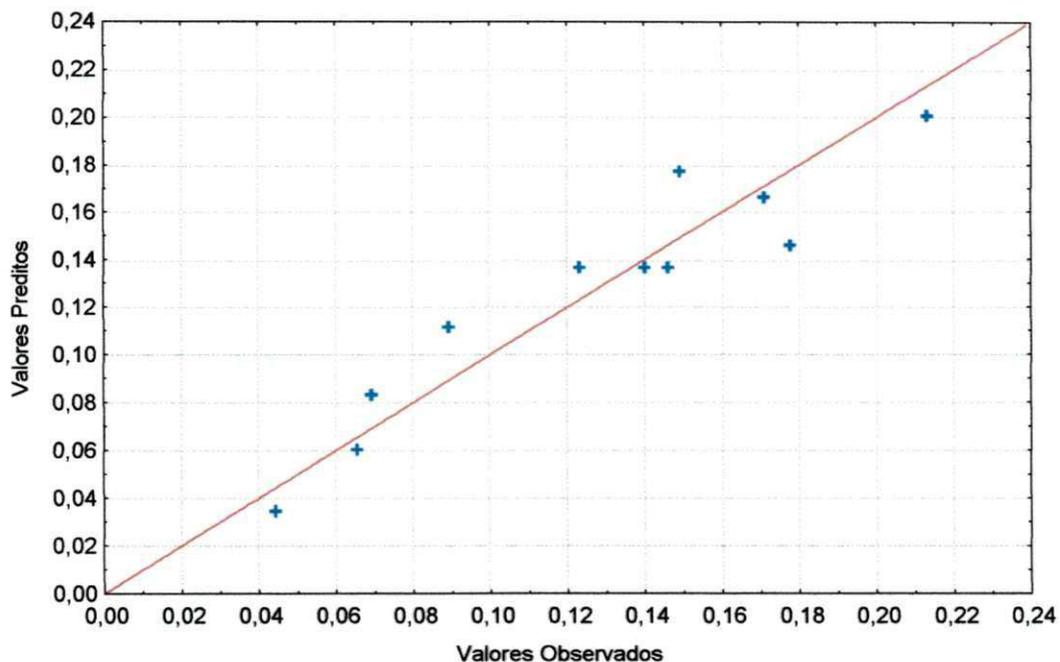


Figura 4.9 - Valores observados versus valores preditos

Analisando-se o parâmetro teste F na verificação da validade estatística do modelo ajustado, observa-se que o valor de F calculado pela regressão dos dados experimentais é maior que o valor de F tabelado para uma distribuição de referência com 95% de confiança. Isto mostra que o modelo apresenta uma quantidade de variação devido ao modelo ajustado superior à variação não explicada, indicando que o modelo ajustado representa bem os valores experimentais. Então, pode-se utilizar a Equação 4.1 para gerar a superfície de resposta para a taxa de produção. A Figura 4.10 ilustra a superfície construída para todas as combinações possíveis do percentual de levedura e velocidade do ar.

O comportamento da taxa de produção frente as variáveis de entrada, mostra um aumento com valor superior a 0,200g/min para valores de percentagem de levedura maior que 6%, para qualquer valor de velocidade, podendo ser justificado pelo efeito

positivo do percentual de leveduras sobre a taxa de produção de acordo com a Equação 4.1.

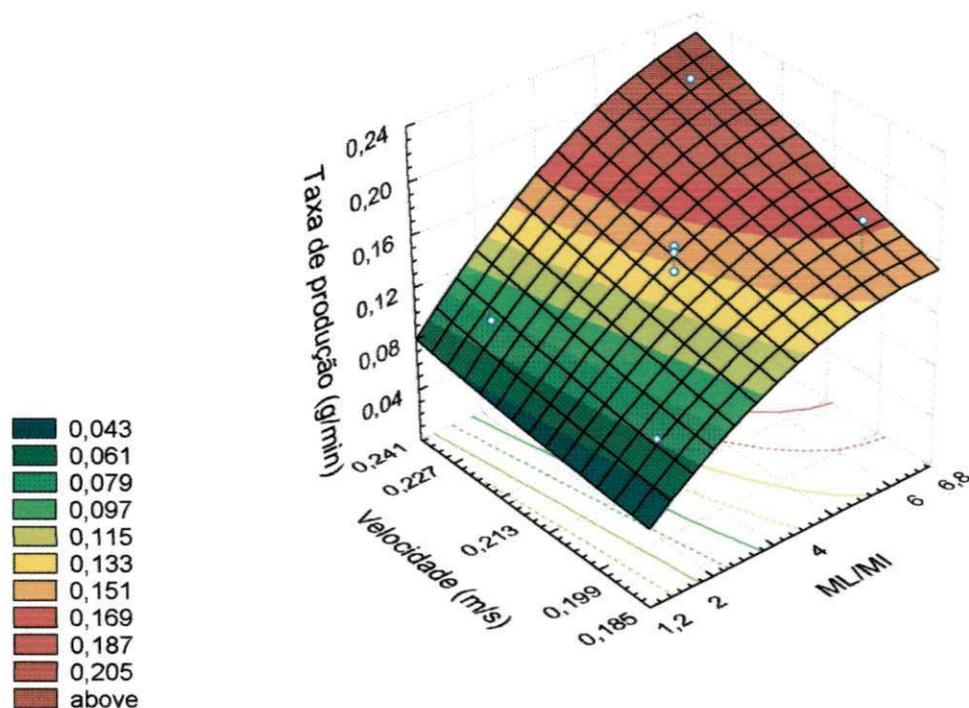


Figura 4.10 – Superfície de resposta para taxa de produção

### 4.3 - QUALIDADE DO PRODUTO FINAL

#### 4.3.1 – TEOR DE UMIDADE E PROTEÍNAS TOTAIS

A determinação da umidade e do valor nutricional das leveduras foi realizada de acordo com os métodos citados no Capítulo III. Os resultados obtidos nas determinações físico-químicos são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultados do teor de umidade e proteína

<b>Experimento</b>	<b>Percentual de Levedura (%)</b>	<b>Velocidade do Ar (m/s)</b>	<b>Umidade do coletado (%)</b>	<b>Umidade do retido (%)</b>	<b>Proteínas totais (%)</b>
1	2	0,199	17,6	*	51,82
2	6	0,199	23,7	13,9	50,09
3	2	0,227	11,65	11,65	50,95
4	6	0,227	16,25	11,0	51,82
5	4	0,213	18,64	17,0	51,82
6	4	0,213	11,19	7,18	50,95
7	4	0,213	11,56	8,74	51,82
8	1,2	0,213	12,59	*	51,82
9	6,8	0,213	16,2	17,46	51,82
10	4	0,241	31,34	31,34	52,68
11	4	0,185	13,13	13,35	52,68

\* → experimentos com retenção igual a zero.

A medida do teor protéico para os diferentes valores de velocidades do ar e percentuais de levedura alimentada apresenta valores muito próximos, com os teores de proteínas totais se mantendo praticamente constante.

Segundo SANTIN (1996) a desnaturação das proteínas começa a ocorrer com temperaturas acima de 65°C, como a quebra das cadeias polipeptídicas, a qual é uma reação irreversível. Como neste trabalho não houve variação da temperatura do ar alimentado, mantendo-se o valor médio em torno de 38°C, esperava-se que os teores de proteínas nos ensaios fossem próximos, o que realmente aconteceu. Segundo CHEFTEL (1989), a velocidade de desnaturação depende da temperatura e duplica quando a temperatura aumenta 10°C. Acredita-se que pelas condições estudadas neste trabalho não ocorreu alteração química das proteínas, porém para que se possa afirmar é necessário um estudo mais detalhado sobre os mesmos.

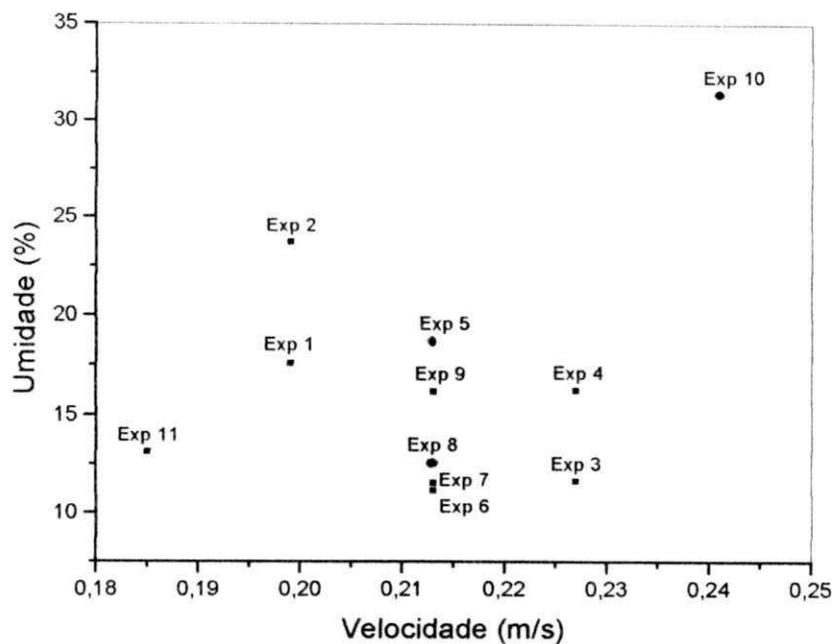


Figura 4.11 – Umidade em função da velocidade do ar. Sobre os pontos estão indicados o numero do experimento.

Quanto ao teor de umidade do coletado, observa-se na Figura 4.11, juntamente com a Tabela 4.6, que há um aumento na umidade quando o percentual de levedura aumenta para uma mesma velocidade, com exceção dos experimentos 5, 8 e 10 (marcado no gráfico com um circulo vermelho). O comportamento diferenciado destes experimentos pode estar associado ao efeito das condições ambiente. Estes ensaios foram realizados durante o período chuvoso, com alta umidade relativa e temperatura ambiente inferior em relação aos outros. Já no caso do experimento 10, além das condições ambientais, houve um arraste prematuro das particulas de leveduras, com níveis de umidade maiores, devido à alta velocidade utilizada. Isto pode ser observado na Figura 4.11. Outro fator relacionado com a alta velocidade utilizada é o elevado valor das perdas verificada neste experimento, como mencionamos anteriormente. Excetuando os pontos obtidos em condições ambientes diferentes, experimento 5, 8 e 10, pode ser observado, na Figura 4.11 uma tendência geral de diminuição da umidade do pó com o aumento da velocidade. Esta tendência indicaria que, nas faixas utilizadas,

o aumento da velocidade promoveria um incremento nas taxas de transferência de massa favorecendo assim a secagem. No entanto, para velocidades elevadas, como no experimento 10, o arraste prematuro das partículas prevaleceria sobre o aumento das taxas de transferência.

De um modo geral, observando a Tabela 4.6, verifica-se que o teor de umidade para a maioria dos experimentos ficou acima do exigido pela legislação para levedura seca que é de no máximo 12% (GHIRALDINI et alli, 1996). Apenas os ensaios 3, 6 e 7 se encontram dentro desta especificação. Para que haja um menor percentual de umidade se faz necessário o estudo de outras variáveis não abordadas neste trabalho que podem ter influência significativa sobre o mesmo, especialmente a temperatura de operação e tempo de residência.

Tabela 4.10 – Resultados do teor de umidade e proteínas totais da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, comparados com valores da literatura.

	Rheinboldt et alli (1987)	Santin (1996)	Oliveira et alli (1996)	Nicacio (2002)	Presente trabalho
Proteínas(%)	32 - 38	50	25,99 - 27,24	12,09-57,81	50,09 - 52,68
Umidade(%)	8	-	7,77 - 11,21	12	11,19 - 31,34

Os resultados das médias dos teores de umidade e proteínas totais das células de *Saccharomyces cerevisiae* encontradas neste trabalho são mostrados na Tabela 4.10, comparativamente aos valores obtidos por outros autores. As composições médias de proteínas citadas por RHEINBOLDT et alli (1987) variaram de 32 a 38%, utilizando um secador spray dryer, com um teor de umidade final de 8%. OLIVEIRA et alli (1996), trabalhando também com secador spray dryer e temperatura de operação de 73 a 140°C determinou um teor de umidade e proteínas de 7,77 a 11,12 e 25,99 a 27,24, respectivamente, valores estes obtidos sob diversas condições operacionais. O autor atribui o aumento da umidade e a diminuição das proteínas totais ao aumento da vazão de alimentação. Este resultado não foi observado neste trabalho, pois em todas as condições experimentais estudadas obteve-se praticamente o mesmo valor para as proteínas. Valores semelhantes aos aqui apresentados foram obtidos por SANTIN

(1996), trabalhando com secagem em estufa e temperaturas de 55 a 120°C, que obteve um teor de proteínas em torno de 50% em todos os ensaios.

NICÁCIO (2002) obteve resultados referentes à umidade (12%) e teor de proteínas (12,09 a 57,56%) de estudos realizados com secagem de leveduras em estufa. Como utilizou diversas faixas de temperatura, para efeito de comparação, pode-se tomar o valor do teor de proteínas a 40 e 55°C, que é de 48,7 e 48,4%. Estes teores são inferiores aos encontrados neste trabalho, que pode ser justificado pelo tempo total do processo de secagem, que no caso da secagem em estufa foi de 300 minutos e no leito de jorro aqui estudado, onde todo o processo ocorre em 100 minutos, a levedura seca começa a ser coletada a partir dos 2 minutos iniciais. Então se conclui que a variável tempo tem influência no processo. Como mencionado no Capítulo II, NICACIO (2002) conclui que em geral um aumento de temperatura, requer um menor tempo de secagem, portanto maior teor de proteínas e melhor qualidade do produto.

## CAPÍTULO V

---

### CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, podemos concluir que:

- A presença da levedura modifica os parâmetros fluidodinâmicos no leito de jorro;
- Quanto aos parâmetros fluidodinâmicos, o  $\Delta P_M$  diminui com o aumento da proporção  $M_1/M_2$ . O mesmo efeito é observado para o  $\Delta P_{jm}$ ;
- Com relação a  $U_{jm}$  não houve variação significativa com o aumento da proporção, de levedura com um valor médio observado em torno de  $0,1676 \pm 0,0086$  m/s;
- A comparação com valores obtidos de correlações empíricas disponíveis na literatura, calculados com as propriedades do poliestireno, mostrou que para  $\Delta P_M$  e  $\Delta P_{jm}$ , os desvios são consideráveis;
- As correlações para  $U_{jm}$  apresentaram menores desvios. Nota-se que a de ABDELRAZEK (1969) é a que melhor ajusta ao dado experimental;
- A eficiência de produção de pó foi alta em todos os experimentos se comparada à secagem com polpas de frutas (MEDEIROS, 2001; MORAIS, 1996);
- Na maioria dos experimentos há uma tendência ao aumento das eficiências com o aumento das velocidades para um mesmo percentual de levedura alimentada. Nos experimentos 9 e 10 não se verifica esta tendência, o primeiro devido ao elevado percentual de leveduras alimentadas e velocidade insuficiente para arrastar a levedura seca aumentando o percentual de retenção. Quanto ao ensaio 10 a elevada velocidade do ar promoveu o arraste de muito material mantendo uma eficiência considerada boa, mas aumentando a percentagem de perdas.

- Com relação à retenção de sólidos no leite, os valores observados foram baixos, com uma variação de 0% (experimentos 1 e 8) a 23,1% (experimento 5);
- De uma maneira geral, as perdas foram elevadas, sugerindo a necessidade de melhorar o sistema experimental, especialmente o método de alimentação, que era efetuada retirando-se a tampa do leite.
- Os resultados da cinética de produção de levedura seca mostraram que nas condições estudadas neste trabalho a produção é uniforme
- As eficiências de produção de levedura durante a maioria dos ensaios são constantes a partir da terceira alimentação
- Já os ensaios 9 e 11 não apresentaram uniformidade da eficiência de produção até a 5ª alimentação. Entretanto, observa-se nestes ensaios uma tendência da eficiência evoluir até atingir um valor constante com a continuidade do processo, após sucessivas alimentações.
- O modelo quadrático codificado obtido para a taxa de produção em função das variáveis estudadas é estatisticamente significativo com 95% de confiança. Entretanto, o modelo não pode ser considerado preditivo, pois o F calculado sobre o F tabelado é menor que 4 conforme BARROS NETO (1995);
- O comportamento da taxa de produção frente às variáveis de entrada mostra um aumento com valor superior a 0,200g/min para valores de percentagem de levedura maior que 6%, para qualquer valor de velocidade. Este resultado é justificado pelo efeito positivo do percentual de leveduras sobre a taxa de produção;
- A medida do teor protéico para os diferentes valores de velocidades do ar e percentuais de levedura alimentada apresenta valores muito próximos, com os teores de proteínas totais se mantendo praticamente constantes;
- Quanto ao teor de umidade do produto coletado, observou-se um aumento com o percentual de levedura alimentada para uma mesma velocidade do ar. Este comportamento foi observado em todos os experimentos excetuando-se o 5, 8 e 10 que foram realizados sob condições ambiente diferentes dos demais, com alta umidade relativa e temperatura ambiente inferior;
- Observa-se nos resultados uma tendência geral de diminuição da umidade do pó com o aumento da velocidade, indicando que, nas faixas utilizadas, o aumento da velocidade promove um incremento nas taxas de transferência de massa

favorecendo assim a secagem. No entanto, para velocidades elevadas, como no experimento 10, o arraste prematuro das partículas prevaleceria sobre o aumento das taxas de transferência;

- Verifica-se que o teor de umidade para a maioria dos experimentos ficou acima do exigido pela legislação para levedura seca que é de no máximo 12%;
- As médias dos teores de umidade e proteínas totais encontradas neste trabalho são superiores quando comparadas aos valores obtidos por outros autores, estando as proteínas dentro dos padrões exigidos pela legislação de no mínimo 25%;
- Pelo exposto, pode-se concluir que a secagem em leito de jorro é uma alternativa favorável, no sentido de obter um produto com boas propriedades nutricionais, especialmente elevados teor de proteínas, o que o torna interessante como aditivo alimentar.

## CAPÍTULO VI

---

### SUGESTÕES

Para dar prosseguimento ao presente trabalho, algumas sugestões são consideradas importantes. São elas:

- Levantamento das curvas fluidodinâmicas utilizando outros tempos de secagem;
- Utilizar as correlações aqui apresentadas para o cálculo dos parâmetros fluidodinâmicos utilizando as propriedades médias do leito formado por partículas inertes e leveduras;
- Estudar a secagem em leito de jorro utilizando a levedura industrial;
- Utilizar temperaturas mais altas com intuito de observar o efeito desta sobre a qualidade do produto, principalmente a umidade final;
- Analisar a qualidade nutricional do produto através de aminogramas;
- Realizar análises de atividade fermentativa para verificar se ocorre a inativação das leveduras nas condições estudadas neste trabalho;
- Analisar a qualidade do produto obtido realizando análise de cor e granulometria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ABDELRAZEK, I. D.; **An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds**, 1969. Apud MATHUR, K. B. e EPSTEIN, N., Spouted Beds. Academic Press, New York, 1974.
- A. O. A. C. **Official methods of analysis of the association of official agricultural chemists**. Washington, Ed. 12, 1984.
- ALMEIDA, M. M. **Desidratação de polpa de umbu**, UFPB. Relatório de Iniciação Científica. Campina Grande -PB, 1991.
- ALMEIDA, M. M. **Processamento de urucum em leito de jorro – estudos fluidodinâmicos**, Dissertação de Mestrado, UFPB. Campina Grande -PB, 1993.
- ALSINA, O. L. S.; MORAIS, V. L. M.; LIMA, L. M. R. & SOARES, F. H. L., **Studies on the Performance of the Spouted Bed dryer for west Indian cherry pulp**. X International Drying Symposium (IDS'96). Kraków, Poland, Vol. B, pp. 865 -872, 1996.
- ANDRIETTA M. G. S. **Novas alternativas para subprodutos da cana-de-açúcar**. STAB, volume 16 nº 4. Campinas- SP, pp 10, 1998.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J. S. e BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Editora da Unicamp. Campinas - SP, 1995.

- BAYROCH, D. & INGLEDEW, W. M. **Fluidized bed drying of baker's yeast: moisture levels, drying rates, and viability changes during drying.** Food Research International, Volume 30, N° 6, pp. 407 – 415, 1997.
- BERRUTI, F.; MUJR, J. R. e BEHIE, L. A. **Solids circulation in a spout – fluid bed with draft tube**, 1990. 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. 6, 1992.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters. An introduction to design, data analysis and model building**, 1978 . Apud BARROS NETO, B.; SCARMINIO, J. S. & BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Editora da Unicamp. Campinas – SP, 1995.
- BOX, G. E. P. e WILSON, K. B. **On the experimental attainment of optimum conditions**, 1951. Apud 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, PP. 265, 1974.
- BRUNELLO, G., NINA, G. D., NUNES, F. C. S. & NASCIMENTO, C. A. O. **Minimum air requirement for spouting mixed particles.** Canadian Journal do Chemical Engineering. Volume 52, pp. 170-3, 1974.
- BUTOLO J. E. **Determinação do valor biológico da levedura de cana (*Saccharomyces cerevisiae*) como fonte protéica na substituição da proteína fornecida pelo farelo de soja, e como fonte vitamínica substituindo-se total e parcialmente as vitaminas do complexo B, presentes na levedura, na**

- alimentação de poedeiras comerciais.** In: II Seminário de Produção e Comercialização de Levedura, Anais. Piracicaba. C.T.C. Abril, 1991
- 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.
  - CHARM, S. E. **Dehydration of foods. The fundamentals of food engineering,** Westport. The AVI Publishing Company, Inc., p. 252-277, 1963.
  - CHEFTEL, J. C.; CUQ, J. L. & LORIENT, D. **Proteínas alimentares.** Bio química, Propriedades funcionales, Valor nutritivo, Modificações químicas. Editorial ACRIBIA S. A. España, 1989.
  - CHEN, S.C. e JOHNSON, W.H. **Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials,** Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Volume. 12, n.º 1, pp. 101, 1969.
  - CLAFLIN, J. K. e FANE, A. G. **Gas distribution and heat transfer in a draft-tube spouted bed,** 1983. 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.
  - 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.
  - CRANK, J. **The mathematics of diffusion,** 2 ed ., Clarendon Press, p. 414 , 1975.

- DAUDIN, J.D., **Calcul dès cinétiques de séchage par lair chaudes**, Science Aliments. Volume 3 , n 1 , p. 1-36 , 1983.
- 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. Volume 1, pp. 119-154, 1980.
- FRAZIER W. C. e WESTHOFF D. C. **Microbiologia de los Alimentos**. Editorial Acribia S.A., Espanhã, 1985.
- GHIRALDINI, J. A.; FILHO, D. L 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.
- 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.
- GRANGEIRO, M. G. A. **Inclusão da levedura de cana de açúcar (*Saccharomyces cerevisiae*) em dietas para frangos de corte**. Dissertação de Mestrado, UFC. Fortaleza – CE, 2000.
- GRBAVCIC, A. B., VUKOVIC, D. U. & ZDANSKI, F. K.; **Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds**, 1976. Apud ALMEIDA, M. M. Processamento de urucum em leito de jorro – estudos fluidodinâmicos, Dissertação de Mestrado, UFPB. Campina Grande -PB, 1993.
- HALL, C. W. **Drying farm crops**. Ann Arboor, Ed. Wards Brodthers, pp.336, 1971.
- ITAL – Instituto Tecnológico de Alimentos. Desidratação de Frutas e Hortaliças – Manual Técnico. 1997.

# APÊNDICE

## A – ENSAIOS FLUIDODINÂMICOS

TABELA A.1 – Valores de queda de pressão e velocidade obtidas.

$$M_1/M_1 = 0\%$$

Velocidade crescente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade decrecente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
0	0	0,2272	153,7752
0,0071	206,1848	0,2201	254,2189
0,0284	625,667	0,213	267,4758
0,0426	1031,439	0,1704	399,1075
0,0639	1649,529	0,1562	367,4552
0,1207	448,7079	0,142	423,5724
0,1349	393,6035	0,0923	385,7085
0,1704	287,8386	0,0781	336,0778
0,2272	153,7752	0,0568	249,6671
		0	0

TABELA A.2 – Valores de queda de pressão e velocidade obtidas.

$$M_I/M_I = 2\%$$

Velocidade crescente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade decrecente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
0	0	0,2343	145,88678
0,0142	162,15939	0,2272	110,97947
0,0284	240,50554	0,2059	125,07286
0,0426	312,47048	0,1917	186,40594
0,0497	388,85572	0,1846	210,39995
0,071	462,93414	0,1775	224,23952
0,0852	532,87371	0,1633	238,57358
0,1065	574,46343	0,1136	259,88858
0,1278	610,25454	0,0923	282,99879
0,1491	306,44044	0,0497	303,26428
0,1704	245,04292	0	0
0,1917	169,28765		
0,2201	117,27257		
0,2343	145,88678		

TABELA A.6 – Valores de queda de pressão e velocidade obtidas.

$M_1/M_1 = 4\%$

Velocidade crescente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade decrecente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
0	0	0,2059	107,95457
0,0213	159,3344	0,1917	169,28765
0,0284	223,38726	0,1775	207,12123
0,0355	285,84481	0,1704	202,2472
0,0497	337,50085	0,1491	263,64472
0,0852	430,16399	0,1278	285,00707
0,0923	471,29996	0,1207	234,72933
0,1065	531,66771	0,0923	223,08478
0,1349	282,33464	0,0568	232,54876
0,142	269,50776	0,0426	226,87904
0,1491	263,64472	0,0355	191,69423
0,1775	207,12123	0	0
0,1917	160,72851		--
0,2059	125,07286		--

TABELA A.10 – Valores de queda de pressão e velocidade obtidas.

$M_1/M_1 = 6\%$  e tempo de secagem = 0 minuto

Velocidade crescente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade decrecente (m/s)	$\Delta P$ (N/m <sup>2</sup> )
0	0	0,1988	118,02091
0,0071	120,59335	0,1917	109,37365
0,0284	240,50554	0,1775	190,00294
0,071	437,25671	0,1704	193,68805
0,0781	447,34672	0,1562	230,50894
0,0852	430,16399	0,1278	267,88878
0,0994	408,1309	0,0994	279,74374
0,1136	456,74889	0,071	266,07383
0,1278	524,6631	0,0426	226,87904
0,142	509,16379	0	0
0,1562	264,74552		
0,1846	141,9268		
0,1917	92,25536		
0,1988	66,66604		

## B – ENSAIOS DE SECAGEM

TABELA B.1 – Condições ambiente nos experimentos

Exp.	Percentual de Levedura (%)	Velocidade do Ar (m/s)	Umidade Relativa (%)	Temp. Ambiente (°C)	Temp. na entrada do Secador (°C)
1	2	0,199	57,6	28	37
2	6	0,199	60,5	28	37,5
3	2	0,227	59,6	28	37,3
4	6	0,227	50	29	39
5	4	0,213	65,6	23	32,5
6	4	0,213	56	28	37,5
7	4	0,227	56	28	37,3
8	1,2	0,213	48,6	25	35
9	6,8	0,213	54,3	29	37,5
10	4	0,2410	58	24	33,27
11	4	0,185	58,5	28	37,3

**Tabela B.2 – Cinética de Produção****Experimento 1**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0,0
20	1,331
40	2,71
60	4,08
80	5,565
100	6,341
*	6,814

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.4 – Cinética de Produção****Experimento 3**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	1,14
40	2,34
60	3,75
80	5,47
100	6,81
*	7,368

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.3 – Cinética de Produção****Experimento 2**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	1,775
40	5,321
60	8,666
80	13,8
100	17
*	20,837

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.5 – Cinética de Produção****Experimento 4**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0,0
20	3,2
40	8
60	11,96
80	16,88
100	20,86
*	21,4

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.6 – Cinética de Produção****Experimento 5**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	1,42
40	3,995
60	6,456
80	9,333
100	12,038
*	12,489

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.8 – Cinética de Produção****Experimento 7**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	2,491
40	5,461
60	8,668
80	11,901
100	15,299
*	15,966

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.7 – Cinética de Produção****Experimento 6**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0,0
20	2,01
40	4,3
60	7,75
80	11
100	14,37
*	14,66

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.9 – Cinética de Produção****Experimento 8**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	0,432
40	1,299
60	2,391
80	3,51
100	4,172
*	4,598

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.10 – Cinética de Produção****Experimento 9**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	1,366
40	3,24
60	5,83
80	8,823
100	12,5
*	12,941

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.12 – Cinética de Produção****Experimento 11**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	0,24
40	1,61
60	3,559
80	6,06
100	8,606
*	9,033

\*→Após desligar o secador.

**Tabela B.11 – Cinética de Produção****Experimento 10**

T (min)	M <sub>Levedura</sub>
0	0
20	4,16
40	7,99
60	11
80	14,28
100	17,27
*	17,64

\*→Após desligar o secador.

## C – DOSAGEM DE NITROGÊNIO TOTAL

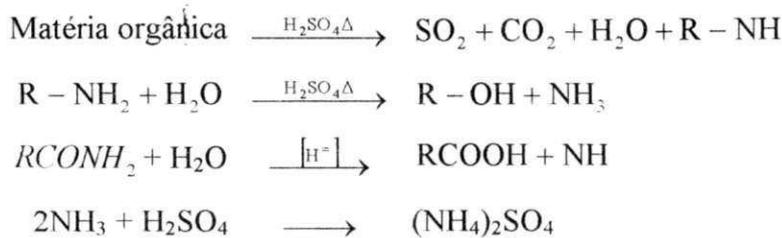
As etapas para a determinação do nitrogênio total foram as seguintes:

### 1. Digestão

Em um tubo de ensaio próprio para digestão foi adicionado 0,5 g de amostra de levedura seca, 1g de mistura catalítica (sulfato de potássio e sulfato de cobre) e 10ml 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:



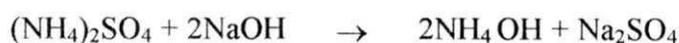
### 2. Destilação

O tubo contendo a amostra digerida é conectado ao aparelho de destilação (Tecnal, TE – 036/1) adicionando-se 150ml 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  $NH_3$ . O  $NH_3$  desprendido é recebido em um erlenmeyer previamente adaptado ao conjunto de

destilação, contendo solução de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  a 4% por/volume com indicadores vermelho de metila e verde de bromocresol.

A solução receptora tem a finalidade de fixar o  $\text{NH}_3$  para que se proceda a titulação, sendo que o ácido bórico, quando em contato com  $\text{NH}_3$ , forma o sal  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$ , 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  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$ . 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  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{BO}_3$  é determinada através da titulação com solução padrão de  $\text{HCl}$  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:

$$\%N = \frac{V \cdot f \cdot 0,014 \cdot 100}{m} \quad (3.3)$$

Sendo a porcentagem de proteína bruta expressa por:

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

(3.4)

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