



Dimensionamento de um Spray Dryer para uma Planta
Industrial de Zeólitas

Vanessa Panasco da Silva
Vinicius Menez da Silva

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Donato A. Gomes Aranda

Dezembro de 2008

**DIMENSIONAMENTO DE UM SPRAY DRYER PARA UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE ZEÓLITAS.**

Vanessa Panasco da Silva

Vinicius Menez da Silva

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Leôncio Diógenes T. Câmara, Dsc

Neyda Om Tapanes, Dsc

Gisel Chenard, Msc

Orientado por:

Donato A. Gomes Aranda, Dsc

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Dezembro de 2008

Silva, Vanessa Panasco

Silva, Vinicius Menez

Dimensionamento de um Spray Dryer para uma planta industrial de zeólitas.

Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

vii, 67 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008.

Orientador: Donato A. Gomes Aranda

“Dois importantes fatos, nesta vida, saltam aos olhos: primeiro que cada um de nós sofre inevitavelmente derrotas temporárias, de formas diferentes, nas ocasiões mais diversas. Segundo, que cada adversidade traz consigo a semente de um benefício equivalente. Ainda não encontrei homem algum bem-sucedido na vida que não houvesse antes sofrido derrotas temporárias. Toda vez que um homem supera os reveses, torna-se mental e espiritualmente mais forte... É assim que aprendemos o que devemos à grande lição da adversidade”.

Andrew Carnegie a Napoleon Hill

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os seus parentes pelo carinho, educação, caráter e incentivo nos diversos momentos. Em especial a seus pais e irmãs, por serem nossos alicerces nessa trajetória, sem eles não conseguiríamos trilhá-la com sucesso.

Ao professor Donato pela oportunidade em elaborar este trabalho sob sua orientação.

Aos professores da Escola de Química, pela motivação e pela competência em repassar os seus conhecimentos.

Aos nossos amigos que nos incentivaram e apoiaram durante toda a graduação.

Agradecemos, enfim, a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

DIMENSIONAMENTO DE UM SPRAY DRYER PARA UMA PLANTA INDUSTRIAL DE ZEÓLITAS.

Vanessa Panasco da Silva
Vinicius Menez da Silva

Dezembro de 2008

Orientador: Prof. Donato A. Gomes Aranda, Dsc

Com o intuito de produzir material em quantidade suficiente para a realização de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em unidades pilotos específicas (HDT, HCC, FCC, Petroquímica, etc.), será criada uma Unidade Protótipo de Preparo de Catalisadores (PROCAT) que atuará em conjunto com a Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC).

Esta unidade terá como principal objetivo o preparo da zeólita ZSM-5, um importante catalisador para o refino do petróleo e para a indústria petroquímica. A unidade de produção contará com reatores CSTR, 1 reator autoclavado, sistema de moagem, secagem, atomização, calcinação, etc.

O objetivo deste trabalho consiste no projeto do sistema de secagem por atomização (Spray Dryer) aplicado a zeólita ZSM-5. Inicialmente será realizada uma descrição das propriedades e aplicações do secador, para depois, efetuar o projeto da unidade de atomização.

Sprays Dryers podem ser aplicados em uma vasta gama de produtos de diversos tipos de indústrias, como indústria química, de alimentos e farmacêutica. Um Spray Dryer pode ser definido com sendo uma grande câmara cilíndrica, usualmente vertical, em que o material a ser seco é pulverizado (atomizado) na forma de pequenas gotículas. Nesta câmara também é introduzido um grande volume de gás quente, suficiente para fornecer o calor necessário para a completa evaporação do líquido.

Os resultados do projeto mostraram que o Spray Dryer mais indicado para secar a suspensão de zeólita deve possuir câmara cilíndrica, atomizador rotatório, trabalhar em paralelo, além de possuir separação do material grosseiro na câmara de secagem e sistema de separação do material fino (ciclone e filtro de mangas) que tenha sido arrastado pelo gás. Os cálculos do dimensionamento da câmara utilizando parâmetros da literatura indicaram um volume de 64.88m^3 , uma altura de 3.09m e um diâmetro de 5.16m.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. PROCAT.....	3
1.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DA UNIDADE.....	5
1.3. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO.....	5
1.4. ZEÓLITA ZSM-5.....	6
2. OBJETIVOS	8
3. SECAGEM	9
<i>Princípios gerais</i>	10
3.1. SECADORES.....	12
<i>Secadores Diretos</i>	12
<i>Batelada x Contínuo</i>	13
<i>Avaliações da secagem direta / Spray Dryer</i>	14
3.2. MECANISMOS DA SECAGEM	15
<i>Transferência de calor</i>	15
<i>Transferência de Massa</i>	16
4. SPRAY DRYER.....	21
4.1. Elementos de um Spray Dryer.....	23
4.2. Atomização.....	26
4.2.1. Atomizadores.....	26
<i>Tipos de Bocal</i>	29
4.3. Câmara de secagem.....	33
4.4. Modos de Operação.....	35
4.5. Aquecimento do ar.....	38
4.6. Sistema de Separação do material (Ciclone).....	38
5. PROJETO DO SISTEMA	39
5.1. Escolha do tipo de Atomizador.....	42
5.2. Dimensionamento da Câmara de Secagem	42
5.3. Descrição dos sistemas presentes no Spray Dryer	50
5.3.1. Sistema de Alimentação	51
5.3.2. Sistema de Aquecimento de Ar	52
5.3.3. Câmara de secagem	53
5.3.4. Sistema de Exaustão de Ar.....	54
5.4. Instrumentação e Controle.....	56

6. INTERDEPENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO	56
6.1. Interações dos parâmetros individuais	57
7. CONCLUSÕES.....	59
8. ANEXOS.....	60
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de blocos da unidade.....	05
Figura 2: Representação estrutural da zeólita.....	06
Figura 3: Variação do custo unitário de secagem pela taxa de produção.....	14
Figura 4: Taxa de secagem de um material granular.....	17
Figura 5: Possíveis dimensionamentos dos atomizadores.....	23
Figura 6: Equipamentos que compõem um Spray Dryer.....	24
Figura 7: Bocal a Pressão.....	30
Figura 8: Bocal a Dois Fuidos.....	31
Figura 9: Atomizador Rotatório com aletas.....	33
Figura 10: Ar de secagem.....	34
Figura 11: Diversas câmaras e modos de operação dos Sprays Dryers.....	36
Figura 12: Distribuição do tamanho das partículas para diferentes condições de processo.....	37
Figura 13: Variáveis importantes para o projeto da Câmara de Secagem.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações do Spray Dryer.....	23
Tabela 2: Principais propriedades dos bocais de atomização.....	28
Tabela 3: Dados fornecidos pelo PROCAT para o projeto.....	44
Tabela 4: Dependência entre as variáveis de processo.....	56
Tabela 5: Exemplos de Alimentos secos com Spray Dryer.....	59
Tabela 6: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para alimentos.....	60
Tabela 7: Exemplos de Aromas, cosméticos, produtos de limpeza e detergentes secos com Spray Dryer.....	60
Tabela 8: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para de Aromas, cosméticos, produtos de limpeza e detergente.....	61
Tabela 9: Exemplos produtos médicos / farmacêuticos secos com Spray Dryer.....	62
Tabela 10: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para produtos médicos / farmacêuticos.....	62
Tabela 11: Exemplos produtos químicos secos com Spray Dryer.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROCAT

Segundo o programa do governo brasileiro de “**PESQUISA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NA ÁREA DE PETRÓLEO**” objetiva-se desenvolver tecnologia de processos, produtos e serviços da indústria do petróleo. Para isto, torna-se necessário disponibilizar a diversas universidades do país uma unidade piloto multipropósito capaz de produzir material em quantidade suficiente para a realização de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em unidades pilotos específicas (HDT, HCC, FCC, Petroquímica, etc.).

Neste trabalho será apresentado um dos projetos que se trata da Unidade Protótipo de Preparo de Catalisadores – PROCAT – que se localizará no Parque Tecnológico de Santa Cruz – PTSC e terá o suporte da Fábrica de Catalisadores Carioca – FCC. Será abordado o projeto de um secador Spray-dryer visando à atomização e secagem do catalisador ZSM-5 zeólita, um importante material para o refino do petróleo e para indústria petroquímica.

O sucesso no preparo de um catalisador industrial depende fortemente da sua atividade, seletividade e estabilidade, sendo fundamental o conhecimento da sua estrutura, formulação, cinética de reação e propriedades físico-químicas. Tais características são de grande importância para o desenvolvimento de novos processos químicos na área de petróleo, onde há um grande número de processos catalíticos. A unidade piloto permite estudar a otimização dos processos já conhecidos, visando à melhoria na sua atividade e seletividade, assim como o auxílio no conhecimento de novos processos.

Uma etapa relevante na pesquisa e no desenvolvimento de processos químicos é a avaliação catalítica, seja dos diferentes catalisadores desenvolvidos ou dos catalisadores industriais. Como vantagem da geração de material para testes de sistemas catalíticos em escala piloto, existe a obtenção de dados cinéticos e modelagem de reações ligadas à área de petróleo. Assim, espera-se a elaboração de projetos de reatores catalíticos nas áreas de refino, reforma de nafta, hidrotratamento, produção e melhoria da qualidade de combustíveis e na qualidade ambiental. Além destes resultados, a unidade piloto auxilia no desenvolvimento de novos materiais, aplicados a processos de adsorção ou eletrocatalise.

A importância desse projeto está em melhorar a qualidade de produtos derivados do petróleo, como combustíveis líquidos e gás natural; diminuir o impacto ambiental dos processos catalíticos - via minimização na perda de hidrocarbonetos pesados através de seu reaproveitamento energético ou transformação em outros produtos de consumo - e desenvolver tecnologias limpas.

Então, o PROCAT é uma unidade piloto multipropósito, destinada à pesquisa para produção de adsorventes, catalisadores heterogêneos e seus respectivos intermediários para a indústria de química fina e de petróleo. A seguir será feita uma breve descrição de sua planta, onde será apresentado um fluxograma resumido e uma síntese das principais áreas presentes. Serão abordadas as principais características da zeólita ZSM-5 e os conceitos envolvidos na secagem de sua suspensão.

Como o alvo deste estudo é o dimensionamento do Spray Dryer utilizado nesta Unidade, realizou-se juntamente uma pesquisa sobre suas aplicações e características.

1.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DA UNIDADE

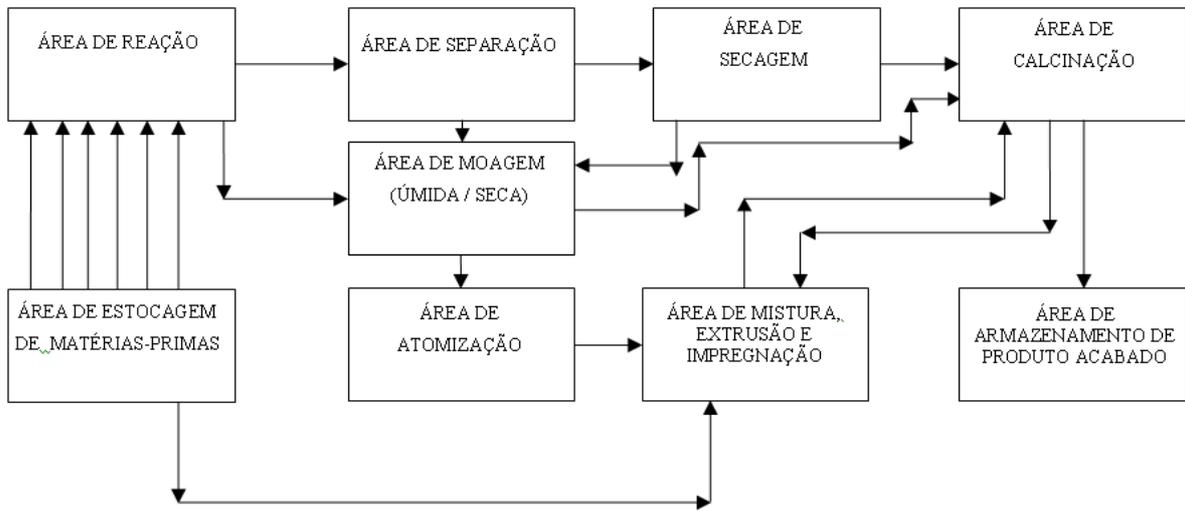


Figura 1: Diagrama de blocos da unidade

1.3. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO

Da área de estocagem de matérias-primas, onde são recebidos e estocados todos os insumos básicos necessários, as mesmas são enviadas a área de reação, área de síntese dos diferentes tipos de catalisadores, que consta de 3 reatores de 20 litros, 3 reatores de 100 litros e 1 reator autoclavado de 50 litros. A unidade tem flexibilidade para produzir materiais contendo terras raras ou materiais com baixo teor de Alumínio e/ou Sódio. A concepção adotada para a área de reação permite que nela sejam preparados todos os insumos bem como os catalisadores objeto da pesquisa.

A suspensão obtida poderá ser encaminhada diretamente para a área de secagem/atomização, ou precedida das áreas de separação e moagem úmida/seca. O catalisador seco obtido é então enviado a área de calcinação.

Tanto o material calcinado, como o material seco, moído e atomizado podem ser transferidos manualmente para a área de mistura, extrusão e impregnação e desta retornam para a área de calcinação.

1.4. ZEÓLITA ZSM-5

O termo zeólita foi utilizado inicialmente por Crönsted em 1756, para designar uma nova classe de minerais naturais constituída de aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos e alcalino terrosos.

O termo genérico “zeólita” se deu ao verificar que, sob aquecimento, ela parecia ebulir e ferver ao mesmo tempo com elevada liberação de vapor de água.

Hoje em dia, esse termo engloba um grande número de minerais naturais ou sintéticos que apresentam características estruturais comuns. Uma característica muito importante das zeólitas é sua grande porosidade. A estrutura é formada por canais e cavidades regulares e uniformes e são de dimensões moleculares, pois suas medidas (3-13 Å) são muito similares aos diâmetros cinéticos de várias outras moléculas. Este tipo de estrutura microporosa faz com que as zeólitas apresentem uma superfície interna extremamente grande em relação a sua superfície externa. [1]

A zeólita ZSM-5 (do inglês, *Zeolite Socony Mobil*, sendo “5” a abertura dos poros da zeólita, em angström) faz parte da família pentasil. Se caracteriza por um alto teor de silício ($\text{Si/Al} > 15$). A cela unitária da ZSM-5 apresenta a seguinte fórmula empírica: $\text{M}_n\text{Al}_n\text{Si}_{(96-n)}\text{O}_{192} \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$, onde M é o cátion de valência n. Nas zeólitas sintéticas são encontrados uma grande variedade de cátions provenientes diretamente da síntese ou por troca iônica posterior (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , cátions orgânicos diversos). [1]

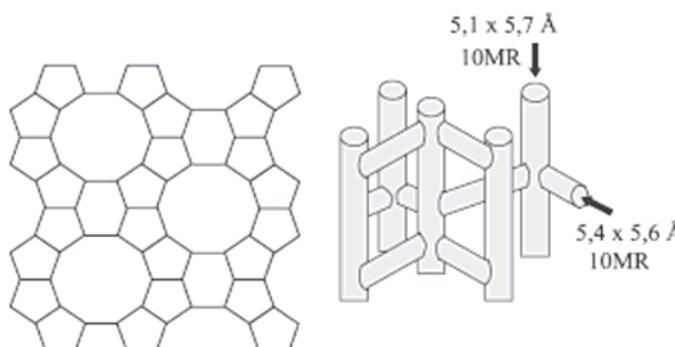


Figura 2: Representação estrutural da zeólita [2]

Na síntese destes materiais utilizam-se vários reagentes: sílica, aluminato de sódio, hidróxido de sódio, água, reagentes orgânicos e etc. A síntese é realizada em autoclaves com aquecimento e a cristalização da fase zeolítica leva de uma a duas semanas. [2]

A elevada capacidade de troca iônica, uma grande área superficial distribuída através de poros com diâmetros variáveis, a elevada estabilidade térmica e a elevada acidez fazem das zeólitas materiais de extremo potencial para inúmeras aplicações, tendo mostrado destaque como adsorventes na purificação de gases, separação de compostos aromáticos, como trocadores iônicos para remoção de metais pesados em solos contaminados, na catálise no refino do petróleo, na petroquímica, síntese de membranas para separação água-etanol e em aplicações biotecnológicas.

Tendo em vista as importantes aplicações comerciais das zeólitas, estes materiais vêm sendo sintetizados em todo o mundo. O consumo mundial de zeólitas sintéticas está estimado em 1,36 milhões de toneladas por ano e estatísticas estimam que ele aumente consideravelmente nos próximos anos.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste, portanto, no projeto de um secador tipo Spray Dryer, para a secagem do catalisador zeólita ZSM-5. Desta forma, este trabalho visa estudar as propriedades, os fenômenos e os equipamentos que constituem um sistema de secagem em Spray Dryer.

Sendo assim, para que as metas deste projeto fossem alcançadas foram realizadas as seguintes etapas:

- Introdução aos fenômenos que ocorrem durante a secagem, abordando os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos neste processo e apresentando também os tipos de secadores utilizados industrialmente.

- Descrição completa do sistema Spray Dryer, abordando os equipamentos que o constitui, com destaque para o tipo de atomizador, modo de operação escolhido e outras configurações existentes para o processo; buscando-se relacionar as vantagens e desvantagens de cada tópico.

- Projeto do sistema, incluindo os cálculos necessários para o dimensionamento da câmara de secagem.

3. SECAGEM

Os processos de secagem têm a finalidade de remover termicamente substâncias voláteis, normalmente a água, de suspensões para obtenção de produtos sólidos. Geralmente, o produto desejado encontra-se dissolvido em uma solução aquosa e com alto grau de pureza. Assim, faz-se necessário a utilização de secadores para obtenção do produto com reduzido teor de água e de outras substâncias voláteis indesejáveis.

As vantagens que justificam o uso da secagem em processos industriais são [3]:

- a) certos produtos são geralmente sensíveis a degradação química (desamidação e oxidação) e física (agregação e precipitação);
- b) redução dos custos com transporte;
- c) deixa o material com maior facilidade para o manuseio, por exemplo, fertilizantes, sabão em pó e corantes;
- d) aumento do tempo de prateleira, por exemplo, alimentos em geral;
- e) garante uma maior conveniência dependendo do uso final do produto, por exemplo, farmacêuticos que quando vendidos na forma de comprimidos reduzem o risco de contaminação.

No caso de produtos cristalinos, a secagem não pode prejudicar as formas dos cristais durante o processo. Com a exceção da secagem parcial por compressão ou adsorção, quase todos os processos industriais, realizam a secagem por vaporização da água, o que requer a adição de calor. Esse aquecimento necessário deve ser feito com cuidado, pois muitos produtos, como por exemplo, os produtos biológicos: proteínas e açúcares, que são termolábeis.

Princípios gerais

Para melhor entender o processo de secagem pela vaporização da água, é necessário prever o comportamento dos gases presentes nesta, especialmente o ar, pois este é o veículo mais utilizado para carregar o vapor d'água produzido no processo. Sabe-se que qualquer material exposto ao ar com uma determinada temperatura e umidade, poderá tanto perder ou ganhar água no seu meio até que uma condição de equilíbrio seja estabelecida. Esse equilíbrio obtido está sujeito a variações dependendo do tipo de mistura úmida a ser processada. São dois tipos [4]:

- Umidade livre: quando a água presente nos materiais está em equilíbrio com o vapor d'água. Sendo assim, a água na superfície tem a mesma pressão de vapor da água presente nos interstícios dos sólidos.
- Umidade ligada: quando a água retida nos materiais exerce uma pressão de vapor menor do que a pressão da água livre na mesma temperatura. Desta maneira a água fica retida nos interstícios ou adsorvida nas superfícies de sólidos. Estes sólidos são chamados de higroscópicos, apresentando diferentes propriedades.

A água é removida pelo ar ou gases quentes e a sua capacidade de ser carregada por estes gases está relacionada com a temperatura e umidade do sistema. No projeto de secadores com ar, o conhecimento de algumas definições que caracterizam o sistema ar-água é essencial.

A partir da lei dos gases ideais, sabe-se que [3]:

$$\text{Concentração da água (mol/V):} \quad C_w = \frac{P_w}{RT} \quad (3.1)$$

$$\text{Pressão Parcial da água:} \quad P_w = \frac{U(28.9/18)P}{1 + U(28.9/18)} \quad (3.2)$$

Logo:

$$C_w = \frac{U(28.9/18)}{1 + U(28.9/18)} \frac{P}{RT} \quad (3.3)$$

R = Constante dos gases ideais

T = Temperatura absoluta (K)

U = Umidade

Define-se também a Umidade Relativa:

$$U_m = \frac{P_w}{P_{ws}} * 100 \quad (3.4)$$

P_{ws} = Pressão de saturação da água (dependente da temperatura)

Pode-se observar que de acordo com a equação acima, com o aumento da temperatura a umidade relativa diminui, visto que há um acréscimo na pressão de saturação da água enquanto que a pressão parcial se mantém constante.

Para o cálculo do calor envolvido na secagem é necessário a entalpia do gás de secagem. A entalpia total (H_y) da mistura gás-vapor d'água na temperatura T é dada pela equação [4]:

$$H_y = C_s (T - T_0) + U\lambda_0 \quad (3.5)$$

T_0 = Temperatura de referência (K)

λ_0 = Calor latente do líquido na temperatura T_0

C_s = Calor específico (Calor úmido) da mistura gás-vapor d'água, definido por:

$$C_s = C_{pg} + C_{pw}U \quad (3.6)$$

C_{pg} = Calor específico do gás

C_{pw} = Calor específico do vapor d'água

Para a mistura ar-água:

$$C_s \left(\frac{kcal}{kg_{ar\ sec\ o}} \right) = 0.24 + 0.46 * U \quad (3.7)$$

$$\lambda_0 = 597 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}_{\text{água}}} \quad (\text{a } 0^\circ\text{C e } 760 \text{ mmHg})$$

3.1. SECADORES

Industrialmente, os secadores mais utilizados são: Secador de Estantes à Vácuo, Secadores Rotatórios a Vácuo, Freeze Dryers e Spray Dryers.

Analisando os tipos de secadores comerciais existentes, o mais adequado para a solução de zeólita em estudo seria o Pulverizador (Spray-Dryer), tipo direto e operação contínua. Este secador é apropriado para grandes capacidades e geralmente o produto é pulverulento, esférico e movente, além de manter as propriedades físicas desejáveis, exatamente como se objetiva na produção desse catalisador no PROCAT. Neste equipamento podem ser usadas temperaturas altas com materiais termicamente sensíveis e o produto pode ter densidade volumar baixa [5].

Outros tipos de secadores aplicáveis a líquidos (Soluções verdadeiras e coloidais; emulsões) não são ideais para o caso em estudo, pois é preciso a recirculação do produto seco, como no Rotatório Direto, Transportador-pneumático, Transportador-parafuso e Leitos fluidos; ou por serem muito caros, como o Dielétrico, Tambor e Congelador à vácuo [5].

Secadores Diretos

Características operacionais [5]

- Contato direto dos gases quentes com os sólidos úmidos, para aquecê-los e remover o vapor
- As temperaturas de secagem podem atingir até 1400°F, que é a temperatura limite de uso com a maior parte dos materiais metálicos estruturais.

- Nas temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade, e o vapor superaquecido do líquido que está sendo removido pode ser usado para efetuar a secagem.

- A desumidificação do ar de secagem pode ser necessária quando a umidade atmosférica for excessivamente elevada.

- Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por massa evaporada.

- A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluente, sendo constante a temperatura do gás efluente.

- Devido ao grande volume de gás necessário, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro, especialmente quando se operam sólidos em pequenas partículas.

Batelada x Contínuo

Frequentemente, o modo contínuo de operação oferece mais vantagens do que a batelada, pois este é mais fácil de integrar aos outros processos e apresenta um menor custo unitário de secagem. Porém, como a taxa de produção tende a diminuir, de modo que, a disponibilidade financeira junto com outros custos correntes ilustrará que a operação em batelada seria uma alternativa mais barata e atrativa. Sabe-se, no entanto, que qualquer secador contínuo pode ser operado intermitentemente, ou por partidas, conforme uma operação em batelada. Na figura 3 a seguir temos o gráfico da variação do custo unitário da secagem pela taxa de produção [4].

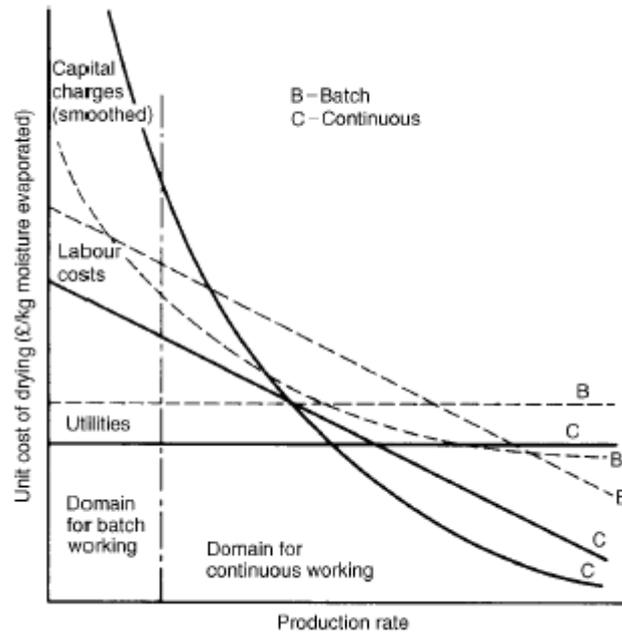


Figura 3: Variação do custo unitário de secagem pela taxa de produção [4]

Avaliações da secagem direta / Spray Dryer

O tipo de aquecimento é um fator a ser avaliado na escolha de um secador. Sabe-se que o aquecimento direto dos sólidos úmidos fornece uma série de vantagens. Uma delas é o baixo custo devido à ausência de tubos e jaquetas dentro do secador, nas quais o aquecimento médio é contido. E ainda pode se controlar melhor a temperatura do filme gasoso em cima da superfície do material. Mas, este tipo de aquecimento está sujeito a limites impostos pela eficiência térmica reduzida devido à perda de energia do gás exausto. Com esta perda, o gás reduz a capacidade de absorção da umidade e quando se evapora um solvente caro a operação se torna ainda mais inviável [5]. No caso da secagem da solução de zeólita, o solvente líquido a ser evaporado é a água e não há interesse em recuperá-la.

3.2. MECANISMOS DA SECAGEM

A secagem dos sólidos é baseada em dois processos fundamentais: a transferência de calor para o líquido a ser evaporado e a transferência de massa tanto do líquido/vapor através do sólido quanto do vapor pela superfície do sólido [3].

Analisando os processos separadamente:

Transferência de calor

Por definição, a secagem de sólidos úmidos é dada por um processo térmico, sendo, portanto, a transferência de calor essencial e limitante da razão de secagem nos processos condutivos. Os principais mecanismos são [3]:

Condução - de uma superfície quente em contato com o material;

Convecção – de um gás em contato com o material;

Radiação – de um gás/superfície quente ou campos elétricos de alta frequência que geram calor no material.

Em Spray-Dryers (objetivo deste estudo) o mecanismo predominante é o convectivo. Nele uma fase gasosa em movimento fornece calor para secar a fase sólida [3].

Taxa de transferência de calor entre o ar e a água (Q) : quando uma corrente de ar quente passa pela superfície da água, ocorre a transferência de calor dada por [6] :

$$Q = hA(T - T_s) \quad (3.8)$$

h = Coeficiente de transferência de calor

A = Área de superfície pela qual o calor atravessa (contato entre o ar e a água)

T = Temperatura no seio do fluido gasoso

T_s = Temperatura na superfície do sólido

Assim, tem-se o fluxo de calor (taxa de transferência de calor por unidade de área):

$$q = h(T - T_s) \quad (3.9)$$

E a taxa de transferência de calor global [4]:

$$Q = UA\Delta T \quad (3.10)$$

A = Área de transferência de calor

ΔT = Diferença média de temperatura

U = Coeficiente global de transferência de calor

Como para alguns tipos de secadores, a área de troca térmica não é conhecida com tanta precisão, usa-se:

$$Q = UaV\Delta T \quad (3.11)$$

Ua = Coeficiente volumétrico de transferência de calor

a = Área de troca térmica por volume do secador

V = Volume do secador

Transferência de Massa

No processo convectivo a transferência de massa é um fator limitante da secagem. Na secagem, o sólido inicialmente perde umidade por evaporação da superfície saturada, esta evaporação continua conforme a área gradualmente diminui, e finalmente, a água no seu interior também evapora [3].

Primeiramente há um período de aquecimento, em que a taxa de transferência da água para a superfície do sólido é tão rápida que mantém a superfície saturada e a taxa de secagem permanece constante por um período de tempo. Durante este período, a transferência de massa é limitada por uma camada de gás na superfície do sólido.

Em um determinado teor de umidade crítico X_c , a taxa de transferência interna da

água não é tão rápida, não sendo capaz de manter a superfície saturada, e então, a taxa de secagem começa a diminuir. No período de secagem decrescente, a taxa de secagem aproxima-se assintoticamente de um teor de umidade em equilíbrio X_e . A curva da taxa de secagem é influenciada pelo tipo de material a ser secado e pelo tipo de transferência de massa predominante [3].

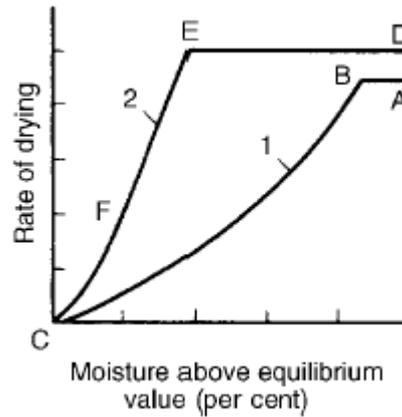


Figura 4: Taxa de secagem de um material granular

A-B e D-E = Período de taxa de secagem constante

B-C e E-C = Período de taxa de secagem decrescente

Durante a taxa constante, considera-se que só ocorre a remoção de umidade na superfície do material por difusão do vapor d'água através do filme de ar estacionário presente na corrente de ar. A transferência da água que vem sendo evaporada da superfície do sólido pode ser definida por [6]:

$$N_w = k_G \Delta p_w \quad (3.12)$$

N_w = Fluxo molar de água

k_G = Coeficiente de transferência de massa

Δp_w = Diferença entre as pressões parciais da água na superfície e no gás do seio do sólido

Ou, em termos da concentração c_w : $N_w = k_G \Delta c_w RT$ (3.13)

Durante o período de taxa de secagem constante, a relação do estado estacionário entre a transferência de calor e massa na superfície do sólido é:

$$q = \lambda N_w \quad (3.14)$$

$q = \text{Fluxo de calor}$

$\lambda = \text{Calor de vaporização da água.}$

Combinando essas equações tem-se:

$$N_w = \frac{h(T - T_s)}{\lambda} \quad (3.15)$$

$(T - T_s) = \text{Variação de temperatura entre o gás (bulbo seco) e a superfície}$

Essa equação permite estimar a taxa de evaporação se o coeficiente de transferência de calor e as temperaturas relevantes forem conhecidos.

A temperatura na superfície do sólido úmido, durante o período de secagem constante, é normalmente próxima da temperatura de saturação, que é definida pela temperatura do estado estacionário de uma pequena quantidade de água que está evaporando em uma corrente contínua de ar úmido [4].

Durante o período de taxa de secagem decrescente, os principais mecanismos de transferência de massa são [3]:

- 1- Difusão do líquido em materiais contínuos e homogêneos
- 2- Difusão do vapor em materiais granulares ou porosos
- 3- Fluxo por capilaridade em materiais porosos ou granulares
- 4- Fluxo por gravidade em materiais granulares
- 5- Fluxo causado por gradientes de encolhimento induzido de pressão

Um mecanismo geralmente domina um determinado período do ciclo de secagem, no entanto, vários mecanismos podem ocorrer ao mesmo tempo.

A difusão líquida/vapor da água através da matriz do sólido sob secagem pode ser descrita pela 2ª Lei de difusão de Fick, escrita em termos da fração mássica X (massa de água/massa de sólido seco):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial^2 y} \quad (3.16)$$

$t =$ Tempo

$D =$ Coeficiente de difusão da água na matriz do sólido

$y =$ Distância medida na direção de difusão

Como a difusão é um processo muito mais lento na fase líquida do que na fase vapor, resolve-se a segunda Lei de Fick para o caso de difusão líquida em sólidos não porosos considerando as seguintes condições [3]:

- 1 – Difusão líquida é independente do teor da mistura, isto é, D é constante
- 2 – Distribuição da mistura inicial é uniforme
- 3 – Tamanho, forma e densidade do material não variam

Para sólidos de forma retangular com espessura $2d$ e a secagem ocorrendo em ambas as faces:

Em $t=0$ e $-d < y < d$, $X=X_c$

Em $t>0$ e $y=\pm d$, $X=X_e$

A solução para o teor médio da mistura X_m é:

$$\frac{X_m - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[\sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 Dt \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] \right] \quad (3.17)$$

$X_m - X_e =$ Teor de água livre

Para longos tempos de secagem, quando Dt/d^2 excede 0,1:

$$\frac{X_m - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-Dt \left(\frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

Ao diferenciar essa equação com relação ao tempo tem-se:

$$-\frac{dX_m}{dt} = \frac{\pi^2 D}{4d^2} (X_m - X_e) \quad (3.19)$$

E assim, o tempo para o período de secagem decrescente é:

$$t = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{8(X_c - X_e)}{\pi^2 (X_m - X_e)} \right] \quad (3.20)$$

Geralmente o coeficiente de difusão decresce com o teor de umidade, então um valor médio de D é usado para uma faixa de teor de umidade durante a secagem.

Outro método de calcular o período de taxa de secagem decrescente é assumir que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o teor residual de umidade e o teor de umidade em equilíbrio:

$$-\frac{dX_m}{dt} = K(X_m - X_e) \quad (3.21)$$

$K = \text{Constante}$

No começo da queda da taxa, X_m é o teor de umidade crítica X_c , onde:

$$-\frac{dX_m}{dt} \Big|_{X_c} = K(X_c - X_e) \quad (3.22)$$

Durante o período de secagem constante:

$$N_w = \frac{h(T - T_s)}{\lambda} = \frac{\rho_s d}{M} \left(-\frac{dX_m}{dt} \right) \Big|_{X_c} \quad (3.23)$$

$\rho_s = \text{massa de solido seco/volume do solido úmido}$

$M = \text{peso molecular da água}$

Substituindo (3.22) em (3.23), tem-se que:

$$K = \frac{hM(T - T_s)}{\rho_s d \lambda (X_c - X_e)} \quad (3.24)$$

Então, durante o período de secagem decrescente:

$$-\left. \frac{dX_m}{dt} \right|_{X_c} = \frac{hM(T - T_s)}{\rho_s d \lambda} \left(\frac{X_m - X_e}{X_c - X_e} \right) \quad (3.25)$$

Integrando-se com relação à condição inicial $t=0$ e $X_m=X_c$:

$$t = \frac{\rho_s d \lambda (X_c - X_e)}{hM(T - T_s)} \ln \left[\frac{X_c - X_e}{X_m - X_e} \right] \quad (3.26)$$

As últimas camadas, mais próximas da superfície secam mais rapidamente que o interior, e isso pode levar a quebra ou rachadura de uma camada externa.

4. *SPRAY DRYER*

A operação de secagem num spray dryer (secador a pulverização) se dá através da pulverização de um líquido em uma coluna de gás quente, geralmente ar. É uma técnica amplamente aplicada nas indústrias químicas e na indústria de alimentos. Trata-se de um método utilizado para secar soluções aquosas ou orgânicas, emulsões, soluções, suspensões, pastas etc; preservar alimentos e redução de peso e volume dos produtos. Leite em pó, detergentes e corantes são alguns exemplos de produtos que são secos por Spray Dryer atualmente [7].

Um Spray Dryer consiste em uma grande câmara cilíndrica, usualmente vertical, em que o material a ser seco é pulverizado na forma de pequenas gotículas. Nesta câmara também é introduzido um grande volume de gás quente, suficiente para fornecer o calor necessário para a completa evaporação do líquido. As transferências de calor e de massa são realizadas pelo contato direto entre o gás quente e as gotículas dispersas. Após completar a secagem, o gás resfriado e os sólidos são separados. Consegue-se a separação das partículas grosseiras secas no fundo da câmara de secagem. As partículas finas são arrastadas pelo gás, e separadas em ciclones externos

ou em mangas coletoras [5].

Os processos que envolvem esta secagem são: atomização do líquido, mistura gás-gota e secagem da gota. Desse secador obtêm-se partículas esféricas com diâmetros de 2 a 500 μm no fundo do secador. A temperatura do gás de entrada vai de 150 até 815°C. A secagem essencialmente ocorre na temperatura de bulbo úmido de ar e o tempo de retenção é muito baixo, em segundos, devido à grande superfície total de secagem e da pequena dimensão das gotículas criadas [3].

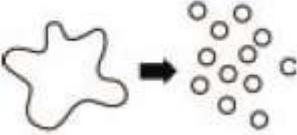
As propriedades dos materiais secos dependem da direção do escoamento do gás e da sua temperatura; do grau de uniformidade da atomização; do teor de sólidos, da temperatura e do grau de aeração da alimentação. As propriedades mais importantes são: o tamanho da partícula, densidade aparente do material e presença de poeira [5].

O design da câmara e a vazão do ar de secagem proporcionam um tempo de residência da gotícula na câmara, de forma que se remova a umidade desejada da gotícula, e que o produto seja removido do secador antes que a temperatura do produto aumente até a temperatura de saída do ar de secagem. Assim, há pouca probabilidade de dano, provocado por calor, ao produto [7].

A aplicação mais importante e de maior êxito dos secadores pulverizadores é com soluções, suspensões e pastas que não podem ser desumidificadas mecanicamente, que são sensíveis ao calor e não podem ser expostas a atmosferas muito quentes durante períodos longos. A secagem por Spray se torna aplicável para estes casos em virtude do tempo de contato curto na zona quente do secador [7].

O Spray Dryer pode ser utilizado para diversas finalidades. A principal consiste na secagem de materiais (como citada acima), mas este equipamento também pode ser utilizado para os processos de micronização, microencapsulação e englobamento, como mostrado na tabela a seguir [7]:

Tabela 1: Aplicações do Spray Dryer

Aplicação	Meta / Uso	Aplicação prática
Secagem por atomização 	Secagem de inorgânicos e produtos orgânicos	amido de milho pigmentos leite em pó
Micronização 	Redução do tamanho da partícula de um produto	sal Corantes
Microencapsulação 	Um produto líquido é embutido em uma matriz sólida	perfumes aroma morango óleo de pêssego
Englobamento 	Um produto sólido é embutido em um sólido ou mistura de sólidos	carotenóides em gelatinas

4.1. Elementos de um Spray Dryer

Um Spray Dryer pode ser construído de diferentes maneiras. O equipamento pode operar nos modos paralelo ou contracorrente e o atomizador pode ser direcionado verticalmente para cima ou para baixo, ou na horizontal [8].

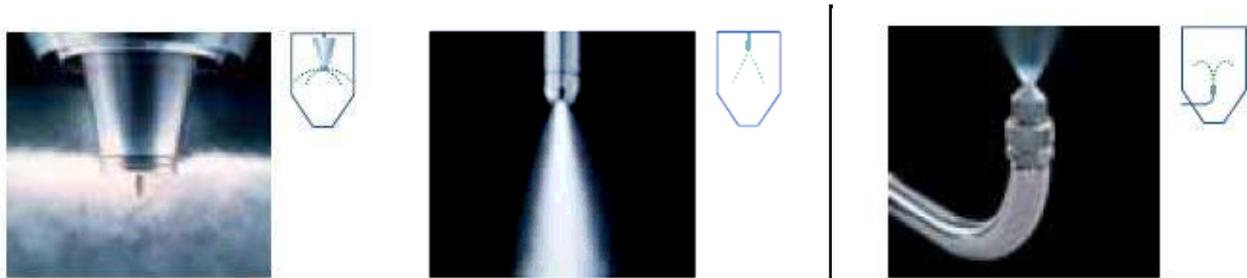


Figura 5: Possíveis direcionamentos dos atomizadores [8]

Todos os Sprays Dryers são constituídos por um conjunto essencial de elementos [3]:

- Aquecedor do ar de secagem, que pode ser indireto ou direto (1);
- Sistema de bombeamento da suspensão para o atomizador (2);
- Atomizador (3);
- Câmara de secagem (4);
- Sistema de remoção de produto (5);
- Ciclone (remoção do material mais fino, que foi arrastado pelo gás de secagem) (6);
- Sistema de exaustão (filtro de mangas, exaustor) (7).

A figura abaixo mostra uma configuração usual de um Spray Dryer, indicando onde se encontra cada um dos itens citados acima:

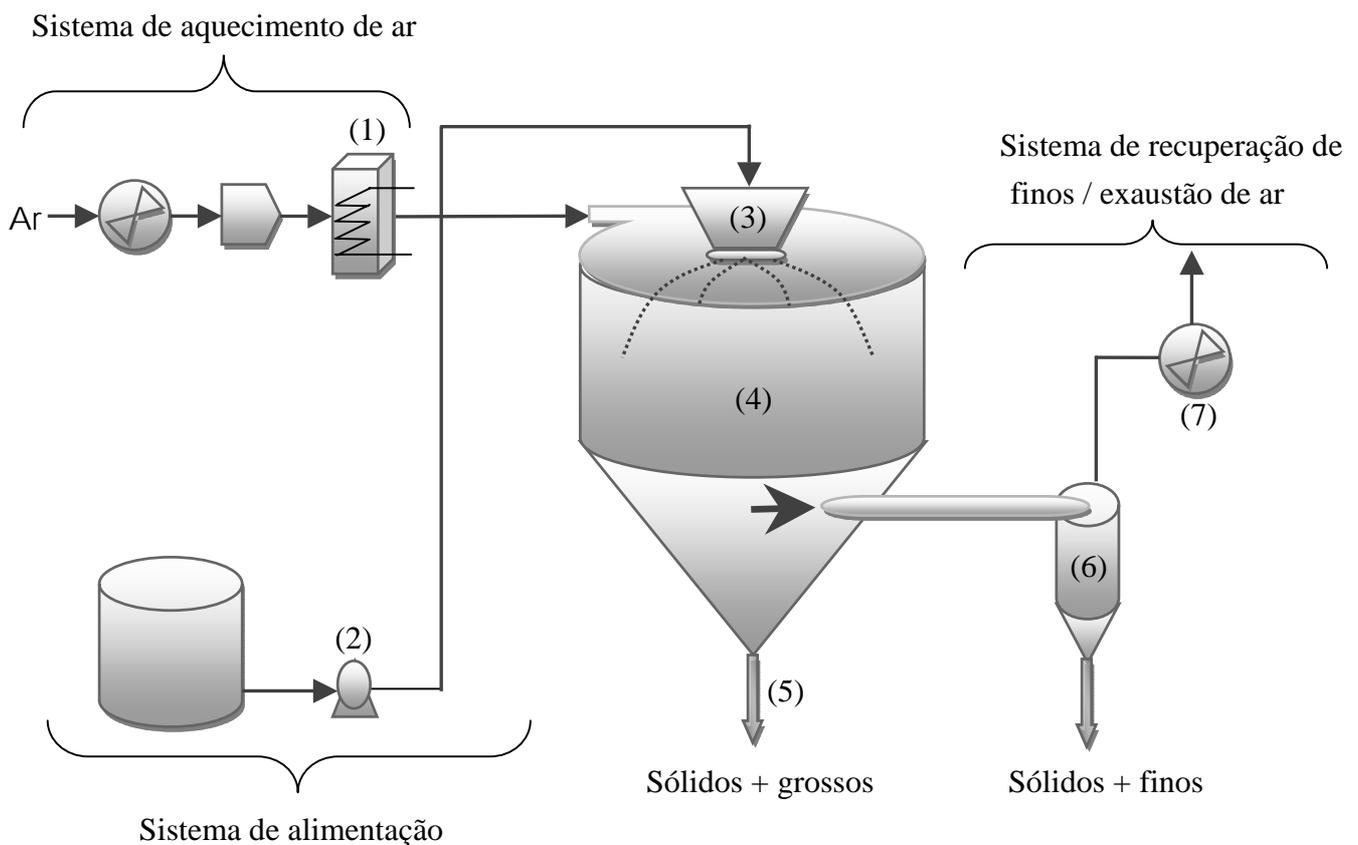


Figura 6: Equipamentos que compõem um Spray Dryer

Para facilitar a análise, separamos o sistema citado na página anterior em quatro grupos:

- Sistemas de alimentação
 - Tanque de alimentação
 - Tanque de água para partida e emergência
 - Bomba para alimentação
 - Linha de alimentação
 - Atomizador
- Sistema de aquecimento de ar
 - Ventilador Centrífugo “Adutor”
 - Filtro de ar
 - Aquecedor de ar direto a gás
- Câmara de secagem
 - Difusor de ar
 - Sistema de resfriamento do Atomizador
 - Sistema de resfriamento do difusor de ar
 - Câmara de secagem
 - Sistema de descarga de pó para saída do secador
- Sistema de recuperação de finos / exaustão de ar
 - Duto e transições para extração dos finos
 - Ciclone principal
 - Filtro de mangas
 - Sistema de descarga de pó
 - Exaustor centrífugo

Uma descrição mais detalhada das funções de cada componente do Spray Dryer citado acima será feita mais adiante.

Em modelos especiais de secadores a pulverização pode haver ar de resfriamento para entrar na câmara, ou sistemas fechados para recuperação de solventes, ou então arrastadores pneumáticos ou arrastadores mecânicos para remover o produto seco das paredes e do fundo da câmara. Alguns deles são seguidos por transportadores pneumáticos, em que o ar de secagem é diluído com o ar frio para o arrefecimento do produto antes da separação [5].

4.2. Atomização

Atomização, ou sistema de pulverização, é responsável por transformar a suspensão em pequenas gotas, sendo o resultado de uma fonte de energia atuando em um líquido. Forças se acumulam até um ponto onde o líquido se desintegra e conseqüentemente gotículas individuais são criadas. Diferentes técnicas de atomização aplicam diferentes formas de energia no líquido [8].

4.2.1. Atomizadores

A parte mais importante da operação do spray é a atomização do fluido, onde a necessidade de dispersar um líquido num gás levou a criação de diversos dispositivos mecânicos. Esses modelos acentuam diferentes vantagens, como a ausência de entupimento, o tipo de névoa, o tamanho e distribuição de tamanho das gotículas, a uniformidade da nebulização, a grande razão de rejeito e/ou o pequeno consumo de potência.

Os principais tipos de atomizadores existentes são os seguintes: bocal a pressão, bocal a dois fluidos e atomizador rotatório.

Estas categorias apresentam as seguintes características [5]:

1. Eficiência relativamente baixa – A energia empregada para aumentar a área é menor que 1% da energia total consumida.
2. Ampla distribuição do tamanho das partículas.
3. Custo relativamente baixo.
4. Operação com base nos mecanismos de fragmentação de películas líquidas e de gotículas.

Fragmentação de Películas líquidas

O princípio básico da maioria dos atomizadores é a formação de uma película fina que pode fragmentar-se por uma série de mecanismos, formando filamentos líquidos que por seu turno formam cadeias de gotículas. Em face da natureza aleatória da formação dos filamentos, o espectro das gotículas formadas é amplo.

Fragmentação de gotículas

As gotículas também se fragmentam em gotículas menores. Muitas vezes este processo estabelece um limite superior para o tamanho da gotícula em processos que envolvem escoamento em contra corrente, ou cruzado, do líquido e do vapor. Usualmente é um processo secundário, isto é, uma película fragmenta-se em gotas, e estas em gotas menores.

Outros tipos de bocais usam energia sonora (de correntes gasosas), ultrasônica (gerada eletronicamente) e energia eletrostática; embora tenham um bom potencial de aplicação, não são comumente utilizados nas indústrias.

A tabela abaixo mostra um resumo dos principais tipos de bocais de atomização:

Tabela 2: Principais propriedades dos bocais de atomização [5]

Tipo do bocal	Características	Vantagens	Desvantagens
A pressão	A única fonte de energia provém do fluido que está sendo atomizado.	Simplicidade e baixo custo.	Tolerância limitada a sólidos; atomização incerta para líquidos de alta viscosidade e suscetível à erosão
A dois fluidos	O gás colide sobre um fluxo interno de líquido que lhe é co-axial, e fornece a energia da desintegração.	Velocidades elevadas são atingidas em pressões mais baixas. Menor risco de entupimento.	Por ser o gás acelerado, a eficiência é mais baixa que nos bocais a pressão.
Atomizador rotatório	O líquido é introduzido em uma superfície rotatória e se espalha como uma película uniforme. Usam-se discos chatos ou com aletas, ou cubas hemisféricas.	A velocidade que determina o tamanho da gota é independente do escoamento, operando em várias taxas. Também pode operar material muito viscoso e até suspensões grosseiras.	Complexidade do equipamento de rotação. Descarga radial.

Usualmente a característica mais importante de um bocal é o tamanho da gotícula que produz. A transferência de massa ou calor que se pode conseguir de uma dada dispersão é, freqüentemente, proporcional a $(1/D)^2$. Por isso, as pequenas gotículas são favorecidas. No entanto, as gotículas que são muito finas não sedimentam, e uma preocupação comum centraliza-se sobre o líquido que será arrastado numa dada operação de nebulização [5].

A Seleção do tipo de bocal depende das propriedades da alimentação e da especificação do pó.

Tipos de Bocal

Bocais a Pressão (Pressure Nozzle)

A atomização é o resultado da conversão de energia de pressão no líquido em energia cinética [8].

A pressão aplicada ao líquido dentro do bocal o força para fora do orifício, criando a atomização. Um bocal a pressão pode ser operado em modo paralelo ou contracorrente. O tamanho das partículas é ajustado pela variação da pressão na alimentação e tamanho do bocal. Este tipo de bocal geralmente permite conseguir uma menor distribuição granulométrica das partículas do que outros tipos de atomizador, produzindo, na prática, partículas na faixa de 120-250 μm [3].

Para este tipo de bocal não existe uma equação que leve em conta os efeitos das propriedades físicas. A dependência entre o tamanho da gota e a geometria, a velocidade e as propriedades são complicadas pelas modificações na natureza do processo de fragmentação. Isto explica as grandes divergências entre os resultados sobre a importância da tensão superficial, da viscosidade e das densidades [5].

Na prática, a viscosidade exerce a maior influência entre as propriedades físicas. Por exemplo, é comum encontrar um óleo com viscosidade 1000 vezes maior que a da água, enquanto a maior parte dos líquidos tem a densidade dentro de uma faixa de 2 vezes a densidade da água, e a tensão superficial num intervalo de 3 vezes [5].

Este atomizador não é recomendado para suspensões muito concentradas e materiais abrasivos, que podem danificar o orifício de atomização. As pressões podem

ir de 400 até 10000lb/in², dependendo do grau de atomização, da capacidade e das propriedades físicas. Os orifícios do bocal podem ter diâmetros que vão de 0.010 a 0.15 in [5].

A pressão afeta não apenas as características de nebulização, mas também a capacidade. Quando se deseja reduzir o teor de líquido nebulizado mediante o abaixamento de pressão, a dispersão pode se tornar mais grosseira. Para corrigir o efeito, insere-se um orifício menor que pode então, exigir uma pressão mais elevada para se ter a capacidade desejada. A névoa formada, nestas circunstâncias, pode ser mais fina do que se quer. Os bocais múltiplos tendem a superar esta característica inflexível da atomização por pressão, embora a presença de vários bocais num secador complique o modelo da câmara e o escoamento do ar e tenha o risco potencial de provocar a colisão de partículas, o que leva a uma desuniformidade da névoa e das dimensões das partículas [5].

A figura abaixo mostra o desenho de um bocal a pressão:

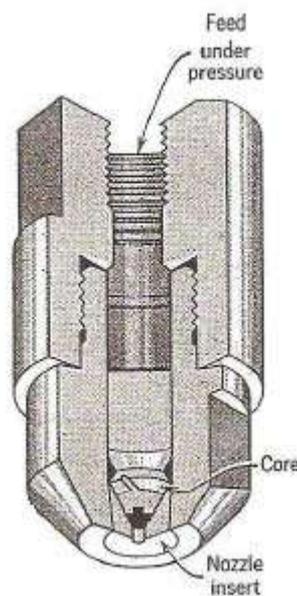


Figura 7: Bocal a Pressão [9]

Bocal a Dois Fluidos (Two-fluid Nozzle)

A atomização por bocal a dois fluidos é alcançada pneumaticamente por ar/gás comprimido de alta velocidade atingindo o líquido alimentado. O Tamanho da partícula é controlado pela variação da proporção entre fluxo de gás e de líquido alimentado. Quando operar no modo paralelo, a ponta do bocal é colocada perto da saída do dispersor de ar. O modo paralelo é selecionado para secagem de produtos sensíveis ao calor. Já o modo contracorrente é indicado para partículas grossas de um produto não sensível ao calor [8].

Os bocais a dois fluidos não funcionam eficientemente em capacidades altas e por isso não são usados nos secadores pulverizadores de porte industrial. A maior vantagem que apresentam está na operação em pressões relativamente baixa. Este tipo de bocal é empregado na dispersão de pastas espessas e tortas de filtros que não se podem nos atomizadores comuns [5].

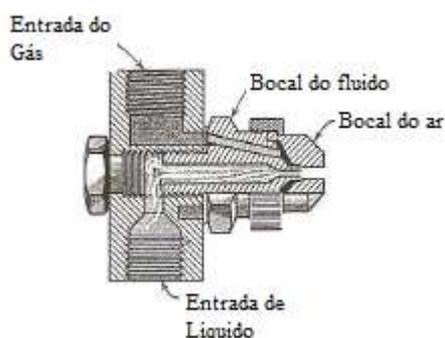


Figura 8: Bocal a Dois Fluidos [9]

Atomizador Rotatório (Rotary Atomizer)

Neste tipo de atomização, a alimentação é centrifugamente acelerada a alta velocidade antes de ser descarregada para a secagem com ar quente/gás. O grau de atomização e morfologia das partículas depende da velocidade tangencial, taxa de alimentação, propriedades de líquidos e design do atomizador. O Tamanho da partícula é ajustado pela variação da velocidade tangencial O atomizador rotativo é

considerado o dispositivo de atomização mais flexível, adequado para uma vasta gama de produtos [8].

Existem três tipos de operação para os discos e cubas rotatórias. Em velocidades baixas, o líquido é fragmentado como gotas das bordas. Em velocidades intermediárias, o líquido deixa a borda ao modo de filamentos, e nas velocidades mais elevadas ainda (que são as de operação normal), o líquido se estende das bordas como uma película fina que se fragmenta. As gotas formadas são lançadas horizontalmente e seu tamanho é tão menor quanto maior for a velocidade do disco [4].

Os diâmetros do disco vão de 2 in nos pequenos modelos de laboratório até 12 a 14 in nos secadores de porte industrial. As velocidades de rotação vão de 3000 até 50000 rpm, e é dependente do tamanho do orifício dos discos rotativos. As velocidades altas são as dos discos de pequeno diâmetro. Nos secadores industriais as velocidades comuns são de 4000 até 20000 rpm, dependendo do diâmetro do disco e do grau de atomização [5].

A atomização a disco centrífugo é particularmente vantajosa para operar suspensões e pastas que erodem e entopem os bocais. Este tipo de atomizador é geralmente o preferido para altos valores de vazão de alimentação. As partículas produzidas são relativamente pequenas (30-120 μ m) [3].

A configuração mais comum deste tipo de atomizador é a de disco com canais radiais. Estes não possuem pontos de estagnação de produto e o tamanho da gota que deixa o atomizador é altamente controlável pela velocidade do disco. Para atomizadores de alta capacidade que requerem alta taxa de alimentação, o número e altura dos canais são aumentados para manter a mesma condição de líquido em cada canal. O canal, neste caso, possui um formato oval [5].

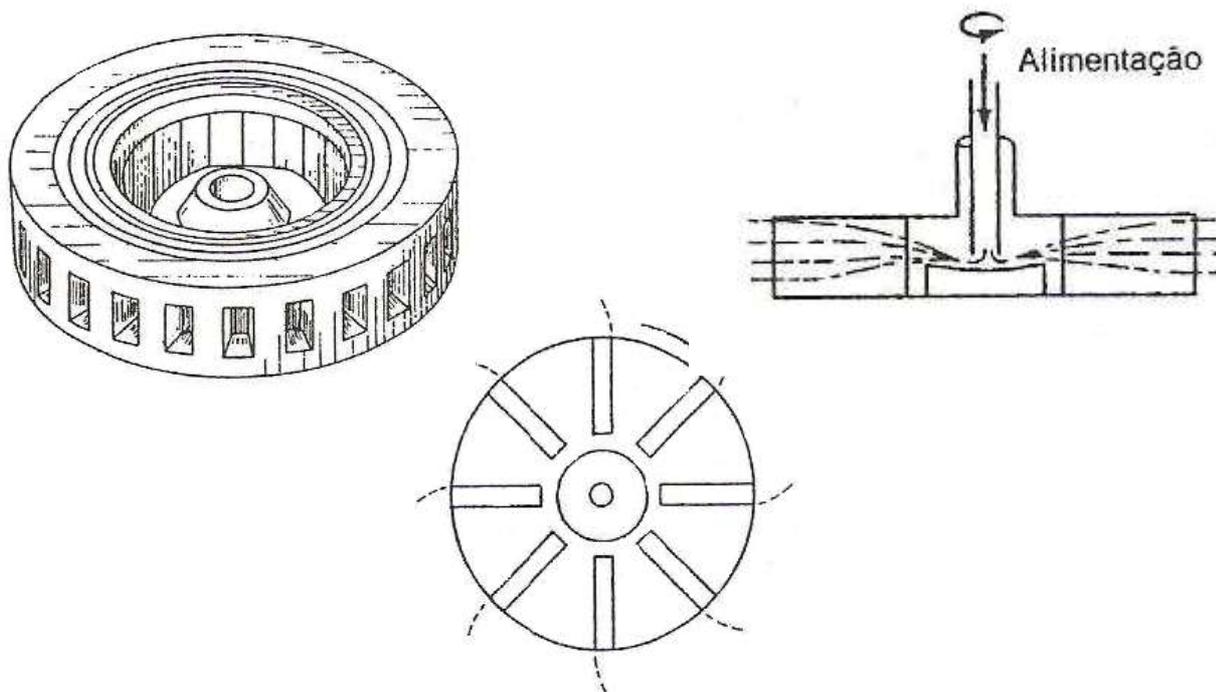


Figura 9: Atomizador Rotatório com aletas [5]

Uma das principais vantagens da secagem por pulverização está na produção de partículas esféricas, que não se obtêm usualmente em nenhum outro processo de secagem, podendo ser maciças ou ocas, dependendo do material, das condições de alimentação e de secagem.

As partículas esféricas podem ser obtidas a partir de soluções verdadeiras, ou de suspensões, e podem ser formadas em quaisquer dos atomizadores anteriormente descritos.

4.3. Câmara de secagem

Como mencionado anteriormente, a câmara de secagem é o local onde se dá o contato do material a ser seco e do ar quente. A figura a seguir representa o que acontece com o ar no processo de secagem. O processo de 1 para 2 representa o aquecimento do ar; e de 2 para 3, a secagem, onde o ar recebe umidade. A linha isoentálpica (tracejada) é aquela na qual o processo se descreveria se não houvesse

perda de energia [10].

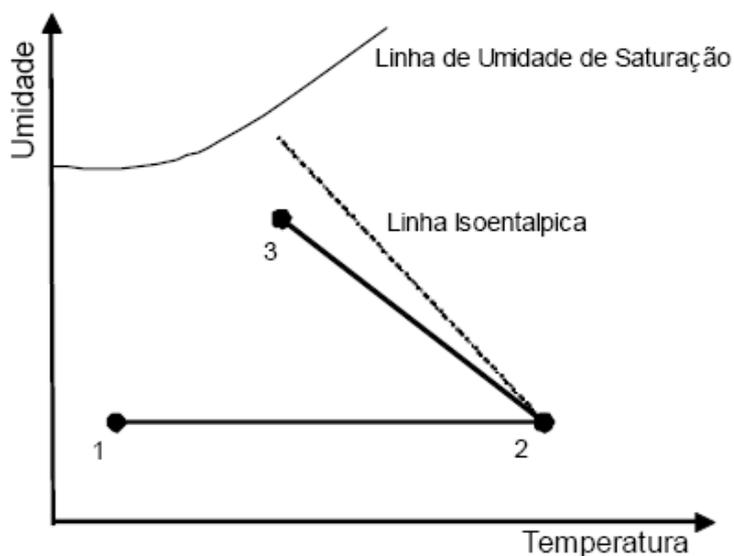


Figura 10: Ar de secagem [10]

O diâmetro da câmara permite uma otimização do processo. Diâmetros grandes geram custos de fabricação grandes (muito material utilizado na confecção). Enquanto diâmetros pequenos fazem com que a atomização seja afetada, pois a probabilidade de haver deposição de produto nas paredes aumenta. É preciso haver um estudo prévio para adequar o tamanho da câmara ao sistema de pulverização escolhido, de modo que as partículas pulverizadas não entrem em contato com as paredes antes de estarem completamente secas.

Geralmente sistemas de pulverização por disco requerem diâmetros de câmaras maiores que sistemas de pulverização por bocal, isto porque em sistemas com disco atomizador as partículas são jogadas com maior velocidade e a uma distância maior. Já as câmaras verticais altas e de diâmetro pequeno são usadas com atomizadores a dois fluidos ou com bocais de pressão [10].

4.4. Modos de Operação

A maneira com que a suspensão atomizada entra em contato com o ar de secagem é um importante fator no projeto de um spray dryer, uma vez que tem grande incidência sobre as propriedades do produto seco, influenciando no comportamento das gotículas [7].

Secadores pulverizadores podem operar em escoamento paralelo, misto ou em contracorrente do gás e da suspensão contendo os sólidos [10,11]:

Escoamento Paralelo: O material é pulverizado na mesma direção que o fluxo de ar quente através do aparelho. As gotículas entram em contato com o quente ar de secagem quando essas estão mais úmidas. O produto é tratado com cuidado devido à repentina vaporização.

Escoamento Contracorrente: O material é pulverizado no sentido oposto ao fluxo do ar de secagem. O ar quente flui para cima e o produto é abrangido por cada vez mais ar quente na “bandeja coletora”. A umidade residual é eliminada e o produto se torna muito quente. Este método é adequado apenas para produtos termicamente estáveis.

Escoamento Misto: Combina os escoamentos em contracorrente e paralelo

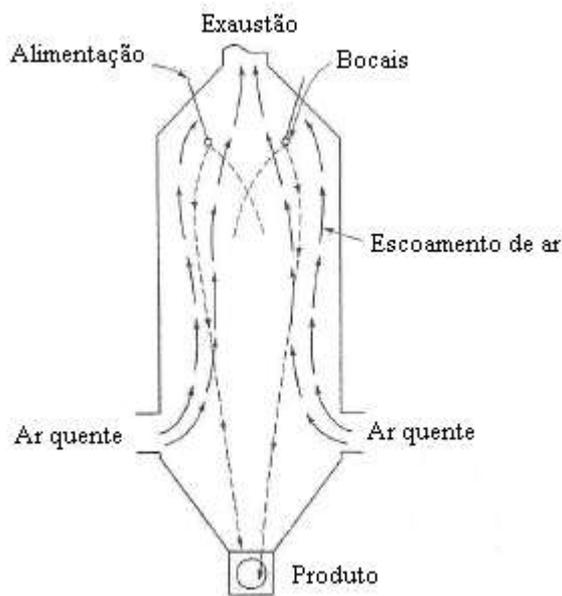
A maioria dos secadores pulverizadores em uso industrial adota o escoamento paralelo do gás e dos sólidos.

Nos secadores do tipo em contracorrente o escoamento do ar é ascendente, e arrasta os finos para o topo da câmara, já o produto grosseiro sedimenta e é removido separadamente no fundo. Este modo de operação permite conseguir a classificação e a separação entre a fração fina e grossa do produto seco.

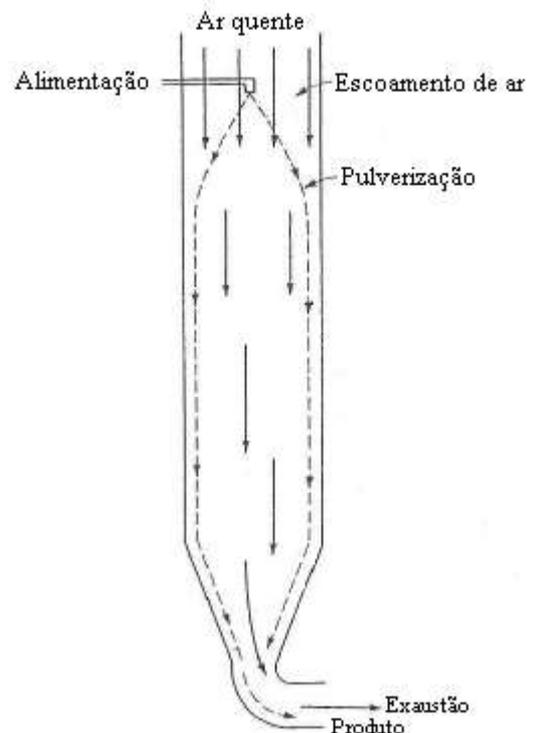
O modelo de escoamento misto é complicado, tendo elevado grau de turbulência na câmara de secagem. Em resumo, o escoamento é análogo ao que existe

em um ciclone, ou seja, o ar entra tangencialmente pelo topo de uma câmara cônica, segue uma trajetória descendente em espiral pelas paredes da câmara e retorna por uma coluna no centro até a saída do topo. A alimentação entra pelo centro do topo, move-se para a periferia e para baixo em contracorrente com a corrente de saída do gás e, quando se aproxima da parede, é arrastada em paralelo pela corrente de entrada.

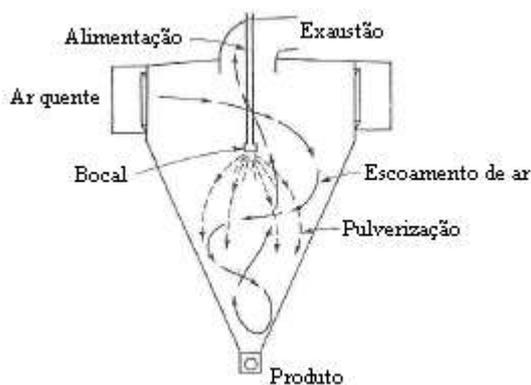
As figuras abaixo ilustram os diferentes modos de operação existentes, assim como os diversos tipos de câmaras [5]:



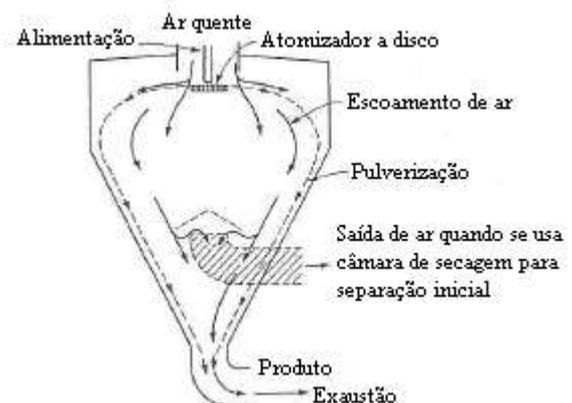
a. Contracorrente



b. Atomização em bocal, em paralelo



c. Escoamento misto



d. Atomização a disco, em paralelo

Figura 11: Diversas câmaras e modos de operação dos Sprays Dryers [5]

Análise da distribuição de tamanho das partículas

(Dados fornecidos por GEA-Process Engineering Division)

O gráfico abaixo ilustra a distribuição de tamanho da partícula para os diferentes tipos de atomizador e modos de operação (paralelo e contracorrente):

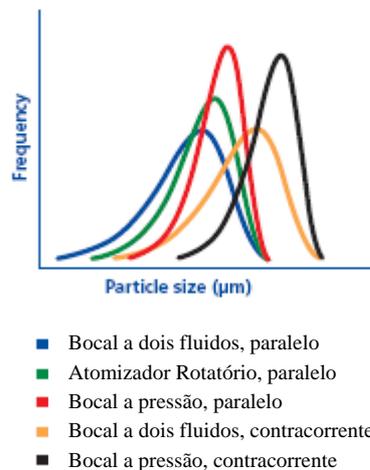


Figura 12: Distribuição do tamanho das partículas para diferentes condições de processo [8]

Observa-se que quanto mais larga é a curva de frequência x tamanho da partícula, mais heterogênea é a distribuição de tamanho. Os atomizadores do tipo bocal a pressão apresentam maior homogeneidade no tamanho das partículas frente aos demais bocais, obtendo-se pelo modo paralelo partículas menores, enquanto que pelo modo contracorrente conseguem-se partículas mais grossas. Já o bocal a dois fluidos é o que apresenta maior diferença entre os tamanhos de partícula, porém estas são menores que as de bocal a pressão, em ambos os modos de operação. No caso dos atomizadores centrífugos, encontra-se maior uniformidade no tamanho das partículas que do bocal a dois fluidos, no entanto com diâmetros menores que as obtidas por bocal à pressão.

4.5. Aquecimento do ar

O aquecedor de ar tem como função aumentar a força motriz do processo de secagem. Isto ocorre porque o ar quente possui maior entalpia e menor umidade relativa.

O aquecimento pode ser por resistência elétrica, por trocador de calor com vapor ou mesmo por contato direto com gases de combustão. Tem-se ainda a possibilidade de utilizar uma parcela do calor que sai junto com o ar úmido no final do processo para aquecer o gás de entrada, otimizando o processo e reaproveitando a energia [10].

4.6. Sistema de Separação do material (Ciclone)

Dois sistemas podem ser utilizados para separar o produto após a secagem [3,5,10]:

- Separação primária do produto seco (grossos) é realizada na base da câmara de secagem, com o produto fino sendo separado em ciclones ou mangas coletoras.
- Total de recuperação do produto seco no equipamento de separação (ciclones ou mangas coletoras).

O sistema de separação gás-sólido é muito importante num Spray Dryer, pois é o responsável por captar os sólidos mais finos que são arrastados pelo ar de secagem e conseqüentemente não são separados na câmara, ou para separar todo o produto seco no caso da recuperação total. Este sistema representa 20-25% do custo total de instalação do sistema de secagem. Usualmente utiliza-se um ciclone e, em alguns casos, coloca-se um filtro de mangas em série ao ciclone. Este filtro serve para aumentar a captação de pó, principalmente de partículas muito finas. No entanto, ele

eleva significativamente os custos de secagem, além de ter operação trabalhosa.

A operação de um ciclone é simples, o ar contendo uma certa quantidade de partículas entra no equipamento e passa a descrever uma trajetória helicoidal. Num determinado momento há uma inversão no sentido da trajetória e as partículas sólidas são despejadas no coletor (situado logo abaixo do ciclone) e o ar sai pela abertura superior do equipamento.

Alguns cuidados devem ser tomados no projeto e aquisição de um ciclone. É importante saber a curva característica de rendimento do ciclone versus o tamanho da partícula. No processo de secagem as partículas não possuem o mesmo tamanho, logo, o ciclone que separa essas partículas do ar deve ser projetado para que se tenha a captação do maior número de partículas possível.

5. PROJETO DO SISTEMA

Para dimensionar um spray dryer a palavra chave é tempo de residência do ar na câmara de secagem. O tempo de residência mínimo do produto deve ser assumido como tempo de residência do ar, porém a maioria dos produtos tem um tempo de residência bem maior que o ar. Em secagem de produtos termicamente sensíveis, como materiais biológicos, esse tempo deve ser de 35 segundos ou mais, ou se a secagem for de partículas mais grossas (200 a 275 μm). Para a secagem de partículas menores que 180 μm , esse tempo pode variar de 20 a 35 segundos [11].

Uma vez determinado o volume da câmara baseado no tempo de secagem, podemos determinar outras dimensões da câmara e realizar o aumento de escala baseado na relação H:D (altura do secador: diâmetro interno do secador). Para Spray Dryers operando em modo paralelo e com atomizadores rotatórios a relação H:D varia de 0,6:1 a 1:1. Já para bocais a pressão a esta relação é de 3:1 até 4:1. No uso de

atomizadores rotatórios deve-se ter cuidado com o diâmetro da câmara, pois o movimento horizontal dado às partículas promove a acumulação e incrustação destas na parede na câmara. Com isso podemos seguir a seguinte relação [11]:

- Para partículas de 40-80µm, D = 1m;
- Para partículas de 80-100 µm, D = 4m e
- Para partículas de 100- 120 µm, D = 5m.

Estes parâmetros de projeto existentes na literatura serão levados em conta neste trabalho.

Outra alternativa para o projeto do sistema é o uso de correlações teóricas. Um bom exemplo são as correlações de Gluckert [12] que estabelecem:

- Devido às grandes correntes de circulação no secador, as condições de secagem são constantes em toda câmara. Toda a câmara está na temperatura de saída do gás, exceto próximo ao atomizador;
- Secagem ocorre na superfície da partícula que consiste de um líquido saturado com solutos;
- O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pode ser calculado considerando que a partícula é um fluido estático que se move na mesma velocidade do ar. Neste caso, o número de Nussel para a transferência de calor (hD/k_f) é 2. Esta observação foi sustentada por intensos trabalhos experimentais.

Todas essas correlações ajudam a melhor entender o funcionamento do spray dryer.

Gluckert estabeleceu as seguintes equações para calcular a transferência de calor em várias condições de atomização.

- Bocais a dois fluidos

$$Q = \frac{6.38K_f v^{2/3} \Delta t}{D_m^2} \frac{w_s}{\rho_s} \sqrt{\frac{\rho_a}{w_a V_a} \frac{w_a + w_s}{w_a}} \quad (5.1)$$

- Bocais a pressão

$$Q = \frac{10.98K_f v^{2/3} \Delta t}{D_m^2} D_s \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_s}} \quad (5.2)$$

- Discos centrífugos

$$Q = \frac{4.19K_f (R_c - r/2)^2 \Delta t}{D_m^2 \rho_s} \sqrt{\frac{w_s \rho_t}{rN}} \quad (5.3)$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor do spray (Btu/h)

K_f = condutividade térmica do filme de gás ao redor da partícula (Btu/h. ft²°F)

v = volume da câmara de secagem (ft³)

Δt = Força motriz térmica (°F)

D_m = diâmetro máximo da gota (ft)

D_s = diâmetro do orifício do atomizador (ft)

ρ_t = densidade do gás na saída (lb/ft³)

ρ_s = densidade do fluido injetado (lb/ft³)

ρ_a = densidade do ar de atomização (lb/ft³)

w_s = vazão mássica do líquido (lb/h)

w_a = vazão do ar de atomização (lb/h)

r = raio do disco (ft)

O projeto será realizado em etapas, fazendo uma descrição de cada item a ser utilizado nos sistemas de alimentação, de aquecimento de ar, câmara de secagem, sistema de exaustão de ar e, instrumentação e controle da unidade. Destacam-se também as influências desses sistemas e do tipo de material utilizado na confecção desses equipamentos, no processo de secagem.

Será realizado também o cálculo do dimensionamento da câmara de secagem,

assim como serão escolhidos o tipo de atomizador e modo de operação.

5.1. Escolha do tipo de Atomizador

A partir da comparação entre os tipos de atomizadores supracitados, constatamos que o atomizador rotativo é o mais indicado para tratar a suspensão de zeólita ou outros tipos de material, visto que o PROCAT é uma unidade multipropósito. As principais razões para esta escolha foram:

- Aplicável a suspensões ou pastas que podem erodir ou entupir o bocal
- Alta vazão de alimentação
- Apresenta maior uniformidade de tamanho de partícula que os outros tipos de bocal
- Produz partículas relativamente pequenas (30-120 μm). Esta faixa de distribuição granulométrica condiz com as especificações da zeólita seca (30-100 μm)
- Este tipo de atomizador pode ter canais radiais, que impedem a formação de pontos de estagnação e permite controlar o tamanho da gota através da velocidade do disco.

5.2. Dimensionamento da Câmara de Secagem

De acordo com os dados de projeto e de parâmetros existentes na literatura expostos acima [11], escolhemos para o projeto do Spray Dryer uma câmara cilíndrica, com atomizador rotatório e operação em paralelo.

A figura abaixo ilustra os parâmetros importantes para o cálculo do volume (V)

da câmara de secagem:

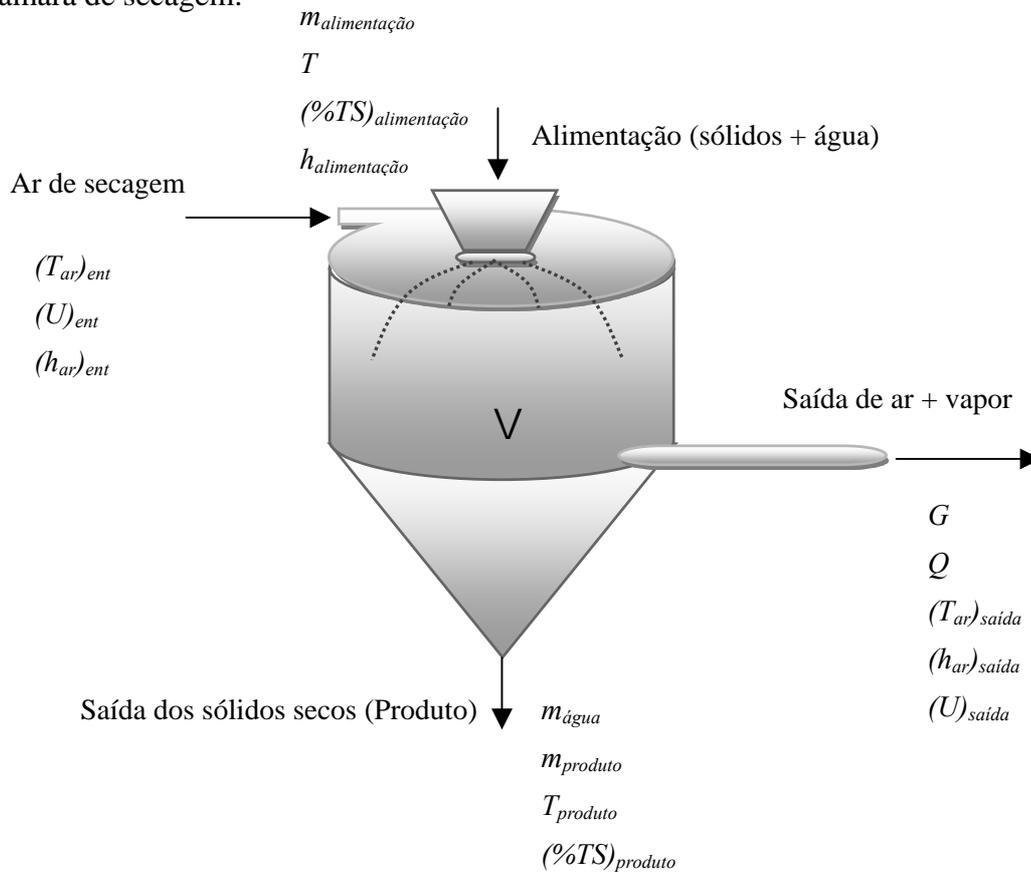


Figura 13: Variáveis importantes para o projeto da Câmara de Secagem

Onde:

- $m_{alimentação}$ = Vazão mássica total da alimentação
- $T_{alimentação}$ = Temperatura da alimentação
- $(\%TS)_{alimentação}$ = Teor de sólidos na alimentação
- $h_{alimentação}$ = Entalpia da alimentação
- $(T_{ar})_{ent}$ = Temperatura do ar na entrada
- $(U)_{ent}$ = Umidade Absoluta do ar na entrada
- $(h_{ar})_{ent}$ = Entalpia do ar na entrada
- $m_{água}$ = Vazão mássica de água evaporada
- $m_{produto}$ = Vazão mássica de produto
- $T_{produto}$ = Temperatura do produto
- $(\%TS)_{produto}$ = Teor de sólidos no produto
- $h_{produto}$ = Entalpia do produto
- G = Vazão mássica de ar seco
- Q = Vazão volumétrica de ar úmido

- $(T_{ar})_{saída}$ = Temperatura da saída de ar
 $(h_{ar})_{saída}$ = Entalpia da saída de ar
 $(U)_{saída}$ = Umidade Absoluta na saída de ar
 m_{vapor} = Vazão mássica de vapor na saída de ar
 $(h_{ar})_{saída}$ = Entalpia do ar na saída
 V = Volume da Câmara de Secagem

Para a realização do projeto do sistema utilizaremos como base as seguintes especificações, que foram fornecidas pelo PROCAT:

Dados da Entrada:

Tabela 3: Dados fornecidos pelo PROCAT para o projeto

Vazão de alimentação (m_a)	250 kg/h
Temperatura da alimentação (T)	20°C
Teor de sólidos na alimentação ($\%TS)_{ent}$	20%
Umidade Relativa do ar atmosférico a 25°C	60%
Temperatura do ar de secagem na entrada ($T_{ar})_{ent}$	450°C
Volume do tanque de alimentação	250 L
Volume do tanque de água para partida	100 L
Consumo de Gás Natural no aquecedor	25 kg/h
Calor específico da água (C_{pH_2O})	1.0 kcal/kg.°C

Dados da Saída:

Temperatura de saída dos sólidos (T_s)	100°C
Teor de sólidos na saída ($\%TS)_{saída}$	95%
Temperatura do ar na saída ($T_{ar})_{saída}$	300°C

Parâmetros físicos da zeólita:

Calor específico (C_p) [13]	0.1789 kcal/kg.°C
Diâmetro médio das partículas (d_p) [PROCAT]	90 μ m

A partir dos dados de projeto expostos acima, dos balanços de massa, de energia e de parâmetros existentes na literatura foi possível o dimensionamento do volume da câmara de secagem de um Spray Dryer com atomizador rotativo, como mostrado abaixo [3]:

Cálculos:

- Cálculo da Umidade Absoluta do ar de secagem a partir da umidade relativa:

Consultando a carta psicrométrica presente no *Perry* [12], e assumindo que a umidade relativa do ar atmosférico a 25°C é de 60% :

$$(U)_{ent} = 0.012 \frac{Kg}{Kg \text{ ar seco}}$$

- Balanço de massa para os sólidos

Considerando que todo sólido que entra na alimentação saia na corrente produto:

$$(m \cdot \%TS)_{alimentação} = (m \cdot \%TS)_{produto}$$

- Com a equação acima pode-se calcular a vazão mássica de produto:

$$m_{produto} = \frac{(m \cdot \%TS)_{alimentação}}{(\%TS)_{produto}} = \frac{250 \cdot 0.2}{0.95} = \frac{52.63 Kg}{h}$$

- Vazão de água evaporada

$$m_{água} = m_{alimentação} - m_{produto} = 250 - 53 = 197.37 \text{ Kg/h}$$

Para dimensionar a Câmara de secagem, precisamos saber a vazão volumétrica de ar úmido na saída (Q).

Conhecido o teor de umidade do ar na entrada em base de ar seco (U)_{ent}, utilizamos a vazão mássica de ar seco (G) para escrever o balanço de massa para água.

- Balanço de massa para a água

$$m_{água} = G \cdot [U_{saída} - U_{ent}]$$

Logo:

$$197.37 = G \cdot [U_{saída} - 0.012]$$

$$G = \frac{197.37}{U_{saída} - 0.012} \quad (5.2.1)$$

G e $(U)_{saída}$ serão calculados mais a frente.

- Cálculo das Entalpias

Para o cálculo das entalpias do ar na entrada e na saída usamos as equações 3.5, 3.6 e 3.7 e utilizamos como referência a temperatura $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

$$\text{Entalpia do ar na entrada} = (h_{ar})_{ent} = (0.24 + 0.46 * U_{ent}) * (450 - T_0) + U_{ent} * 597$$

$$\text{Como } (U)_{ent} = 0.012 \frac{\text{Kg}}{\text{Kg ar sec o}} \quad e \quad T_0 = 0^\circ\text{C}$$

$$(h_{ar})_{ent} = (0.24 + 0.46 * 0.012) * (450 - 0) + 0.012 * 597 = 117.648 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg ar sec o}} \quad (5.2.2)$$

$$\text{Entalpia do ar na saída} = (h_{ar})_{saída} = (0.24 + 0.46 * U_{saída}) * (300 - T_0) + U_{saída} * 597$$

Como o valor de $U_{saída}$ ainda não é conhecido, a entalpia do ar na saída ficará em função deste parâmetro:

$$(h_{ar})_{saída} = (0.24 + 0.46 * U_{saída}) * (300 - 0) + U_{saída} * 597 = 72 + 735 * U_{saída} \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg ar sec o}} \quad (5.2.3)$$

Já que o calor específico dos sólidos secos é conhecido, podemos escrever também a entalpia da alimentação e do produto baseando-se no peso dos sólidos secos:

$$\text{Entalpia da alimentação} = h_{alimentação} = (0.1789 * 20) + (1 * 20) \left(\frac{80}{20} \right) = 83 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg sólidos sec o}} \quad (5.2.4)$$

$$\text{Entalpia do produto} = h_{produto} = (0.1789 * 100) + (1 * 100) \left(\frac{5}{95} \right) = 23.2 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg sólidos sec o}} \quad (5.2.5)$$

- Balanço de Energia Total

A partir da primeira lei da termodinâmica para sistemas abertos:

Num volume de controle vc,

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

Onde os índices 'e', 's' significam respectivamente entrada e saída, V= velocidade, z = altura, W = trabalho de eixo e Q = calor recebido ou transferido para as vizinhanças.

Em regime permanente: $\frac{dE_{v.c.}}{dt} = 0$

Logo:

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \dot{W}_{v.c.} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$$

Considerando que o sistema não troca calor com as vizinhanças, não há trabalho de eixo e desprezando os termos referentes a velocidade e altura:

$$\sum_e \dot{m}_e (h_e) = \sum_s \dot{m}_s (h_s)$$

Com as entalpias calculadas, podemos escrever o balanço de energia total:

Energia do ar na entrada + Energia da alimentação = Energia do ar na saída + Energia do produto

$$(h_{ar})_{ent} \cdot G + h_{alimentação} \cdot (m. \%TS)_{alimentação} = (h_{ar})_{saída} \cdot G + h_{produto} \cdot (m. \%TS)_{produto} \quad (5.2.6)$$

Substituindo (5.2.2), (5.2.3), (5.2.4) e (5.2.5) em (5.2.6):

$$117.648 * G + 83.57 * 50 = (72 + 735 * U_{saída}) * G + 23.2 * 50$$

$$(117.648 - 72 - 735 * U_{saída}) * G = -3240 \quad (5.2.7)$$

Substituindo (5.2.1) em (5.2.7), podemos calcular $U_{saída}$ e G :

$$(45.648 - 735 * U_{saída}) * \frac{197}{U_{saída} - 0.012} = -3240$$

Logo:

$$U_{saída} = 0.06 \frac{Kg \text{ água}}{Kg \text{ ar sec o}}$$

Voltando na equação (5.2.1), calculamos G :

$$G = \frac{197.36}{U_{saída} - 0.012} = \frac{197.36}{0.06 - 0.012} = 3856.97 \frac{Kg \text{ ar sec o}}{h}$$

Como $U_{saída}$ e G estão em base de ar seco, podemos calcular a vazão de vapor d'água na saída de ar:

$$m_{vapor} = U_{saída} * G = 0.06 * 3856.97 = 243.65 \frac{Kg \text{ água}}{h}$$

- Cálculo da vazão volumétrica de ar úmido

Para o cálculo da vazão volumétrica do ar úmido na saída precisamos primeiramente conhecer a sua densidade.

Considerando o gás na saída como gás ideal a 1 atm e 300°C, podemos calcular a sua densidade pela seguinte equação:

$$\rho_{saída} = \frac{P < M >}{RT}$$

Onde:

$P = Pressão \text{ na saída de ar} = 1 \text{ atm}$

$R = Constante \text{ universal dos gases ideais} = 82.06 \frac{cm^3 atm}{gmolK}$

$T = Temperatura \text{ do ar na saída} = 300 + 273.15 = 573.15 \text{ K}$

Assumindo o peso molecular médio do ar úmido com sendo o do ar seco:

$$\langle M \rangle = \text{Peso molecular médio do ar úmido na saída} = 28.9 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}$$

Substituindo os valores:

$$\rho_{saída} = 6.144 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0.614 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Podemos, então, calcular a vazão volumétrica de ar úmido na saída:

$$Q = \frac{\text{vazão total na saída}}{\rho_{saída}} = \frac{G + m_{\text{vapor}}}{\rho_{saída}} = \frac{3856.97 + 243.65}{0.614} = 6673.47 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

- Dimensionamento da Câmara de Secagem

A literatura reporta [11] que para tamanhos de partícula de 90µm, o tempo de residência médio encontra-se na faixa de 20 a 35s. Para um design conservativo, nós consideramos o tempo de residência de 35s.

Sendo assim:

$$V = 6673.47 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 35 \text{ s} * \frac{1\text{h}}{3600 \text{ s}} = 64.88\text{m}^3$$

Após o estudo do tipo de atomizador descrito anteriormente foi verificado que para partículas com diâmetro de 90µm o mais apropriado é o **atomizador rotativo**.

Para este tipo de atomizador, considerando **escoamento paralelo e câmara cilíndrica**:

Relação altura : diâmetro (H:D) → 0.6:1 à 1:1

Para o nosso projeto utilizamos → 0.6:1

$$\frac{H}{D} = 0.6 \tag{5.2.8}$$

Para a determinação do diâmetro e da altura da câmara, não consideraremos a parte cônica da mesma.

Logo:

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * H = 64.88m^3 \quad (5.2.9)$$

Substituindo (5.2.8) em (5.2.9)

$$D = 5.17m$$

$$H = 3.09m$$

O diâmetro encontrado (5.17m) é maior do que o diâmetro mínimo de 4m recomendado para partículas de 90µm [11].

5.3. Descrição dos sistemas presentes no Spray Dryer

Depois de escolhido o tipo de atomizador, o modo de operação e dimensionada a câmara de secagem, pode-se descrever os equipamentos que fazem parte de todo o sistema de um Spray Dryer (conforme mostrado no item 4.1.). Como pontos principais destes equipamentos podem-se destacar que o aquecimento do ar de secagem será realizado através de trocador de calor direto, e será utilizado um ciclone e um filtro de mangas para a separação do material mais fino que foi arrastado pelo ar.

Os equipamentos devem ser construídos com aços inoxidáveis, aços cuja composição tem um elevado teor de cromo, o que torna o metal praticamente indestrutível a corrosão. O níquel, conforme o cromo, melhora a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas. O carbono, sempre presente em todos os tipos de aço, diminui ligeiramente a corrosão quando dissolvido. O molibdênio aumenta a passividade e a resistência à corrosão a altas temperaturas e pressões.

Dentre os aços inoxidáveis, os austeníticos são os mais importantes e, portanto serão esses os utilizados nesse projeto. Para as partes que requerem menor proteção anti-corrosiva recomenda-se o AISI 304, composto por 0,08% de C, 18/20% de Cr,

8/10,5% de Ni, 1% de Si e 2% de Mn. Para uma maior proteção, nas partes em contato com o produto, usa-se o AISI 316 cuja composição é 0,10% de C, 16/18% de Cr, 10/14% de Ni, 1% de Si, 2% de Mn e 2/3% de Mo; e o AISI 316L, que apresenta baixíssimo teor de carbono, menos que 0,035%, o que faz o aço ser praticamente imune à corrosão intergranular.

5.3.1. Sistema de Alimentação

Para bombeamento e controle do fluxo de alimentação, desde o tanque de alimentação até o sistema de atomização. A seguir será feita uma descrição dos equipamentos que fazem parte deste sistema:

Tanque de Alimentação

Construído em aço inoxidável AISI 316L com capacidade para 250 litros, com agitador para manter a alimentação suspensa.

Tanque de Água para Partida e Emergência

Armazena água que é utilizada durante a partida e em casos de emergência. Construído em aço inoxidável AISI 304 com capacidade para 100 litros.

Bomba de Deslocamento Positivo para Alimentação

Construída em aço inoxidável AISI 316 (partes em contato com o produto).

Linha de Alimentação

Para interligar o tanque de água/bomba de alimentação e atomizador há uma linha de alimentação de aço inoxidável AISI 316L.

Atomizador centrífugo

Será utilizado um atomizador centrífugo com discos radiais. As partes em contato com o produto líquido/pó serão construídas em aço inoxidável. Eixo e disco serão construídos com liga especial de aço inoxidável, resistente às grandes forças centrífugas a que serão submetidos durante a operação.

5.3.2. Sistema de Aquecimento de Ar

Para filtração e aquecimento do ar de secagem até a temperatura desejada, e transporte do mesmo à câmara de secagem, num fluxo constante. A seguir será feita uma descrição dos equipamentos que fazem parte deste sistema:

Ventilador Centrífugo “Adutor”

Destinado à adução do ar de secagem. Rotor e carcaça em aço carbono.

Linha de Transição 1

A função da linha é interligar o ventilador e o filtro de ar, sendo construída em aço carbono.

Filtro de Ar

A unidade de filtração é fixada em molduras construídas de aço inoxidável AISI 304. O filtro é do tipo bolsa, auto-suportável.

Linha de Transição 2

A função da linha é interligar o filtro de ar e o aquecedor de ar, sendo construída em aço inoxidável AISI 304.

Aquecedor de Ar Direto a Gás

Para aquecimento direto do ar de secagem por meio de gás. Construído em aço resistente ao calor. Para garantir a segurança devem ser acoplados ao aquecedor os seguintes instrumentos:

Registro manual, Válvula de ajuste de pressão, Válvulas solenóides, Válvula de segurança, Válvula reguladora da vazão de gás e programador para checagem de operação do queimador.

Linha de Transição e Duto de Ar Quente

A função da linha é interligar o aquecedor de ar e o duto de ar quente, sendo construída em aço inoxidável AISI 304.

5.3.3. Câmara de secagem

Difusor de Ar

Consiste em um sistema direcionador do fluxo de ar com aletas ajustáveis ao redor do atomizador. Sua função é distribuir o ar na câmara de secagem.

Todas as partes em contato com o ar de secagem serão construídas em aço inoxidável AISI 316L, as demais partes em aço inoxidável AISI 304 e aço carbono.

Sistema de Resfriamento do Atomizador e do Difusor de Ar

Este sistema fornece ar de resfriamento do atomizador e do difusor de ar, evitando superaquecimento e é formado por: filtro de ar, ventilador centrífugo “adutor”- em aço carbono pintado e conjunto de dutos e transições em aço inoxidável AISI 304.

Câmara de Secagem

Construída em aço inoxidável AISI 316L (partes em contato com o produto) e as demais partes em aço inoxidável AISI 304 e aço carbono. Formada por um teto plano, corpo cilíndrico e fundo cônico.

Componentes da câmara:

- Porta de inspeção, em aço inoxidável AISI 316L
- Conjunto de Martelos pneumáticos para impedir o acúmulo de produto nas paredes internas da câmara de secagem.

Sistema de Descarga de Pó para a Saída do Secador

Para coletar o produto seco depositado no fundo da câmara de secagem. É formado por: registro e tambores coletores de pó.

5.3.4. Sistema de Exaustão de Ar

Para transporte do ar descarregado pela câmara até o ciclone principal, permitindo a separação e recuperação das partículas finas arrastadas pelo ar de secagem e conduzindo-o até a atmosfera.

Duto e Transições para Extração de Finos

Tem a função de interligar a parte cônica da câmara de secagem e o ciclone ou (filtro de mangas). Construído em aço inoxidável AISI 304.

Ciclone Principal

Para separação das partículas finas que serão introduzidas na corrente de ar da câmara de secagem. Construído em aço inoxidável AISI 316L (parte em contato com o produto), demais partes em aço inoxidável AISI 304.

Filtro de Mangas

O gás com o material particulado entra no coletor pela parte inferior da carcaça, onde as partículas mais densas são decantadas e as partículas menos densas são carregadas junto com o gás para a parte intermediária do filtro, sendo forçadas a passar através das mangas, onde todo o particulado é coletado. O gás limpo é então conduzido ao compartimento superior do filtro, possibilitando sua saída em direção ao exaustor.

Construído em aço inoxidável AISI 316L (parte em contato com o produto), demais partes em aço inoxidável AISI 304 e aço carbono (suportes, reforços, etc.).

Sistema de Descarga do Pó

Para coletar o produto seco depositado no fundo do ciclone e no fundo do filtro de mangas. É formado por: registro e tambores coletores de pó.

Duto de Exaustão

Interligando o ciclone e o filtro de mangas ao exaustor. Construído em aço inoxidável AISI 316L.

Exaustor Centrífugo

Destinado à exaustão do ar de secagem. Motor e carcaça construído em aço carbono.

Chaminé

Para a descarga dos gases na atmosfera, em aço inoxidável AISI 304.

5.4. Instrumentação e Controle

As principais variáveis a serem levadas em consideração no sistema de controle de um Spray Dryer são as temperaturas de entrada e saída do gás na câmara, isto deve-se ao fato de que se estas temperaturas forem excessivamente elevadas pode ocorrer na câmara de secagem uma evaporação instantânea da água, o que provocaria uma “explosão” das partículas. Sendo assim, tem que haver sempre uma boa dosagem entre a alimentação e o ar aquecido.

Logo, o sistema de controle do processo será o seguinte:

- Controle da Temperatura de entrada do ar de secagem, manipulando a vazão de gás que é queimado no aquecedor de ar
- Controle da Temperatura de saída do ar, manipulando a vazão de alimentação.

6. INTERDEPENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

O resultado do processo de secagem em um Spray Dryer depende fortemente das propriedades dos materiais.

Assim, os diversos parâmetros existentes nesse tipo de equipamento, ou seja, temperatura de entrada de ar, taxa de alimentação e fluxo de ar formam um sistema combinado que influenciam as seguintes propriedades do produto [7]:

- Temperatura da carga
- Umidade Final
- Granulométrica
- Rendimento

A otimização destes parâmetros permite alcançar um máximo rendimento do processo de secagem. A tabela abaixo mostra a influência dos mesmos nas propriedades do sistema:

Tabela 4: Dependência entre as variáveis de processo [7]

Parâmetro / Dependência	Umidade do ar de secagem ↑	Temperatura de entrada do ar ↑	Fluxo de ar ↑	Taxa de alimentação ↑	Concentração ↑	Velocidade do aspirador de ar ↑
Temperatura de saída do ar	↑ mais energia armazenada na umidade	↑↑↑ diretamente proporcional	↓ mais ar frio para ser aquecido	↓↓ mais solvente para ser evaporado	↑↑ menos água para ser evaporada	↑↑ menos perda de calor baseado no total de energia na entrada
Diâmetro da partícula	-	-	↓↓↓ mais energia para dispersão do fluido	↑ mais fluido para dispersar	↑↑↑ mais água permanece no produto	-
Umidade final do produto	↑↑ alta pressão parcial do ar	↓↓ menor umidade relativa no ar	-	↑↑ mais água produz maior pressão na partícula	↓ menos água evaporada, menor pressão parcial	↑↑ menor pressão parcial da água evaporada
Rendimento	↓ quanto maior a umidade, mais pegajoso é o produto	↑ previne contra a formação de produto pegajoso	-	↓↑ depende da aplicação	↑ maiores partículas aumentam a separação	↑↑ melhor separação no ciclone

6.1. Interações dos parâmetros individuais

- Baixa vazão de ar de secagem, com entrada de produto constante provoca longa permanência de produto na câmara, resultando em um pó muito seco.

- Uma alta velocidade no aspirador de ar resulta em um maior grau de separação no ciclone.
- Uma baixa velocidade no aspirador resulta numa diminuição da umidade residual.
- Alta velocidade do disco atomizador resulta em partículas menores do produto
- Altas concentrações da solução resultam em partículas maiores.
- Baixa concentração da solução e alta velocidade do disco atomizador resultam em partículas do produto muito pequenas, dificultando uma ótima separação ciclônica.
- Com partículas muito pequenas e leves a extração do pó deve ser efetuada mediante filtros tipo manga.
- Aumentar a vazão da bomba com temperatura de entrada constante resulta na diminuição da temperatura de saída.

7. CONCLUSÕES

A técnica de secagem denominada Spray Dryer é aplicável para uma série de produtos, como produtos químicos, alimentícios, farmacêuticos, etc. Além disso, a utilidade de um Spray Dryer não se restringe apenas para a secagem, podendo ser utilizado também para os processos de micronização, microencapsulação e englobamento.

De acordo com o projeto do equipamento, o Spray Dryer a ser construído para secar a suspensão de zeólita deve possuir um atomizador rotativo, operar no modo paralelo e possuir câmara de secagem cilíndrica. Para o aquecimento do ar de secagem será utilizado um trocador de calor de contato direto. O material mais fino será separado através de um ciclone e de um filtro de mangas.

O atomizador rotativo é o mais indicado para o projeto por proporcionar o trabalho com altas vazões de alimentação, ser aplicável a suspensões ou pastas que podem erodir ou entupir os bocais e produzir partículas na faixa de diâmetro desejável pelo PROCAT (30-120 μ m).

Os cálculos para o dimensionamento da câmara de secagem permitiram obter um diâmetro de 5.16m e uma altura de 3.09m. Estes valores foram obtidos seguindo os parâmetros de projeto disponíveis na literatura, de modo que as partículas não depositem nas paredes do secador.

O sistema de controle da unidade deve contemplar o controle das temperaturas de entrada e saída de gás, a fim de evitar uma evaporação instantânea da água e conseqüentemente, uma “explosão” das partículas.

Uma otimização do processo de secagem pode ser conseguida analisando as influências que as variáveis possuem entre si.

8. ANEXOS

As tabelas a seguir mostram exemplos de produtos que foram secos com sucesso por um secador Spray Dryer, mostrando as temperaturas de entrada e saída de ar, assim como a concentração da solução/suspensão [7]. São apresentados exemplos de produtos do gênero de produtos químicos, alimentícios, aromas etc. Os dados para cada gênero estão divididos de acordo com a finalidade com a qual foi utilizado o Spray Dryer: para secagem ou englobamento/micro-encapsulação de produtos.

Alimentos

- Secagem

Tabela 5: Exemplos de Alimentos secos com Spray Dryer [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Comida de bebê	160	95	40
Cerveja	180	108	-
Caseína	150	90	6
Fermento	95	55	60
Lactose	160	105	30
Leite desnatado	174	102	50
Amido de milho	130	70	40
Leite integral	110	70	15
Soro do leite	180	80	6/45
Extrato de feijão de soja	130	75	80
Tofu	110	60	17

- Englobamento / Micro-encapsulação

Tabela 6: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para alimentos [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Concentrado de fruta, framboesa, em maltodextrina, 2:8	150	90	30
Concentrado de fruta, laranja, em maltodextrina, 2:8	150	90	40
Suco de groselha em maltodextrina	170	100	47
Óleo de soja em maltodextrina	150	90	30
Açúcar/mistura de maltodextrina/goma arábica 25:15:50:10	160	90	22

Aromas, cosméticos, produtos de limpeza e detergentes

- Secagem

Tabela 7: Exemplos de Aromas, cosméticos, produtos de limpeza e detergentes secos com Spray Dryer [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Extrato de valeriana	150	100	25
Concentrado de cerveja	150	110	30-40
Extrato de chicória	130	75	38
Extrato de casca de pinheiro	120	85	4
Extrato de castanha	200	130	20
Citrato de sódio	160	90	20
Ortofosfato de sódio	180	110	40
Extrato de folha de oliva	150	90	36
Extrato de alcaçuz	100	75	36
Detergente	200	110	40
Amaciante de roupa	125	75	20

- Englobamento / Micro-encapsulação

Tabela 8: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para de Aromas, cosméticos, produtos de limpeza e detergente [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Aroma, morango em maltodextrina	150	90	35
Aroma, laranja em maltodextrina	150	90	17
Óleo de cardamomo em maltodextrina	170	100	20
Suco de tâmara em maltodextrina	120	90	30
Óleo de cominho em maldex	140	100	50
Óleo de perfume em maltodextrina	130	70	-
Óleo de pêssego em maltodextrina	150	100	20
Espuma de banho em cloreto de sódio 1:2	160	100	15
Óleo de canela em maltodextrina	170	100	20
Óleo de limão em maltodextrina	130	90	20

Produtos médicos / farmacêuticos

- Secagem

Tabela 9: Exemplos produtos médicos / farmacêuticos secos com Spray Dryer [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Albumina	110	60	5
Soro de anti-progesterona liofilizada	80	60	1
Plasma sanguíneo	180	100	5
Dextrana	154	120	20
Enzimas / coenzimas	80	55	12
Compostos ácidos de amino-frutose	180	80	37
Dispersões de gelatina em capsula	105	80	20
Glicose / Compostos de aminoácidos 1:1	130	80	10
Manitol com enzimas	100	55	15
Combinação de vacinas	190	140	-
Peptídeos	110	70	2
Vitamina A+E	100	55	-
Suspensão de células (cultura de bactérias)	90	60	Aprox. 50

- Englobamento / Micro-encapsulação

Tabela 10: Exemplos de Englobamento/Micro-encapsulação para produtos médicos / farmacêuticos [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Caroteno em geléia 40:60	170	100	25
Estreptococo em leite em pó desnatado / Glicose / Geléia 1:1:1:3	90	70	40

Produtos Químicos

- Secagem

Tabela 11: Exemplos produtos químicos secos com Spray Dryer [7]

Produto	Temperatura de Entrada do ar (°C)	Temperatura de Saída do ar (°C)	Concentração %
Acrilamida	125	69	50
Cloreto de amônio	180	75	20
Nitrato de amônio	180	100	20
Óxido de chumbo	150	90	-
Citrato de cálcio-hidrogênio	200	110	50
Carbonato de cálcio	220	100	10
Fosfato de cálcio	190	100	-
Dispersão de tinta	150	95	20
Óxido de ferro	170	125	-
Pigmentos	130	110	36
Pó de vidro	120	90	20
Borracha de látex	120	70	20
Cerâmicas variadas	150	120	46
Cola sintética	100	70	20
Látex	160	90	31
Lignina	130	55	7/4
Fosfato de magnésio	120	90	15
Resina de melamina	120	80	-
Óxidos metálicos	210	135	-
Citrato de sódio	160	90	20
Ortofosfato de sódio	180	110	40
Sulfito de sódio	180	90	20
Resina fenólica	135	105	50
Poliacrilamida	204	111	3
PVC-Látex	160	90	31
Suspensão de argila	200	100	1,2
Poli acetato de vinila	90	50	25
Zeólita	180	120	10
Oxido de titânio	230	170	-
Zircônia	180	100	-

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **E. L. Foletto, N. C. Kuhnen, H. J. José.** *Síntese da zeólita ZSM-5 e suas propriedades estruturais após troca iônica com cobre. Universidade Federal de Santa Catarina, C. P. 476. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos.*
- [2] **Marcelo L. Mignoni, Chaline Detoni e Sibeles B. C. Pergher (2007).** *ESTUDO DA SÍNTESE DA ZEÓLITA ZSM-5 A PARTIR DE ARGILAS NATURAIS. Quim. Nova, Vol. 30, No. 1, 45-48.*
- [3] **Harrison R., Todd P., Rudge S. and Petrides D. (2003).** *Bioseparations Science and Engineering.*
- [4] **Perry, R., and Chilton, C. (1986).** *Manual de Engenharia Química. 5th ed. Guanabara Dois.*
- [5] **McCabe, W. L., Smith, J.C., and Harriott, P. (1993).** *Unit Operations of Chemical Engineering, 5th ed., McGraw-Hill, New York.*
- [6] **Bird, R. B. , Stewart, W. E., and Lighfoot, E. N. (2002).** *Transport Phenomena, 2nd ed., Wiley, New York*
- [7] **BÜCHI Labortechnik AG (2002).**, *Training Papers Spray Drying.*
- [8] **GEA Process Engineering Division.,** *Small-scale spray drying from the industry's leading supplier.*
- [9] **Foust, A., and Wenzel, L.(1960).** *Principles of Unit Operations. Department of Chemical Engineering, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania., chapter 18.*
- [10] **Esteves, B. N., (2006).** *Influência do processo de secagem por pulverização mecânica (Spray Dryer) no tamanho de partícula e densidade aparente do café solúvel. Dissertação de mestrado, USP.*

- [11] Masters, K. (1991). *Spray Drying Handbook*, 5th ed., Wiley, New York
- [12] Gluckert, F. A. (1962). *A theoretical correlation of spray-dryer performance. AIChE. J.*, vol. 8, p.460.
- [13] P. Hu et al.(2009)., *Analysis for composite zeolite/foam aluminum–water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat. / Energy Conversion and Management (50) 255–261.*
- [14] Van't Land, C.M. (1991). *Industrial Drying Equipment*, Dekker, New York.
- [15] Filkova, I., and Mujumdar, A.S. (1995). *Industrial spray drying systems. In Handbook of Industrial Drying, vol. 1, A. S. Mujumdar, ed., Dekker, New York, p.263.*
- [16] Marshal, W. R., Jr., "Atomization and Spray Drying," *Chem. Eng. Progr. Monograph Series N. 50 (2) (1954).*
- [17] M.W. Woo et al. (2008). Amorphous particle deposition and product quality under different conditions in a spray dryer. *Particuology (6) 265–270.*
- [18] V.S. Shabde, K.A. Hoo (2008). *Optimum controller design for a spray drying process. Control Engineering Practice (16) 541–552.*
- [19] K. Tomoda et al. (2008). *Preparation and properties of inhalable nanocomposite particles: Effects of the temperature at a spray-dryer inlet upon the properties of particles. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces (61) 138–144,*
- [20] R. Vehring et al. (2007). *Particle formation in spray drying. Aerosol Science(38) 728– 746.*
- [21] J. Nava et al. (2002.) *Robustness of a proportional-integral with feedforward action control in a plant pilot spray dryer. Chemical Engineering Journal (86) 47–51.*
- [22] I. Zbicinski (1995). *Development and experimental of momentum, heat and mass transfer model in Spray Drying. The chemical Engineering Journal (58) 123-133.*

[23] J. R. Perez-Correa and F. Farias (1995). *Modelling and control of spray dryer. Food Control*, Vol. 6, No. 4, pp. 219-227.

[24] P. Hu et al. (2009). *Analysis for composite zeolite/foam aluminum–water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat. Energy Conversion and Management* (50) 255–261.

[25] Willey J. & Sons, Inc and Chapman & Hall.(1956) *Unit Operations*

[26] Kirk R. and Othmer D. (1954). *Encyclopedia of Chemical Technology*