

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Alex Notaroberto Madeira**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SPRAY DRYING  
PELO USO DE PRÉ-DESUMIDIFICADORES  
NO AR DE ENTRADA**

**T A U B A T É**  
**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Alex Notaroberto Madeira**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SPRAY DRYING  
PELO USO DE PRÉ-DESUMIDIFICADORES  
NO AR DE ENTRADA**

Monografia apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, subárea Projetos Mecânicos no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté  
**Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo**

**Taubaté, SP**

**2009**

**Alex Notaroberto Madeira**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SPRAY DRYING PELO USO DE PRÉ-  
DESUMIDIFICADORES NO AR DE ENTRADA**

Monografia apresentada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, subárea Projetos Mecânicos no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté  
**Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo**

MONOGRAFIA APROVADA EM: 07/11/2009

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. José Rui Camargo - Presidente

Assinatura: \_\_\_\_\_

Professor Dr. Sebastião Cardoso – Membro externo

Assinatura: \_\_\_\_\_

Professor Dr. Carlos Teófilo Salinas Sedano – Membro interno

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a minha Esposa Juliana, meu filho Felipe, meus pais Sérgio e Marly, que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida. Foram grandes incentivadores e me deram muito suporte durante toda esta jornada. Graças ao amor e dedicação ao lado deles consegui enfrentar mais um desafio na minha vida. Agradeço também a Deus, pois sem ele nada é possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus companheiros de trabalho e professores, em especial aos Professores Dr. José Rui Camargo, Dr. Carlos Alberto Chaves, Dr. Wendell Queiroz Lammas, Dra. Daniela Helena Pelegrine Guimarães, Dra. Valesca Alves Correa e a Helena Barros Fiorio pela paciência, colaboração e orientação nos trabalhos que precederam esta monografia. Aos meus colegas do Curso de Mestrado, pelo companheirismo e também a todos que de alguma forma auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Spray Drying é um processo de secagem por atomização em uma câmara fechada, que visa retirar a umidade de um produto por transferência de calor e massa de água contida no produto para o ar que é previamente aquecido neste processo. Este trabalho apresenta um estudo de caso para uma indústria que produz aditivos alimentícios. O ar de entrada pode chegar à câmara com alta umidade proveniente da atmosfera, neste caso, haverá mais consumo de energia de acordo com as estações do ano. Esta pesquisa promove um estudo do processo atual, através da instalação de um equipamento de pré-desumidificação no ar de entrada do processo e mostra diferentes sistemas de desumidificação: por refrigeração e por adsorção, comparando os desempenhos sob o ponto de vista energético, ambiental e econômico com sistema original. Os objetivos deste estudo são analisar a capacidade de remoção de umidade de cada dispositivo de desumidificação, a influência de cada dispositivo e a variação da umidade do ar de entrada no processo, bem como o impacto econômico e ambiental de cada equipamento no sistema global. Além disso, promove o aumento do gradiente de umidade entre o ar de entrada e do produto otimizando o processo de secagem, aumentando a eficiência energética global do sistema e reduzindo o impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Spray drying. Desumidificadores. Otimização de processos. Eficiência energética global.

## ABSTRACT

Spray drying is a dehumidification process by atomization in a closed chamber that aims to remove moisture of a product by heat and mass transfer from the contained water in the product to the air which is previously heated in this process. This paper presents a case study for an industry that produces food ingredients. The inlet air can reach the chamber with high moisture from the atmosphere condition requesting, in this case, more energy consumption according to the seasons of the year. This paper promotes a study of the current process through the installation of a pre-dehumidification device of the inlet air and shows different dehumidification systems: The refrigeration and the adsorption and comparing their performance in an energetic, environmental and economic point of view. The goals of this study are to analyze the capacity of moisture removing of each dehumidification device, the influence of moisture variation of the inlet air in the process as well as the economic impact of each device in the global system. Moreover, it promotes the increasing of moisture gradient between the inlet air and the product optimizing the drying process, increasing the global energy efficiency in the global system and reducing environmental impact.

**Keywords:** Spray drying. Dehumidification. Process optimization. Global energy efficiency.



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Diagrama de fluxo básico de um spray dryer	16
Figura 2 - Fluxo de um spray drying com ciclones	19
Figura 3 - Técnicas de microencapsulação	23
Figura 4 - Microesferas	24
Figura 5 - Carta Psicrométrica	27
Figura 6 - Diagrama de fases (pressão x temperatura)	29
Figura 7 - Foto de um desumidificador	37
Figura 8 - O processo atual	41
Figura 9 - O fluxo proposto com os desumidificadores	41
Figura 10 - Balanço de massa do processo de secagem	43

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros do ar atmosférico	45
Tabela 2 - Resultados do processo atual	46
Tabela 3 - Resultados do sistema por refrigeração	47
Tabela 4 - Resultados do sistema de adsorção	48
Tabela 5 - Comparação do consumo energético	51
Tabela 6 - Reação química da queima dos componentes do GLP	51
Tabela 7 - Emissões de CO <sub>2</sub> provenientes da queima de GLP	52

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{\text{GLP}}$	Massa de GLP	kg
$\text{PCI}_{\text{GLP}}$	Poder Calorífico Inferior do GLP	kJ
$Q$	Energia transferida pelo queimador	GJ/h
$M_{\text{ar}}$	Massa de ar	kg
$h_{\text{inicial}}$	Entalpia antes do queimador	kJ/kg
$h_{\text{final}}$	Entalpia depois do queimador	kJ/kg
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	Massa total de água	kg
$W_{\text{inicial}}$	Umidade absoluta antes da câmara	$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$
$W_{\text{final}}$	Umidade absoluta depois da câmara	$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$
$v$	Volume específico do ar	$\text{m}^3/\text{kg}$
$M_p$	Fluxo de massa total na entrada (produto úmido)	kg/h
$\dot{m}_p$	Fluxo de massa de produto seco (entrada e saída)	kg/h
$m_{\text{pH}_2\text{O}}$	Fluxo de massa de água do produto úmido (entrada)	kg/h
$T_{\text{ep}}$	Temperatura do produto na entrada	$^{\circ}\text{C}$
$\dot{m}_{\text{ear}}$	Fluxo de massa ar na entrada	kg/h
$w$	Umidade absoluta do ar na entrada	$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$
$\dot{m}_{\text{ew}}$	Fluxo de massa de água na entrada	kg/h
$T_{\text{ear}}$	Temperatura do ar na entrada	$^{\circ}\text{C}$
$\dot{m}_{\text{sar}}$	Fluxo de massa de ar na saída	kg/h

$m_{aH_2O}$	Fluxo de massa de água do ar na saída	kg/h
$T_{sar}$	Temperatura do ar na saída	°C
$\dot{m}_{sw}$	Fluxo de massa de água na saída	kg/h
$T_{sp}$	Temperatura do produto na saída	°C
$\dot{m}_e$	Fluxo de massa total na entrada	kg/h
$h_e$	Entalpia total na entrada	kJ/kg
$\dot{m}_s$	Fluxo de massa total na saída	kg/h
$h_s$	Entalpia total na saída	kJ/kg
$h_{ear}$	Entalpia do ar na entrada	kJ/kg
$h_{ep}$	Entalpia do produto na entrada	kJ/kg
$h_{ew}$	Entalpia da água na entrada	kJ/kg
$h_{sar}$	Entalpia do ar na saída	kJ/kg
$h_{sp}$	Entalpia do produto na saída	kJ/kg
$h_{sw}$	Entalpia da água na saída	kJ/kg
$C_p$	Calor específico do produto	kJ/kg.°C
TBS	Temperatura de Bulbo seco	°C
UR	Umidade de relativa	%
$W_1$	umidade absoluta no ponto 1	kg <sub>água</sub> /kg <sub>ar seco</sub>
DP	Dew point ou Ponto de orvalho	(°C)
H	Entalpia	kJ/ kg
$M_{CO_2}$	Fluxo de massa de gás carbônico	kg/h

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	14
3. REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 Processo de Spray Drying	15
3.2 Psicrometria	27
3.3 Desumidificadores	32
3.3.1 Sistema por Refrigeração	33
3.3.2 Sistema por Adsorção	35
3.4 Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	37
4. METODOLOGIA	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Processo atual	46
5.2 Desumidificação por Refrigeração	47
5.3 Desumidificação por Adsorção	48
5.4 Balanço Energético	49
5.5 Análise Econômica	49
5.5.1 Análise Econômica sobre o consumo de GLP	49
5.5.2 Análise Econômica sobre o consumo de energia elétrica	50
5.5.3 Balanço final da análise econômica	51
5.6 Análise de emissão de CO <sub>2</sub>	51
5.7 Análise de Pay-Back	52
6. CONCLUSÕES	54
7. REFERÊNCIAS	56

## 1. INTRODUÇÃO

O ser humano dotado de inteligência tinha procurado formas durante toda a história para superar os obstáculos impostos pela natureza. Desse modo, foram inventados e desenvolvidos instrumentos tecnológicos com o objetivo de superar as dificuldades. Pode-se dizer que a necessidade é a mãe das grandes invenções tecnológicas. Este trabalho irá lidar com a tecnologia de secagem conhecido como "Spray Drying", que hoje é considerado o mais usual e mais importante da tecnologia de secagem, superando a liofilização. O Spray drying é um processo de secagem por atomização. Por este equipamento podem-se obter dois tipos de produtos, o microencapsulado, no qual o princípio ativo está encapsulado em forma de microcápsulas e o desidratado, no qual uma solução é desidratada a fim de se obter um material em pó com baixíssima umidade e granulometria microscópica.

O processo de secagem por atomização ou secagem por pulverização conhecido como Spray Drying é o processo de desidratação mais utilizado nas indústrias, principalmente as alimentícias. Como exemplo, faz-se de secagem de leite em pó, sucos de frutas, aromas e fragrâncias, extratos botânicos e outros ingredientes alimentícios. O processo de secagem visa retirar a umidade de um produto por dispersão do produto em uma câmara de secagem. Nesta câmara, um fluxo de ar previamente aquecido faz contato com o produto úmido. Nesse momento, ocorre troca de calor do ar para o produto e a transferência de massa de água do produto para o ar. O ar úmido formado é retirado da câmara, bem como o produto seco é obtido com baixa umidade. A média é inferior a 5%. Entre os parâmetros mais importantes, há o fluxo de ar e suas condições de temperatura, diferença de pressão na câmara, fluxo de entrada e saída de produto. Além disso, os conceitos psicrométricos são extremamente importantes. Estes conceitos podem explicar a influência do ar na qualidade do produto. Por isso que a análise psicrométrica é fundamental quando as indústrias estão projetando um spray dryer. A aplicação destes conceitos pode influenciar no custo

do projeto, no custo da operação do equipamento e no impacto ambiental dos recursos energéticos do secador.

Muitas conferências, encontros e simpósios são organizados anualmente para discutir sobre recursos energéticos e o meio ambiente. Há a participação de políticos e grandes líderes, o que gera a expectativa de que alguém surgirá com uma inovação capaz de solucionar os grandes problemas do planeta. Porém, muitas das atuais soluções ou alternativas de minimizar os problemas podem não advir de nenhuma grande invenção, mas sim do melhor aproveitamento das tecnologias que já existem. Em alguns casos a combinação destas tecnologias em harmonia pode ajudar na redução dos impactos negativos que o homem causa no planeta. Este trabalho demonstra bem isto, pois trata da aplicação da tecnologia de desumidificação na tecnologia de spray drying e demonstra sua eficácia e seus benefícios.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é fazer uma avaliação sobre a aplicação dos desumidificadores no processo de secagem por atomização. De acordo com as condições do tempo, estações do ano e mudanças de clima, a umidade do ar se modifica e influencia o desempenho da secagem industrial variando à produtividade de acordo com a quantidade de água no ar.

Analisando-se os conceitos psicrométricos e visando melhorias de processo, pode-se verificar que há uma questão conflitante. O spray dryer é um equipamento de secagem de produtos com elevado teor de umidade, que por sua vez utiliza o ar atmosférico como veículo de secagem. Todavia, o ar atmosférico pode transportar naturalmente uma grande quantidade de água para dentro do equipamento de secagem. Ou seja, durante a secagem o spray dryer é evaporado não somente a água contida no produto, mas também a água contida no ar. Por isso, este estudo avalia quais seriam os impactos econômico, energético e ambiental, se neste processo fosse utilizado um ar tão seco quanto possível, por meio da aplicação de pré-desumidificadores no ar de entrada do Spray dryer.

Baseado nesta questão elaborou-se esta pesquisa. Neste estudo analisam-se as seguintes condições: a capacidade de remoção de umidade do ar de cada equipamento de desumidificação, a influência da variação da umidade do ar de entrada no processo pelo consumo de GLP e o impacto energético, econômico e ambiental na aplicação dos desumidificadores.

Essas metas mostrarão para cada estudo, sua análise. O mais importante é manter o foco na otimização de processo. Este trabalho também pretende ser utilizado como ferramenta de novos projetos de instalação de spray drying, mostrando uma boa oportunidade para economizar energia desde a concepção do projeto.



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Processo de Spray Drying

O Spray drying é um sistema de processamento de partículas suspensas que utiliza atomização líquida para criar gotas nas quais são secadas em partículas individuais enquanto move em um meio de secagem gasoso, usualmente ar.

Spray drying envolve princípios de secagem por convecção, onde o calor de evaporação para secagem das gotas é fornecido pelo calor sensível do meio de secagem (ar ou gás inerte) dentro do qual a gota é pulverizada. Soluções bombeáveis (alimentação) são requeridas para uma atomização efetiva, e gotas, normalmente tendo uma variação de tamanho de partícula de 5-600 micra (0,005-0,6mm), saem do atomizador entram em contato com o ar de secagem e secam as partículas enquanto se movem pela câmara de secagem. Se o pó resultante da secagem deste tamanho de gotas, na saída da câmara de secagem tem as propriedades de produto seco desejadas, em termos de tamanho de partícula, estrutura, quantidade de voláteis, temperatura e etc., nenhuma fase maior ou tratamento posterior é requerido e a câmara de secagem é considerada para operar em um estágio de layout do spray drying. Se este não for o caso, um equipamento de tratamento posterior é adaptado à câmara do spray drying e então este opera em dois ou até mesmo três estágio de layout do spray drying (MASTER, 2002).

Um diagrama do fluxo de um Spray dryer em sua forma mais simplificada é mostrado na figura 1.

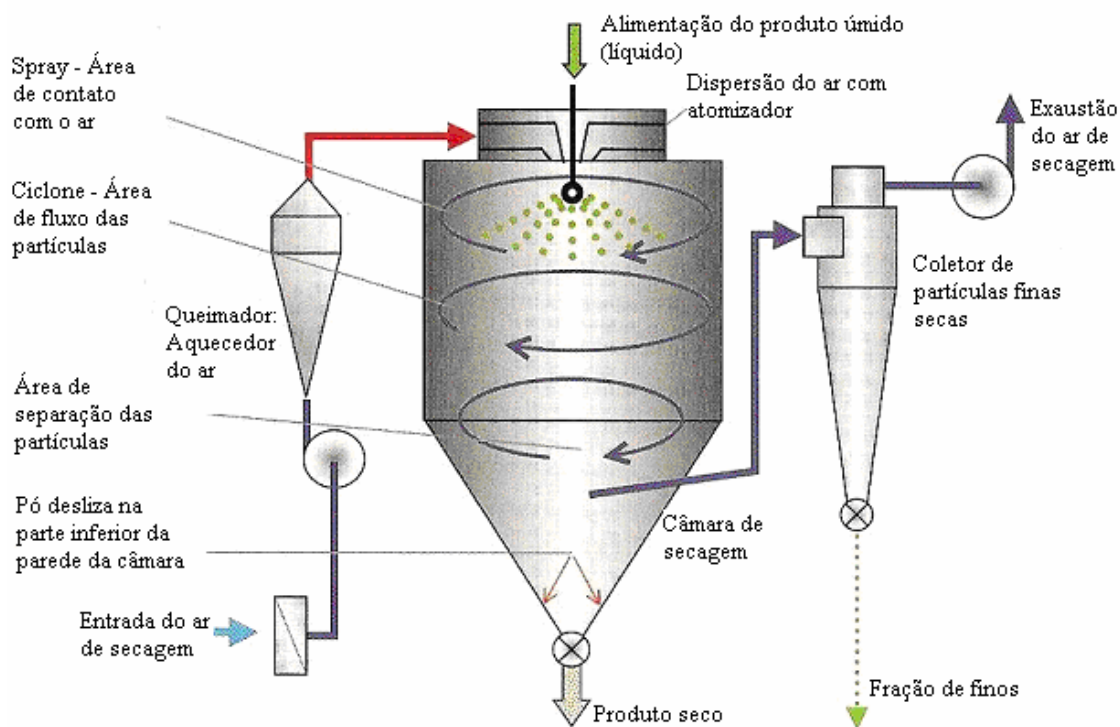


Figura 1 - Diagrama de fluxo básico de um spray dryer (MASTER, 2002)

O sistema de secagem caracteriza-se pela remoção de umidade até valores desejados, de forma que seja garantida a estabilidade do produto por tempo adequado, nas condições pré-estabelecidas. A secagem apresenta uma série de vantagens em relação a outras formas de conservação, principalmente por redução de peso e armazenamento em temperatura ambiente (CEREDA E VILPOUX, 2003).

A secagem por atomização, pulverização ou “spray drying” é um processo contínuo onde um líquido ou pasta é transformado em produto seco, caracterizando-se pelo tempo de secagem relativamente curto.

O processo consiste basicamente na atomização do líquido em um compartimento que recebe fluxo de ar quente. A rápida evaporação da água permite manter baixa a temperatura das partículas de maneira que a alta temperatura do ar de secagem não afete demasiadamente o produto. É utilizado

não só na indústria alimentícia (leite em pó, café solúvel, etc.), mas também na indústria farmacêutica, cerâmica, detergentes, etc.

A operação de atomização está baseada em quatro fases:

- atomização do líquido,
- contato do líquido atomizado com o ar quente,
- evaporação da água,
- separação do produto em pó do ar de secagem.

A pulverização do líquido na câmara de secagem poderá ser feita por discos ou bicos atomizadores. No primeiro caso (sistema centrífugo), um disco ranhurado girando em alta velocidade pulveriza o líquido e projeta as gotículas de maneira radial ao fluxo de ar quente que entra pelo dispersor de ar situado na parte superior da câmara. A câmara tem normalmente uma forma cilíndrica na sua parte superior e cônica na sua parte inferior.

A atomização através de bicos especiais poderá ser ocasionada por bombas de alta pressão ou por sistema pneumático (ar comprimido).

O aquecimento do ar pode ser feito por contato indireto (tubulações aletadas aquecidas por vapor, óleo ou sistema elétrico) ou por queima direta de gás, óleo ou outro combustível.

É muito importante nas características do pó final a maneira com que o ar quente entra em contato com o líquido atomizado. O fluxo de ar quente é normalmente introduzido na câmara, através do dispersor de ar localizado na parte superior da mesma. O líquido pulverizado poderá ter o mesmo fluxo do ar quente (fluxo paralelo) ocorrendo, neste caso, um contato da partícula com ar de temperatura cada vez mais baixa. É um sistema usado para produtos mais sensíveis ao calor.

No fluxo em contracorrente, o líquido é pulverizado em uma posição oposta à entrada de ar quente, ocorrendo o contato da partícula mais seca com o ar mais quente. Este sistema utiliza eficientemente o calor, sendo indicado para produtos não sensíveis ao calor. Alguns atomizadores usam o sistema misto, combinando os dois tipos descritos.

A evaporação da água do líquido pulverizado (névoa) ocorre na câmara de secagem quando o ar quente ( $180^{\circ}$  -  $230^{\circ}\text{C}$ ) entra em contato com a partícula úmida. A construção da câmara e as condições de trabalho são ajustadas de modo a ocorrer uma evaporação necessária de água, sem elevar demasiadamente a temperatura do produto.

A separação do produto seco do ar de secagem tem importância sobre as características do pó final, devido ao manuseio mecânico usado nesta separação. Excessivo manuseio mecânico resulta em um pó mais fino. Os atomizadores usam dois sistemas básicos de separação:

1) A separação principal do pó ocorre na parte inferior (base) da câmara de secagem. O ar de secagem sempre arrasta partículas finas que são recuperadas em sistemas de separação, usualmente ciclones. O pó mais fino coletado no ciclone poderá ser misturado ou não com o pó obtido na base do atomizador. A figura 2 mostra o esquema de funcionamento de um atomizador deste tipo onde os dois tipos de pós são misturados antes da embalagem.

2) A separação do pó ocorre somente em sistemas de separação (ciclones), sendo necessário assim um número maior de ciclones (de 3 a 8, dependendo de cada tipo).

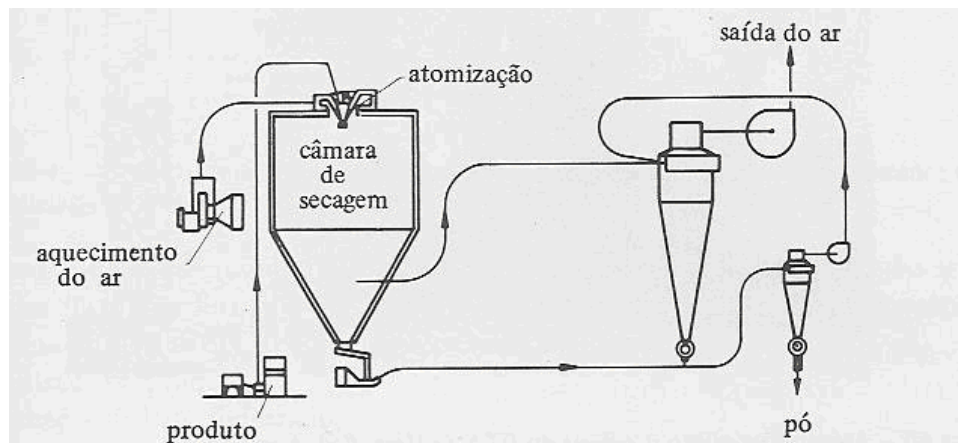


Figura 2 - Fluxo de um spray drying com ciclones (GAVA, 1984).

As quatro fases da atomização interferem nas características do pó final. Assim, a maneira de atomizar e as propriedades do líquido atomizado influenciam o tamanho da partícula sólida, sua densidade, aparência e umidade. Já o contato líquido, ar quente e a evaporação influenciam a densidade do pó, aparência, umidade, retenção de aroma e sabor. Como já foi mencionada, a técnica de separação entre o pó e o ar de secagem influencia a granulometria do produto desidratado. As variáveis importantes no controle das características do pó final podem ser assim resumidas:

- Líquido atomizado (teor de sólidos, número e tamanho de partículas e viscosidade);
- Atomizador (tipo e mecanismo de funcionamento);
- Ar de secagem (velocidade, temperatura do ar de entrada e temperatura do ar de saída).

Assim, a atomização consiste basicamente em colocar ar quente (180-230°C) em contato com um líquido pulverizado ocorrendo rapidamente a evaporação e a disposição do pó na parte inferior do aparelho. O ar de secagem sai pela parte inferior do equipamento a uma temperatura de 60-100°C, passando por ciclones para recuperar partículas finas (através da força centrífuga) e dando saída para a atmosfera através de chaminés (GAVA, 1984).

Na literatura especializada, as microcápsulas são definidas como partículas de diâmetro desde 1 até 1000  $\mu\text{m}$ , contendo material de núcleo envolvido por membrana especial, liberando-o na hora desejada. O material do núcleo pode ser constituído de pequenas partículas sólidas, gotas de líquido ou quantidades de gás que no processo de encapsulação são revestidas por um filme ou membrana. Existem vários tipos de estrutura física de microcápsulas como as esferas mononucleares ou multinucleares e partículas irregulares multinucleares. As condições de fabricação determinam o tipo de cápsula resultante, sendo a esfera mononuclear a mais comum. O conteúdo da microcápsula é chamado na literatura técnica de “agente ativo”, “fase interna” ou “núcleo”. Já ao referir-se ao material que forma a parte externa, os textos normalmente usam os termos “revestimento”, “membrana”, “agente encapsulador”, “carregador”, “casca” ou “concha”. O material do núcleo compreende, em geral, 80% a 85% das cápsulas.

A substância encapsulada pode ser liberada por ação mecânica, isto é, por rompimento das cascas por meio de pressão ou por variações físico-químicas de temperatura ou pH no meio em que as cápsulas se encontram, atuando sobre a membrana.

As microcápsulas têm várias utilidades. Como exemplo, o tempo de vida útil de um composto volátil pode ser bastante aumentado por microencapsulação, pois a membrana impede a sua evaporação. As microcápsulas podem também proteger um material de núcleo dos efeitos da radiação ultravioleta, umidade ou do contato com oxigênio. Também as reações químicas entre duas espécies ativas podem ser evitadas pela separação física oferecida pela membrana. A densidade de um produto pode ser aumentada por encapsulação ou diminuída por inclusão de ar na cápsula, ou seja, um sólido denso pode ser convertido por esse processo em um produto capaz de flutuar na água. Pós muito finos podem ser microencapsulados para reduzir tendências de aglomeração. A microencapsulação pode ainda modificar a cor, a forma, o volume ou a fotossensibilidade da substância encapsulada. Graças a essas propriedades, as microcápsulas encontram inúmeras aplicações industriais. Na área farmacêutica, por exemplo, deram uma contribuição importante permitindo o desenvolvimento de

fórmulas de liberação lenta, ou seja, aqueles com a capacidade de liberar os agentes ativos apenas nos órgãos onde devam agir ou onde serão absorvidos. Nesses produtos, o princípio ativo protegido pela cápsula é liberado gradativamente à medida que esta se dissolve. Em outros casos, a casca é obtida com poros ou microfuros para permitir a liberação gradual do conteúdo ativo. Uma aplicação conhecida em farmácia é a redução da irritação gastrointestinal conseguida pela microencapsulação de ativos, como o ácido acetilsalicílico (aspirina). Nesse caso, uma liberação constante é conseguida por um revestimento do pó preparado com graus especiais de etilcelulose. Também para atenuar os efeitos nocivos de medicamentos que contenham componente agressivo à mucosa estomacal, costuma-se encapsulá-lo usando como membrana material resistente ao meio ácido e que só se decompõe em pH alcalino. Dessa forma, a cápsula passa pelo estômago sem se romper permitindo a absorção do ativo apenas no intestino, onde o meio alcalino existente propiciará sua liberação graças à degradação da membrana. Mascaram odor e/ou sabor desagradável de princípios ativos é outra aplicação do processo de microencapsulação na indústria farmacêutica. A proteção de ativos higroscópicos também é prática obtida por microencapsulação. Um exemplo são algumas vitaminas do grupo B, como hidrocloreto de tiamina, riboflavina e niacina, que podem ser microencapsuladas antes de serem comprimidas em tabletes. Também há uso de microcápsulas em drogas injetáveis, objetivando obter liberação lenta, como em anticoncepcionais usados uma vez ao mês.

A indústria de alimentos usa microcápsulas de aromas, extratos de tempero e outros. Esses aditivos são encapsulados para ter vida útil aumentada, reduzindo a volatilização e a degradação oxidativa. Vantagens adicionais incluem a facilidade de incorporação em misturas em pó e consistência melhorada.

Também na área de pesticidas as microcápsulas encontram aplicação. Os agrotóxicos encapsulados têm sua atividade prolongada por liberação controlada do princípio ativo. Há ainda outros benefícios como: a redução da volatilização, da fitotoxicidade e da degradação ambiental, além, é claro, da questão de segurança pois os pesticidas encapsulados reduzem o perigo de intoxicação a que o usuário

é exposto. Prova disso é o produto Penncap-M, existente nos EUA, que contém microcápsulas de 30 a 50  $\mu\text{m}$  de metilparation. Após aplicação com equipamento spray convencional, o agente ativo é liberado lentamente por permeação da parede da cápsula. Comparado ao metilparation não encapsulado, apresenta toxicidade reduzida para mamíferos e efetividade prolongada.

Outro setor que cada dia mais desenvolve formulações com microcápsulas é o cosmético. Vários produtos para tratamento facial e capilar usam as microcápsulas para, entre outros benefícios, preservá-los. É o caso da vitamina C usada nos produtos anti-envelhecimento para combater os radicais livres. Nesse segmento é mais comum o uso de partículas menores que 1  $\mu\text{m}$ , chamadas de nanocápsulas, cujo diminuto tamanho permite uma penetração mais fácil na pele (SOUZA, 2000).

Na área de alimentos, os estudos foram iniciados nos anos 60 pelo Instituto de Pesquisas Southwest (Estados Unidos), com a microencapsulação de óleos essenciais para prevenir a oxidação e a perda de substâncias voláteis e controlar a liberação do aroma. Além dos aromas, a aplicação dessa tecnologia estendeu-se à incorporação de aditivos naturais e ingredientes (corantes, temperos, acidulantes, vitaminas e minerais) que alteram a textura, melhoram a qualidade nutricional, aumentam a vida de prateleira e controlam as propriedades dos alimentos processados. A técnica da microencapsulação protege esses ingredientes contra perdas nutricionais e preserva ou mascara cor e sabores (inibindo a reação com outros materiais), além de incorporar aos alimentos mecanismos de controle da liberação de certos componentes. A figura 3 ilustra as técnicas de microencapsulação.



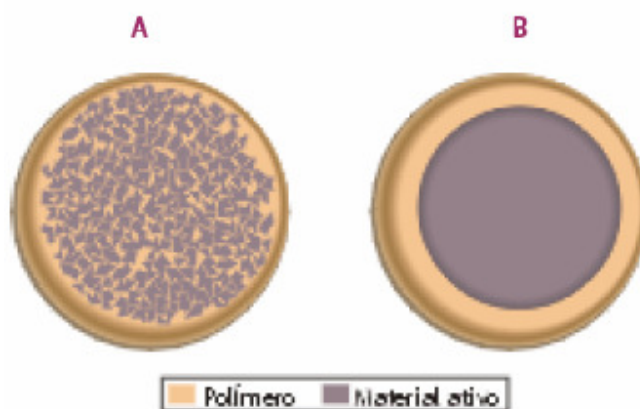


Figura 3 - Técnicas de microencapsulação A - microesferas, onde o material ativo está retido por uma matriz polimérica B - microcapsulas, onde o material ativo está apenas envolto pelo agente encapsulante (RÉ, 2000).

Os estudos sobre microencapsulação de materiais ativos foram iniciados no IPT em meados de 1994. O uso dessa tecnologia é para preservar substâncias voláteis em diferentes produtos, assim aumentando sua durabilidade e sua vida de prateleira (shelf-life), o qual foi um dos primeiros temas de pesquisa do grupo. Nesse caso, a microencapsulação de compostos voláteis mantém por mais tempo o sabor, o cheiro e a textura de produtos como refrescos e sopas ou as propriedades de uso de produtos como sabões e detergentes, evitando o contato (e, portanto a interação) de tais compostos com os demais componentes das fórmulas.

A retenção do produto volátil nas microcápsulas produzidas decorre, em grande parte, da diferença na velocidade de difusão (a dispersão no meio externo) da água e do aroma (um composto orgânico) presentes nas gotículas. À medida que a umidade diminui na câmara de secagem, as gotículas perdem água e aroma, mas em geral a velocidade de difusão do aroma é menor que a da água. Abaixo de um valor crítico de umidade (que depende da natureza do agente encapsulante), essa diferença acentua-se. Isso acontece porque o agente encapsulante forma uma barreira seletiva, ou seja, uma membrana permeável à água, mas impermeável ao aroma que vai ficando preso no interior dessa

membrana até a evaporação total da água. A figura 4 apresenta a imagem das microesferas produzidas por esta tecnologia.

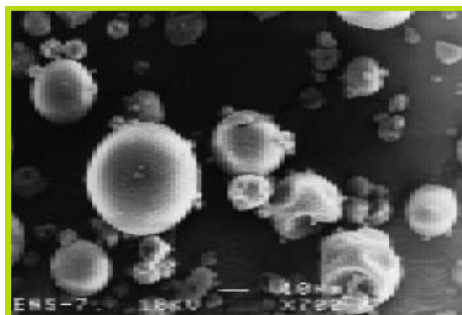


Figura 4 - Microesferas (aumentadas 700 vezes na imagem) com aroma retido no seu interior, produzidas pela técnica de Spray drying (RÉ, 2000).

Outro campo para o qual a microencapsulação vem trazendo grandes benefícios é o nutricional, em especial no caso do combate à deficiência mineral. Estudos com crianças, adolescentes, gestantes e idosos demonstram a carência de certos minerais na dieta da população brasileira. A deficiência torna-se mais grave no caso de ferro, iodo, cálcio e zinco. Estes elementos são de grande importância em processos orgânicos como crescimento, maturação sexual, atuação do sistema imunológico, produção hormonal, desenvolvimento da inteligência entre outros.

Instituições governamentais e particulares têm procurado prevenir tais carências através da fortificação de certos alimentos ou da suplementação com medicamentos (aditivos nutricionais). No entanto, a incorporação de vários minerais a alimentos de uso comum (cereais, farinha, leite etc.) apresenta uma grande dificuldade: a reatividade elevada desses elementos com outros ingredientes e a facilidade com que se oxidam, alterando a cor e/ou o gosto do produto. Nesses casos, a microencapsulação pode mascarar o sabor dos minerais nos produtos enriquecidos, reduzir a reatividade com outros componentes e controlar sua liberação nas áreas do trato gastrointestinal que permitam melhor absorção (RÉ, 2000).

A microencapsulação de alimentos emprega formulações contendo o ingrediente a ser preservado em mistura com agentes encapsulantes dos mais variados: amido ou seus derivados, proteínas, gomas, lipídios ou combinações entre estes agentes. A tecnologia de secagem é o segundo passo de escolha: secagem atomizada, extrusão, inclusão molecular, cocristalização e muitos outros (SHAHIDI E HAN, 1993).

As microcápsulas são formadas pelo envolvimento do material ativo ou núcleo com o material de parede ou encapsulante. As microcápsulas podem ter diâmetros variando entre unidades de micrometros até milímetros e apresentar diversas formas, dependendo dos materiais e métodos usados para sua obtenção. A microencapsulação de óleo essencial envolve as seguintes etapas: escolha de material de parede adequado ao óleo essencial a encapsular, preparo da emulsão constituída pela solução do material de parede e do óleo e homogeneização da emulsão. Finalmente, a secagem da emulsão por atomização em secador formará glóbulos os quais podem conter bolhas internas e superfícies lisas ou rugosas (ALEXANDER E KING, 1985).

A secagem por atomização (spray drying) é um dos métodos mais utilizados para a microencapsulação, devido à grande disponibilidade de equipamento de baixo custo do processo, a possibilidade de trabalhar com uma série de vários dos agentes de encapsulamento, boa retenção de compostos voláteis e estabilidade do ponto final (REINECCIUS, 1989).

A temperatura do ar, uma das variáveis de processo mais importante, tem o menor erro no modelo previsto. Umidade do ar também está previsto, no entanto, a incerteza experimental é alta, devido ao tempo necessário para se obter resultados confiáveis em linha (BIRCHAL E PASSOS, 2005).

Quanto menos a temperatura para uma mesma umidade relativa do ar ou atividade de água, maior será o teor de água do pó (ANSELMO, 2006).

O processo de secagem de soluções por atomização é, atualmente, empregado por diversos segmentos industriais, dentre os quais se destacam os

das indústrias química, farmacêutica, alimentícia e cerâmica (KEEY, 1980; STRUMILO E KUDRA, 1986; SHAW, 1990 e HOUK, 1985).

Na indústria de revestimento cerâmico, a secagem por atomização atua na remoção da água adicionada no processo de moagem das argilas (FAVALLI et al., 2001), elevando acentuadamente os custos energéticos. O que demonstra o quanto é importante analisar a umidade na entrada do equipamento através do balanço de massa.

A secagem por ar é um processo antigo usado para conservar os alimentos, onde o produto para ser seco é exposto em uma corrente de ar quente contínua, onde a umidade evapora (RATTI, 2001). Seu objetivo é conservar e eliminar por evaporação a maior parte da água presente no produto (OCHOA et al., 2002).

Este processo melhora a estabilidade dos alimentos, uma vez que reduz consideravelmente a atividade de água, minimizando as alterações físicas, químicas e microbiológicas durante o seu armazenamento (OCHOA et al., 2002; HATAMIPOUR et al., 2007).

A estabilidade dos alimentos e a atividade de água estão relacionadas em muitas situações. Em relação às reações químicas (Maillard, oxidação, enzimáticas, entre outras), as maiores velocidades de reação ocorrem em alimentos de umidade alta e intermediária o que é indesejável, e as velocidades de reações menores se encontram na faixa de 0,2 a 0,4 de atividade de água. A atividade de água máxima que pode ser tolerada nos produtos desidratados sem induzir a perda de propriedades desejáveis oscila desde 0,35 até 0,5 dependendo do produto. No entanto, na faixa de atividade de água entre 0,2 e 0,5 não ocorre mais a proliferação microorganismos (FENNEMA, 1993).

### 3.2 Psicrometria

Psicrometria consiste na determinação das propriedades de misturas gás-vapor. O sistema de ar-vapor d'água é de longe o sistema mais comumente encontrado. Os princípios envolvidos na determinação das propriedades de outros sistemas são os mesmos princípios do sistema ar-vapor d'água, com uma grande exceção. Isto tem o efeito de tornar a temperatura de saturação adiabática diferente da temperatura de bulbo úmido. Portanto, para os outros sistemas além de ar-vapor d'água, o cálculo psicrométrico e problemas de secagem é complicado pela necessidade do cálculo ponto-a-ponto da temperatura da superfície de evaporação. Por exemplo, para o sistema de ar-água a temperatura de superfície de evaporação será constante durante o período de secagem a uma taxa constante, embora a temperatura e a umidade do fluxo de gás alterem. Para outros sistemas, a temperatura da superfície de evaporação mudaria (PERRY E GREEN, 1984).

Para melhor compreensão da combinação das variáveis na psicrometria, na Figura 5 tem-se um carta psicrométrica para relações à nível do mar.

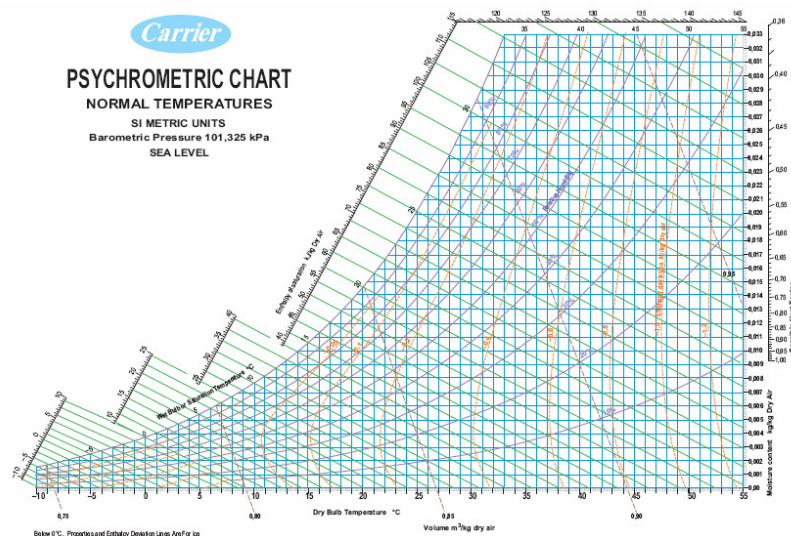


Figura 5 - Carta Psicrométrica.

Psicrometria é a Área da Engenharia que lida com as propriedades de ar úmido.

O meio de remoção e transporte de umidade mais comumente utilizada em operações de secagem é o ar úmido, que consiste de uma mistura de ar e vapor de água.

O ar seco consiste de uma mistura de gases, sendo principais o oxigênio e o nitrogênio, devido os mesmos se encontrarem em maior quantidade. Além dos gases de ar seco, o ar úmido contém uma quantidade variável de vapor de água.

Embora a fração de vapor de água em peso no ar, utilizado normalmente em operações de secagem, seja sempre menor do que um décimo ainda sim a presença das moléculas de água no ar tem um efeito significativo no processo de secagem, uma vez que são estas moléculas as responsáveis pelo estabelecimento dos gradientes de umidade e, até certo ponto, de temperatura.

A quantidade de vapor de água no ar de secagem é expressa pela pressão de vapor, umidade relativa e umidade absoluta.

As temperaturas de ar úmido em geral se referem a: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e temperatura de ponto de orvalho.

Duas propriedades adicionais de ar úmido, freqüentemente utilizadas em cálculos de secagem, são a entalpia e o volume específico.

A pressão de vapor ( $p_v$ ) é a pressão parcial exercida pelo vapor de água no ar úmido, devido ao escape de moléculas de água altamente energéticas de uma superfície líquida para o ar ao qual a superfície está exposta. Quando esta água é vaporizada para um espaço confinado, um equilíbrio dinâmico é alcançado entre as taxas de evaporação e de condensação sobre a fase densa (ar úmido). Nesta condição de equilíbrio, o ar se encontra completamente saturado com vapor de água, e a pressão de vapor é denominada pressão de saturação ( $p_{vs}$ ).

Da Regra das Fases (Termodinâmica), para uma temperatura constante especificada, há uma única pressão na qual um líquido pode estar em equilíbrio com seu vapor. A figura 6 mostra o diagrama de fases (pressão × temperatura) para a água.

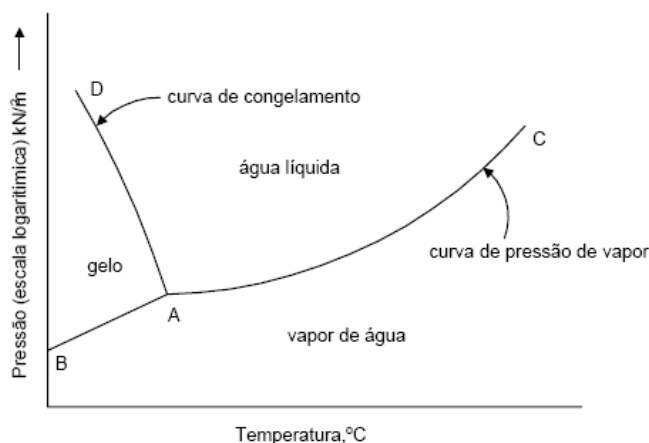


Figura 6 - Diagrama de fases (pressão × temperatura) para a água.

A pressão de vapor no ar utilizado em operações de secagem é, em geral, pequena quando comparada à pressão atmosférica.

A umidade relativa é a razão da fração molar (ou pressão de vapor) do vapor d'água no ar e da fração molar (ou pressão de vapor) do vapor d'água no ar saturado à mesma temperatura e pressão atmosférica. Umidade absoluta é a massa de vapor de água contida em ar úmido por unidade de massa de ar seco. Temperatura de bulbo seco é a temperatura do ar úmido indicada por um termômetro regular, temperatura de bulbo úmido é a temperatura alcançada pelo ar úmido e a água quando o ar é adiabaticamente saturado pela água que evapora e temperatura de ponto de orvalho é a temperatura na qual condensação ocorre quando o ar é resfriado a umidades relativas e pressões atmosféricas constantes. Entalpia é a quantidade de calor do ar úmido por unidade de massa de ar seco acima de certa temperatura de referência. Para água líquida e para o ar seco, a temperatura de referência normalmente utilizada é 0°C. Volume úmido é o volume

(em m<sup>3</sup>) de uma massa unitária de ar seco (em kg) e do vapor associado às condições de temperatura e pressão prevalecentes.

Pressão de vapor são as condições atmosféricas de pressão: mistura de gases e vapor de água em um ar úmido considerado uma mistura ideal de gases. Lei de Pressões Parciais de Gibbs-Dalton: a pressão do ar úmido é dada pela soma das pressões do ar seco e do vapor de água.

A atmosfera possui propriedades e condições físicas, como temperatura, umidade, pressão, direção e velocidade de deslocamento do ar, grau de nebulosidade e quantidade de precipitação (SILVA et al., 2007).

O conceito de ambiente é amplo, uma vez que inclui todas as condições que influenciam no desenvolvimento dos animais (ROLLER E STOMBAUGH, 1976). O ar atmosférico é um importante componente do ambiente, sendo a temperatura e a umidade relativa do ar os principais elementos psicrométricos responsáveis por dois processos importantes no desenvolvimento da produção: o aquecimento e o resfriamento. Em países de regime tropical, como o Brasil, o aquecimento torna-se o principal problema para obter alto rendimento nos processos de secagem, e em países de clima temperado, o resfriamento é um componente indesejável para o processo produtivo, pois, para cada fase da produção, são exigidas diferentes faixas de temperatura e umidade relativa. Essas medidas são de grande importância em áreas como agricultura, zootecnia e engenharia, e os fabricantes de instrumentos têm-se preocupado em oferecer grande variedade de equipamentos com aplicação nesses setores (NOBLE E LE DIVICH, 1982; LE DIVICH E REINALDO, 1989).

Todas essas propriedades mutáveis devem ser medidas com precisão toda vez que se deseje determinar o que ocorre no ar e como ele varia, caracterizando, assim, o tempo em um dado momento e lugar. A exatidão das medidas vai depender, em grande parte, da precisão do instrumental utilizado (SILVA, 2000).

A umidade relativa do ar é medida normalmente por psicrômetros, higrômetros e registrada por higrógrafos, embora, atualmente, existam sensores



eletroeletrônicos que também permitem o monitoramento da umidade instantânea ou contínua, quando operados com sistemas de aquisição de dados (SILVA, 2000).

O ar atmosférico é composto por uma mistura de ar seco e vapor d'água e, em certas condições de temperatura e pressão, essa composição é capaz de conter quantidades variáveis de vapor d'água, pois normalmente o ar encontra-se não-saturado e, portanto, capaz de reter maior quantidade de vapor d'água. Para que ocorra essa retenção, é necessário que a água passe da fase líquida para a fase de vapor, cuja mudança demanda certa quantidade de energia, a qual é retirada do ar, resfriando-o (SILVA, 2002).

Dados meteorológicos do ambiente freqüentemente podem ser apresentados por diferentes maneiras, em termos de variações da quantidade de vapor d'água na atmosfera, na escala vertical e temporal, e normalmente são obtidos por diferentes instrumentos (JUPP, 2003).

O conhecimento de propriedades psicrométricas é fundamental para projetar sistemas de controle ambiental para plantas, animais e seres humanos (SINGH et al., 2002).

Normalmente, as pesquisas sobre psicrometria são feitas utilizando-se de um instrumento denominado psicrômetro, o qual se trata, basicamente, de um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido (coberto por um tecido imerso em água) (DIAS, 2001).

Portanto, por intermédio do psicrômetro, podem ser obtidas as temperaturas de bulbo úmido e da temperatura do ar (bulbo seco), tendo sido o método mais comum para obter informações sobre o vapor d'água em estações meteorológicas tradicionais. Com essas duas propriedades psicrométricas, juntamente com a pressão atmosférica, é possível calcular várias propriedades psicrométricas, tais como: a pressão exercida pelo vapor sobre a massa líquida, chamada de pressão atual de vapor ( $e_a$ ) (COSTA, 2003), e a umidade relativa do ar, que é a razão entre

a pressão atual de vapor e a pressão de saturação de vapor (MONTEITH E UNSWORTH, 1990).

### **3.3 Desumidificadores**

O equipamento destina-se aos mais diversos tipos de processos, tais como: condicionamento de ar para moldes de injeção plástica e sopro; centro de processamento de dados (CPD); bibliotecas e museus; hotéis, restaurantes e adegas; bancos, cofres e arquivos; salas limpas, laboratórios e hospitais; processos de alta precisão; indústria têxtil, alimentícia, química, gráfica, farmacêutica e de componentes eletrônicos.

O fluxo de ar seco insuflado em ambientes que necessitam de baixa umidade proporciona benefícios de maior produtividade, melhor qualidade, e maior vida útil, isentando de riscos de oxidação em materiais de aço carbono.

Os equipamentos são projetados conforme as necessidades do processo, permitindo várias performances com relação à condição final do ar climatizado (DSA, 2009).

Um desumidificador é mais eficiente em uma área fechada (sala) onde há uma boa circulação de ar. Para uma máxima eficiência, a unidade deve ser localizada tão próxima do centro da sala, espaço, ou estrutura quanto possível (BRUMBAUGH, 2004).

Dois métodos largamente aplicados nas indústrias são o adsorativo e a condensação. Ambos possuem nomes mais familiares. Condensação, frequentemente conhecida como desumidificação por refrigeração ou uma frase similar, é realizada pela passagem de ar por uma superfície a qual é suficientemente fria para condensar a umidade absorvida, reduzindo a quantidade de umidade total do ar. Se a temperatura do ar no lado de descarga do processo

estiver abaixo do desejado (setpoint) da câmara, este deve ser reaquecido antes de entrar na zona de trabalho.

Adsorção, a adesão das moléculas de água na superfície de um material (dissecante), é o segundo método de desumidificação empregado. O equipamento ajustado para este processo de desumidificação é frequentemente referido como um secador. Dentro desta unidade, o dissecante é contaminado em uma roda ou leito rotativo lentamente. A Câmara de ar é desenhada pelo leito, de acordo com a atividade de adsorção de água do dessecante. O ar seco é então retirado pelo outro lado em um espaço controlado para misturar com a sala de ar com alta umidade. A rotação do leito move o dessecante saturado para uma zona de reativação onde é exposta a um contínuo fluxo de ar aquecido. Este ar de reativação é aquecido para remover a umidade a qual está presa na superfície do dessecante. O ar carregado de umidade é então descarregado no espaço em volta ou para um duto de exaustão (OELSCHLAEGER, 2006).

Na secagem em desumidificador ocorreu a desidratação do material vegetal (capim limão) apenas pela redução da umidade do ar, sem elevação da temperatura do ambiente, preservando desta forma as características originais da planta. Diante do exposto, pode-se verificar que o desumidificador é um aparelho eficiente, de custo reduzido e econômico no uso da energia elétrica em comparação à estufa, representando desta forma, uma vantagem do ponto de vista prático (COSTA et al., 2005).

### **3.3.1 Sistema por Refrigeração**

Um desumidificador por refrigeração remove a umidade do ar o passado por uma serpentina fria. A superfície fria da serpentina causa a condensação da umidade do ar. Esta umidade é então coletada nas serpentinas e eventualmente corre para um trilho coletor ou um reservatório abaixo da unidade, ou por uma mangueira para um dreno mais próximo. Desumidificadores por refrigeração

eletricamente portátil são os tipos de unidades mais comumente encontradas em residências.

A quantidade de umidade removida do ar pelo desumidificador por refrigeração dependerá do volume de ar e da sua umidade relativa. A quantidade inicial de umidade removida será relativamente grande em comparação com a quantidade removida em estágios seguintes de desumidificação. Esta redução de quantidade de remoção de umidade não é uma indicação que o desumidificador não está operando apropriadamente. Esta é uma característica de operação normal. Quando a umidade relativa atinge níveis desejados, a quantidade de umidade sendo removida do ar será consideravelmente menor (BRUMBAUGH, 2004).

Em um sistema de refrigeração que opera por processo de refrigeração, a umidade é removida pela refrigeração do ar abaixo do ponto de orvalho. Uma parte da umidade do ar é condensada e drenada para fora (ENGINEERING TOOLBOX, 2009).

Um desumidificador utiliza princípios de refrigeração da mesma maneira como um ar condicionado funciona, mas ele não esfria o ar, na verdade, aquece um pouco. Um desumidificador é uma caixa que contém evaporador com serpentinas a frio, condensador com serpentinas a quente, um ventilador, e um reservatório ou dreno para captação de água.

O ventilador sopra a umidade do ar carregada do ambiente sobre as serpentinas a frio, onde a água se condensa e pinga na panela ou dreno. O ar seco, em seguida, sopra as serpentinas de aquecimento e volta para a sala. Embora um desumidificador não resfriar o ar, ele faz isto mais confortável, porque ele diminui a umidade. Mas um desumidificador não funciona bem a 18 graus Celsius.

O ventilador de um desumidificador deve ser a energia elétrica, as serpentinas do evaporador devem conter uma carga adequada de refrigerante e os controles devem funcionar corretamente para o desumidificador operar. Da

mesma forma que um termostato controla um aquecedor ou ar condicionado, um desumidificador é ciclicamente ligado e desligado por um medidor que mede a umidade do ambiente (VANDERVORT, 2009).

### **3.3.2 Sistema por Adsorção**

Adsorção é o termo usado para descrever o fenômeno no qual moléculas de um fluido concentram-se espontaneamente sobre uma superfície sólida. Este fenômeno ocorre como resultado de forças não balanceadas agindo entre a superfície sólida e o fluido, que atraem e retém as moléculas do fluido.

O sólido sobre o qual ocorre a adsorção denomina-se adsorvente, a espécie química retida pelo adsorvente denomina-se adsorvato e o fluido em contato com a superfície denomina-se adsortivo.

Adsorventes são materiais sólidos porosos, com uma grande área de superfície interna por unidade de massa e, estruturalmente, lembram esponjas rígidas. A água adsorvida é contida por condensação dentro dos capilares formados na própria estrutura cristalina do material. A capacidade de um adsorvente para atrair umidade depende do tamanho de seus poros e da relação entre a quantidade de água em sua superfície e o conteúdo de umidade do ar. Essa diferença reflete-se na pressão de vapor na superfície e no ar. Normalmente, um dessecante comercial retém entre 10% e 1100% de sua massa seca em vapor d'água, dependendo do seu tipo e da umidade do ambiente (HARRIMAN, 1990).

Todo dessecante atrai e retém umidade até alcançar um equilíbrio com o ar ambiente. A umidade é usualmente removida aquecendo o dessecante até temperaturas entre 50°C e 320°C, expondo-o a um fluxo de ar de reativação (ou de regeneração). Depois de seco, o dessecante deve ser resfriado para que possa atrair a umidade novamente, ou seja, o processo é regenerativo, pois a substância

adsorvente após estar saturada de umidade, permite a liberação de água quando submetida a um aquecimento regenerativo (desorção). Neste processo as energias liberadas são relativamente baixas. Os processos de atrair e reter umidade podem ser feitos por adsorção ou absorção.

A adsorção é um fenômeno físico reversível onde se observa normalmente a deposição de camadas de adsorvato sobre a superfície adsorvente. É um processo parecido com uma esponja absorvendo água, ou seja, é o processo de depositar moléculas de uma substância (água, por exemplo) na superfície de outra substância.

O sistema de adsorção tem sido utilizado com outros sistemas de ar condicionado. O sistema de resfriamento evaporativo acoplados a um desumidificador adsorativo apresentam perspectivas promissoras, principalmente para aplicação em condicionamento de ar onde existem fontes de calor de baixo custo ou calor residual disponível, como em sistemas de cogeração (CAMARGO, 2003).

Um desumidificador adsorativo tem uma roda dessecante que gira lentamente entre duas correntes de ar primárias, processo e reativação. Na corrente de ar de processo, o vapor d'água é removido quando este passa pela roda dessecante. Este ar desumidificado é então enviado para o processo ou ambiente. A roda então gira para o setor de desativação onde uma corrente de ar aquecida passa pela roda. A roda dessecante libera o vapor d'água para esta corrente de ar. A maioria da energia requerida para este processo dessecante é usada no aquecimento da corrente de ar de reativação (MUNTERS, 2009).

A eficiência da secagem, compactabilidade e simplicidade desta estrutura única fazem dela superior às outras técnicas e construções disponíveis hoje. Não existe líquido, granulados, nem poeiras. Apenas ar seco.

A roda principal é feita de uma estrutura não metálica, não corrosiva, inerte impregnada por um dessecante sólido não granular que transfere água na forma de vapor. O dessecante é disperso por toda estrutura da roda. Não há acomodação, erosão ou atrito do dessecante. Ela gira lentamente a

aproximadamente 6-10 rph. O ar úmido de processo passa pelos canais para ser secado. Simultaneamente um contator de fluxo da corrente de ar quente passa pelos canais no setor de reativação e remove a umidade aprendida pelo dessecante, garantindo a secagem previsível contínua. A Figura 7 mostra um desumidificador adsorativo. A roda por ser impregnada com um sólido dessecante como Cloreto de lítio e Silica Gel Titânio (MUNTERS, 2006).



Figura 7 - Foto de um desumidificador (MUNTERS, 2006).

### **3.4 Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)**

O GLP consumido no país provém em sua maior parte do refino do petróleo. Dele são extraídos gases combustíveis, gasolina, nafta, solventes querosene, óleo diesel e um óleo pesado, denominado resíduo atmosférico, quando aquecido, resulta em um produto genericamente definido como gasóleo. Ao ser submetido a uma temperatura alta e à presença de catalisadores químicos, esse composto é transformado em GLP.

Outro processo da extração do gás liquefeito de petróleo acontece nas Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN), nas quais as frações mais pesadas do gás são separadas dos demais componentes. Os rendimentos do refino dependem do tipo de petróleo e da complexidade da refinaria. Por exemplo, petróleos mais leves geram maior quantidade de derivados leves, como gases combustíveis, GLP e gasolina. Dos mais pesados, nascem o óleo combustível ou o asfalto. Cerca de 8,75% de um barril de petróleo com capacidade de 159 litros são transformados em GLP. Trata-se de um produto inflamável, incolor, inodoro e asfixiante. O GLP é envasado na fase líquida e é utilizado como combustível na fase gasosa. Para que os vazamentos sejam facilmente identificados, são adicionados compostos à base de enxofre, proporcionando-lhe um odor característico.

As propriedades e características do GLP à temperatura ambiente e submetido a pressões próximas de 4 kgf/cm<sup>2</sup> a 15 kgf/cm<sup>2</sup>, o GLP se apresenta na forma líquida e é relativamente estável, o que facilita seu transporte e armazenamento em recipientes apropriados e a utilização, domiciliar ou a granel. Apresenta-se na fase gasosa quando mantido na temperatura ambiente e na pressão atmosférica. É um produto naturalmente inodoro. Entretanto, em sua composição estão presentes compostos a base de enxofre para que se possa identificar, com facilidade, qualquer vazamento. Na fase líquida, ele é menos denso do que a água. Portanto, quando em contato com qualquer corpo d'água, o GLP vai permanecer na superfície. Na fase gasosa o GLP é mais denso do que o ar. Portanto, em caso de vazamento, vai ocupar sempre os locais mais baixos (ralos, pisos, canaletas etc.)

Propano Especial é Hidrocarboneto saturado com 3 átomos de carbono e 8 de hidrogênio com até 99% de pureza em volume utilizado como combustível em aplicações específicas, como corte e tratamento térmico de metais. Seu estado natural é gasoso, incolor e inodoro, e também é adicionado etil-mercaptana.

Butano - Hidrocarboneto saturado com 4 átomos de carbono e 10 de hidrogênio é utilizado sem a adição de etil-mercaptana portanto é comercializado na forma gasosa, incolor e inodoro. Usado principalmente como propelente em



aerosóis em substituição ao CFC (Cloro Fluor Carbono) que ataca a atmosfera terrestre. Utilizado também em isqueiros a gás (LIQUIGAS, 2008).

O GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), ou gás de cozinha, consiste em uma mistura gasosa de hidrocarboneto obtido do gás natural das reservas do subsolo, ou do processo de refino do petróleo cru nas refinarias.

O GLP é acondicionado dentro de cilindros em estado líquido. O cilindro quando cheio, contém em seu interior 85% de GLP em estado líquido e 15% em estado de vapor. O GLP em estado líquido começa a se transformar em vapor a medida que os aparelhos a gás são utilizados. Uma característica marcante do GLP é não possuir cor nem cheiro próprio. No entanto, por motivo de segurança, uma substância do grupo Mercaptan é adicionada ao GLP ainda nas refinarias. Ela produz o cheiro característico quando há um vazamento de gás. O GLP não é uma substância tóxica, porém se inalado em grande quantidade, produz efeito anestésico. GLP é uma mistura de hidrocarbonetos em um ou outro estado líquido ou gasoso, onde os principais componentes são compostos de propano ( $C_3H_8$ ), propileno ( $C_3H_8$ ), o isobutano ( $C_4H_{10}$ ), N-butano ( $C_4H_{10}$ ) e Butylene ( $C_4H_8$ ). Assim, o GPL é gasoso nas condições atmosféricas normais, mas liquefeito por refrigeração e / ou compressão. O GLP é comumente utilizado como combustível industrial para fins domésticos e comerciais, como o gás de cidade e gás auto. GPL também é utilizado como matéria-prima em processos químicos de plantas (COPAGAZ, 2009).

Neste trabalho, o poder calorífico do GLP é utilizado 11.500,00 kcal / kg. O consumo de GLP gera emissões de  $CO_2$  na atmosfera. Assim, este trabalho usa para calcular as emissões de  $CO_2$  as equações apresentadas por Ioshimoto e Prado (2008).

#### 4. METODOLOGIA

Neste trabalho, determina-se o consumo de GLP e comparando-o entre o processo atual e os processos de desumidificação (refrigeração e adsorção). Utilizam-se as seguintes equações para determinar os resultados.

Massa de GLP consumida é encontrada pela equação (1):

$$M_{GLP} = PCI_{GLP} / Q \quad (1)$$

A Energia transferida é encontrado pela equação (2):

$$Q = M_{ar} \times (h_{final} - h_{inicial}) \quad (2)$$

Massa de água total é encontrada pela equação (3): será calculado apenas para o processo atual, a fim de determinar a capacidade de evaporação de água do spray drying. Para os cálculos seguintes, este valor encontrado será utilizado para simular e projetar os equipamentos de pre-desumidificação (refrigeração e adsorção)

$$M_{H_2O} = M_{ar} \times (W_{final} - W_{inicial}) \quad (3)$$

O fluxo de ar em um spray dryer, com e sem desumidificação é mostrada na Figura 8 e 9, respectivamente.

O termo  $M_{ar}$ , que refere-se a massa de ar expressam em kg, é determinada através da vazão volumétrica do compressor ( $27000\text{m}^3/\text{h}$ ) dividido pelo volume específico do ar ( $v$ ) na entrada do processo, que neste caso é  $v = 0,91\text{kg}/\text{m}^3$ . Este fluxo está ilustrado nas figuras 8 e 9.

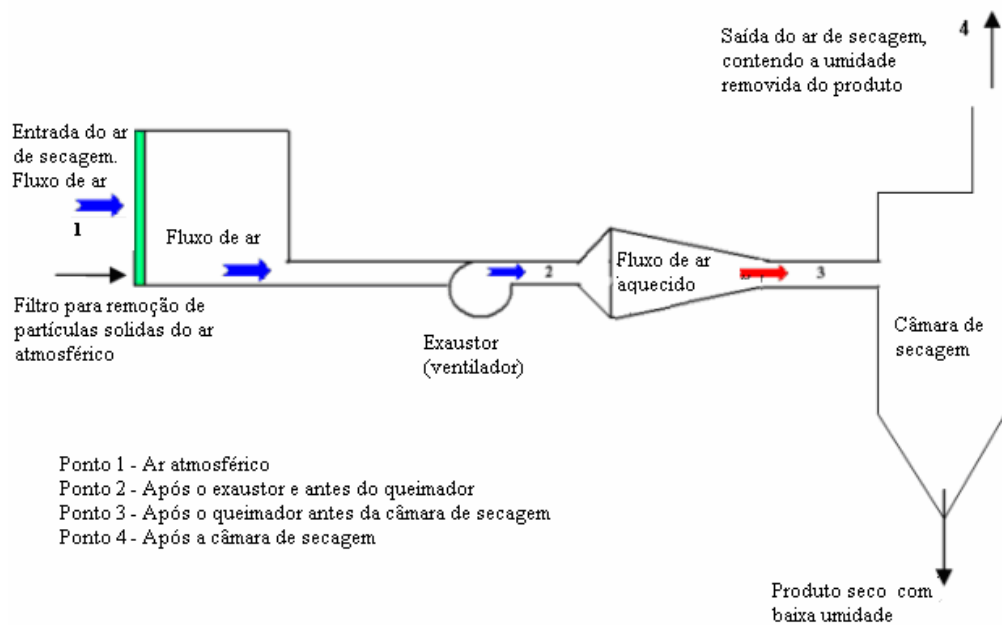


Figura 8 - O processo atual possui os seguintes pontos no fluxo de ar: Ponto 1 – Condição do ar atmosférico, Ponto 2 - Após o ventilador e antes de aquecer o ar (queimador), Ponto 3 - Após o queimador de ar e antes da entrada da câmara e Ponto 4 - saída de ar com a umidade removida do produto.

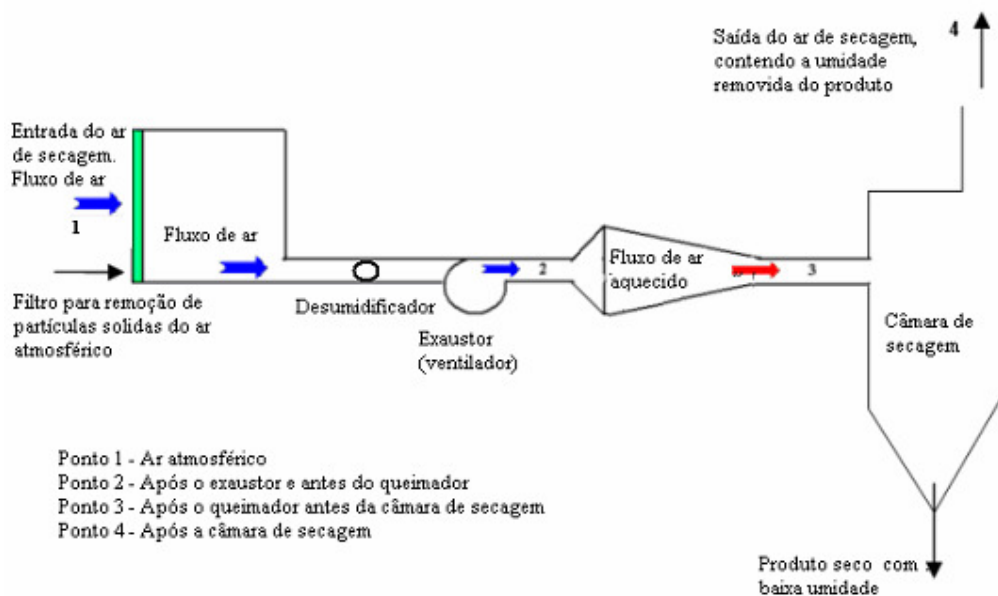


Figura 9 - O fluxo proposto com os desumidificadores possui os seguintes pontos no fluxo de ar: Ponto 1 - Condição do ar atmosférico, Ponto 2 - Após o ventilador e antes de aquecer o ar (queimador), Ponto 3 - Após o queimador de ar e antes da entrada da câmara e Ponto 4 - Saída de ar com a umidade removida do produto.

No processo atual as características psicrométricas são as mesmas para os pontos 1 e 2. No entanto, no fluxo proposto, o ponto 2 tem características psicrométricas com menor umidade absoluta devido à ação dos desumidificadores.

O ponto de orvalho (Dew Point) do ar na saída do desumidificador será determinado como 3°C no processo por refrigeração (FARGON, 2009b) e -40°C no processo por adsorção (FARGON, 2009a), sendo que elas estão baseadas na norma ISO 7183.

Equações (1), (2) e (3) requerem a umidade absoluta e entalpia em alguns pontos da análise. Estas foram determinadas pelo software de Computer-Aided Thermodynamic Tables - CATT2. Este programa faz todas as análises psicrométricas para o presente trabalho. Todos os parâmetros estão na figura 10.

O início do estudo foi uma análise sobre as características psicrométricas do ar durante um ano. De acordo com os valores encontrados, calcula-se uma média, e baseado nestes valores realiza-se todos os cálculos que serão apresentados. Utiliza-se a média, pois as pesquisas relacionadas ao clima são geralmente feitas baseadas na média dos valores obtidos por um determinado período.

Os parâmetros do ar atmosférico foram obtidos pela estação meteorológica Davis Vantage Pro 2.

A secagem foi realizada em um equipamento Spray Dryer com disco atomizador fabricado pela Niro Inc.

As temperaturas de entrada e saída foram medidas pelo PT100 da Contec. A temperatura de bulbo seco no ponto 3 é a temperatura de entrada do spray dryer ou temperatura de secagem do processo. Esta temperatura no modelo atual será usada para calcular a umidade relativa neste ponto. Esta umidade relativa será fixada nos modelos propostos com desumidificadores a fim de auxiliar nos cálculos e manter a mesma concepção de entrada de ar com os modelos propostos.

No ponto 4, foram utilizadas a temperatura do ar de saída e quantidade de água evaporada do produto, que é apresentado no balanço de massa na figura 10. Portanto, estes parâmetros foram utilizados para determinar a umidade absoluta (w).

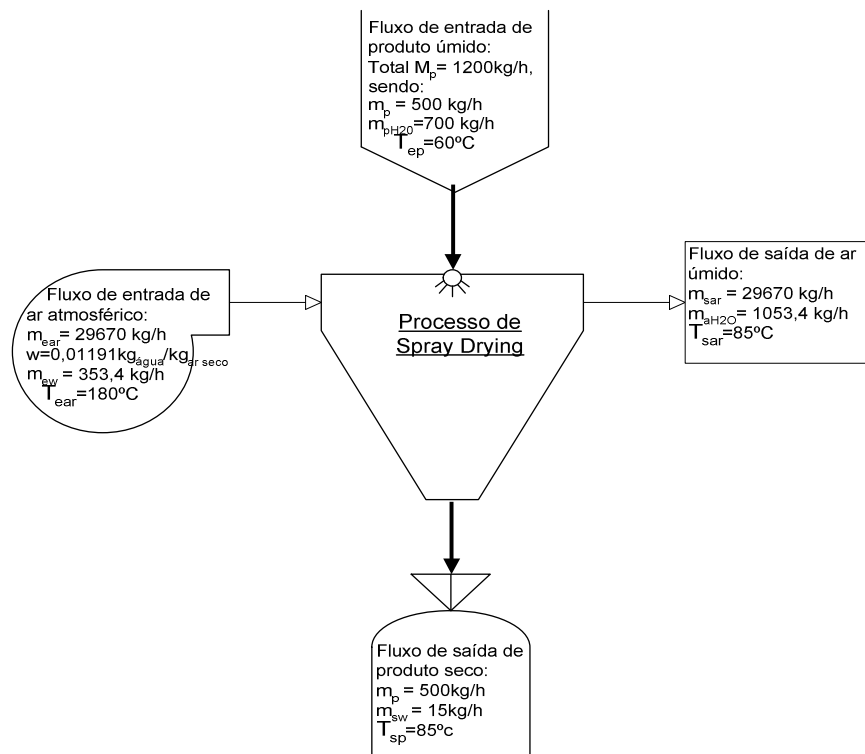


Figura 10 - Balanço de massa do processo de secagem

A umidade relativa foi encontrada no processo atual sobre o ponto 3, e foi mantido o mesmo nas análises com os desumidificadores, pois será um padrão para a concepção do desumidificadores de acordo com o processo atual. Além disto, foi feito um balanço de massa e energia a fim de validar todos os cálculos apresentados conforme equações abaixo.

$$\sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (4)$$

Separaram-se as parcelas do ar, água e produto por entrada e saída:

$$\dot{m}_{\text{ear}} h_{\text{ear}} + (\dot{m}_{\text{p}} h_{\text{ep}} + \dot{m}_{\text{ew}} h_{\text{ew}}) = \dot{m}_{\text{sar}} h_{\text{sar}} + (\dot{m}_{\text{p}} h_{\text{sp}} + \dot{m}_{\text{sw}} h_{\text{sw}}) \quad (5)$$

Eliminam-se os termos equivalentes:

$$\dot{m}_{\text{ear}} h_{\text{ear}} + \dot{m}_{\text{p}} (h_{\text{ep}} - h_{\text{sp}}) = \dot{m}_{\text{sar}} h_{\text{sar}} + \dot{m}_{\text{sw}} h_{\text{sw}} - \dot{m}_{\text{ew}} h_{\text{ew}} \quad (6)$$

A diferença de entalpia pode ser representada pela Eq. (7):

$$(h_{\text{ep}} - h_{\text{sp}}) = C_p (T_{\text{ep}} - T_{\text{sp}}) \quad (7)$$

Usando a Eq. (7) na Eq. (6), tem-se a Eq. (8):

$$\dot{m}_{\text{ear}} h_{\text{ear}} + \dot{m}_{\text{p}} C_p (T_{\text{ep}} - T_{\text{sp}}) = \dot{m}_{\text{sar}} h_{\text{sar}} + \dot{m}_{\text{sw}} h_{\text{sw}} - \dot{m}_{\text{ew}} h_{\text{ew}} \quad (8)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 segue os parâmetros TBS e UR do ar atmosférico, que foram encontrados em medições mensais realizadas entre dezembro de 2007 e outubro de 2008.

Tabela 1 - Parâmetros do ar atmosférico

<b>Dia</b>	<b>TBS (°C)</b>	<b>UR (%)</b>
01/12/07	21,6	83
01/01/08	27,9	66
01/02/08	23,5	79
01/03/08	22,3	88
01/04/08	23,8	60
01/05/08	18,9	80
01/06/08	13,7	94
01/07/08	15,7	97
01/08/08	22,2	56
01/09/08	19,6	61
01/10/08	25,2	62
<b>MÉDIA</b>	<b>21,31</b>	<b>75,09</b>

Utilizando os valores médios da Tabela 1, obteve-se a análise psicrométrica no ponto 1:

TBS = 21,31°C e UR = 75,09%, em CATT2 isso significa que:

$$W_1 = 0,01189 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$$

A corrente de ar do exaustor é 27000m<sup>3</sup>/h, o volume específico do ar é v=0,91kg/m<sup>3</sup>, então: Massa de ar = 29670 kg/h

## 5.1 Processo atual

A Tabela 2 mostra os resultados do processo atual, sem o uso de desumidificador de ar. Os parâmetros avaliados foram a temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa do ar (UR), ponto de orvalho (DP), umidade absoluta (w) e entalpia (H).

Tabela 2 - Resultados do processo atual

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4
<b>TBS (°C)</b>	21,31	21,31	180	85
<b>UR (%)</b>	75,09	75,09	0,19	9,46
<b>DP (°C)</b>	16,72	16,72	16,72	34,5
<b>w (kg/kg)</b>	0,01191	0,01191	0,01191	0,0355
<b>H (kJ/kg)</b>	71,71	71,71	235	199,7

Usando a Eq. (3) tem-se  $M_{H_2O} = 700$  kg/h, ou seja, a capacidade de evaporação real para este spray drying. Este fluxo de massa será utilizado nos modelos com desumidificadores para fixar a capacidade de evaporação do spray drying e variar apenas a eficiência dos desumidificadores na remoção de água.

Usando a Eq. (2) tem-se:  $Q = 1345,8$  kW.

Usando a Eq. (1) tem-se:  $M_{GLP} = 100,62$  kg/h.

Esta é a massa de GLP necessária para aquecer o ar até chegar à máxima eficácia de secagem, utilizando o ar atmosférico sem desumidificadores.



## 5.2 Desumidificação por Refrigeração

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos com desumidificadores por sistema de refrigeração. O equipamento tem a capacidade de remover a umidade do ar baixando o ponto de orvalho ou Dew Point (DP) para 3°C. Os parâmetros avaliados foram a temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa do ar (UR), ponto de orvalho (DP), umidade absoluta (w) e entalpia (H).

Tabela 3 - Resultados do sistema por refrigeração

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4
<b>TBS (°C)</b>	21,31	3	143,5	85
<b>UR (%)</b>	75,09	100	0,19	9,46
<b>DP (°C)</b>	16,72	3	3	34,5
<b>w (kg/kg)</b>	0,01191	0.004685	0.004685	0,0355
<b>H (kJ/kg)</b>	71,71	34,82	177,6	199,7

$M_{H_2O} = 700 \text{ kg/h}$ . É a eficiência máxima do secador.

Usando a Eq. (3) tem-se:  $M_{ar} = 22.713,71 \text{ kg/h}$

Usando a Eq. (2) tem-se:  $Q = 900,85 \text{ kW}$

Usando a Eq. (1) tem-se:  $M_{GLP} = 67,36 \text{ kg/h}$

Esta é a massa de GLP necessária para aquecer o ar até a máxima eficácia de secagem, utilizando o ar atmosférico com desumidificadores por refrigeração.

### 5.3 Desumidificação por Adsorção

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos com desumidificadores por sistema de adsorção. O equipamento tem a capacidade de remover a umidade do ar baixando o ponto de orvalho ou dew point (DP) para  $-40^{\circ}\text{C}$ . Os parâmetros avaliados foram a temperatura de bulbo seco (TBS), umidade relativa do ar (UR), ponto de orvalho (DP), umidade absoluta (w) e entalpia (H).

Tabela 4 - Resultados do sistema de adsorção

	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4
<b>TBS (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	21,31	-40	38,38	85
<b>UR (%)</b>	75,09	100	0,19	9,46
<b>DP (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	16,72	-40	-40	34,5
<b>w (kg/kg)</b>	0,01191	0,00007894	0,00007894	0,0355
<b>H (kJ/kg)</b>	71,71	-19,86	58,81	199,7

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 700 \text{ kg/h}$ . É a eficiência máxima do secador.

Usando a Eq. (3) tem-se:  $M_{\text{ar}} = 19,760 \text{ kg/h}$

Usando a Eq. (2) tem-se:  $Q = 431,8 \text{ kW}$

Usando a Eq. (1) tem-se:  $M_{\text{GLP}} = 32,29 \text{ kg/h}$

Esta é a massa de GLP necessária para aquecer o ar até a máxima eficácia de secagem, utilizando o ar atmosférico com desumidificadores pelo sistema de adsorção.

## 5.4 Balanço Energético

Na Eq. (8) utilizando os valores do balanço de massa (Fig. 4), a fim de calcular a entalpia de saída de ar,  $h_{sar}$ . Considerando  $C_p=1,6\text{kJ/kg.}^\circ\text{C}$ ,  $h_{sw}=2652\text{kJ/kg}$  (vapor saturado a  $85^\circ\text{C}$ ) e  $h_{ew}=251,2\text{kJ/kg}$  (líquido saturado a  $60^\circ\text{C}$ ), assim tem-se:

$$h_{sar} = 200,78\text{kJ/kg.}$$

Esse valor é aproximado do valor que foi encontrado pelo CATT2:

$$h_{sar} = 199,7\text{kJ/kg.}$$

## 5.5 Análise Econômica

### 5.5.1 Análise Econômica sobre o consumo de GLP

Segundo a ANP (2009), (Agência Nacional de Petróleo), o preço médio do GLP é de R\$ 34,75 por 13kg, ou seja, R\$ 2,67/kg. Com base neste valor pode-se calcular quanto custa cada processo pelo consumo de GLP.

No processo atual tem-se:

$M_{GLP} = 100,62 \text{ kg/h}$ , assim consome:

R\$ 268,67/h,

No sistema de desumidificadores por refrigeração tem-se:

$M_{GLP} = 67,36 \text{ kg/h}$ , assim consome:

R\$ 179,84/h.

No sistema de desumidificadores por adsorção tem-se:

$M_{GLP} = 32,29 \text{ kg/h}$ , assim consome:

R\$ 86,20/h

### **5.5.2 Análise Econômica sobre o consumo de energia elétrica**

Baseado nas análises de consumo de cada tipo de desumidificador pela vazão de ar (FARGON, 2009a e FARGON 2009b), considera-se que para uma vazão de ar de  $27000 \text{ m}^3/\text{h}$ , têm-se os seguintes consumos de energia:

- Desumidificador por refrigeração – 80 kWh
- Desumidificador por adsorção – 350 kWh

De acordo com a ANEEL (2009), (Agência Nacional de Energia Elétrica) a tarifa cobrada na região Sudeste é de R\$ 249,83/MWh. Então para esta análise considera-se a tarifa de R\$0,25/kWh. Por isso a despesa em energia elétrica para cada sistema será:

- Desumidificador por refrigeração – R\$ 20/h
- Desumidificador por adsorção – R\$ 87,5/h

### 5.5.3 Balanço final da análise econômica:

Abaixo na tabela 5 pode-se analisar a despesa com GLP e energia elétrica de cada sistema com desumidificador (refrigeração e adsorativo) em comparação ao sistema atual.

Tabela 5 - Comparação do consumo energético.

Processo	GLP (R\$/h)	Energia elétrica do desumidificador (R\$/h)	Total (R\$/h)
<b>Atual</b>	268,67	0,00	268,67
<b>Refrigeração</b>	179,84	20,00	199,84
<b>Adsorativo</b>	86,20	87,50	173,70

Portanto, conforme a tabela 5 o sistema adsorativo apresenta-se com o menor consumo total em R\$/h.

### 5.6 Análise de emissão de CO<sub>2</sub>

Este trabalho irá considerar o GLP como uma mistura de butano e propano 1:1, ou seja, a mistura em massa será calculada como mistura equilibrada de 50% propano e 50% butano. A equação química de cada componente pode ser encontrada na Tabela 6 (IOSHIMOTO E PRADO, 2008):

Tabela 6 - Reação química da queima dos componentes do GLP

Componentes	Reação de Combustão	Oxigênio gerado	CO <sub>2</sub> gerado	H <sub>2</sub> O gerada
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	$C_3H_6 + 9/2O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$	4,5	3	3
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$C_4H_{10} + 13/2O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	6,5	4	5

Nesta análise, da tabela 6, conclui-se que 50% de propano vai gerar 1,5 partes de CO<sub>2</sub> e 50% de butano vai gerar 2 partes de CO<sub>2</sub>. Então, 1 parte do GLP vai gerar 3,5 partes de CO<sub>2</sub>.

Baseado nestes cálculos pode-se calcular por equivalência das massas, as emissões de CO<sub>2</sub> para cada sistema pela queima de CO<sub>2</sub> a partir de cada sistema em estudo, conforme se mostra na Tabela 7.

Tabela 7 - Emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de GLP

<b>Sistema</b>	<b>M<sub>GLP</sub> (kg/h)</b>	<b>M<sub>CO2</sub> (kg/h)</b>
Geral	1	3,5
Atual	100,62	352,17
Refrigeração	67,36	235,76
Adsorção	32,29	113,015

### 5.7 Análise de Pay-Back

Por fim, analisa-se o tempo de recuperação do dinheiro investido com cada tipo de desumidificador. Os investimentos para aquisição dos desumidificadores são da ordem de:

- Desumidificador por refrigeração – R\$ 450.000,00
- Desumidificador por adsorção – R\$ 750.000,00

Baseado nos valores de consumo em reais obtidos na tabela 5, o processo por refrigeração tem uma economia de R\$ 68,83/h e o processo por adsorção tem uma economia de R\$ 94,97/h.

Considerando que o equipamento opera por 440 horas por mês, a economia mensal para cada desumidificador será:

- Desumidificador por refrigeração – R\$ 30.285,2/mês
- Desumidificador por adsorção – R\$ 41.786,8/mês

Portanto com estes números conclui-se que o tempo de recuperação do investimento será:

- Desumidificador por refrigeração – 15 meses
- Desumidificador por adsorção – 18 meses

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre a aplicação dos desumidificadores no ar de entrada na secagem por atomização ou spray drying. Com base nos resultados calculados para o processo atual, os desumidificadores podem reduzir o consumo de GLP, reduzir a temperatura de secagem (temperatura de bulbo seco na entrada da câmara de secagem, ponto 3, das figuras 8 e 9) e a eficiência de energia global pode ser otimizado utilizando desumidificadores, principalmente se engenheiros e gerentes de projeto usarem esses conceitos no início da instalação.

Portanto, pode-se concluir sobre cada sistema de desumidificação que:

O sistema por refrigeração tem uma economia no consumo de GLP em massa de 33,06%, bem como a temperatura de secagem foi reduzida para 143,5°C.

O sistema por adsorção tem uma economia no consumo de GLP em massa 67,91%, bem como a temperatura de secagem foi reduzida para 38,38°C.

As emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela queima de GLP no aquecimento do ar, foram calculadas para cada sistema e mostram que os desumidificadores reduzem de 352,17kg/h no processo atual para 235,76kg/h pelo sistema por refrigeração e 113kg/h pelo sistema por adsorção.

A avaliação econômica analisou o consumo em reais por hora com a queima do GLP e do consumo com a energia elétrica. O Consumo energético total com a instalação dos desumidificadores mostrou-se mais viável considerando o desumidificador por adsorção, pois este apresentou um consumo total de R\$173,7/h, sendo inferior ao consumo do processo atual e do processo por refrigeração.



O tempo de recuperação do investimento na compra dos desumidificadores é relativamente baixo, sendo 15 meses para o desumidificador por refrigeração e 18 meses para o desumidificador por adsorção.

O balanço de energia mostrou que o cálculo usado neste trabalho tem consistência e encontrou um valor de entalpia do ar na saída de 200,78kJ/kg, bastante próximo ao que foi encontrado pelo CATT2 de 199,7kJ/kg.

Pode-se observar que a aplicação de desumidificadores no ar de entrada do spray dryer aumenta a eficiência de secagem, além de demonstrar que o sistema por adsorção é o tipo mais adequado de desumidificador, pois é o mais eficiente na remoção de água do ar, possui o menor consumo de energia total, tem menor impacto no sistema global e reduz o impacto ambiental.

A instalação do desumidificador de ar soluciona o problema de variação de produtividade pelo uso de ar atmosférico como veículo em um processo de secagem. Toda a energia transferida no processo estará destinada para remover a água do produto, já que o ar entrará no processo previamente desumidificado. Isto aumenta a eficiência energética da indústria otimizando o processo.

Este trabalho comprova a necessidade da utilização de desumidificadores em processos de secagem tipo Spray drying e abre espaço para futuras pesquisas, onde as empresas que fabricam spray dryer juntamente com fabricantes de desumidificadores podem buscar um sistema eficiente, compacto e personalizado. Ou seja, desenvolver um desumidificador específico para ser utilizado no spray dryer. Desta forma focando para cada tipo de segmento da indústria (alimentícia, farmacêutica, cerâmica e química) e analisando a melhor conformação do desumidificador a fim de atender todos os requisitos legais e de qualidade destas indústrias. Portanto o trabalho apresenta um grande desafio para as indústrias que desejam fabricar equipamentos de spray drying de forma eficiente e otimizada, minimizando os impactos ambientais e reduzindo o consumo de recursos energéticos.

## 7. REFERÊNCIAS

ALEXANDER, K.; KING C.J. Factor governing surface morphology of spray-dried amorphous substances. *Drying Technology*, 3(3), 1985, p.321-348.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Tarifas médias por classe de consumo por região (Industrial - Sudeste), período agosto, 2009.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Síntese dos Preços Praticados - Brasil, Ministério de Minas e Energia, Abril, 2009.

ANSELMO, G. C. S. Determinação da Higroscopicidade do cajá em pó por meio da secagem por atomização. *Revista de Biologia de Ciências da Terra*, 6(2), 2006, p. 58-65.

BIRCHAL, V. S.; PASSOS M. L. Modeling and simulation of milk emulsion drying in spray dryers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22 (02), 2005, p. 293-302.

BRUMBAUGH, J.E., *Audel HVAC Fundamentals, V.3 Air Conditioning, Heat Pumps and Distribution*, Ed 4, 541, 2004.

CAMARGO, J. R. Sistema de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar. Tese de Doutorado para Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Unesp, 2003, p. 122-123.

CEREDA, M.P.; VILPOUX, O. *Processamento de Amiláceas Latino Americanas*; Fundação Cargill, SP Brazil, 2003.

COPAGAZ, O que é GLP?, disponível em [http://www.copagaz.com.br/representantes/o\\_que\\_e\\_glp.asp](http://www.copagaz.com.br/representantes/o_que_e_glp.asp), acessado em 15 Fevereiro, 2009.

COSTA, E. Medidas da umidade relativa do ar em um ambiente fechado. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v.25, n.3, 2003, p.346.

COSTA, L.C.B.; CORRÊA, R. M.; CARDOSO, J.C. W.; PINTO, J.E.B.P.; BERTOLUCCI, S.K.V.; FERRI P.H. Secagem e fragmentação da matéria seca no rendimento e composição do óleo essencial de capim-limão, Revista Hortic. Bras. Volume 23 (4) Brasília, 2005.

DIAS, J.B. Construção e validação de uma bancada para calibração de sensores para determinação da umidade relativa do ar. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DSA, Desumidificador de Ar, Refrisat technology, 2009.

ENGINEERING TOOLBOX, Dehumidification, disponível em [http://www.engineeringtoolbox.com/dehumidification-d\\_141.html](http://www.engineeringtoolbox.com/dehumidification-d_141.html) acessado em 20 de Março 2009.

FARGON ENGENHARIA E INDÚSTRIA, Secadores de ar comprimido por Adsorção, 2009a.

FARGON ENGENHARIA E INDÚSTRIA, Secadores de ar comprimido por Refrigeração, 2009b.

FAVALLI, R.C.; PIMENTA, M.M.; PASCHOAL, J.O.A. Modelagem Matemática da Secagem por Atomização: Trajetória das Gotículas dentro do Secador, Revista Ceramica Industrial 6 (5), 2001, p. 41-46.

FENNEMA, O. R. Química de los Alimentos. Editorial Acribia S.A. Zaragoza (Espanha), 1993.

GAVA, A. J. Princípio da Tecnologia dos Alimentos; Ed Nobel, SP, Brazil, 1984.

HARRIMAN, L.G. The dehumidification Handbook, Munters Cargocaire, Amesbury MA, 1990.

HATAMIPOUR, M.S.; KAZEMI, H.H.; NOORALIVAND, A.; NOZARPOOR A. Drying Characteristics of Six Varieties of Sweet Potatoes in Different Dryers. Food and Bioproducts Processing, 85(C3), 2007, p. 171–177.

HOUK, D.L. Spray drying in metal industries, Journal of Metals, 37, 1985.

ISO 7183, Secadores de ar comprimido – especificações e testes, GT Secadores, CE 04:007:12, 2007.

IOSHIMOTO, E.; PRADO, R.T.A. Física das construções - Combustão de gases, USP, 2008.

JUPP, D.L.B. Calculating and converting between common water vapour measures in meteorological data and their use in support of earth observation. Camberra: CSIRO Earth Observation Centre Technical Report, 2003, p. 49.

KEEY, R.B. Theoretical foundations of drying technology, volume 1 of advantages in drying, Capítulo 1, Hemisphere publishing corporation, 1980.

LE DIVICH, J.; REINALDO, D. Effes de l'environnement thermique sur les performance du porc en croissance. Journées Rech. Porcine en France, Paris, v.21, 1989, p.221-9.

LIQUIGAS, O GLP, Liquigás Distribuidora S.A. 2008.

MASTERS, K. Spray Drying in Practice; Spray Dry Consult Inc, Denmark, 2002.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. Principles of environmental physics. 2<sup>nd</sup> ed. London: Edward Arnold, 1990.

MUNTERS, Products guide PowerPurge, PG0050-00, 2009.

MUNTERS, Product Information HCE, HCE Series, M162014, 06, 2006.

NOBLE J., LE DIVICH Effect of environmental temperature and feeding level on energy balance traits of early-weaned piglets. Livest Production Sciences, Amsterdam, v.9, 619-32, 1982.

OCHOA, M.R.; KESSELER, A.G.; PIRONE, B.N.; MARQUEZ, C.A.; MICHELIS, A. Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa Rubiginosa* L.) fruits. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, v. 35, 2002, p. 400–406.

OELSCHLAEGGER, T. Selecting a Dehumidification Method, CERTS, Technical Papers, 2006.

PERRY, R.H.; GREEN, D.W. Perry's chemical engineers' handbook; McGraw-Hill, New York, 1984.

RÉ, M. I. Microencapsulação em busca de produtos inteligentes. Revista Ciência Hoje, 27 (162), 2000, p. 25-29.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, v. 49, 2001, p. 311-319.

REINECCIUS, G.A. Flavor encapsulation, *Food Review International*, 5(2), 1989, p 146-176.

ROLLER W.L.; STOMBAUGH D.P. The influence of environmental factors on the reproduction of livestock. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM LIVESTOCK ENVIRONMENT*, 1976, Atlanta. Proceedings... Atlanta: ASAE, v.1, 1976, p. 31-50.

SHAHIDI, F.; HAN, X.Q. Encapsulation of Food Ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(6), p.501-547, 1993.

SHAW, F.D. Spray Drying: A traditional process for advanced applications. *Journal of the American Ceramic society bulletin*, 69(9), 1990, p. 1484-1489.

SILVA, C.E. Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistema de resfriamento adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel. 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2002.

SILVA, K.O. Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade e temperatura do ar. 2000. 70 f. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SILVA, K.O.; MORAES, S. O.; MIRANDA, J.H.; PALMIERI, A.M. Sistema automatizado para aquisição de dados de umidade relativa do ar, *Revista Engaharia Agrícola*. Volume 27 (3), Jaboticabal, 2007.

SINGH, A.K.; SINGH, H.; SINGH, S.P.; SAWHNEY, R.L. Numerical calculation of psychrometric properties on a calculator. *Building and Environment*, Oxford, v.37, n.4, 2002, p.415-19.

SOUZA, M.S.M. Microencapsulados. *Revista Química & Derivados*, 388, 2000, p34-43.

STRUMILO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*, Volume 3, Gordon and Breach Science Publishers, 1986

VANDERVORT, D. How a dehumidifier works, Disponível em [http://www.hometips.com/how\\_dehumidifier\\_works.html](http://www.hometips.com/how_dehumidifier_works.html) acessado em 12 Janeiro 2009.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)