

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

CARLOS DANIEL MANDOLESI DE ARAÚJO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO: Produção de farinha de cascas de banana

Itajubá/MG

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

CARLOS DANIEL MANDOLESI DE ARAÚJO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO: Produção de farinha de cascas de banana

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha

Itajubá/MG

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

CARLOS DANIEL MANDOLESI DE ARAÚJO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO: Produção de farinha de cascas de banana

Dissertação apresentada para aprovação por banca examinadora em 19 de dezembro de 2013, para conferir ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Energia*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha (Orientador)

Prof. Dr. Vivaldo da Silveira Junior

Prof. Dr. Álvaro Antonio Alencar de Queiroz

Itajubá/MG

2013

AGRADECIMENTOS

A Deus antes de tudo por me dar saúde e força para batalhar e enfrentar com fé meus desafios.

Aos meus pais Carlos Raimundo de Araújo e Lídia Maria Lopes Mandolesi de Araújo pelo apoio, atenção, carinho e exemplo de conduta.

A minha companheira Erika de Souza e Silva por estar sempre ao meu lado, compartilhando minhas vitórias e momentos de alegria e me dando força nas horas difíceis.

A CAPES pelo auxílio financeiro durante esta importante etapa em minha vida profissional.

Aos meus avós Uldélio Carneiro Mandolesi e Gláucia Lopes Mandolesi, in memoriam, que sempre apoiaram e incentivaram meus estudos.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia visando o aumento da eficiência energética em processos de secagem para a viabilização do uso de resíduos agroindustriais. Inicialmente, foram analisados os aspectos mais relevantes para a escolha e projeto de sistemas de secagem junto à literatura científica. Posteriormente, a metodologia foi aplicada em um estudo de caso envolvendo uma indústria de polpa de banana da região que descartava em torno de 40 toneladas de cascas por mês. Foram então realizados experimentos para a caracterização, pré-tratamento e pré-processamento desses resíduos e a partir daí escolhido o sistema de secagem pneumática com auxílio de processos de desagramento mecânico e mistura com produto seco, onde foi possível obter uma redução de 94,5% para 35% do teor de umidade inicial das cascas. Por fim, foi realizada uma simulação com o objetivo de comparar o processo de secagem direta considerando o uso de um secador de bandeja com o processo da metodologia em questão, obtendo uma redução de 93,8% no consumo de vapor do processo e uma economia de 94.179 kJ e R\$ 1,54 por kg de produto seco obtido.

Palavras-Chave: Processos mecânicos, Eficiência energética, Secagem, Cascas de banana;

ABSTRACT

This study aimed to develop a methodology for increasing energy efficiency in drying processes and become feasible the utilization of agro-industrial residues. Initially, the most relevant aspects have been analyzed for the choice and design of drying systems in the scientific literature. Subsequently, the methodology was applied in a case study involving a banana pulp industry in the region where are discarded around 40 tons of peels per month. Experiments were then performed to characterization, pre-treatment and pre-processing of residues and from there choose the pneumatic drying system with the aid of mechanical dewatering processes and mixing of the dried product which allowed a reduction of 94.5% to 35.0% of the content initial moisture of peels. Finally, a simulation in order to compare the direct drying processes considering the use of a tray dryer with the process of the methodology in question was performed, obtaining a reduction of 93.8% in steam consumption of the process and savings of 94,179 kJ and R\$1.54 per kg of dry product.

Keywords: Mechanical Process, Energy Efficiency, Drying, Banana Peels;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pressão de vapor de um líquido puro.....	18
Figura 2 – Diagrama Entalpia-Temperatura para uma substância pura.....	19
Figura 3 – Curva típica da taxa de secagem para condições de secagem constantes.....	27
Figura 4 – Tipos de secadores conforme os métodos de transferência de calor.....	29
Figura 5 – Algoritmo para projeto de secadores.....	31
Figura 6 – Fluxograma da preparação inicial da matéria-prima.....	39
Figura 7 – Fluxograma do processamento da matéria prima tratada.....	42
Figura 8 – Fluxograma do processamento da matéria pré-seco.....	43
Figura 9 – Fluxograma do processamento do material pré-seco.....	45
Figura 10 – Amostra de 1 kg de cascas de banana utilizadas no experimento.....	48
Figura 11 – Produto antes do branqueamento.....	49
Figura 12 – Produto após o branqueamento.....	49
Figura 13 – Moagem das cascas pré-tratadas.....	50
Figura 14 – Produto após prensagem.....	50
Figura 15 – Desidratador utilizado para a secagem do produto pré-seco.....	51
Figura 16 – Fluxograma final do processo.....	52
Figura 17 – Secador pneumático.....	54
Figura 18 – Balanço de massa do sistema para a secagem direta.....	56
Figura 19 – Balanço de massa do sistema com a etapa de moagem e prensagem.....	58
Figura 20 – Balanço de massa do sistema com a etapa de moagem, prensagem e mistura do produto seco.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Seleção de secadores x tipo de matéria-prima.....	30
Tabela 2 – Exposição de sólidos a condições de calor.....	31
Tabela 3 – Capacidade e consumo de energia por tipo de secador.....	34
Tabela 4 – Poder Calorífico Útil de biomassa de eucalipto.....	37
Tabela 5 – Vapor saturado.....	38
Tabela 6 – Teor de nutrientes de cascas de frutas.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivos Gerais	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Introdução.....	14
3.2. Operação de secagem.....	14
3.3. Variáveis externas do processo de secagem	17
3.3.1. <i>Equilíbrio vapor-líquido e entalpia de uma substância pura</i>	<i>17</i>
3.3.2. <i>Misturas Vapor-Gas.....</i>	<i>20</i>
3.3.3. <i>Métodos de Aquecimento</i>	<i>20</i>
3.3.4. <i>Temperatura e Pressão de Operação</i>	<i>22</i>
3.4. Variáveis internas do processo de secagem.....	23
3.4.1. <i>Umidade dos sólidos.....</i>	<i>24</i>
3.4.2. <i>Taxa de Secagem</i>	<i>25</i>
3.5. Tipos de Secadores.....	29
3.6. Efeito dos custos de energia, segurança e fatores ambientais na seleção de secadores. .	32
3.7. Fontes de energia para secagem	37
4. METODOLOGIA	39
4.1. Introdução.....	39
4.2. Análise inicial e etapas de preparação da matéria prima	39
4.2.1. <i>Caracterização da matéria-prima “in natura”</i>	<i>39</i>
4.2.2. <i>Pré-tratamento.....</i>	<i>40</i>
4.3. Análise e processamento da matéria prima tratada	41
4.3.1. <i>Caracterização da matéria-prima tratada.....</i>	<i>41</i>
4.3.2. <i>Moagem e Prensagem.....</i>	<i>42</i>
4.4. Análise e processamento do material pré-seco.....	43
4.4.1. <i>Caracterização do material pré-seco</i>	<i>43</i>
4.4.2. <i>Mistura com produto seco.....</i>	<i>43</i>
4.5. Análise e seleção do processo final de secagem	44
4.5.1. <i>Caracterização do material para secagem</i>	<i>44</i>
4.5.2. <i>Análise da eficiência energética do sistema.....</i>	<i>44</i>

5. ESTUDO DE CASO	46
5.1. Produção de farinha de casca de banana	46
5.2. Oferta de casca de banana como matéria-prima	46
5.3. Caracterização da matéria-prima “in natura”	47
5.4. Pré-tratamento da matéria prima	49
5.5. Pré-processamento da matéria-prima tratada.....	50
5.6. Mistura de material úmido e seco.....	51
5.7. Seleção do secador para secagem final.....	53
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1. Secagem Direta	56
6.2. Secagem utilizando a metodologia proposta	58
<i>6.2.1. Processos mecânicos de desaguamento.....</i>	<i>58</i>
<i>6.2.2. Mistura de material úmido e seco.....</i>	<i>60</i>
7 - CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações da humanidade consiste na racionalização de suas fontes de alimentos. Para tanto, vários métodos vem sendo desenvolvidos ao longo do tempo visando a sua conservação e transformação. A remoção de água de alimentos sólidos através dos processos de secagem pode ser citada como um desses métodos, surgindo como uma forma de reduzir a atividade de água e inibir o crescimento microbiano, evitando assim a deterioração dos mesmos. Esta remoção passou a ter grande importância na indústria atual devido ao grande potencial de redução dos custos energéticos em comparação à conservação a frio, bem como dos custos de transporte, embalagem e armazenagem destes alimentos (Park et al, 2006). A secagem também é um processo industrial com grande potencial de ser utilizado para o aproveitamento de diferentes tipos de resíduos agroindustriais, porém não é tão utilizada para esse fim por ser uma operação que requer grande quantidade de energia, o que muitas vezes inviabiliza economicamente o produto final devido ao alto custo da energia gasta. Assim, o desenvolvimento de processos de secagem com alta eficiência energética e baixo consumo de energia é de grande importância para a viabilização e aproveitamento de vários subprodutos provenientes do setor industrial.

A geração de resíduos e subprodutos é inerente a qualquer setor produtivo. O aumento da conscientização ecológica, iniciado no final do século 20, deixou claro que o grande desafio da humanidade para as próximas décadas é equilibrar a produção de bens e serviços, crescimento econômico, igualdade social e sustentabilidade ambiental (Garbosa et al, 2008). Os setores: agroindustrial e de alimentos, produzem grandes quantidades de resíduos, tanto líquidos como sólidos. Esses resíduos podem apresentar problemas de disposição final, sendo potenciais poluentes, além de representarem, muitas vezes, perdas de biomassa e de nutrientes de alto valor. Ao contrário do que acontecia no passado, quando resíduos eram dispostos em aterros sanitários ou empregados sem tratamento para ração animal ou adubo, atualmente, conceitos de minimização, recuperação, aproveitamento de subprodutos e bioconversão de resíduos são cada vez mais difundidos e necessários para as cadeias agroindustriais (Laufenberg et al, 2003).

Dentro deste cenário pode ser ressaltada a cultura da banana, visto que o seu consumo apresenta vários benefícios à saúde humana. Por se caracterizar como uma

cultura apta a ser explorada em todo o território nacional, a viabilização comercial passa pelo atendimento dos consumidores locais, entretanto, trata-se de um produto altamente perecível e com elevado nível de desperdício, que pode ultrapassar os 50% do volume plantado. Além disso, na industrialização da banana as cascas são geralmente descartadas servindo apenas como alimento para animais, mas se devidamente tratadas, podem servir como substrato para a produção de leveduras e de outros fermentos, além de excelente produto para a fabricação de doces (Martins, 2002). Estas geralmente apresentam teores de nutrientes maiores do que os das suas respectivas partes comestíveis, podendo ser utilizadas como fonte alternativa de nutrientes (Oliveira et al, 2002; Gondim et al, 2005). Assim, a transformação das cascas de banana em uma farinha de alto valor agregado trata-se de uma proposta plausível e concreta, visto que esses resíduos representam extraordinária fonte de materiais considerados estratégicos para diversas indústrias brasileiras (Oliveira et al, 2002). A produção da farinha da casca da banana mostra-se um empreendimento bastante promissor para o enriquecimento dos alimentos ou a substituição parcial da farinha de trigo. Assim, este produto poderia ser utilizado na panificação, em alimentos infantis, doces e produtos dietéticos (Pessoa, 2009). Entretanto, o grande entrave para a viabilização desse cenário concentra-se no elevado teor de umidade destes subprodutos (em torno de 93%), exigindo o uso de sistemas de secagem que competem com a destilação como um dos processos mais intensivos em energia da indústria, além de ser uma operação complexa e altamente não linear que envolve transferência de calor e massa juntamente com transformações químicas e físicas que podem causar alterações na qualidade do produto como: encolhimento, cristalização, alterações de cor, textura, odor, etc, não existindo um procedimento único de projeto que seja aplicável a todos os casos (Taylor and Francis Group, 2006).

Logo, são necessários estudos mais aprofundados sobre as leis de transferência de calor e massa e das propriedades do material para o correto dimensionamento do sistema de secagem visando à otimização da eficiência energética do processo de modo a viabilizar técnica e economicamente o produto em questão conforme será discutido neste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Este estudo tem como objetivo a elaboração de uma metodologia para a otimização da eficiência energética em sistemas de secagem de forma a viabilizar técnica e economicamente o aproveitamento de resíduos agroindustriais, bem como sua aplicação em um estudo de caso visando a desidratação de cascas de banana provenientes de uma agroindústria da região para a comprovação da eficácia do método em questão.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a teoria e o funcionamento dos processos de secagem visando o levantamento do consumo de energia típico para cada sistema;
- Caracterizar a matéria prima de entrada para o processo de secagem; as umidades iniciais e finais e demais parâmetros de interesse do material a ser seco;
- Verificar alternativas para o aumento da eficiência energética de secagem no estudo de caso através de processos mecânicos para redução da umidade inicial da matéria-prima;
- Avaliar o sistema de secagem mais adequado ao estudo de caso em questão;
- Fazer um comparativo do processo de secagem direta com o processo da metodologia proposta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

A secagem é uma operação essencial em vários segmentos produtivos como na indústria química, agricultura, biotecnologia, alimentos, polímeros, cerâmica, papel e celulose, farmacêutica, minério e processamento de madeira. É um dos mais antigos métodos de conservação de alimentos e de acordo com registros históricos, as sociedades primitivas já praticavam a secagem da carne utilizando o sol. Hoje, o processo de secagem de alimentos é um método de preservação essencial. Alimentos secos podem ser armazenados por longos períodos sem ocorrência de deterioração pelo fato dos microorganismos responsáveis por este efeito serem incapazes de crescer e multiplicar-se na ausência de água e muitas das enzimas que promovem alterações indesejáveis na composição química dos alimentos também não podem atuar sem a presença de água.

Entretanto, conforme já mencionado anteriormente, a secagem compete com a destilação como um dos processos industriais mais intensivos em energia, devido ao elevado calor latente de vaporização e a ineficiência no uso do ar quente como meio de secagem (mais comum). Vários estudos reportam que o consumo nacional de energia para operações industriais de secagem variam de 10-15% para os Estados Unidos, Canadá, França e Reino Unido e de 20-25% para Dinamarca e Alemanha. O consumo de energia na secagem varia de valores inferiores a 5% para as indústrias de processos químicos até 35% para operações de fabricação de papel. Nos Estados Unidos, por exemplo, as despesas de capital para secadores são estimadas na ordem de apenas 800 milhões de dólares por ano, ou seja, os principais custos para o uso de secadores estão na sua operação ao invés do investimento inicial (Taylor and Francis Group, 2006).

3.2. Operação de secagem

A secagem trata-se de um processo de remoção térmica de substâncias voláteis (umidade) para a obtenção de um produto sólido. Quando um sólido úmido é sujeito à secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de energia (na maior parte em forma de calor) a partir do ambiente circundante para evaporar a superfície úmida;

2. Transferência da umidade interna para a superfície do sólido e subsequente evaporação.

A taxa na qual é realizada a secagem é regulada por estes dois processos. A transferência de energia na forma de calor a partir do ambiente circundante para o sólido úmido pode ocorrer como resultado da convecção, condução, irradiação ou, em alguns casos, como resultado de uma combinação destes efeitos. Secadores industriais diferem no tipo e design, dependendo do método de transferência de calor empregado. Em muitos casos, o calor é transferido para a superfície do sólido úmido e depois para o seu interior. No entanto, em sistemas dielétricos, de rádio frequência (RF) ou por micro-ondas, a energia é fornecida para gerar calor internamente dentro do sólido e depois fluxos para as superfícies exteriores.

O processo 1, remoção de água na forma de vapor a partir da superfície do material, depende das condições externas de temperatura, umidade e fluxo de ar, área de exposição da superfície e pressão. O processo 2, movimento da umidade internamente dentro do sólido, é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e de seu teor de umidade. Em uma operação de secagem, qualquer um destes processos pode ser o fator limitante que regula a velocidade de secagem, embora ambos procedam simultaneamente através do ciclo de secagem (Taylor and Francis Group, 2006).

A operação de secagem converte uma matéria-prima sólida, semi-sólida, ou líquida para um produto sólido por evaporação da umidade na forma de vapor através da aplicação de calor. No caso especial da liofilização, que acontece abaixo do ponto triplo da substância que é removida, a secagem ocorre por sublimação da fase sólida diretamente na fase de vapor. Esta definição exclui, portanto, a conversão de uma fase líquida para uma fase líquida concentrada, operações mecânicas de desaguamento como a filtragem, centrifugação, sedimentação, extração supercrítica de água a partir de géis para a produção de aerogéis de elevada porosidade e a secagem de líquidos e gases através da utilização de peneiras moleculares (adsorção). A secagem ocorre pela efetiva vaporização do líquido através do fornecimento de calor à matéria-prima úmida. Como notado anteriormente, o calor pode ser fornecido por convecção (secadores diretos), por condução (contato ou secadores indiretos), radiação ou volumetricamente através da colocação do material úmido em campos eletromagnéticos de micro-ondas ou rádio frequência (RF). Mais de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo com ar

quente ou gases de combustão como meio de secagem. Mais de 99% das aplicações envolvem a remoção de água. Todos os modos, exceto o dielétrico (micro-ondas e RF) fornecem calor através da superfície do objeto da secagem que é então difundido para o interior do sólido principalmente por condução. O líquido é transportado para a superfície do material e então é liberado na forma de gás ou vapor. O transporte da umidade dentro do sólido pode ocorrer através de um ou mais dos seguintes mecanismos de transferência de massa (Taylor and Francis Group, 2006):

- Difusão do líquido, se o sólido úmido se encontra em uma temperatura abaixo do ponto de ebulição do líquido;
- Difusão do vapor, se o líquido vaporiza-se dentro do material;
- Difusão de Knudsen, se a secagem é realizada em baixas temperaturas e pressões (liofilização);
- Difusão de superfície;
- Combinações dos mecanismos acima;

É importante ressaltar que em muitos processos, a secagem imprópria pode levar a danos irreversíveis a qualidade do produto, pois se trata de uma operação complexa envolvendo transferência transitória de calor e massa juntamente com vários outros processos, tais como transformações químicas ou físicas, que por sua vez, podem causar alterações como: encolhimento, estufamento, cristalização, transições vítreas, alterações de cor, textura, odor ou outras propriedades do produto sólido. Claramente, nenhum procedimento único de projeto é aplicável a todos os processos de secagem. Portanto, é essencial a análise dos fundamentos de transferência de calor e massa, juntamente com o conhecimento das propriedades do material (qualidade) ao tentar projetar um secador ou analisar um secador existente. Matematicamente, todos os processos envolvidos, mesmo no secador mais simples, são altamente não lineares e, portanto, o aumento de escala é geralmente muito difícil. Experimentos em laboratório e em escalas-piloto junto com experiências de campo são essenciais para o desenvolvimento de novos secadores. Fornecedores de secadores, normalmente, oferecem apenas uma estreita faixa de equipamentos de secagem. O interessado deve, portanto, estar razoavelmente familiarizado com o conhecimento básico sobre a grande variedade de secadores e ser capaz de chegar com uma seleção preliminar informal antes de negociar com os

vendedores, pois vários secadores diferentes podem ser capazes de lidar com uma dada aplicação.

3.3. Variáveis externas do processo de secagem

As variáveis externas de atuação essencial nos processos de secagem são a temperatura, umidade, taxa e direção do fluxo de ar, forma física do sólido, agitação e o método de suporte do sólido durante a operação de secagem (Williams-Gardner, 1971). Estas condições são especialmente importantes durante a fase inicial de secagem onde a umidade da superfície é removida. Por exemplo, em materiais como cerâmica e madeira onde ocorre um considerável encolhimento, a excessiva evaporação na superfície depois da umidade inicial livre ter sido removida configura elevados gradientes de umidade do interior para a superfície. Isto pode causar ressecamento, encolhimento excessivo e, conseqüentemente, elevada tensão dentro do material causando rachaduras e empenamento. Nestes casos, a evaporação na superfície deve ser retardada através do uso de ar com elevada umidade relativa, mantendo uma taxa de maior segurança para o movimento interno da umidade através da transferência de calor. A evaporação da superfície é controlada pela difusão de vapor da superfície do sólido para a atmosfera circundante através de uma fina camada de ar em contato com a superfície.

Uma vez que a secagem envolve uma transferência interfase de massa, quando um gás é colocado em contato com um líquido no qual é essencialmente insolúvel, torna-se necessária a familiarização com as características de equilíbrio do sólido úmido. Além disso, uma vez que a transferência de massa é normalmente acompanhada por uma transferência simultânea de calor, devem ser feitas as devidas considerações a respeito das características entálpicas do processo.

3.3.1. Equilíbrio vapor-líquido e entalpia de uma substância pura

Quando um líquido é exposto a um gás seco ocorre uma transformação de fase gerando vapor. Se m_w é a massa de vapor na fase gasosa, então este vapor exerce uma pressão sobre o líquido, chamada de pressão parcial, a qual, partindo do princípio que o gás apresenta um comportamento ideal para o vapor, é dada por:

$$P_w V = \frac{m_w}{M_w} RT \quad \text{ou} \quad P_w V_w = RT \quad (1)$$

O valor máximo de P_w que pode ser atingido em qualquer temperatura é a pressão de vapor saturado P_w^0 . Se a pressão de vapor de uma substância é representada graficamente em função da temperatura, uma curva como a da Figura 1 é obtida. Também representadas na figura estão a curva de equilíbrio sólido-líquido (curva de fusão) e a curva de sólido-vapor (sublimação). O ponto T, no gráfico, no qual todas as três fases podem coexistir é chamado de ponto triplo. Para todas as condições ao longo da curva TC, líquido e vapor podem coexistir, e esses pontos correspondem aos estados de líquido saturado e vapor saturado. O ponto C é o ponto crítico onde a distinção entre as fases líquida e de vapor desaparece, e todas as propriedades do líquido como densidade, viscosidade e índice de refração são idênticas as do vapor. A substância acima da temperatura crítica é chamada de gás, a temperatura correspondente a pressão de cada ponto na curva TC é o ponto de ebulição.

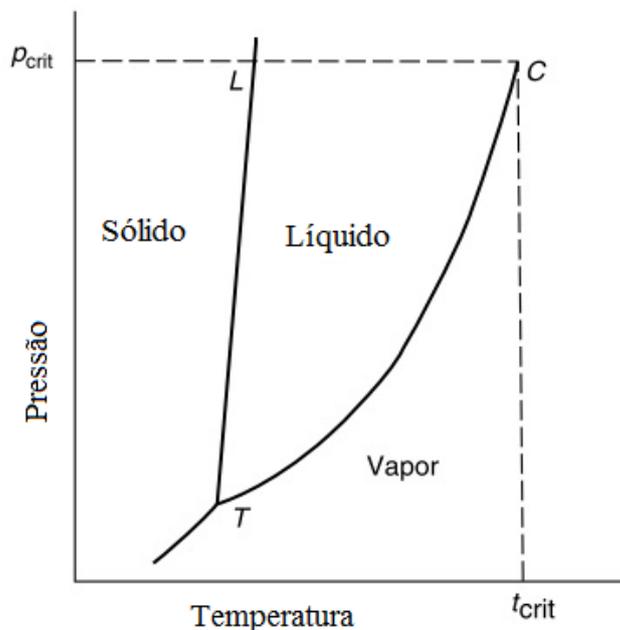


Figura 1 – Pressão de vapor de uma substância pura (Taylor and Francis Group, 2006)

Todas as substâncias têm uma energia interna devido ao movimento e posição relativa dos componentes dos átomos e moléculas. Valores absolutos de energia interna, u , são desconhecidos, mas os valores numéricos relativos a uma linha de base definida arbitrariamente podem ser calculados. Em qualquer sistema de fluxo estável há uma energia adicional associada, forçando fluxos dentro de um sistema contra uma pressão que o força para fora do sistema. Este fluxo de trabalho por unidade de massa é PV , onde P é a pressão e V o volume específico. A energia interna e o fluxo de trabalho por unidade de massa tem sido convenientemente agrupados para formar um componente

energético chamado de entalpia (H). A entalpia é definida pela expressão abaixo sendo dimensionada pela unidade de energia dividida por unidade de massa (J/kg ou Nm/kg):

$$H = u + PV \quad (2)$$

Os valores absolutos da entalpia de uma substância como a energia interna não são conhecidos. Os valores relativos de entalpia podem ser calculados pela definição arbitrária do zero ou início da escala a partir de um estado de referência conveniente. Um desses estados de referência para a entalpia zero é a água no estado líquido sob sua própria pressão de vapor de 611,2 Pa à temperatura do ponto triplo de 273,16K (0,01°C). A variação isobárica da entalpia com a temperatura é mostrada na Figura 2 a seguir:

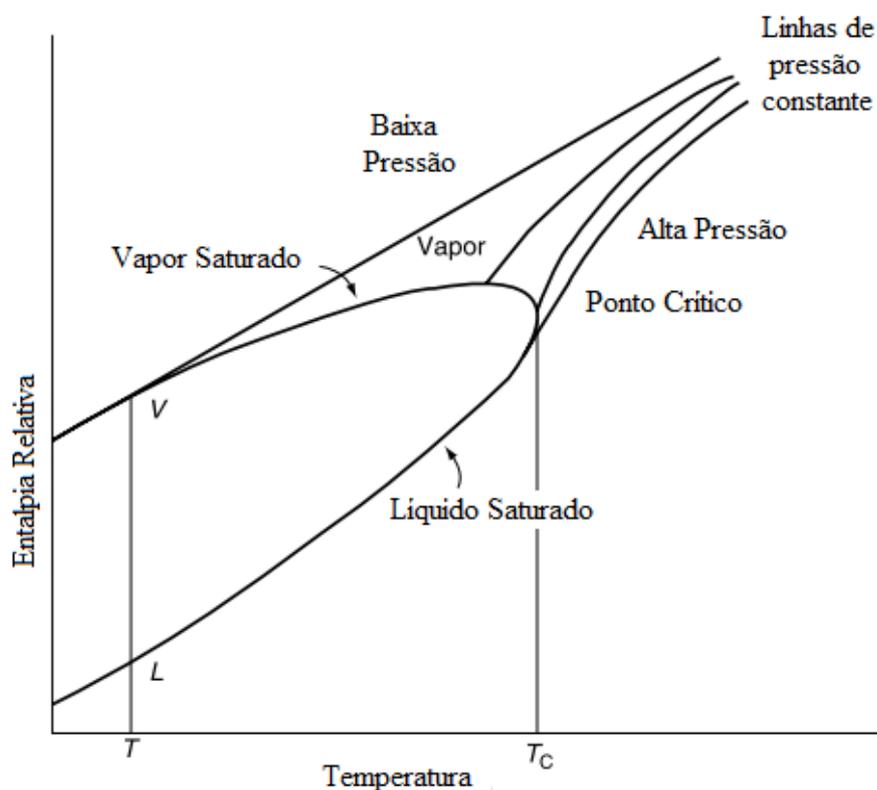


Figura 2 – Diagrama Entalpia-Temperatura para uma substância pura (Taylor and Francis Group, 2006)

Em baixas pressões no estado gasoso, quando o comportamento do gás é essencialmente ideal, a entalpia é quase independente da pressão, de modo que as isóbaras quase se sobrepõem umas as outras. As curvas marcadas como “líquido saturado” e “vapor saturado”, no entanto, cortam as linhas de pressão constante e mostram as entalpias para estas condições de temperatura e pressão correspondentes a

pressão de vapor de equilíbrio para a substância. A distância entre as curvas de líquido saturado e vapor saturado, tal como a distância V-L, corresponde ao calor latente de vaporização a uma determinada temperatura. Tanto T como V-L são dependentes da pressão, a distância V-L diminui e torna-se zero a temperatura crítica T_C . Exceto próximo à temperatura crítica, a entalpia do líquido é quase independente da pressão até mesmo quando altas pressões são atingidas.

3.3.2. Misturas Vapor-Gas

Quando um gás ou uma mistura gasosa entra em contato com uma superfície líquida ocorre à absorção de vapor proveniente do líquido até que a pressão parcial do vapor na mistura gasosa seja igual à pressão de vapor do líquido na temperatura existente. Em aplicações de secagem, o gás frequentemente utilizado é o ar e o líquido utilizado é a água. Embora unidades de concentração comuns (pressão parcial, fração molar e outros) baseadas na quantidade total de gás e vapor sejam úteis, para operações que envolvam mudanças no conteúdo de vapor de uma mistura vapor-gás sem mudanças na quantidade de gás, é mais conveniente o uso de uma unidade baseada na quantidade imutável de gás. O ar úmido é uma mistura de vapor de água e gás, composto por uma massa m_w de vapor de água e uma massa m_G de gás (ar). O teor de umidade ou umidade absoluta pode ser expresso como:

$$Y = \frac{m_w}{m_G} \quad (3)$$

3.3.3. Métodos de Aquecimento

3.3.3.1 - Convecção

A convecção é possivelmente o modo mais comum de secagem de partículas ou sólidos pastosos. O calor é fornecido pelo ar aquecido ou um gás que flui sobre a superfície do sólido. Calor por evaporação é fornecido pela convecção para a superfície exposta do material e a umidade evaporada é carregada pelo meio de secagem. Ar (o mais comum), gás inerte (tal como N_2 , para a secagem de sólidos úmidos com solvente orgânico), gases de combustão direta ou vapor superaquecido podem ser usados em sistemas de secagem convectiva.

Tais secadores são também chamados de secadores diretos. No período inicial de taxa de secagem constante (onde a umidade da superfície é removida), a superfície do sólido assume a temperatura de bulbo úmido correspondente à temperatura do ar e condições de umidade da mesma localização. No período de queda da taxa de secagem a temperatura do sólido aproxima-se da temperatura de bulbo seco do meio externo. Esses fatores devem ser considerados durante a secagem de sólidos sensíveis ao calor. Quando ocorre a secagem com vapor superaquecido, a temperatura do sólido corresponde à temperatura de saturação a pressão de operação, por exemplo, 100°C para vapor a 1 atm. Para sólidos suscetíveis à oxidação ou desnaturação, por exemplo, na presença de oxigênio, a sensibilidade ao calor pode ser bastante diferente em ambiente de vapor. A qualidade do produto pode variar também. Esta só pode ser determinada através de testes de laboratório. Exemplos de secadores convectivos (direto) são secadores de ar em suspensão, tais como leito fluidizado, pneumático, rotativo ou secadores do tipo spray.

3.3.3.2 - Condução

Condução ou secadores indiretos são mais apropriados para produtos finos ou para sólidos muito úmidos. Calor por evaporação é fornecido através de uma superfície aquecida (estacionária ou móvel) colocada dentro do secador para suportar, carregar ou confinar os sólidos. A umidade evaporada é transportada por uma operação a vácuo ou por um fluxo de gás que é principalmente um carregador de umidade. A operação a vácuo é recomendada para sólidos sensíveis ao calor, porque a perda de entalpia com o ar de secagem em secadores convectivos é grande e sua eficiência térmica tende a ser baixa. Para secadores de condução a eficiência térmica é maior. Secadores de pás para a secagem de massas, secadores rotativos com tubos de vapor internos e secadores de tambor para secagem de lamas finas são exemplos de secadores indiretos.

Um secador mais eficiente pode ser concebido para operações que combinem vantagens tanto do aquecimento direto quanto do indireto, por exemplo, um secador de leito fluidizado com tubos de aquecimento imersos ou bobinas para secagem de polímeros sensíveis ao calor. Tal secador pode ter apenas um terço do tamanho de um secador de leito fluidizado puramente convectivo para a mesma obrigação.

Vale ressaltar que algumas vezes pode-se operar o mesmo aparelho em modo direto, indireto, ou em uma combinação de ambos. Por exemplo, um secador de leito

fluidizado pode ser puramente convectivo (por exemplo, secagem de chá), puramente condutivo (por exemplo, secagem a vácuo de grânulos farmacêuticos), ou uma combinação direto-indireto (por exemplo, secagem de carvão pulverizado com tubos de aquecimento imersos).

3.3.3.3 - Irradiação

Existem várias fontes de radiação eletromagnética com comprimentos de onda que variam a partir do espectro solar até as micro-ondas (0,2 m – 0,2 μ m). A radiação solar raramente penetra além da camada externa do material, a qual absorve apenas uma parte da radiação incidente, dependendo do seu comprimento de onda. A radiação infravermelha é usada frequentemente na secagem de revestimentos, folhas e filmes finos e aquecimento de sólidos volumetricamente, reduzindo assim a resistência interna à transferência de calor. A energia é absorvida seletivamente pelas moléculas de água: o produto fica mais seco com menos uso de energia. O custo de capital bem como os custos de operação são elevados e por isso estas técnicas são úteis para a secagem de produtos de alto valor unitário ou para correção final do perfil de umidade em que apenas pequenas quantidades de umidade ligada são removidas, como nos perfis de umidade de papel utilizando aquecimento RF. O modo combinado da secagem com convecção (por exemplo, infravermelho juntamente com jatos de ar ou micro-ondas para a secagem de alimentos em fatias) também são viáveis comercialmente.

3.3.4. Temperatura e Pressão de Operação

A maioria dos secadores é operada próxima a pressões atmosféricas. Uma pressão ligeiramente positiva evita fugas para o ambiente externo, o que não é permitido em alguns casos. Se nenhuma fuga for permitida para o exterior, então uma ligeira pressão negativa é usada.

A operação a vácuo é cara e recomendada somente se o produto deve ser seco em baixas temperaturas ou em ausência de oxigênio. Altas temperaturas de operação tendem a ser mais eficientes desde que menores taxas de fluxo de gás e menores equipamentos possam ser utilizados para uma dada função de evaporação. A disponibilidade de calor residual a baixa temperatura ou energia de coletores solares possibilitam a escolha de uma operação a temperaturas mais baixas.

A liofilização é um caso especial de secagem sob vácuo a uma temperatura abaixo do ponto triplo da água; aqui a água (gelo) sublima-se diretamente em vapor de água. Embora o calor necessário para a sublimação seja várias vezes menor do que o necessário à evaporação, a operação a vácuo é cara. A liofilização de café, por exemplo, custa de duas a três vezes mais do que a secagem por spray. Por outro lado, a qualidade do produto e a retenção de sabores são melhores.

3.4. Variáveis internas do processo de secagem

Depois das discussões sobre as condições externas de temperatura e umidade do ar, o foco do estudo em questão passa a ser as características do sólido. Como resultado da transferência de calor para um sólido úmido, um gradiente de temperatura se desenvolve dentro do sólido enquanto a evaporação da umidade ocorre a partir da superfície. Este fato produz uma migração da umidade do interior do sólido para a superfície, o que ocorre através de um ou mais mecanismos chamados difusão, fluxo capilar, pressões internas criadas pelo encolhimento durante a secagem, e, no caso de secadores indiretos (condução), por meio da ocorrência de progressivas e repetidas vaporizações e recondensações da umidade para a superfície externa. Variáveis como a velocidade do ar e temperatura que normalmente aumentam a velocidade de evaporação da superfície, são de importância decrescente, exceto para promover a taxa de transferência de calor. Longos períodos de residência e, quando permitido, temperaturas mais altas tornam-se necessários.

No caso de materiais como a cerâmica e a madeira, a evaporação excessiva na superfície configura altos gradientes de umidade do interior em direção à superfície, o que pode causar ressecamento, encolhimento excessivo e, conseqüentemente, altas tensões que resultam em rachaduras ou deformações. Em tais casos, é essencial não incorrer em gradientes de umidade muito altos, retardando a evaporação da superfície mediante o emprego de elevada umidade relativa do ar, mantendo uma maior taxa de movimento da umidade interna em virtude da transferência de calor. O gradiente de temperatura criado no sólido irá também criar um gradiente de pressão de vapor, o qual por sua vez, resultará na difusão da umidade sob a forma de vapor para a superfície, ocorrendo de forma simultânea ao movimento da umidade na forma líquida.

3.4.1. Umidade dos sólidos

A umidade contida em um sólido úmido ou numa solução líquida exerce uma pressão de vapor numa extensão que depende da natureza da umidade, da natureza do sólido e da temperatura. Um sólido úmido exposto a um fluxo contínuo de gás fresco continua a perder umidade até que a pressão de vapor da umidade no sólido seja igual a pressão parcial de vapor no gás. Diz-se então que o sólido e o gás estão em equilíbrio e o teor de água do sólido é chamado de teor de umidade de equilíbrio sob as condições prevalecentes. A maior exposição deste ar por longos períodos não trará qualquer perda adicional de umidade. O teor de água no sólido pode ser ainda mais reduzido pela exposição ao ar de menor umidade relativa. Os sólidos podem ser melhor classificados da seguinte forma (Van Brackel, 1980):

- ***Meios não higroscópicos capilares e porosos***, como areia, minerais triturados, cristais não higroscópicos, partículas de polímeros e algumas cerâmicas. Os critérios de definição são os seguintes. (1) Existe uma clara porosidade reconhecível; do espaço poroso é liberado líquido, se o meio poroso capilar é completamente saturado ou liberado ar quando o meio é completamente seco. (2) A quantidade de umidade fisicamente ligada é insignificante. (3) O meio não encolhe durante a secagem.
- ***Meios higroscópicos porosos***, como argila, peneiras moleculares, madeira e materiais têxteis. Os critérios de definição são: (1) Existem poros claramente reconhecíveis. (2) Há uma grande quantidade de líquido fisicamente ligado. (3) Encolhimento frequentemente ocorre nos estágios iniciais de secagem. Esta categoria ainda pode ser dividida em: (a) meio higroscópico capilar poroso (microporos e macroporos, incluindo meios bidispersos tais como madeira, argila e têxteis) e (b) meios estritamente higroscópicos (apenas microporos, tais como a sílica gel, alumina e zeólitas).
- ***Meios coloidais (não porosos)***, tais como o sabão, cola, alguns polímeros (por exemplo, nylons), e vários produtos alimentícios. Os critérios de definição são os seguintes: (1) não há espaço poroso (evaporação pode ocorrer apenas na superfície), (2) todo o líquido é fisicamente vinculado a estrutura química do produto.

Deve-se notar que as classificações são aplicáveis apenas a meios homogêneos que podem ser considerados de maneira contínua para o transporte. Como um sólido úmido é geralmente inchado em comparação a sua condição livre de umidade, seu volume sofre alterações durante o processo de secagem. Logo, não é conveniente expressar o conteúdo de umidade em termos de volume. O teor de umidade de um produto sólido é geralmente expresso como o teor de umidade em peso do material completamente seco no sólido (X). Algumas vezes é utilizado o teor de umidade em base úmida (W), que é a relação umidade-sólido baseada na massa total de material úmido. Os dois teores de umidade são relacionados pela expressão:

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (4)$$

A água pode ser fisicamente ligada a um sólido pela retenção nos capilares ou nas estruturas celulares e adsorção química ou física à superfície do sólido. A umidade não ligada a um material higroscópico é o excesso de água em relação a umidade de equilíbrio, o que corresponde a umidade de saturação. Todo o conteúdo de umidade de um material não higroscópico é a umidade não ligada. O teor de água livre é a umidade removível a uma dada temperatura e pode incluir tanto a umidade ligada quanto a não ligada. Na imediata vizinhança da interface entre a água livre e vapor, a pressão de vapor de equilíbrio é a pressão de vapor saturado. Muitos produtos úmidos têm uma pressão de vapor na interface quase igual à pressão de vapor de saturação. Se a concentração de sólidos é aumentada pela remoção de água, então os sólidos higroscópicos dissolvidos produzem uma queda na pressão de vapor, devido às forças osmóticas. Mais remoção de água finalmente resulta em uma superfície seca. A água agora existe apenas no interior de capilares muito pequenos, entre as pequenas partículas e ligadas as suas próprias moléculas. Esta ligação produz uma redução considerável na pressão de vapor. Assim, um produto pode estar em equilíbrio apenas com uma atmosfera externa em que a pressão de vapor seja consideravelmente reduzida.

3.4.2. Taxa de Secagem

Como já mencionado, o teor de água de um sólido pode apresentar-se de maneira ligada ou não ligada a estrutura molecular da substância. Existem dois métodos para a remoção da umidade não ligada: **evaporação** e **vaporização**. A evaporação

ocorre quando a pressão de vapor da umidade sobre a superfície sólida é igual à pressão atmosférica. Isto é feito através do aumento da temperatura até o seu ponto de ebulição. Esse tipo de fenômeno ocorre, por exemplo, em secadores de rolo. Se o material seco é sensível ao calor, então a temperatura à qual ocorre a evaporação, isto é, o ponto de ebulição, pode ser reduzido pela diminuição da pressão (evaporação por vácuo). Se a temperatura é reduzida abaixo do ponto triplo, então nenhuma fase líquida pode existir e a umidade do produto é congelada. A adição de calor provoca a sublimação do gelo diretamente para vapor de água, como no caso da liofilização. Na vaporização, a secagem é realizada por convecção, isto é, fazendo passar ar quente sobre o produto. O ar é arrefecido pelo produto e a umidade é transferida para o ar.

Uma necessidade preliminar para a seleção e dimensionamento adequado de secadores é a determinação das características de secagem. Também são necessárias informações a respeito das características de manipulação de sólidos, umidade de equilíbrio do sólido e sensibilidade do material à temperatura em conjunto com os possíveis limites de temperatura para determinada fonte de calor. O comportamento da secagem de sólidos pode ser caracterizado medindo a redução do teor de umidade em função de tempo. Os métodos utilizados são diferença de umidade, pesagem contínua e pesagem intermitente conforme descrito em Keey (1978) e Ashworth (1978).

A Figura 3 descreve qualitativamente uma curva típica de secagem para um produto higroscópico. Produtos que contêm água se comportam de forma diferente na secagem de acordo com o seu teor de umidade. Durante a primeira fase de secagem a velocidade de secagem é constante. A superfície contém umidade livre. A vaporização ocorre aí e algum encolhimento pode ocorrer quando a umidade da superfície é puxada para trás na direção da superfície sólida. Nesta etapa quem controla a taxa de secagem é a difusão do vapor de água através da interface de ar úmido e a taxa na qual a superfície para a difusão é removida. Perto do final do período de taxa constante, a umidade tem de ser transportada de dentro do sólido para a superfície através das forças capilares e a taxa de secagem pode ainda ser constante.

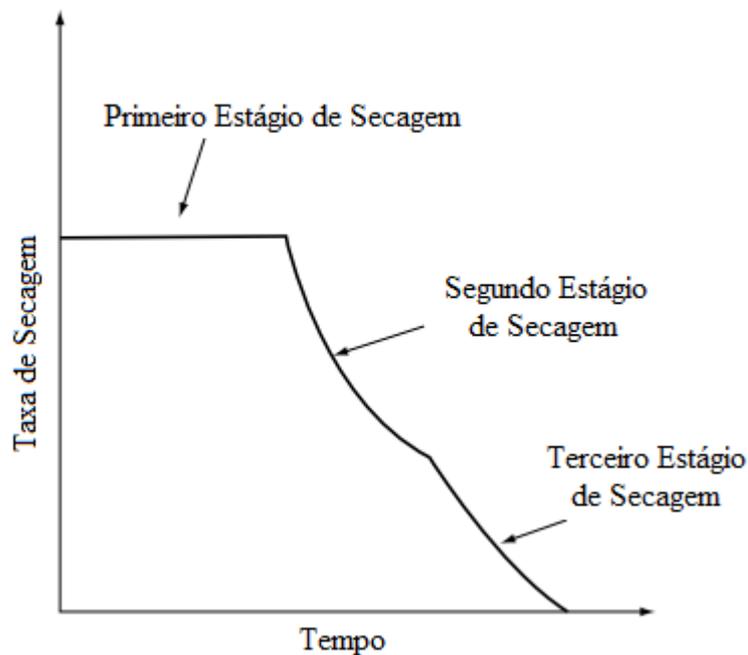


Figura 3 – Curva típica da taxa de secagem para condições de secagem constantes (Taylor and Francis Group, 2006)

Quando o teor médio de umidade alcança o valor crítico, a película de superfície da umidade é reduzida pela evaporação que causa uma secagem adicional provocando manchas secas sobre a superfície. Uma vez que, no entanto, a taxa é calculada em relação à área total da superfície do sólido, a velocidade de secagem cai mesmo que a taxa por unidade de área de superfície sólida úmida permaneça constante. Isto dá origem à segunda fase de secagem ou a primeira parte do período de taxa decrescente, o período de secagem das superfícies insaturadas. Este estágio procede até que a película da superfície do líquido seja completamente evaporada.

Na continuação da secagem (o segundo período de taxa decrescente ou a terceira fase de secagem), a taxa em que a umidade pode mover-se através do sólido, como resultado da concentração de gradientes entre as partes mais profundas e a superfície, é o passo de controle. A transmissão de calor agora consiste em transferência de calor para a superfície e condução de calor no produto. Desde que a profundidade média do nível de umidade aumenta progressivamente e a condutividade do calor nas zonas secas externas é muito pequena, a taxa de secagem é cada vez mais influenciado pela condução do calor. No entanto, se o produto seco tem uma densidade relativamente elevada e um volume de cavidade com poros muito pequenos, a secagem não é tão influenciada pela condução de calor, mas por uma resistência bastante elevada à difusão

dentro do produto. A taxa de secagem é controlada pela difusão da umidade do interior para a superfície e, em seguida, a transferência de massa da superfície. Durante esta fase, alguma umidade ligada é removida. Como a concentração de umidade é reduzida pela secagem, a taxa de movimentação interna da umidade decresce. A taxa de secagem cai ainda mais rapidamente do que antes até que o conteúdo de umidade chegue próximo ao valor de equilíbrio para a umidade do ar corrente e, em seguida, a secagem é encerrada.

Na prática, as matérias-primas originais podem ter um teor de umidade elevado e o produto pode requerer um elevado teor de umidade residual de modo que toda a secagem possa ocorrer no período de taxa constante. No entanto, na maioria dos casos ambos os fenômenos existem e para a maioria dos materiais uma secagem lenta pode ocorrer durante o período de queda de velocidade. Como mencionado anteriormente, no período de taxa constante a velocidade de secagem é determinada pela taxa de evaporação. Quando toda a superfície exposta do sólido deixa de ser úmida, o movimento do vapor por difusão e a capilaridade de dentro do sólido para a superfície são as etapas que controlam a taxa de secagem. Sempre que ocorre um encolhimento considerável, como na secagem da madeira, gradientes de pressão são criados dentro do sólido e estes podem apresentar grande importância. Neste caso, tal como no caso de materiais “caseharden”, isto é, que formam uma pele dura impermeável, é essencial retardar a evaporação e trazê-la no passo da taxa de movimento de umidade a partir do interior. Isto pode ser conseguido aumentando a umidade relativa do ar na secagem.

Com sólidos no qual o teor de umidade inicial é relativamente baixo e o teor de umidade final requerido é extremamente baixo, o período de queda de velocidade torna-se importante. A velocidade do ar será importante na medida em que são aumentadas as taxas de transferência de calor. Temperatura do ar, espessura do material e profundidade do leito de secagem também se tornam importantes. Quando a taxa de difusão é o fator de controle, longos períodos são necessários para atingir teores de umidade baixos, pois a taxa de secagem durante o período de queda de velocidade varia com o quadrado da espessura do material, o que indica a conveniência de granulação da matéria-prima utilizando a agitação ou camadas finas no caso de secadores de bandeja de fluxo cruzado. Assim, as características de secagem dos sólidos são extremamente importantes no projeto de secadores.

3.5. Tipos de Secadores

Com poucas exceções, a maioria dos produtos industriais são submetidos a uma secagem em algum estágio ou outro. Um produto deve ser adequado para qualquer processamento subsequente ou venda. Materiais devem ter um teor de umidade específico para o processamento, moldagem ou peletização. Pós devem ser secados a um baixo teor de umidade para o embalamento satisfatório. Sempre que produtos são aquecidos a temperaturas elevadas, tal como em processos cerâmicos e metalúrgicos, a pré-secagem em temperaturas mais brandas frente aos fornos de queima é vantajosa para a redução de energia. Custos de transporte (como no caso do carvão) dependem do conteúdo de umidade do produto e um equilíbrio deve ser atingido entre os custos de transporte e os custos de secagem. Além disso, a secagem excessiva é um desperdício, pois não é apenas mais calor e sim uma despesa a mais do que o necessário, podendo resultar ainda na degradação do produto, como no caso do papel e da madeira. Logo, devem ser considerados todos os métodos que possam envolver algum tipo de economia de energia na escolha de secadores (Menon, 1982).

A primeira subdivisão dos tipos de secadores é baseada nos métodos de transferência de calor como aquecimento por condução ou convecção e na forma de processamento do produto: batelada ou contínuo. A Figura 4, a seguir, mostra um resumo das possibilidades mencionadas:

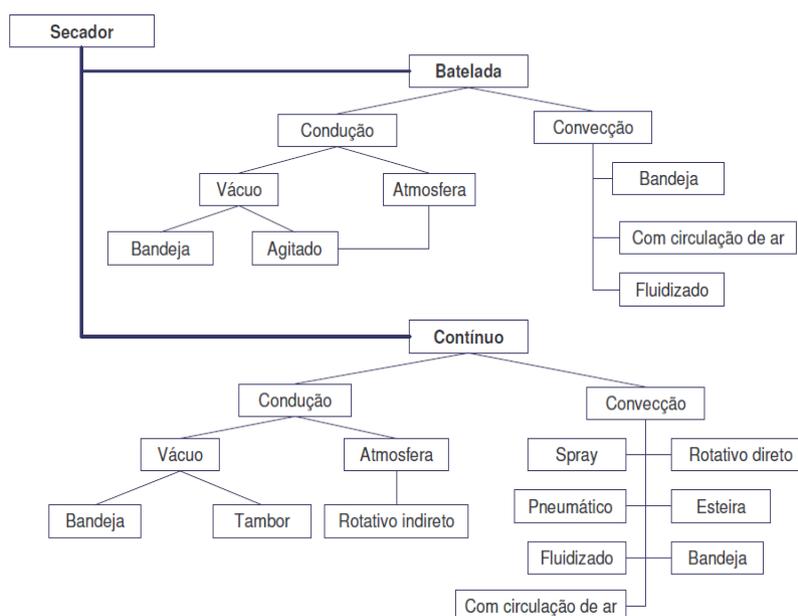


Figura 4 – Tipos de secadores conforme os métodos de transferência de calor (Park et al, 2006)

Em um estudo realizado foram identificados cerca de 20 tipos de secadores, classificados de acordo com as seguintes premissas: operação contínua ou em batelada, condução de calor através de contato direto com os gases ou através das paredes dos reatores e de acordo com o movimento do equipamento (Sloan, 1967). Essa classificação, embora útil em distinguir e descrever sistemas discretos, não vai muito longe ao que tange o relacionamento destes sistemas com os processos que estes deveriam lidar. Para tentar resolver o problema sob o ponto de vista do usuário, 19 tipos de secadores foram classificados de acordo com o quão bem eles lidariam com os diferentes tipos de materiais conforme mostrado na tabela 1.

Tabela 1 – Seleção de secadores x tipo de matéria-prima (McCormick, 1973)

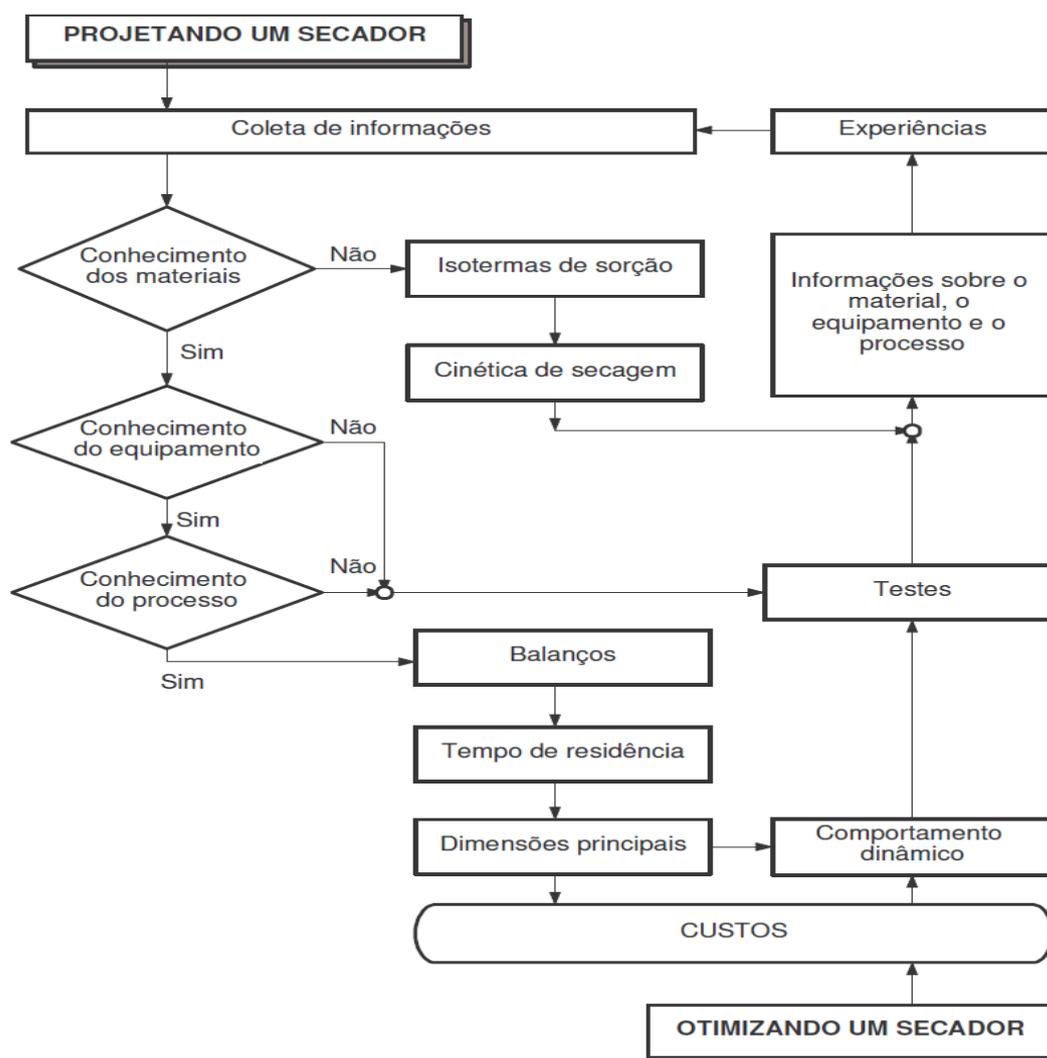
Natureza do Material	Líquidos			Tortas		Sólidos de Fluxo Livre					Sólidos Formados
	Soluções	Lodos	Pastas	Centrifugas	Filtradas	Pós	Grânulos	Cristais	Pellets	Fibras	
Esteira							X	X	X	X	X
Pneumático				X	X	X	X			X	
Leito Fluidizado	X	X		X	X	X	X		X		
Rotativo				X	X	X	X		X	X	
Spray	X	X	X								
Bandeja (batelada)				X	X	X	X	X	X	X	X
Bandeja (contínuo)				X	X	X	X	X	X	X	
Secadores Condutivos											
Tambor	X	X	X								
Rotativo encamisado				X	X	X	X		X	X	
Rotativo tubular				X	X	X	X		X	X	
Bandeja (batelada)				X	X	X	X	X	X	X	X
Bandeja (contínuo)				X	X	X	X	X	X	X	

A sensibilidade térmica bem como a eficiência e tamanho do secador dependem em grande medida das condições térmicas do produto a ser exposto dentro do secador. Dessa forma, os equipamentos também podem ser classificados de acordo com o tempo de permanência do produto no secador conforme demonstrado na Tabela 2. Para tempos muito curtos de secagem (<1 min), secadores spray, pneumáticos ou de tambor são utilizados. Para longos períodos de secagem (> 1 h), apenas secadores do tipo túnel, caminhão ou de esteira são apropriados. A maioria dos secadores opera em uma faixa intermediária, onde uma variedade muito ampla de equipamentos está disponível (Mujumdar, 1984).

Tabela 2 – Exposição de sólidos a condições de calor (Schlunder, 1982)

Secadores	Tempo de residência típico durante a secagem				
	0 - 10 (s)	10 - 30 (s)	5 - 10 (min)	10 - 60 (min)	1 - 6 (h)
Convectivos					
Esteira				X	
Pneumático	X				
Leito Fluidizado				X	
Rotativo				X	
Spray		X			
Bandeja (batelada)					X
Bandeja (contínuo)				X	
Condutores					
Tambor		X			
Rotativo encamisado				X	
Rotativo tubular				X	
Bandeja (batelada)					X
Bandeja (contínuo)				X	

De acordo com Key (1972), pode ser utilizado um algoritmo para a concepção de sistemas de secagem conforme demonstrado na Figura 5:

**Figura 5** – Algoritmo para projeto de secadores (Key, 1972)

3.6. Efeito dos custos de energia, segurança e fatores ambientais na seleção de secadores.

Os crescentes custos de energia, a legislação cada vez mais rigorosa sobre a poluição e as condições de trabalho e segurança tem uma relação direta com o projeto e seleção de secadores industriais. Esses efeitos foram discutidos sob a ótica do projeto de secadores de suspensão de partículas, como spray, flash e leite fluidizado (Lang, 1978) e devem ser considerados durante a fase de seleção do secador. Em alguns casos, a concorrência na escolha entre sistemas de secagem existe e em outros se deve incorporar estes fatores na fase de concepção do projeto.

Para um dado sistema de secagem (incluindo o pré-processamento, como desidratação mecânica, centrifugação, evaporação e prensagem bem como o pós-processamento, como o recolhimento do produto, arrefecimento, aglomeração e granulação), de um modo geral, várias alternativas para economia de energia podem ser concebidas, incluindo: reciclagem do gás, ciclo fechado de operação, auto-inertização, secagem multiestágio e incineração dos gases de exaustão. Áreas de conflito podem existir entre os requisitos legais, higiene da operação e eficiência energética. A seguir são citados os possíveis cenários de conflito:

1. Compartimentos de combustão podem se tornar um problema de higiene;
2. Poeira na reciclagem dos fluxos suja a superfície do trocador de calor causando dificuldades nos sistemas de combustão direta;
3. Juntas de expansão térmica podem acumular resíduos do produto aumentando o perigo de incêndio;
4. Alta eficiência de coleta do produto para secadores em particular significa queda elevada de pressão e maior ruído do ventilador.

É importante notar que especificações desnecessariamente severas para os produtos podem causar aumento significativo nos custos de secagem, capital e operacional. Na seleção de sistemas de secagem visando à economia de energia é importante observar o seguinte:

1. Ao manusear um produto termicamente sensível, os gases de escape devem ser totalmente livres de impurezas se o fluxo passa através ou perto de um queimador;
2. A reciclagem de gases aumenta o nível de umidade na secagem, o que pode aumentar o teor de umidade de equilíbrio para níveis inaceitáveis, em alguns casos;
3. Em múltiplos estágios de secagem, a economia de calor requer que a primeira etapa de secagem resulte em um produto parcialmente seco, o que às vezes dificulta o manuseamento.

Uma instalação de secagem pode causar a poluição do ar por emissão de poeiras e gases. Mesmo plumas de vapor d'água limpo são inaceitáveis em algumas áreas. Partículas dentro do intervalo de 20-50 mg/nm³ de ar de exaustão são um requisito comum. Alta eficiência na coleta de poeira é essencial. Ciclones, filtros de mangas, lavadores e precipitadores eletrostáticos são comumente usados para a coleta de partículas e limpeza do gás de secagem. Para a remoção de gases poluentes nocivos, pode-se recorrer à absorção, adsorção ou incineração, sendo a última operação mais comum. Apesar de raro, muitos cuidados devem ser tomados na secagem de materiais transportados pelo ar que podem pegar fogo. A redução no teor de oxigênio pode suprimir o perigo de explosão. Caso uma explosão ocorra, orifícios de ventilação adequados devem ser acionados para evitar o acúmulo excessivo de pressão no sistema. A eliminação de fontes de ignição não é aceitável como garantia adequada contra fogo ou risco de explosão. Quando o risco de uma explosão existe, o acúmulo de resíduos no secador ou coletor deve ser evitado. Finalmente, a legislação local sobre os níveis de ruído deve ser considerada na seleção e desenvolvimento dos secadores. Dependendo do rigor das condições de ruído, os custos de tratamento acústico podem chegar a até 20% do custo total do sistema. Para secadores de suspensão a ar, o ventilador é o principal gerador de ruído. Outras fontes, tais como bombas, redutores, compressores, equipamentos de dispersão, queimadores e misturadores também contribuem para o ruído. Um baixo ruído do ventilador requer uma baixa queda de pressão no sistema, fato que conflita com a alta queda de pressão exigida para uma alta eficiência de coleta.

A discussão acima se destina a fornecer especificações de equipamentos de secagem de forma prática a serem consideradas na fase de seleção do sistema de secagem. Raramente, ou nunca, é possível selecionar um secador que atende a todos os critérios. Na maioria dos casos, no entanto, pode-se modificar o projeto do sistema de secagem ou operação para atender a todas as especificações essenciais para o usuário.

Embora as experiências anteriores possam servir de guia na especificação de secadores, é importante reconhecer que os secadores anteriores foram projetados em momentos onde os custos de energia foram mínimos e os requisitos de qualidade do produto e taxas de produção eram diferentes. Também existe uma variação nos custos de energia de uma localização geográfica a outra e, certamente, de um país para outro. É altamente recomendado que se faça uma seleção de secadores a partir das condições atuais e da localização geográfica, enquanto se leva em conta futuras tendências esperadas. Em muitos casos os secadores mais utilizados para um determinado produto tornam-se más escolhas sob as condições prevalecentes. A Tabela 3 apresenta um resumo das capacidades típicas de secagem e o consumo de energia nos secadores industriais mais comuns:

Tabela 3 – Capacidade e consumo de energia por tipo de secador (Toei, 1980)

Tipo de Secador	Capacidade de evaporação típica (kg H ₂ O / h m ² ou kg H ₂ O / h m ³)	Consumo de energia típico (kJ / kg de H ₂ O evaporada)
Túnel	-	5.500 - 6.000
Bandeja	-	4.000 - 6.000
Impacto	50 / m ²	5.000 - 7.000
Rotativo	30 - 80 / m ³	4.600 - 9.200
Leito fluidizado	-	4.000 - 6.000
Pneumático	5 - 100 / m ³	4.500 - 9.000
Spray	1 - 30 / m ³	4.500 - 11.500
Tambor	6 - 20 / m ²	3.200 - 6.500

Para o desenvolvimento de processos de secagem é necessário escolher um determinado secador de acordo com as condições e propriedades específicas do produto a ser obtido. As características de desempenho dos sistemas auxiliares também devem ser avaliadas antes da escolha do tipo final de secador. Quase sempre alguns ensaios em pequena escala são necessários para determinar as características necessárias de secagem do material e prever a maneira com que a matéria-prima se comportará em uma unidade industrial. Um extenso trabalho tem sido feito no desenvolvimento de teorias de secagem, tal como a teoria do transporte simultâneo, as teorias que envolvem

fluxos através de meios porosos e modelos simplificados, como o modelo da superfície úmida, dentre outros. A curva característica da taxa de secagem também tem encontrado uso nos projetos. Detalhes destas teorias estão disponíveis em (Kroll, 1959).

Na concepção de um secador, basicamente, uma ou mais das seguintes fontes de informação são utilizadas: (a) informações obtidas de clientes, (b) a experiência anterior sob a forma de arquivos com secadores vendidos e tendências ou (c) testes em planta-piloto ou em escala de bancada. Testes em plantas-piloto asseguram que o material possa ser processado da maneira desejada. No entanto, os procedimentos de aumento de escala não são implementados de forma simples. Algumas discussões científicas vem remetendo a novas tecnologias de secagem (Mujumdar, 1990). Estudos recentes têm resultado em avanços significativos na compreensão da termodinâmica de secagem de materiais higroscópicos, cinética de secagem, evaporação de misturas de multicomponentes a partir de corpos porosos, comportamento do movimento de partículas em vários secadores e assim por diante. Em geral, o conhecimento empírico adquirido nas últimas duas décadas tem sido de considerável valor no desenho de secadores industriais, incluindo a sua modelagem e sistemas de controle. Por outro lado, o entendimento a nível microscópico dos mecanismos de secagem permanece em um nível rudimentar no sentido de que a modelagem de secadores continua a ser uma tarefa complexa e desafiadora. Inúmeros livros didáticos têm aparecido nos últimos anos concentrando-se em um ou mais aspectos da secagem (Cook e Dumont, 1991; Keey, 1982; Strumillo e Kudra, 1987; Van't Land, 1991; Vergnaud, 1992). Para o pesquisador interessado em um maior aprofundamento do assunto podem ser citadas as series *Advances in Drying* (Mujumdar, 1992) e o jornal *Drying Technology* (Mujumdar, 1982) para o conhecimento dos mais recentes desenvolvimentos no campo da secagem. Além disso, a série *Drying of Solids* (Mujumdar, 1987, 1990, 1992) contém valiosas informações recentes sobre a tecnologia de secagem. Os catálogos técnicos publicados por diversos fabricantes de equipamentos de secagem são também muito valiosos bem como os trabalhos do simpósio bienal internacional de secagem (IDS), publicados na série *Drying*, que fornecem um guia útil para atuais propostas de pesquisa e desenvolvimento na secagem (Mujumdar, 1989, 1991, 1992).

É importante ressaltar que o foco deve estar centrado no sistema de secagem como um todo e não apenas no secador ao se examinar um problema de desidratação industrial. As etapas de pré-processamento, pós-processamento e limpeza das emissões

do secador são muitas vezes tão importantes quanto o secador em si. Tendo em vista que cada vez mais rigorosas regulamentações ambientais entram em vigor em todo o mundo, não é incomum que o custo do secador em si seja apenas uma pequena fração do custo total do sistema de secagem. O custo de um sistema mal selecionado é muitas vezes subestimado e o usuário deverá pagar por isso ao longo de todo tempo de vida do sistema. Se experiências passadas são usadas como único guia, automaticamente é eliminado o potencial benefício da especificação de secadores mais recentes e novas tecnologias comercializadas ao redor do mundo, como no caso da utilização de vapor superaquecido ao invés de quente como o meio de secagem para secadores diretos, configuração que tem atraído considerável atenção nos últimos anos. O scale-up é talvez a questão central de maior importância na concepção de secadores. Informações sobre este assunto são bastante limitadas e muito dispersas. Dentro desse contexto, é fornecida, talvez, a única compilação de trabalhos que lidam com o aumento de escala de secadores de vários tipos (Genskow, 1994). Também são apresentadas as equações gerais e metodologia aplicada a análise, desenho e scale-up de certo número de secadores industriais (Houska et al, 1987). Infelizmente, a extrema diversidade de produtos e tipos de secadores impede o desenvolvimento de um pacote de design único. É difícil gerar regras que atendam todas as classificações para a seleção de secadores porque ocorrem exceções com bastante frequência. Muitas vezes, pequenas mudanças na alimentação ou nas características do produto resultam em diferentes tipos de secadores como escolhas apropriadas. Não é raro encontrar diferentes tipos de secadores sendo usados para secar aparentemente o mesmo material. A escolha depende do rendimento da produção, requisitos de flexibilidade, custo de combustível e também da avaliação subjetiva do profissional que irá especificar o equipamento.

Neste estudo não foram consideradas novas tecnologias de secagem, mas detalhes da maioria dos equipamentos não convencionais e inovações tecnológicas no segmento em questão são discutidos em Kudra e Mujumdar (2001). A maioria destas ainda necessita de maior amadurecimento enquanto algumas têm sido comercializadas com sucesso para certos produtos. É útil estar ciente de tais avanços de modo que o usuário possa tomar decisões inteligentes sobre seleção de secadores visto que a vida útil desses equipamentos é, tipicamente, de 25-40 anos e o efeito de uma prescrição equivocada pode ter um impacto de longo prazo sobre a saúde econômica da planta. Normalmente não é uma opção desejável depender exclusivamente de experiências

anteriores, relatos na literatura ou recomendações de vendedores. Cada problema de secagem merece a sua própria avaliação independente e solução. Também não foram considerados modelos matemáticos para a cinética de secagem neste documento, porém em Turner e Mujumdar (1996) bem como nas publicações do jornal *Drying Technology* são relatadas inúmeras abordagens envolvendo modelagens matemáticas e técnicas numéricas aplicáveis em tecnologia de secagem. Estas ferramentas são cada vez mais utilizados para o projeto, otimização e controle de secadores industriais.

3.7. Fontes de energia para secagem

A principal fonte utilizada para a produção de energia térmica na forma de vapor no setor agroindustrial é a biomassa (lenha). Desta forma torna-se importante conhecer quanto de biomassa é necessário para a produção de vapor. Esta informação pode ser obtida a partir do valor de PCU – Poder Calorífico Útil, que incorpora a influência da umidade e as perdas na caldeira para converter a energia da biomassa em vapor conforme demonstrado em Silva (2012). De acordo com a Tabela 4 é possível estimar quanto de biomassa pode ser convertido em energia térmica na forma de vapor. Por exemplo, para a biomassa de Eucalipto *urophylla*, 1 kg com 35% de umidade pode fornecer em torno de 3417,3 kcal de energia térmica para a geração de vapor.

Tabela 4 – Poder Calorífico Útil de biomassa de eucalipto (Silva, 2012)

Teor de umidade (%)	Eucalipto		
	<i>E. urophylla</i> (kcal/kg)	<i>E. grandis</i> (kcal/kg)	<i>E. citriodora</i> (kcal/kg)
55	2974,3	2984,2	2912,2
50	3117,6	3127,5	3055,5
45	3234,9	3244,8	3172,8
40	3332,6	3342,5	3270,5
35	3417,3	3427,2	3355,2
30	3488,9	3498,9	3426,9
25	3554,1	3564,1	3492,0
20	3606,2	3616,2	3544,2
15	3651,8	3661,8	3589,8
10	3697,4	3707,4	3635,4
5	3736,5	3746,5	3674,5
0	3769,1	3779,0	3707,0

A partir da Tabela 5 é possível verificar que 1 kg de vapor saturado com pressão de 10 bar (1 Mpa) possui uma entalpia de 663,9 kcal/kg e considerando que 1 kg de

biomassa de eucalipto com 35% de umidade pode fornecer em 3417,3 kcal seria possível a produção de 5 kg de vapor nestas condições, sem perdas nas conversões:

Tabela 5 – Vapor saturado (Silva, 2012)

Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Entalpia		Calor latente de evaporação (kcal/kg)
		Líquido (kcal/kg)	Vapor (kcal/kg)	
0,0	99,09	99,1	638,5	539,4
0,5	110,79	110,9	642,8	531,9
1,0	119,62	119,8	645,8	525,9
1,5	126,79	127,2	648,3	521,1
2,0	132,88	133,4	650,3	516,9
2,5	138,19	138,8	651,9	513,1
3,0	142,92	143,6	653,4	509,8
3,5	147,2	148	654,7	506,7
4,0	151,11	152,1	655,8	503,7
4,5	154,71	155,8	656,9	501,1
5,0	158,08	159,3	657,8	498,5
5,5	161,15	162,6	658,7	496,2
6,0	164,17	165,6	659,4	493,8
6,5	166,96	168,5	660,2	491,7
7,0	169,61	171,3	660,8	489,5
7,5	172,11	173,9	661,4	487,5
8,0	174,53	176,4	662,0	485,6
8,5	176,82	178,9	662,5	483,6
9,0	179,04	181,2	663,0	481,8
10,0	183,20	185,6	663,9	478,3

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

A metodologia proposta neste trabalho possibilita a análise de todas as etapas do desenvolvimento de processos de secagem para diferentes tipos de matérias primas, visando à obtenção de um produto final com a qualidade necessária à entrada no mercado juntamente com a maior eficiência energética possível e, conseqüentemente, menor custo de processo devido ao baixo consumo de energia na etapa de secagem.

4.2. Análise inicial e etapas de preparação da matéria prima

Inicialmente, é realizada a análise da matéria-prima “in natura” que se deseja processar e, posteriormente, por meio de fluxogramas é avaliada a necessidade da realização de etapas de pré-tratamento e/ou pré-processamento para adequação desta. Identificadas as necessidades, parte-se para análise dos procedimentos e equipamentos necessários para a realização destas etapas. A Figura 6 ilustra a etapa inicial do fluxograma mencionado.

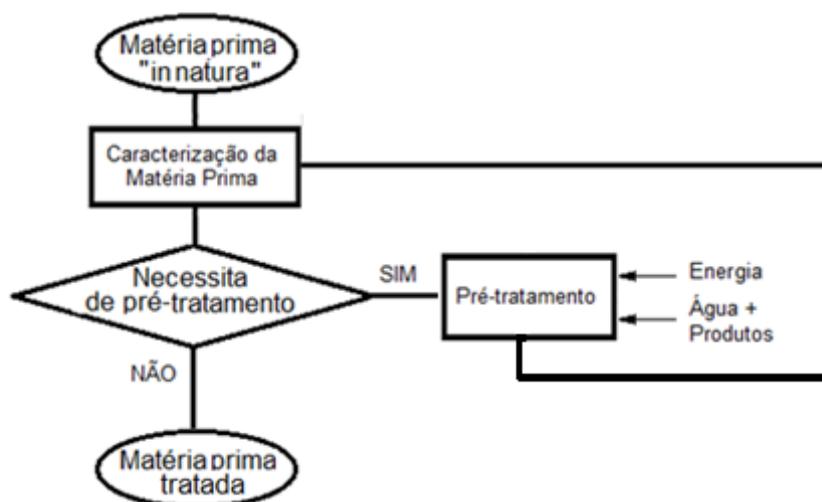


Figura 6 – Fluxograma da preparação inicial da matéria-prima

4.2.1. Caracterização da matéria-prima “in natura”

Para o correto dimensionamento de sistemas de secagem é imprescindível o conhecimento das propriedades físico-químicas do material a ser desidratado. De posse

dessas informações é possível analisar qual é o tipo de secador mais adequado ao produto, o padrão de qualidade exigido pelo mercado, o consumo de energia no processo de secagem bem como possíveis perdas de nutrientes em decorrência da ação do calor. Esses dados podem ser obtidos através de artigos existentes na literatura científica ou da realização de análises bromatológicas em laboratórios especializados. Para o trabalho em questão foram utilizadas as duas opções mencionadas.

4.2.2. Pré-tratamento

Em determinados produtos, pode ocorrer o escurecimento devido à presença de enzimas que são ativadas pela exposição das partes internas da matéria-prima ao oxigênio em decorrência de fatiamento ou moagem. As temperaturas utilizadas nos processos de secagem aceleram essa reação enzimática que causa escurecimento. Perdas nutricionais e modificações sensoriais (cor, sabor, aroma e textura) indesejáveis são as consequências desse processo. Além disso, a ação de microrganismos também é causa dessa deterioração. Para evitar esse problema, faz-se necessário o uso de antioxidantes em uma operação denominada de branqueamento que contribui para o prolongamento da vida útil dos produtos desidratados (Celestino, 2010).

De acordo com Fellows (2006), a função do branqueamento é de inativar enzimas em materiais sendo classificado como um pré-tratamento que é realizado entre o preparo da matéria-prima e operações posteriores (moagem, secagem, congelamento etc.). Para conseguir uma inativação enzimática adequada, o alimento é aquecido rapidamente a uma temperatura predeterminada, mantido durante um tempo estabelecido e rapidamente resfriado a temperaturas próximas à ambiente. A temperatura máxima na desidratação é insuficiente para inativar enzimas. Se o alimento não for branqueado, acontecem mudanças indesejáveis nas características sensoriais e nas propriedades nutricionais durante a estocagem. Um branqueamento insuficiente pode causar um dano maior ao alimento do que a ausência de branqueamento, pois o aquecimento suficiente para romper tecidos e liberar enzimas, mas não para inativá-las, acelera o dano ao misturar enzimas e substratos. Além disso, pode ocorrer à destruição de algumas enzimas, fato que aumenta a atividade de outras enzimas e acelera a deterioração. Entre as enzimas que causam perdas na qualidade nutricional e sensorial em frutas e vegetais encontra-se a lipoxigenase, a polifenoloxidase, a poligalacturonase e a clorofilase. Duas enzimas termorresistentes que são encontradas na maioria dos

vegetais são a catalase e a peroxidase. Essas enzimas são utilizadas como marcadores para determinar o sucesso do branqueamento, apesar de não causarem deterioração do alimento durante a estocagem. A peroxidase é a mais resistente termicamente, assim, a ausência de sua atividade residual indica que as outras enzimas menos resistentes foram também destruídas. O calor recebido pelo alimento durante o branqueamento causa, inevitavelmente, alguns danos em sua qualidade sensorial e nutricional. No entanto, o tratamento térmico é menos severo do que, por exemplo, na esterilização pelo calor, e as mudanças resultantes na qualidade do alimento são menos pronunciadas. Em geral, a combinação tempo-temperatura utilizada assegura uma inativação enzimática adequada, mas previne amolecimento e perda de sabor excessivo no alimento. Durante o branqueamento são perdidos alguns minerais, vitaminas e outros componentes hidrossolúveis. O processo clareia alguns alimentos pela remoção de ar e poeira da superfície, alterando, assim, o comprimento de onda da luz refletida. O tempo e a temperatura de branqueamento influenciam na mudança de pigmento do alimento. O carbonato de sódio, óxido de cálcio e ácido cítrico são frequentemente adicionados à água de branqueamento para proteger a clorofila mantendo a cor dos vegetais verdes. As condições de tempo-temperatura necessárias para alcançar a inativação enzimática causam uma perda excessiva da textura em alguns tipos de alimento.

4.3. Análise e processamento da matéria prima tratada

4.3.1. Caracterização da matéria-prima tratada

Realizada a etapa de pré-tratamento para a adequação do padrão de qualidade da matéria-prima esta pode agora entrar diretamente em algum sistema de secagem ou então podem ser realizadas etapas adicionais de pré-processamento visando à otimização do sistema de secagem por meio da retirada de água em equipamentos de menor gasto energético. Em muitos processos industriais, operações de separação sólido-líquido são combinadas com operações de secagem. Nesta operação combinada, a separação sólido-líquido contribui para a redução da umidade inicial do produto de forma mecânica, diminuindo a energia térmica necessária à secagem. Além disso, também possibilita uma melhor homogeneização e adequação da granulometria do insumo.

4.3.2. Moagem e Prensagem

A redução de tamanho ou fragmentação é a operação unitária na qual o tamanho médio dos pedaços sólidos do alimento é reduzido pela aplicação de forças de moagem, compressão ou impacto. Ela é utilizada para controlar as propriedades reológicas ou de textura dos alimentos e aumentar a eficiência da mistura ou da transferência de calor. A redução de tamanho faz com que haja um aumento na relação área superficial/volume do alimento, isto é, a área relativa, aumentando a taxa de secagem e aquecimento. A quantidade de energia necessária para quebrar um alimento é determinada por sua dureza e tendência a fraturar (sua friabilidade), que, por sua vez, depende da estrutura do produto. Quanto menos linhas de ruptura existir no alimento, maior é a quantidade de energia necessária para causar a quebra. Alimentos mais duros absorvem mais energia e, conseqüentemente, necessitam de maior quantidade de energia para criar fraturas. Os diferentes métodos de redução de tamanho são classificados de acordo com a faixa de tamanho das partículas produzidas. Dentre os métodos de redução temos: trituração, corte, fatiamento, moagem e homogeneização. Forças de compressão são utilizadas para quebrar alimentos friáveis ou cristalinos; forças combinadas de impacto e cisalhamento são necessárias para alimentos fibrosos e forças de cisalhamento são utilizadas para a moagem fina de alimentos macios. Os alimentos quebram-se em níveis de estresse mais baixos se a força for aplicada por um tempo mais longo. O nível de redução de tamanho, o gasto de energia e a quantidade de calor gerado no alimento, portanto, dependem tanto da extensão das forças que são aplicadas quanto do tempo que o alimento é submetido a essas forças (Fellows, 2006). As etapas de pré-processamento utilizadas no estudo em questão são ilustradas no fluxograma a seguir:

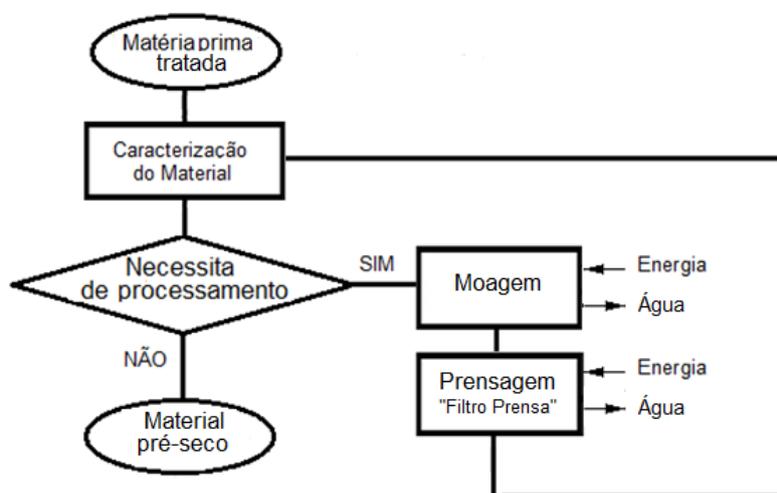


Figura 7 – Fluxograma do processamento da matéria prima tratada.

4.4. Análise e processamento do material pré-seco

4.4.1. Caracterização do material pré-seco

Após as etapas de moagem e prensagem é possível obter um material pré-seco mais homogêneo e de menor granulometria praticamente pronto para a entrada no sistema de secagem. Entretanto, este material deve estar em uma forma adequada para facilitar a alimentação e a remoção de água em um sistema de secagem. Assim, para melhorar as condições de secagem é possível utilizar mais uma etapa de pré-processamento que consiste em misturar o material seco ao material pré-seco conforme explicado no tópico seguinte.

4.4.2. Mistura com produto seco

No caso de sólidos com muita umidade inicial, é possível utilizar um sistema de secagem com a adição de um sistema de recirculação do produto seco que é misturado ao produto úmido na etapa de alimentação, reduzindo o teor de umidade e homogeneizando o produto para a entrada no equipamento de secagem. A determinação da vazão de reciclo é um fator determinante para o adequado planejamento do sistema de secagem de acordo com a aplicação desejada, devendo ser projetada para a mistura do produto úmido com o produto seco de forma a garantir a redução do teor de umidade inicial ao mesmo tempo em que facilita a realimentação do produto e a dispersão do material no sistema de secagem. A Figura 8 ilustra o fluxograma dessa etapa:

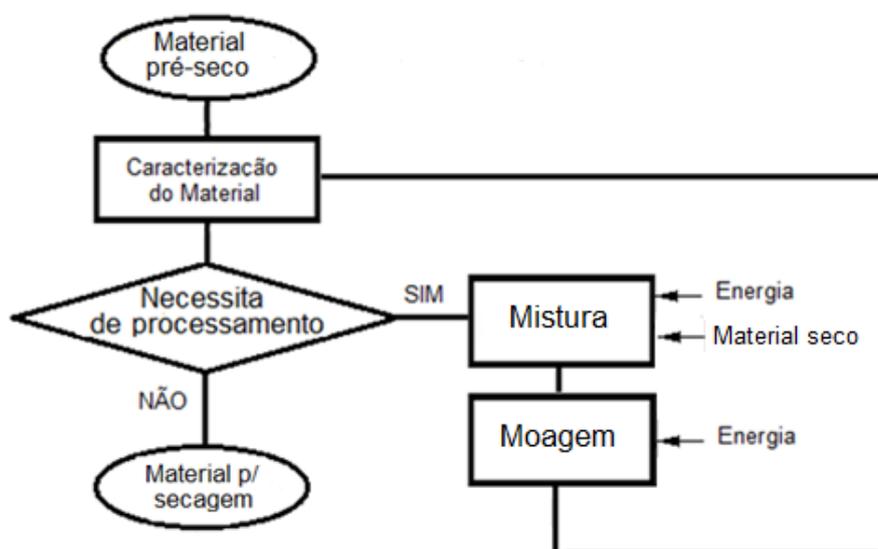


Figura 8 – Fluxograma do processamento do material pré-seco.

4.5. Análise e seleção do processo final de secagem

4.5.1. Caracterização do material para secagem

Realizados todos os pré-tratamentos e pré-processamentos no material, este se encontra apto à entrada no sistema de secagem. A partir das suas características finais tais como: granulometria, densidade aparente, ângulo de talude, umidade inicial e final desejada, dentre outras, é que se pode escolher o tipo de secador mais adequado ao processo e também o que necessita de menor quantidade de energia para retirar a massa de água desejada, ou seja, o que apresenta a maior eficiência energética no processo. A partir das características do material podem ser selecionados diferentes tipos de secadores, porém a eficiência energética é um fator primordial para a viabilidade econômica do sistema escolhido, merecendo uma avaliação cuidadosa nas etapas iniciais de projeto conforme demonstrado na sequência.

4.5.2. Análise da eficiência energética do sistema

A eficiência energética de um sistema de secagem pode ser descrita através da seguinte equação (Strumillo e Lopez-Caciedo, 1987):

$$(\eta_e) = \frac{\text{Energia mínima para evaporação}}{\text{Energia total fornecida}} \quad (\%)$$

Conforme Silveira et al (1995), o desempenho de secadores varia de acordo com fatores como umidade inicial e final do produto, temperatura e propriedades físicas, resistência oferecida pelo fluxo do ar, condições ambientais (temperatura e umidade relativa), tipo de sistema de aquecimento do ar e tipo de ventilador. Outra abordagem sugere que a avaliação de secadores seja baseada na análise dos parâmetros de umidade média inicial e final do produto, umidade relativa ambiente e do ar de secagem, temperatura de bulbo seco e úmido do ar de secagem e do ambiente, densidade do fluxo de ar, quantidade de material a ser desidratado ou seco, tempo de secagem, pressão estática, características do ventilador e do combustível utilizado, capacidade de secagem e eficiência energética (kJ de energia de aquecimento/kg de água evaporada)(Baker-Arkema, 1976).

Alguns fatores essenciais são apresentados na avaliação do desempenho de secadores, destacando-se as seguintes figuras de mérito (Pakowski et al, 1995):

$$\text{Eficiência térmica (ET)} = \frac{\text{Massa de água evaporada}}{\text{Energia térmica total fornecida}} \text{ (kg/kJ)}$$

$$\text{Consumo específico de energia (CEE)} = \frac{\text{Energia total fornecida}}{\text{Massa de água evaporada}} \text{ (kJ/kg)}$$

O consumo energético no processo de secagem pode ser representado por unidade de energia consumida para evaporar 1 kg de água. Para processo em batelada, em geral, consomem-se de 2700 a 6500 kJ/kg. Teoricamente, a energia necessária para a evaporação de 1 kg de água em condição padrão é de 2200 a 2700 kJ/kg (Strumillo et al, 1995). De acordo com Danilov e Leontchik (1986), balanços de energia em secadores convectivos mostram que do total de energia fornecida ao processo de secagem, 20 a 60% são usados na evaporação da água, 5 a 25% para aquecimento do material, 15 a 40% são perdidos com o ar de saída, 3 a 10% são perdidos para a atmosfera através das paredes do secador e 5 a 20% são considerados em outras perdas.

Assim, com base nas características do material pré-tratado e pré-processado e nos critérios explicitados anteriormente torna-se possível simular qual o sistema de secagem que proporciona um material seco de melhor qualidade e mais eficiente sob o ponto de vista energético. O fluxograma a seguir ilustra a etapa final da metodologia desenvolvida neste trabalho:

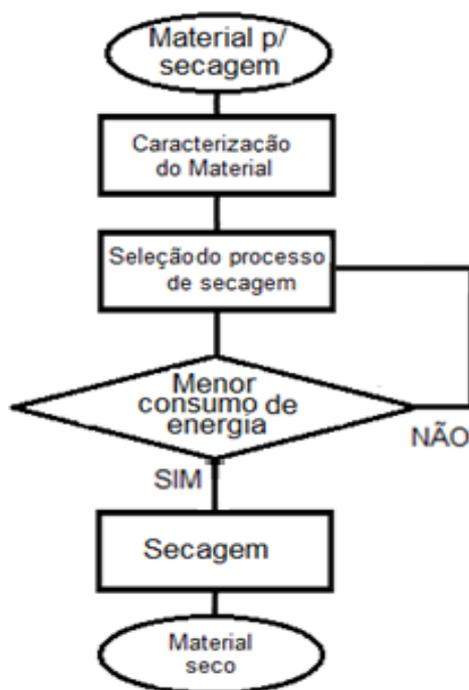


Figura 9 – Fluxograma final do processo de secagem

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Produção de farinha de casca de banana

A casca de banana apresenta elevado valor nutricional, com grande concentração de fibras e potássio, tornando possível a utilização destas cascas para a produção de compostos alimentares de alto valor agregado, voltados á alimentação humana. Especificamente, este produto pode ser utilizado como ingrediente no segmento de suplementos alimentares para praticantes de atividades físicas bem como para os adeptos de dietas alimentares ricas em fibras ou até mesmo visando á substituição da farinha de trigo tradicional, sendo indicada ao público celíaco que apresenta intolerância ao glúten proveniente do trigo.

Entretanto, foi verificado um grande entrave para a efetivação desse cenário: o elevado teor de água encontrado nas cascas, em torno de 89 a 93%, fato que implica em um elevado gasto de energia para a secagem destes resíduos, o que tende a inviabilizar economicamente a operação.

5.2. Oferta de casca de banana como matéria-prima

Para o estudo de caso em questão, utilizou-se o exemplo de uma empresa localizada na cidade de Pedralva/MG que trabalha com a produção de polpa de banana, atingindo um volume mensal de 100 toneladas de produto processado, tendo como subproduto de sua atividade em torno de 40 toneladas de cascas por mês que são descartadas no meio-ambiente. Como fonte de calor, a empresa utiliza vapor proveniente de uma caldeira à lenha de passo único com capacidade para produção de vapor de 200 kg/h. Entretanto, esta apresenta um elevado consumo de lenha, em torno de 30 m³/mês, devido ao longo tempo de uso do equipamento. Em um primeiro momento, optou-se pela utilização da própria caldeira da empresa para a validação do estudo em questão, mas o uso de um equipamento mais novo e com um número maior de passos tende a reduzir o consumo de lenha e aumentar a rentabilidade do negócio.

5.3. Caracterização da matéria-prima “in natura”

Alguns estudos científicos tem relatado a composição de cascas de banana conforme ilustra a Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Teor de Nutrientes de cascas de frutas (Gondim et al, 2005)

Parâmetro	100 g de amostra <i>in natura</i> das cascas de frutas						
	Abacate	Abacaxi	Banana	Mamão	Maracujá	Melão	Tangerina
Umidade (g)	76,95	78,13	89,47	90,63	87,64	93,23	49,10
Cinzas (g)	0,75	1,03	0,95	0,82	0,57	0,96	1,75
Lipídeos (g)	11,04	0,55	0,99	0,08	0,01	0,10	0,64
Proteínas (g)	1,51	1,45	1,69	1,56	0,67	1,24	2,49
Fibras (g)	6,85	3,89	1,99	1,20	4,33	1,42	10,38
Carboidratos (g)	2,90	14,95	4,91	5,71	6,78	3,05	35,64
Calorias (Kcal)	117,02	70,55	35,30	29,80	29,91	18,05	158,30
Cálcio (mg)	123,94	76,44	66,71	55,41	44,51	14,69	478,98
Ferro (mg)	2,18	0,71	1,26	1,10	0,89	0,40	4,77
Sódio (mg)	76,75	62,63	54,27	53,24	43,77	8,54	77,76
Magnésio (mg)	26,24	26,79	29,96	24,52	27,82	13,27	159,59
Zinco (mg)	1,24	0,45	1,00	0,56	0,32	0,23	2,83
Cobre (mg)	0,18	0,11	0,10	0,11	0,04	0,07	0,58
Potássio (mg)	236,70	285,87	300,92	263,52	178,40	110,39	598,36

As cascas de bananas consumidas geralmente são descartadas, utilizadas na alimentação animal, ou eventualmente utilizadas na compostagem (Bakry et al, 1997). O descarte dessas cascas causa problemas ambientais (Zhang et al, 2005) e, atualmente, existem poucos trabalhos na literatura que mencionam o aproveitamento destes resíduos. Alguns artigos tratam de diferentes aplicações práticas para a casca de banana, como por exemplo, a produção de álcool (Tewari et al, 1986), de metano (Gunaseelan, 2004; Bardyia et al, 2004), a alimentação animal (Onwuka et al, 1997) ou o emprego como adsorventes para purificação de água (Annadurai et al, 2004).

No entanto, substâncias de alto valor agregado têm sido identificadas em cascas de banana. Alto conteúdo de compostos pró-vitamina A como trans α -caroteno, trans β -caroteno e β -criptoxantina foram encontrados em bananas da espécie Musa Cavendish (Nanica), sendo que na casca o conteúdo de carotenoides é mais significativo e conta com uma variedade de compostos maior do que na polpa da banana (Davey et al, 2006). O conteúdo de ácidos graxos das cascas de banana nanica foi avaliado apresentando quantidades significativas de ácidos graxos insaturados, principalmente, ácido linoleico e α -linolênico que corresponderam a mais de 40% do total de ácidos graxos presente na

casca (Emaga et al, 2007). Também foram identificados os seguintes fitoesteróis e triterpenos no insumo em questão: β -sitosterol, stigmasterol, campesterol, cicloeucalenol, cicloarteno e 24-metileno cicloartanol. O interesse principal do estudo de fitoesteróides encontra-se na sua efetividade em reduzir a absorção intestinal do colesterol e, portanto, proteção contra doenças cardiovasculares (Knapp, 1969). No entanto, estudos epidemiológicos e experimentais sugerem que os fitoesteróis provenientes da dieta também podem oferecer proteção contra os tipos de câncer mais comuns, como câncer de cólon, de mama e de próstata (Awad e Fink, 2000).

Verificadas as propriedades gerais do material partiu-se para uma análise mais prática visando à determinação do teor de água das cascas provenientes da empresa mencionada anteriormente, visto que este pode variar conforme as condições do ambiente e alterar os parâmetros de secagem. O experimento foi realizado no Laboratório de Bromatologia do Centro Universitário de Itajubá (FEPI) utilizando o método de estufa à pressão atmosférica, com controle termostático, à temperatura uniforme de 105°C pelo tempo de 24 horas, conforme norma da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000). A determinação da umidade da amostra de casca de banana foi realizada em triplicata e os resultados expressos através da média dos três valores obtidos.



Figura 10 – Amostra de 1 kg de cascas de banana utilizadas no experimento

5.4. Pré-tratamento da matéria prima

Com o manuseio das cascas foi constatada uma rápida deterioração do produto devido a atividades enzimáticas que contribuem para seu escurecimento e degradação. Assim, para a garantia de qualidade do produto final após o processo de secagem é necessária à higienização e neutralização das cascas através do uso de agentes químicos capazes de inibir a rápida atividade microbiológica. Para isso as cascas foram fervidas por 5 min em solução de água com ácido cítrico a 2%. As figuras a seguir ilustram o aspecto dos resíduos antes e depois do processo de branqueamento:



Figura 11 – Produto antes do branqueamento



Figura 12 – Produto após o branqueamento

Após o pré-tratamento do material verificou-se que este apresentou aspecto adequado aos padrões de qualidade exigidos pelo mercado, entretanto ocorreu a absorção de uma quantidade significativa de água, em torno de 20%. O produto obtido poderia ser processado diretamente em um secador de bandeja. Entretanto, devido a grande quantidade de material a ser processado, elevada umidade inicial e o longo

tempo de secagem (10 a 60 min) do equipamento, conforme já mostrado na Tabela 2, este processo seria inviável economicamente devido ao elevado consumo de energia.

5.5. Pré-processamento da matéria-prima tratada

O material pré-tratado foi então submetido às etapas de pré-processamento já mencionadas na metodologia. Para isso, foram realizados experimentos com intuito de avaliar as características do resíduo em virtude da desuniformidade do lote quanto ao tamanho das partículas, com as cascas sendo submetidas à moagem em moinho de carne conforme demonstrado na figura a seguir:



Figura 13 – Moagem das cascas pré-tratadas

Após a moagem, o produto foi submetido a uma prensagem com auxílio de um pano visando á simulação de um filtro-prensa, resultando no material ilustrado na Figura 14:



Figura 14 – Produto após prensagem

Após estas etapas, foi possível constatar uma grande redução no teor de umidade inicial, em torno de 30%. Este fato se deve, principalmente, a característica fibrosa das cascas de banana, onde a umidade não se encontra ligada a estrutura química do material, possibilitando sua remoção através de processos mecânicos.

5.6. Mistura de material úmido e seco

Para melhorar as características granulométricas e reduzir ainda mais o teor de umidade inicial apresentado pelo material, este foi então submetido à última etapa de pré-processamento que consiste na mistura do material úmido com o produto seco. Para a execução dessa etapa, o material pré-processado foi submetido à secagem por um período de 24 horas em um desidratador de alimentos da marca funkitchen que é ilustrado na Figura 15.



Figura 15 – Desidratador utilizado para a secagem do produto pré-seco

O material seco foi então misturado ao material úmido em uma proporção de 50% de forma a simular uma possível etapa de recirculação do produto após o processo de secagem. Com esta etapa foi possível verificar uma redução de 60% para 35% no teor de umidade inicial, além de proporcionar uma maior homogeneização do material pré-seco, fato que tende a evitar a aglomeração de sólidos no fundo do secador em decorrência da granulometria e peso das partículas que não puderem ser transportadas na corrente de ar quente dependendo do tipo de secador a ser utilizado. O fluxograma a seguir resume todas as etapas e resultados dos testes realizados com a amostra inicial de 1 kg de cascas:

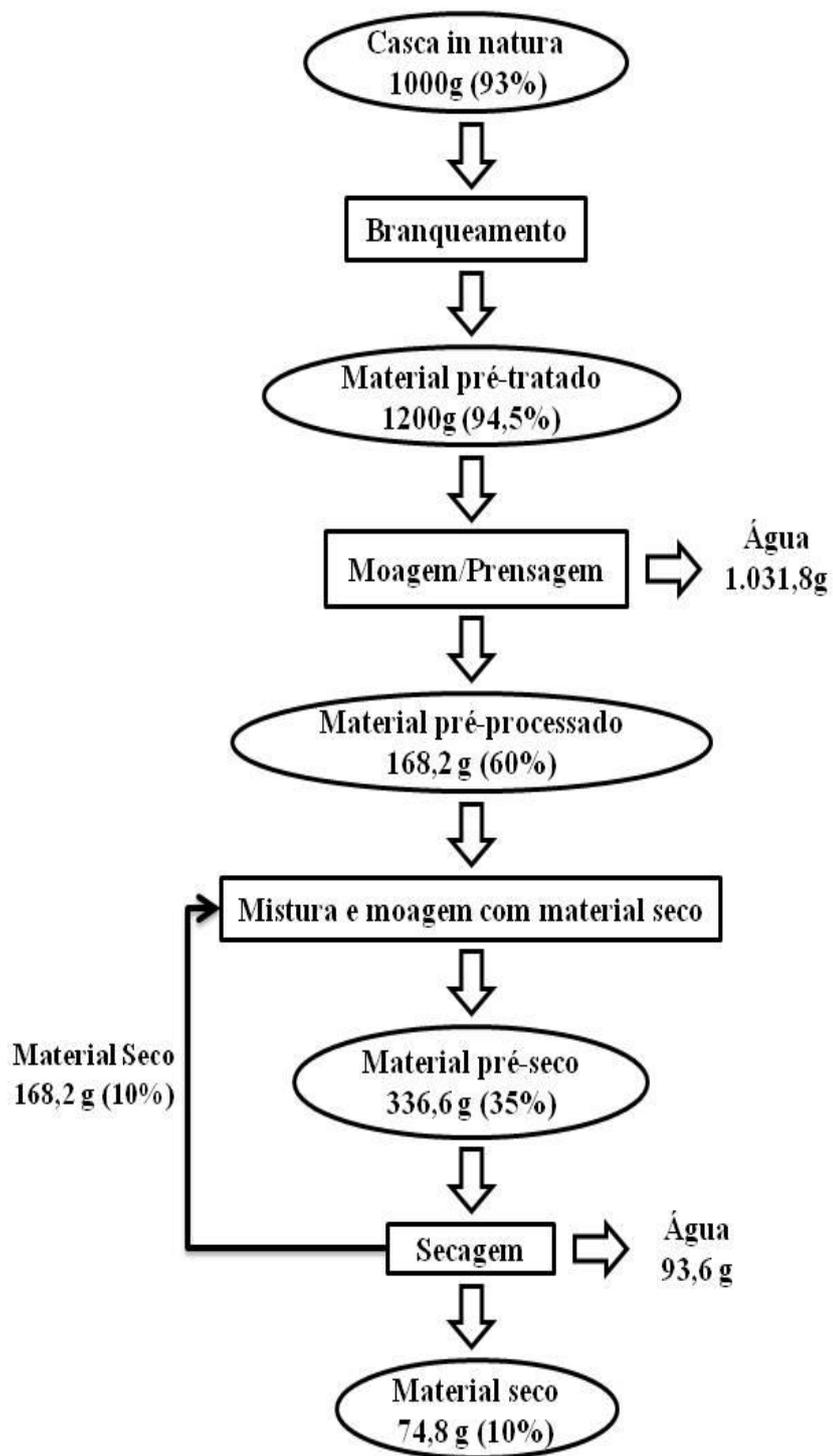


Figura 16 – Fluxograma final do processo

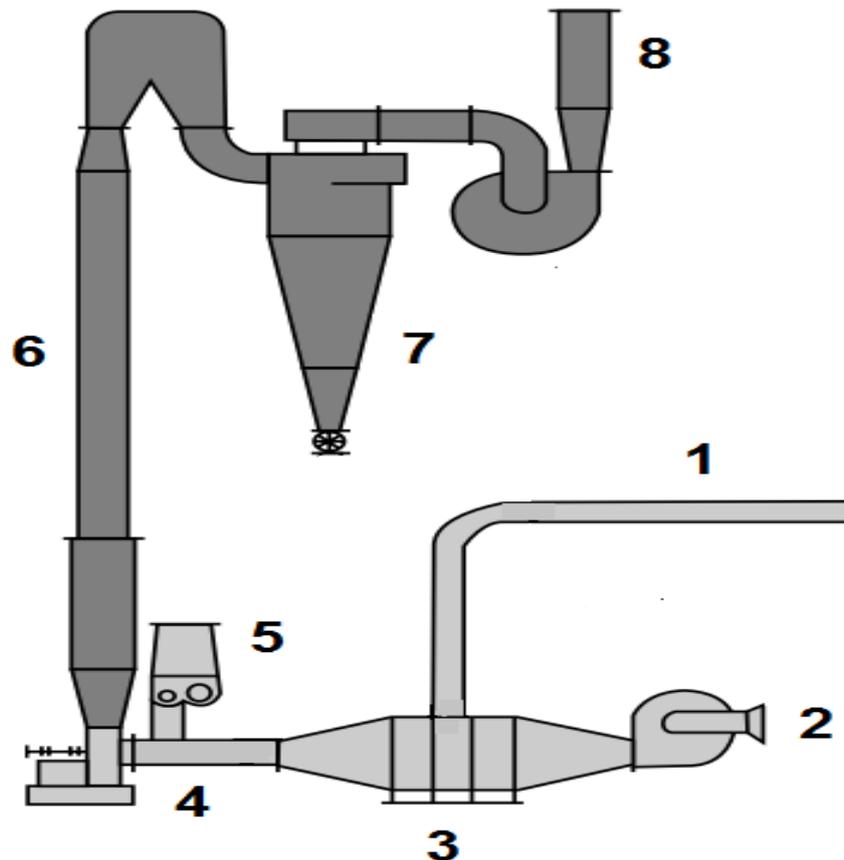
5.7. Seleção do secador para secagem final

De posse das informações a respeito das características do produto a ser desidratado e das fontes de calor disponíveis no local de operação, partiu-se para a análise do tipo de secador que melhor se adequaria ao projeto em questão. Conforme já mencionado, foi possível verificar a consistência fibrosa do material e ainda a possibilidade deste ser reduzido a pequenos grânulos de fluxo livre através de processos de moagem, prensagem e mistura, sendo classificado como produto higroscópico conforme Van Brackel (1980). Além disso, devido à grande quantidade de produto a ser processado, em torno de 2 toneladas por dia, foi constatada a necessidade de um secador com menor tempo de residência, condição que permite um escoamento mais rápido da produção bem como uma baixa exposição do material ao calor evitando assim a perda de nutrientes.

Comparando as necessidades acima com as Tabelas 1, 2 e 3 de seleção de secadores descritas na revisão bibliográfica foi possível verificar que o secador do tipo pneumático seria o mais adequado ao processo em questão. O produto pré-processado obtido também poderia ser seco através de um secador do tipo rotativo, porém devido a sua granulometria e possibilidade de fluxo livre, optou-se pelo sistema do tipo pneumático, de menor consumo energético, menor tempo de residência e maior coeficiente de transferência de calor volumétrico em relação ao secador rotativo, fatores que contribuem para o aumento da eficiência energética de secagem ao mesmo tempo em que é evitada uma longa exposição ao calor e, conseqüentemente, a perda de nutrientes do material a ser processado.

De acordo com a literatura científica, o sistema de secagem flash dryer é uma das tecnologias amplamente utilizadas no processamento de alimentos e produtos farmacêuticos, pois alia a economia de energia proporcionada pela elevada transferência de calor gás-sólido durante o transporte pneumático entre trocadores de calor e o ciclone com o baixo tempo de exposição dos materiais mais sensíveis ao calor, evitando a degradação pela alta temperatura e a perda na qualidade do produto (Jain et al, 1999). Devido à crescente demanda por sistemas de secagem pneumáticos e as exigências de projeto no que tange a eficiência energética e o baixo consumo de recursos, extensos estudos experimentais e teóricos desse processo de secagem foram realizados durante os últimos anos (Baeyens et al, 1995; Kemp et al, 1991; Levy e Borde, 1999; Levy e

Borde, 2001; Rajan et al, 2008; Skuratovsky et al, 2003; Skuratovsky e Levy, 2004; Skuratovsky et al, 2005; Tanaka et al, 2008). A Figura 17 mostra os componentes básicos desse tipo de secador:



- | | | |
|--------------------|-----------------------|--------------------------|
| (1) Linha de Vapor | (2) Ventilador Siroco | (3) Gerador de ar quente |
| (4) Tubo Venturi | (5) Alimentador | (6) Coluna de secagem |
| (7) Ciclone | (8) Saída de ar | |

Figura 17 – Componentes do Secador Pneumático (Taylor and Francis Group, 2006)

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificada a eficácia na redução da umidade inicial durante as etapas de pré-processamento da matéria-prima e escolhido o tipo de secador mais apropriado, parte-se para a análise das possíveis economias de energia do processo visando à validação da metodologia proposta no estudo de caso. Para isso, os gastos de energia térmica da etapa de secagem e o custo por kg de produto processado foram estimados para efeito de comparação em dois cenários: o primeiro simulando o processo de secagem direta do material em secador de bandeja o segundo simulando o processo sugerido pela metodologia em questão no secador pneumático. O último cenário foi dividido em duas etapas com o objetivo de verificar isoladamente o potencial de redução de energia térmica tanto da etapa de moagem e prensagem quanto na etapa de mistura do produto seco ao úmido. Para a avaliação desses parâmetros foram adotadas as seguintes premissas:

- Inicialmente, foi realizado um balanço de massa do processo considerando um regime de trabalho de 30 dias em um mês com 8 horas de operação por dia. Dessa forma, dividindo-se a quantidade total de 40 toneladas de cascas por mês por 30 e depois por 8, chega-se a uma vazão mássica de 250 kg/h de cascas de banana a serem submetidas à secagem.
- De acordo com os experimentos realizados anteriormente, o teor de umidade inicial das cascas foi de 94,5% e o teor de umidade final desejado foi estimado em 10%.
- Como fonte de calor, foi considerada a própria caldeira existente na empresa onde foi realizado o estudo de caso com capacidade de produção de 200 kg/h de vapor. Além disso, adotou-se o valor de 6.000 kJ/kg para a energia necessária a evaporação da água utilizando o secador de bandeja e 4.500 kJ/kg para o pneumático conforme indicado na Tabela 3 e 664 kcal/kg o que equivale a 2.780 kJ/kg para a entalpia do vapor, ou seja, a energia térmica provida por 1 kg de vapor a 10 bar de pressão conforme mostrado na Tabela 5. Também foi considerado o custo de R\$80,00 por m³ de lenha de *Eucalyptus citriodora* com uma densidade de 350 kg/m³ a 35% de umidade e poder calorífico útil de 3.355 kcal/kg ou 14.047 kJ/kg de acordo com a Tabela 4.

6.1. Secagem Direta

Neste caso foram avaliadas as necessidades de energia térmica para a secagem direta das cascas em um secador de bandeja hipotético, sem a passagem pelas etapas de pré-processamento já descritas anteriormente. A Figura 25 ilustra os fluxos de massa na entrada e na saída do processo:

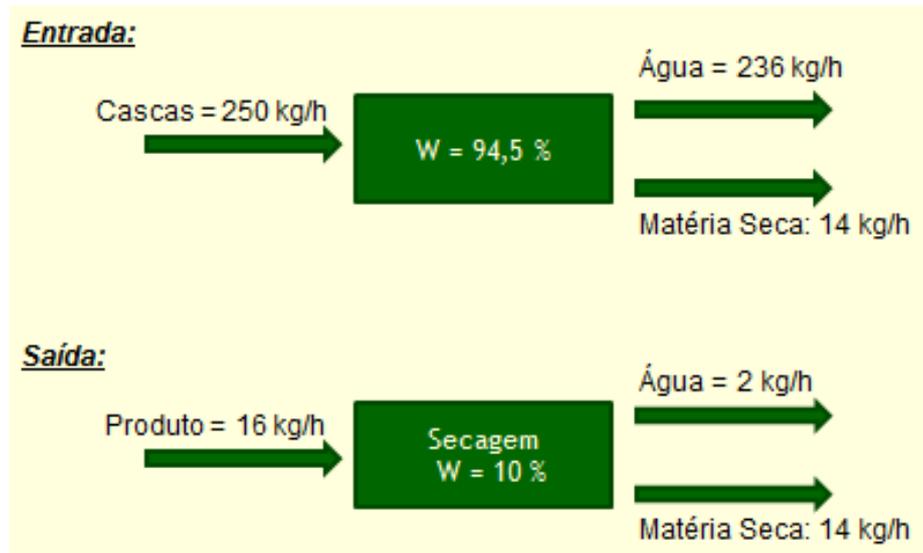


Figura 18 – Balanço de massa do sistema para a secagem direta

É possível notar através da figura que a vazão total de água que se deseja evaporar pode ser calculada como a vazão de água na entrada subtraída da vazão na saída, ou seja:

$$V_T = V_E - V_S = 236 - 2 = \mathbf{234 \text{ kg/h de água}}$$

Calculada a vazão total de água para evaporação no processo de secagem é possível então estimar a potência térmica do sistema. A energia necessária para a evaporação de 1 kg de água é de 6.000 kJ, logo:

$$P_{TH} = V_T \times E_E = 234 \text{ [kg/h]} \times 6.000 \text{ [kJ/kg]} = \mathbf{1.404.000 \text{ kJ/h}}$$

Considerando que a fonte de energia térmica na área de estudo é uma caldeira a vapor e que este possui um valor de entalpia em torno de 2.780 kJ/kg é possível estimar a vazão de vapor necessária a sustentação do processo:

$$V_V = P_{TH} / h_V = 1.404.000 \text{ [kJ/h]} / 2.780 \text{ [kJ/kg]} = \mathbf{505 \text{ kg/h de vapor}}$$

Como a caldeira existente na área de estudo é de apenas 200 kg/h de vapor, não seria possível suprir a quantidade de energia necessária ao processo de secagem, levando a necessidade da aquisição de um equipamento com maior capacidade de geração de vapor. Além disso, considerando que 1 kg de lenha de Eucalipto citriodora tem um poder calorífico útil de 14.047 kJ é possível estimar o consumo de lenha do processo:

$$C_L = P_{TH} / PCU = 1.404.000 \text{ [kJ/h]} / 14.047 \text{ [kJ/kg]} = \mathbf{100 \text{ kg/h de lenha}}$$

Conforme já mencionado, 1 m³ de lenha custa em torno de R\$80,00 e a densidade da lenha é de 350 kg/m³. Logo, é possível estimar o custo da energia consumida na etapa de secagem:

$$C_E = C_L \times (P_L/D) = 100 \text{ [kg/h]} \times (80 \text{ [R\$/m}^3\text{]} / 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}) = \mathbf{22,85 \text{ R\$/h}}$$

De acordo com a Figura 25, na saída do processo são obtidos 14 kg/h de produto seco, logo é possível calcular o custo da energia consumida e o gasto energético por kg de material processado da seguinte maneira:

$$C_E = 22,85 \text{ [R\$/h]} / 14 \text{ [kg/h]} = \mathbf{1,63 \text{ R\$/kg}}$$

$$E_{TH} = 1.404.000 \text{ [kJ/h]} / 14 \text{ [kg/h]} = \mathbf{100.286 \text{ kJ/kg}}$$

Logo, é possível observar que a cada kg de produto seco obtido são gastos 100.286 kJ de energia térmica e R\$1,63 com a aquisição de lenha para o processo de secagem.

6.2. Secagem utilizando a metodologia proposta

6.2.1. Processos mecânicos de desaguamento

Com a aplicação da metodologia desenvolvida, foram avaliadas as necessidades de energia térmica para a secagem das cascas utilizando o secador pneumático com as etapas de pré-tratamento: moagem e prensagem. A Figura 26 ilustra os fluxos de massa na entrada e na saída do processo em questão:



Figura 19 – Balanço de massa do sistema com a etapa de moagem e prensagem

É possível notar através da figura que a vazão total de água que se deseja evaporar pode ser calculada como a vazão de água na entrada do processo de secagem subtraída da vazão na saída, ou seja:

$$V_T = V_E - V_S = 21 - 2 = 19 \text{ kg/h de água}$$

Calculada a vazão total de água para evaporação no processo de secagem é possível então estimar a potência térmica do sistema. A energia necessária para a evaporação de 1 kg de água é de 4.500 kJ, logo:

$$P_{TH} = V_T \times E_E = 19 \text{ [kg/h]} \times 4.500 \text{ [kJ/kg]} = 85.500 \text{ kJ/h}$$

Considerando que a fonte de energia térmica na área de estudo é uma caldeira a vapor e que este possui um valor de entalpia em torno de 2.780 kJ/kg é possível estimar a vazão de vapor necessária a sustentação do processo:

$$V_V = P_{TH} / h_V = 85.500 \text{ [kJ/h]} / 2.780 \text{ [kJ/kg]} = \mathbf{31 \text{ kg/h de vapor}}$$

É possível verificar através deste cenário que ocorre uma redução no consumo de vapor no processo de 505 kg/h para 31 kg/h, ou seja, uma redução de aproximadamente 93,8% no consumo de energia térmica para a secagem das cascas. Além disso, também seria possível utilizar a própria caldeira existente na área de estudo, com capacidade de 200 kg/h de vapor, evitando assim o investimento em um novo equipamento de maior capacidade de geração de vapor. Além disso, considerando que 1 kg de lenha de Eucalipto citriodora tem um poder calorífico útil de 14.047 kJ é possível estimar o consumo de lenha do processo:

$$C_L = P_{TH} / PCU = 85.500 \text{ [kJ/h]} / 14.047 \text{ [kJ/kg]} = \mathbf{6 \text{ kg/h de lenha}}$$

Conforme já mencionado, 1 m³ de lenha custa em torno de R\$80,00 e a densidade da lenha é de 350 kg/m³. Logo, é possível estimar o custo da energia consumida na etapa de secagem:

$$C_E = C_L \times (P_L/D) = 6 \text{ [kg/h]} \times (80 \text{ [R\$/m}^3\text{]} / 350 \text{ [kg/m}^3\text{]}) = \mathbf{1,37 \text{ R\$/h}}$$

De acordo com a Figura 26, na saída do processo são obtidos 14 kg/h de produto seco, logo é possível calcular o custo da energia consumida e o gasto energético por kg de material processado da seguinte maneira:

$$C_E = 1,37 \text{ [R\$/h]} / 14 \text{ [kg/h]} = \mathbf{0,09 \text{ R\$/kg}}$$

$$E_{TH} = 85.500 \text{ [kJ/h]} / 14 \text{ [kg/h]} = \mathbf{6.107 \text{ kJ/kg}}$$

Logo, é possível observar que a cada kg de produto seco obtido são gastos 6.107 kJ de energia térmica e R\$0,09 com a aquisição de lenha para o processo de secagem,

ou seja, houve uma economia de 94.179 kJ e R\$1,54 por kg de produto seco obtido ao final do processo de secagem.

6.2.2. Mistura de material úmido e seco

A última etapa de pré-processamento da matéria-prima consiste na mistura do material úmido com o material seco, visando a redução do teor de umidade inicial do produto para a entrada na etapa de secagem. Neste caso foi considerada uma mistura de 50% de produto com seco com 10% de umidade. A Figura 27 ilustra os fluxos de massa na entrada e na saída deste processo:

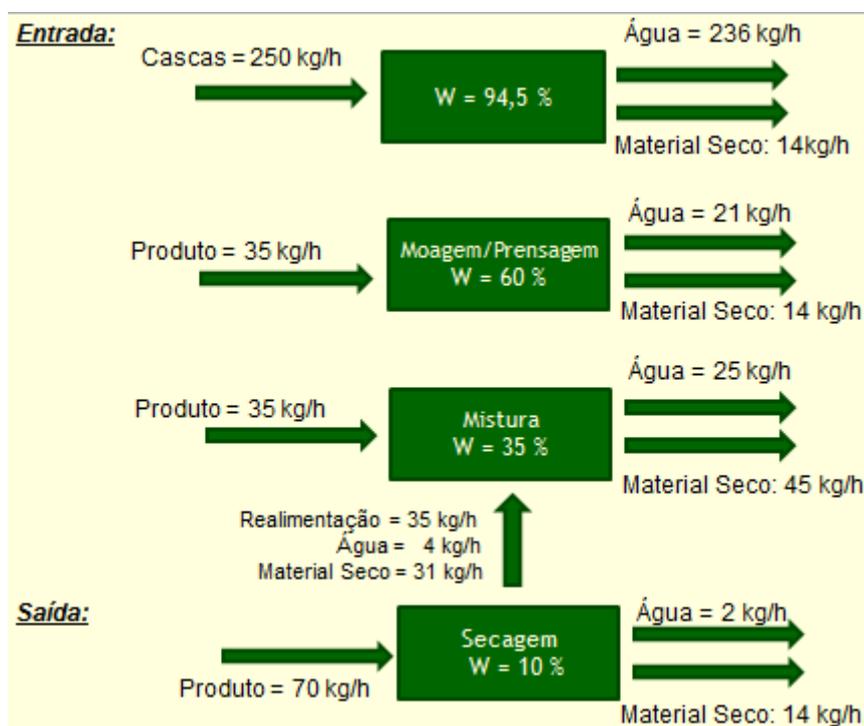


Figura 20 – Balanço de massa do sistema com a etapa de moagem, prensagem e mistura do produto seco.

É possível notar através da figura que a vazão total de água que se deseja evaporar pode ser calculada como a vazão de água na entrada do processo de secagem subtraída da vazão na saída e da vazão que recircula para a entrada, ou seja:

$$V_T = V_E - V_S = 25 - 4 - 2 = \mathbf{19 \text{ kg/h de água}}$$

Entretanto, a quantidade de água a ser evaporada é a mesma da etapa anterior, o que evidencia que este processo não contribui para uma maior redução no consumo de vapor. Logo, a mistura do produto úmido ao seco tende a otimizar apenas as características granulométricas através de uma maior homogeneização do material, incorrendo em melhores propriedades de fluxo livre e dispersão deste na corrente de ar do secador pneumático, porém sem agregar valor ao processo em termos energéticos.

7 - CONCLUSÕES

Com a finalização do trabalho e do estudo de caso em questão foi possível chegar as seguintes conclusões:

- A metodologia proposta neste trabalho contribuiu para a redução do consumo de energia térmica e viabilização do processo de secagem para o estudo de caso avaliado, podendo também ser aplicada a outros tipos de resíduos agroindustriais;
- As cascas de banana, apesar do elevado teor de água, possuem grandes quantidades de fibras, potássio e outros nutrientes de elevado valor agregado, porém foi constatada uma rápida deterioração do produto devido a atividades microbiológicas que contribuem para o escurecimento e estragamento deste. Assim, para o processo de secagem é necessária uma etapa adicional de pré-tratamento para a higienização e neutralização das cascas através do uso de ácido cítrico ou outro agente químico;
- Para a secagem das cascas de banana, o secador do tipo pneumático foi o mais adequado devido as características não-higroscópicas e fibrosas do material, baixo tempo de residência e maior eficiência energética em relação aos demais tipos de secadores;
- Os processos de pré-tratamento (moagem, prensagem e mistura) contribuíram para a redução de 94,5% para 35% do teor de umidade inicial da matéria-prima;
- As etapas de moagem e prensagem contribuíram para uma redução de 93,8% no consumo de vapor no processo, levando a uma economia de 94.179 kJ e R\$1,54 por kg de produto seco obtido em comparação a secagem direta do material. Já a etapa de mistura do produto úmido com produto seco contribui apenas para a melhoria das características de fluxo livre do material, não apresentando melhorias sob o ponto de vista energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17 th ed. Gaithersburg, v.2, 2000.

Annadurai, G.; Juang, R. S.; Lee, D. J. Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels. *Water Science and Technology*. v. 47, p 185–190, 2004.

Ashworth, J.C., Use of Bench Scale Tests for Dryer Design, Industrial Drying Short Course, Department of Chemical Engineering, McGill University, 1978.

Awad, A. B.; Fink, C. S. Phytosterols as anticancer dietary components: evidence and mechanism of action. *Journal of Nutrition*. 130, p. 2127-2130. 2000.

Baeyens, J., van Gauwbergen, D., Vinckier, I. Pneumatic drying: the use of largescale experimental data in a design procedure, *Powder Technology* 83 (1995)139–148.

Baker-Arkema, F.W.; Lerew, L.E; Brook, R.C; Brooker, D.B. Energy and capacity performance evaluation of grain dryers. St. Joseph: Michigan, ASAE, 13p, 1978.

Bakry, F.; Carrel, F.; Caruana, M. L.; Cote, F. X.; Jenny, C.; Tezenas, D. H. Les bananiers. Amelioration des plantes tropicales, CIRAD-ORSTOM, p. 109– 139, 1997.

Bardiya, N.; Somayaji, K. Biomethanation of banana peel and pineapple waste. *Bioresource Technology*. v. 58, p. 73–76, 1996.

Celestino, S.M.C. Princípios de Secagem de Alimentos – Planaltina/DF: Embrapa Cerrados, 2010.

Cook, E.M. and Dumont, D., Process Drying Practice, McGraw-Hill, New York, 1991.

Danilov, O.L.; Leontchik, B.I. Energy economic in thermal drying. Moscow. 1986.

Davey, M.W.; Keulemans, J.; Swennen, R. Methods for the efficient quantification of fruit provitamin A contents. *Journal of Chromatography A*. v. 1136, p. 176-184, 2006.

Emaga, T. H.; Andrianaivo, R. H.; Wathelet, B.; Tchango, J. T.; Paquot, M. Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plaintais peels. *Food Chemistry*. v.103, p. 590-600, 2007.

Fellows, P.J. *Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípio e Prática*. 2 ed. São Paulo: Artmed, 2006. 602p.

Garbosa, F., Trindade, J. L. Bioconversão de resíduos agroindustriais – uma revisão. In: Santos Junior, G.; Almeida, D.; Michaloski, A. *Série em Ciência e Tecnologia de Alimentos: Agroindústria, Energia e Meio Ambiente*. Ponta Grossa : UTFPR, v.2, n.4.2008.

Genskow, L.R., Guest Ed., Scale-up of Dryers, special issue of *Drying Technology*, 12(1–2), 1994.

Gondim, J. A. M., Moura, M.F.V., Dantas, A.S., Medeiros, R.L.S., Santos, K.M. Composição centesimal e de minerais em cascas de frutas *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 25(4): 825-827, out.-dez. 2005.

Gunaseelan, V., N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, p389–399, 2004.

Houska, K., Valchar, J., and Viktorin, Z., Computer aided design of dryers, in *Advances in Drying*, Vol. 4(A.S. Mujumdar, Ed.), Hemisphere, New York, 1987, pp. 1–98.

Jain, P., Raghuraman, P., Pitchumani, B. *Gas–Solid Heat Transfer during Pneumatic Conveying Between Cyclone Heat Exchangers, Fluid Particle Interactions V*, New York, 1999.

Keey, R.B., *Drying: Principles and Practice*, Pergamon Press, Oxford, 1972.

Keey, R.B., Introduction to Industrial Drying Operations, 1st ed., Pergamon Press, New York, 1978, chap.2.

Keey, R.B., Drying of Loose and Particulate Materials, Hemisphere, New York, 1992.

Kemp, I.C., Oakley, D.E., Bahu, R.E. Computational fluid dynamics modelling of vertical pneumatic conveying dryers, Powder Technology 65 (1991) 477–484.

Knapp, F.F.; Nicholas, H.J. The sterols and triterpenes of banana peel. Phytochemistry. v.8, n.1, p.207-214, 1969.

Kroll, K., Trockner und Trockungsverfahren, SpringerVerlag, Berlin, 1959.

Kudra, T., Mujumdar, A.S., Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker, New York, 2001, 457 pp.

Lang, R.W., in Proceedings of the First International Drying Symposium (A.S. Mujumdar, Ed.), Montreal, Science Press, Princeton, NJ, 1978.

Laufenberg, G.; Kunz, B.; Nystrom, M. Transformation of vegetable waste into value added products: (A) The upgrading concept; (B) Practical implementations. Bioresource Technology, v.87, n.2, p.167-198, 2003.

Levy, A., Borde, I. Steady state one dimensional flow model for a pneumatic dryer, Chemical Engineering and Processing 38 (1999) 121–130.

Levy, A., Borde, I. Two-fluid model for pneumatic drying of particulate materials, Drying Technology 19 (8) (2001) 1773–1788.

Martins, C.R., Farias, R. de M. Produção de Alimentos X Desperdício: Tipos, Causas e Como Reduzir Perdas na Produção Agrícola – Revisão. Revista da FZVA. Uruguaiana, v. 9, n.1, p. 20-32. 2002.

McCormick, P.Y., Chemical Engineering Handbook, 5th ed. (J.H. Perry, Ed.), McGraw-Hill, New York, 1973.

Menon, A.S., Mujumdar, A.S., Energy saving in the drying of solids, Indian Chem. Eng., 14(2), 8–13, 1982.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying Technology – An International Journal, Marcel Dekker, New York, 1982.

Mujumdar, A.S., Ed., Advances in Drying, Vol. 1 (1980), Vol. 2 (1982), Vol. 3 (1984), Hemisphere, New York.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying of Solids—Recent International Developments, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1987.

Mujumdar, A.S. and Roques, M., Eds., Drying 89, Hemisphere, New York, 1989.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying of Solids, Sarita, New Delhi, 1990, pp. 17–71.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying of Solids, Sarita Prakashan, Nauchandi Grounds, Meerut, UP, India, 1990.

Mujumdar, A.S., Filkova, I., Eds., Drying'91, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1991.

Mujumdar, A.S., Ed., Advances in Drying, Vol. 5 (1992), Hemisphere, New York.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying of Solids, Oxford/IBH, New Delhi, India, and International Publishers, New York, 1992.

Mujumdar, A.S., Ed., Drying'92, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1992.

Oliveira, L.F. et al. Aproveitamento alternativo da casca do maracujá amarelo (*Passiflora edulis* F. *Flavicarpa*) para a produção de doce em calda. *Revista Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, Campinas, v.22, n.3, p.259-262, Setembro/Dezembro, 2002.

Onwuka, C. F. I., Adetiloye, P. O., & Afolami, C. A. Use of household wastes and crop residues in small ruminant feeding in Nigeria. *Small Ruminant Research*. v. 24, p 233–237, 1997.

Pakowski, Z.; Mujumdar, A. S. Basic Process calculations in drying. In: Mujumdar, A. S. *Handbook of industrial drying*. New York, 2ed, 1995, p.71-112.

Park, K. J., Antonio, G.C., Oliveira, R.A., Park, K.J.B. Seleção de processos e equipamentos de secagem. CONBEA, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

Pessoa, T. Avaliação do processo de obtenção de farinha da casca de banana (*Musa sapientum*) das variedades Prata, Pacovan e Maçã. 2009. 121p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

Rajan, K.S., Dhasandhan, K., Srivastava, S.N., Pitchumani, B. Studies on gas–solid heat transfer during pneumatic conveying, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008) 2801–2813.

Schlunder, E.U., *Handbook of Heat Exchange Design* (E. U. Schlunder et al., Eds.), Hemisphere, New York, 1982.

Silva, E. Biomassa cultivada para produção de energia: Estudo comparativo entre capim elefante e eucalipto com a incorporação da energia solar na secagem. Unifei, 2012.

Silveira, S. de F.R.; Silva, J. de S.; Pinto, F. de A.C. Custo de secagem. In: Silva, J. de S. *Pré-processamento de produtos agrícolas*. Instituto Maria, Juiz de Fora, 1995, cap.8. p.199-229.

Skuratovsky, I., Levy, A. Finite volume approach for solving multiphase flows in vertical pneumatic dryers, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 14 (8) (2004) 980–1001.

Skuratovsky, I., Levy, A., Borde, I. Two-fluid, two-dimensional model for pneumatic drying, *Drying Technology* 21 (9) (2003) 1645–1668.

Skuratovsky, I., Levy, A., Borde, I. Two-dimensional numerical simulations of the Pneumatic drying in vertical pipes, *Chemical Engineering and Processing* 44(2005)187–192.

Sloan, C.E., *Drying systems and equipment*, Chem. Eng., 19, 1967, 167.

Strumillo, C. and Kudra, T., *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach, New York, 1987.

Strumillo, C.; Jones, P.L.; Zylla, R. Energy aspects in drying. In: Mujumdar, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker, 1995, cap.40, p.1241-1275.

Strumillo, C.; Lopez-Caciedo, C. Energy aspects in Drying. In: Mujumdar, A.S. *Handbook of industrial drying*. Montreal, Quebec, Canadá. 1987, cap.27, p.823-862.

Tanaka, F., Maeda, Y., Uchino, T., Hamanaka, D., Atungulu, G.G. Monte Carlo simulation of the collective behavior of food particles in pneumatic drying operation, *LWT-Food Science and Technology* 41 (9) (2008) 1567–1574.

Tanaka, F., Uchino, T., Hamanaka, D., Atungulu, G.G. Mathematical modeling of pneumatic drying of rice powder, *Journal of Food Engineering* 88 (4) (2008) 492–498.

Taylor and Francis Group, LLC. *Handbook of industrial drying*, 2006.

Tewari, H. K.; Marwaha, S. S.; Rupal, K. Ethanol from bananas peels. *Agricultural Wastes*. v. 16, n.2, p135–146, 1986.

Toei, R., Course Notes on Drying Technology, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1980.

Turner, I. Mujumdar A.S., Eds., Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology, Marcel Dekker, New York, 1996, 679 pp.

Van Brackel, J., Mass transfer in convective drying, in Advances in Drying, Vol. 1 (A.S. Mujumdar, Ed.), Hemisphere, New York, 1980, pp. 217–268.

Van't Land, C.M., Industrial Drying Equipment, Marcel Dekker, New York, 1991.

Vergnaud, J.M., Drying of Polymeric and Solid Materials, Springer-Verlag, London, 1992.

Williams-Gardner, A., Industrial Drying, Leonard Hill, London, 1971, chaps. 2–4.

Zhang, P., Whistler, R. L., Bemiller, J. N., & Hamaker, B. R. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility – a review. Carbohydrate Polymers. v.59, p 443–458, 2005.