

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRENO RAPHAEL LOURENÇO

ESTUDO EXPERIMENTAL DA OPERAÇÃO DE SECAGEM EM SECADOR
ELÉTRICO TIPO CABINE

BELO HORIZONTE

2014

BRENO RAPHAEL LOURENÇO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA OPERAÇÃO DE SECAGEM EM SECADOR
ELÉTRICO TIPO CABINE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2014

BRENO RAPHAEL LOURENÇO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA OPERAÇÃO DE SECAGEM EM SECADOR
ELÉTRICO TIPO CABINE**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 25 de fevereiro de 2014.

Por:

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira
Orientador

Prof. M.Sc. Lindomar Matias Gonçalves

Prof. M.Sc. Humberto Barros de Oliveira

*Dedico este trabalho aos meus
pais, Francisco e Luzia, pelo
amor, dedicação e paciência; a
quem devo, abaixo de Deus,
a minha existência.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo entendimento, sabedoria, força e equilíbrio em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais por todo incentivo que me deram.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Guimarães Ferreira, pelos ensinamentos, orientação, paciência e dedicação que sempre demonstrou durante todo o processo de execução deste trabalho. Acompanhando as atividades desenvolvidas e dando total liberdade de criação e apoio nos momentos de dúvida.

Ao CEFET-MG pela estrutura proporcionada e pelo conhecimento adquirido durante todos os anos da graduação.

A todos os amigos que ajudaram de forma direta ou indireta para que esse projeto fosse finalizado.

*"Não sabendo que era impossível,
ele foi lá e fez".*

Jean Cocteau

RESUMO

O Brasil é um grande produtor mundial de frutas e alimentos altamente perecíveis, entretanto enfrenta sérios problemas com relação ao transporte, armazenamento e conservação desses alimentos, pois carece do desenvolvimento e pesquisa de processos de secagem eficientes que minimizem as perdas e aumentem a vida de prateleira de vários produtos. A desidratação é um dos processos mais importantes na conservação de alimentos. O produto a ser desidratado, passa por um secador em que se remove parcialmente a umidade, reduzindo a massa e o volume, garantindo facilidade de transporte devido a sua leveza e o aumento da vida útil, ao ser reduzida à atividade microbiana. A secagem pode ser feita basicamente através de dois processos: secadores solares e artificiais. Os secadores solares possuem baixo custo energético, contudo apresentam muitas restrições em função do alto índice de perdas, da baixa qualidade dos produtos desidratados e por depender necessariamente das condições climáticas que podem variar em cada região. Já os secadores artificiais são mais eficientes, pois contam com um sistema de aquecimento utilizando uma fonte de energia não renovável, sendo totalmente possível o controle do processo e a possibilidade de uso contínuo. Ensaio preliminares realizados mostraram que a vazão mássica de ar de operação do secador sugerida pela literatura, não estava sendo adequada, comprometendo a eficiência térmica do secador. Portanto, neste trabalho foram apresentados mecanismos para identificar e corrigir, por método experimental, a causa da secagem heterogênea (para diferentes posições na câmara de secagem) do protótipo construído de um secador elétrico do tipo cabine. Foi também avaliada a eficiência energética do dispositivo e a qualidade final do produto desidratado. A mudança estrutural realizada na parte interna do secador resultou em um fluxo de ar mais homogêneo, concentrando o calor nas regiões das bandejas e conseqüentemente uma menor diferença de temperatura.

Palavras-chave: Secagem. Secadores artificiais. Perdas térmicas. Heterogeneidade da secagem. Eficiência energética.

ABSTRACT

Brazil is a major global producer of fruit and highly perishable food, however faces serious problems regarding transport, storage and conservation of these foods, it lacks the research and development of efficient drying processes that minimize losses and increase shelf life various products. Dehydration is one of the most important processes in food preservation, the product to be dried passes through a dryer in which partially removes moisture, reducing the mass and volume, ensuring ease of transport due to its lightness and increased lifespan, to be reduced to microbial activity. Drying can be done essentially by two processes: solar and artificial dryers. Solar dryers have low energy cost, yet have many restrictions due to the high loss rate, low quality dried products and necessarily depend on the weather conditions which can vary in each region. Have artificial dryers are more efficient because they have a heating system using a non-renewable source of energy, which can fully control the process and the possibility of continuous use. Preliminary tests have shown that the mass flow of air dryer operation suggested by the literature, was not appropriate, compromising the thermal efficiency of the dryer. Therefore, this work mechanisms to identify and correct, by experiment, the cause of the heterogeneous drying (for different positions in the drying chamber) built the prototype of an electric dryer cabin type were presented. We also evaluated the energy efficiency of the device and the final quality of the dried product. Structural change made inside the dryer resulted in a more homogeneous flow of air, concentrating the heat in the regions of trays and consequently a smaller temperature difference.

Keywords: Dehydration. Drying. Artificial dryers. Thermal losses. Heterogeneity drying. energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 – Estrutura de madeira em caixeta..... **Erro! Indicador não definido.**6
- FIGURA 2 – Apresentação de corte longitudinal no secador elétrico proposto. **Erro! Indicador não definido.**17
- FIGURA 3 – Vista frontal do secador artificial. **Erro! Indicador não definido.**17
- FIGURA 4 – Célula de carga e bandejas em balanço. **Erro! Indicador não definido.**18
- FIGURA 5 - (a) Curva padrão de secagem e (b) velocidade de secagem. **Erro! Indicador não definido.**22
- FIGURA 6 – Movimento da umidade durante a secagem..... **Erro! Indicador não definido.**23
- FIGURA 7 – Secador para secagem artificial. **Erro! Indicador não definido.**32
- FIGURA 8 – Classificação dos secadores solares..... **Erro! Indicador não definido.**34
- FIGURA 9 – Secador solar de convecção natural tipo direto.3935
- FIGURA 10 – Secador solar de convecção natural tipo indireto.3936
- FIGURA 11- Princípio de funcionamento de um secador solar misto..... **Erro! Indicador não definido.**37
- FIGURA 12 – Secador de bandejas operando com circulação de ar..... **Erro! Indicador não definido.**38
- FIGURA 13 – Secador de bandeja (a) com fundo fechado e (b) com fundo telado **Erro! Indicador não definido.**39
- FIGURA 14 – (a) Esquema do meio secante atravessando a camada de produto (b) esquema do meio secante circulando sobre a camada do produto. **Erro! Indicador não definido.**39
- FIGURA 15 – Diagrama do secador rotativo para recobrimento de sementes. **Erro! Indicador não definido.**40
- FIGURA 16 – Secador com esteira transportadora. **Erro! Indicador não definido.**41
- FIGURA 17 – Representação esquemática de um leito fluidizado. **Erro! Indicador não definido.**42
- FIGURA 18 – Atomizador convencional..... **Erro! Indicador não definido.**43
- FIGURA 19 – Esquema de um liofilizador..... **Erro! Indicador não definido.**44
- FIGURA 20 – Secador mecânico de camada fixa para café . **Erro! Indicador não definido.**48

- FIGURA 21 – Secador convencional de bandejas. **Erro! Indicador não definido.**49
- FIGURA 22 – Secador de coluna estática com aquecimento por resistências elétricas..... **Erro! Indicador não definido.**50
- FIGURA 23 – Esquema do secador de leito fixo com fluxo ascendente .. **Erro! Indicador não definido.**51
- FIGURA 24 – Esquema do secador de bandejas **Erro! Indicador não definido.**52
- FIGURA 25 – Estrutura de bandejas do secador..... **Erro! Indicador não definido.**53
- FIGURA 26 – Estrutura de bandejas do secador..... **Erro! Indicador não definido.**54
- FIGURA 27 – Temperatura em função do tempo sem placas metálicas... **Erro! Indicador não definido.**57
- FIGURA 28 - .Velocidade de entrada numa circulação mínima e forçada de ar **Erro! Indicador não definido.**58
- FIGURA 29 – Variação da temperatura ambiente em função do tempo... **Erro! Indicador não definido.**58
- FIGURA 30 – Temperatura em função do tempo com as placas metálicas..... **Erro! Indicador não definido.**59
- FIGURA 31 – Diferença de temperatura do secador em função do tempo..... **Erro! Indicador não definido.**60
- FIGURA 32 – Temperaturas superior e inferior com velocidade mínima de escoamento. **Erro! Indicador não definido.**61
- FIGURA 33 – Umidade final da amostra em cada posição vertical sem a instalação das placas metálicas. **Erro! Indicador não definido.**62
- FIGURA 34 – Umidade final média da amostra com as placas metálicas e circulação máxima. **Erro! Indicador não definido.**63
- FIGURA 35 – Umidade final média da amostra com as placas metálicas e circulação mínima.. **Erro! Indicador não definido.**64
- FIGURA 36 – Relação entre a eficiência entre o secador branco e preto em função do tempo de secagem..... **Erro! Indicador não definido.**65
- FIGURA 37 – Perdas radiantes em função do tempo **Erro! Indicador não definido.**66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos produtos com seus secadores mais adequados.... **Erro! Indicador não definido.**45

Tabela 2 – Característica de secadores selecionados..... **Erro! Indicador não definido.**45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.	4
1.1 Justificativa e Relevância	Erro! Indicador não definido.	4
1.2 Estrutura do Secador Artificial Proposto	Erro! Indicador não definido.	6
1.3 Objetivos	Erro! Indicador não definido.	
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Erro! Indicador não definido.	
2.1 Princípios Físicos de Secagem	Erro! Indicador não definido.	
<i>2.1.1 Classes de Materiais de Acordo com seu Comportamento</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	<i>4</i>
<i>2.1.2 Cálculo da Taxa de Secagem</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	
<i>2.1.3 Lei de Conservação da Massa</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	<i>7</i>
<i>2.1.4 Balanço de Massa para o Ar Seco</i>		<i>28</i>
<i>2.1.5 Balanço de Massa de Água</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	<i>28</i>
<i>2.1.6 Lei da Conservação de Energia</i>		<i>28</i>
<i>2.1.7 Equação do Balanço de Energia do Ar Úmido</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	<i>28</i>
<i>2.1.8 Energia Total e Eficiência do Secador</i>		<i>29</i>
<i>2.1.9 Modelagem do Teor de Umidade</i>		<i>30</i>
<i>2.1.10 Cálculo das Perdas Radiantes</i>		<i>30</i>
2.2 Tipos de Secadores		30
2.2.1 Secadores Solares		32
2.2.2 Secadores Artificiais		37
<i>2.2.2.1 Secadores de Câmara (Secador de bandeja)</i>		<i>38</i>
<i>2.2.2.2 Secador de tambor rotativo (Secador de Rolo)</i>		<i>39</i>
<i>2.2.2.3 Secador de tambor rotativo (Secador de Rolo)</i>		<i>40</i>
<i>2.2.2.4 Secador de Caixa</i>		<i>41</i>
<i>2.2.2.5 Secador de Tunel</i>	Erro! Indicador não definido.	41
<i>2.2.2.6 Secador de Leito Fluidizado</i>		<i>42</i>
<i>2.2.2.7 Secador por Atomizador (“Spray dryer”)</i>		<i>43</i>
<i>2.2.2.8 Secadores de Forno</i>	Erro! Indicador não definido.	43
<i>2.2.2.9 Puff-Dryer</i>		<i>44</i>
<i>2.2.2.10 Formatizador</i>		<i>44</i>

2.2.2.11 Liofilização	Erro! Indicador não definido.	44
2.2.3 <i>Secadores Híbridos</i>		46
2.3 <i>Alterações Provocadas pela desidratação</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	46
2.3.1 <i>Alterações na textura</i>		46
2.3.2 <i>Alterações no sabor e no aroma</i>		47
2.3.3 <i>Alterações na cor</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	47
2.3.4 <i>Alterações no valor nutritivo</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	47
2.3.5 <i>Efeito sobre microorganismo e enzima</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	47
2.4 Estado da Arte		48
3 MATERIAIS E MÉTODOS		54
3.1 Equipamentos	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	54
3.2 Ensaio Experimentais		55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	57
4.1 Ensaio térmicos preliminares com o secador vaso.....		57
4.2 Ensaio térmicos com o secador modificado		59
4.3 Ensaio térmicos de influência da cor do secador	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	64
5 CONCLUSÃO	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	67
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		68
APÊNDICE A		71
APÊNDICE B	<i>Erro! Indicador não definido.</i>	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e Relevância

Atualmente o Brasil se destaca como um dos maiores produtores frutícolas do mundo. Por ser um país continental abrange diferentes tipos de clima, sendo capaz de produzir grandes volumes dos mais variados tipos de frutas e legumes.

Em se tratando de frutas tropicais como a banana, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, sendo que a bananicultura é a nona cultura mais importante do país (BRUNINI et al., 2002), ocupando o segundo lugar em volume de frutas produzidas. A produção nacional é de aproximadamente sete milhões de toneladas por ano, dos quais menos de 3% são exportados (FAO, 2009). Do total produzido no país, aproximadamente 40% são perdidos somente na fase pós-colheita. No mundo, por causa do uso de técnicas inadequadas de colheita, pós-colheita e sazonalidade, o desperdício pode chegar a até 50% de toda a produção (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Várias soluções foram encontradas ao longo do tempo, porém ainda hoje a perda de alimentos continua sendo um problema a ser resolvido em muitos lugares, por razões diversas.

Apesar de ser um grande produtor mundial, o Brasil apresenta um índice de desperdício bastante elevado. Situação que é de extrema preocupação, pois os consumidores estão ficando cada vez mais exigentes e produtos que preservam ao máximo suas características originais estão sendo preferidos. Outro aspecto importante, principalmente na bananicultura, são as diferentes variedades de banana que mostram um bom indicativo do grande número de produtos industrializados que se pode obter a partir dela, já que cada tipo de banana possui características favoráveis a uma forma diferente de industrialização, além de se poderem usar diferentes tipos de banana para um mesmo processamento (EMBRAPA, 2006).

Em nível industrial, a conservação inadequada e os preços incompatíveis de comercialização são importantes fatores na perda da produção. Situação que se agrava durante alguns "picos" de safra e entressafra. Assim, a conservação pós-colheita é um importante fator de contribuição para a redução das perdas, ao tentar diminuir o máximo a falta de técnicas adequadas de transporte e principalmente de armazenamento desses produtos, que são altamente perecíveis.

O uso de técnicas de desidratação como a prensagem, gravidade, peneiramento, torção ou centrifugação apresentam umidade residual após o processo bastante elevada. Já a secagem ou desidratação são métodos tecnicamente viáveis que são utilizados em vários países com o

objetivo de preservar a atividade enzimática original, reduzir e/ou evitar a contaminação por microorganismos, aumentando assim a vida de prateleira dos alimentos.

A desidratação pode ser definida pela remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, a água) de um produto sólido, ou seja, a operação unitária na qual a água de um determinado produto é diminuída, por sua vaporização, através de energia térmica fornecida ao material (LEWICKI e JAKUBCZYK, 2004).

A secagem pode ser dividida em natural (que ainda é utilizada para pequenas produções e feita expondo-se os produtos agrícolas ao sol) ou em secadores projetados (artificiais, solares e híbridos). A secagem artificial apresenta como benefício, em relação à secagem natural ou solar, o controle do processo e a possibilidade de uso contínuo. Todavia há de se considerar a relação custo e benefício, pois a secagem artificial requer em determinados casos alto grau de energia para o funcionamento das máquinas.

Em função do alto índice de perdas e da baixa qualidade do processo de secagem natural, determinadas propriedades nutritivas podem ser perdidas. Portanto, a utilização de secadores artificiais surge como uma alternativa interessante para contornar este problema. Desta forma, pode-se aumentar a vida útil do produto e o seu valor nutritivo, levando em conta que as características do produto permanecem praticamente inalteradas, pois o produto fica mais concentrado por causa da perda de água, facilitando também o transporte e sua comercialização.

Os secadores semi-industriais possuem baixo custo e a mão-de-obra não necessita ser especializada. Com o avanço da tecnologia e através de novas pesquisas, encontra-se no mercado uma variedade de secadores adequados para cada tipo de material, porém, existem poucos estudos no sentido de melhorar sua eficiência. Portanto, é necessário o desenvolvimento de secadores mais eficientes onde se propicia a redução dos custos do produto final, aumentando a margem de lucro do produtor e conseqüentemente reduzindo os custos para o consumidor.

Neste trabalho, são mostradas as vantagens e desvantagens da secagem artificial com relação à secagem solar e serão apresentados mecanismos de aperfeiçoamento do processo de secagem artificial num secador elétrico tipo cabine. Através da diminuição das diferenças de temperatura interna e minimização de perdas térmicas, é possível melhorar a qualidade do produto a ser secado, na tentativa também de se reduzir os custos energéticos.

1.2 Estrutura do Secador Artificial Proposto

O secador artificial construído apresenta uma carcaça com estrutura de caixeta (madeira de baixo peso e alta resistência mecânica), revestida interna e externamente por chapas de aço galvanizado, pintadas, para proteção da estrutura de madeira e todas as paredes da carcaça do secador são isoladas termicamente por lã de vidro. A utilização de uma estrutura de madeira (Figura 1), ao invés de estruturas convencionais de perfis metálicos, deveria promover um aumento significativo da resistência térmica através da parede do dispositivo, pela eliminação do efeito aleta. O desenho representativo da estrutura de madeira com dimensionamento pode ser visualizado no APÊNDICE A.

Figura 1 - Estrutura de madeira em caixeta

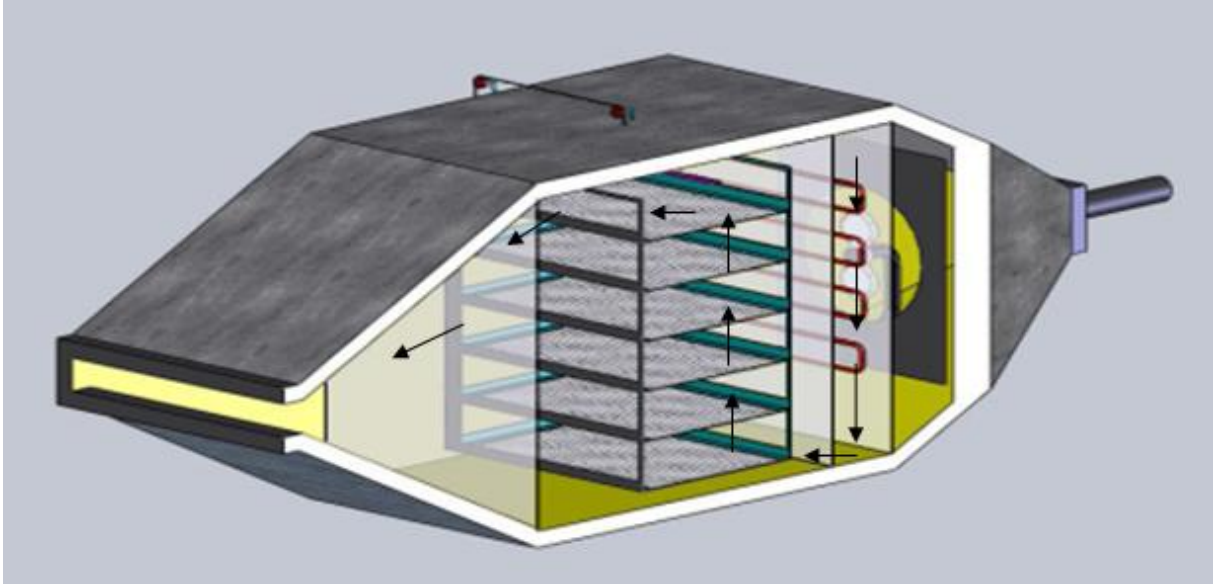


Fonte: Arquivo pessoal.

No secador (Figura 2 e Figura 3), o escoamento de ar penetra à temperatura ambiente por um canal tubular, é aquecido por uma resistência elétrica até a temperatura fixa (alcançada através da ação de um sistema de controle de temperatura), atravessa as bandejas com o produto a ser secado (removendo umidade) e deixa o secador através de um canal retangular telado (sob ação de um exaustor instalado na entrada do secador). As bandejas são feitas de aço galvanizado e o fundo é telado com furos pequenos por onde o ar escoar e atravessa as bandejas causando a desidratação. Neste secador a mudança estrutural com as placas

metálicas força o escoamento de ar mudando o fluxo e minimizando as perdas térmicas e diminuindo a heterogeneidade de secagem.

Figura 2 - Apresentação de corte longitudinal no secador elétrico proposto



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 3 - Vista frontal do secador artificial



Fonte: Arquivo pessoal.

No secador, as bandejas de secagem foram fixadas em uma estrutura em balanço, ligada por um cabo de aço e polias, a uma célula de carga (Figura 4). Um dos grandes problemas dos ensaios de secagem é a constante abertura do secador para remoção de amostras (para avaliação de sua massa), durante o levantamento das curvas de secagem.

Além de ser alterada a temperatura da amostra todas as vezes que ela é removida do secador, a câmara de secagem é resfriada (durante a sua abertura) e uma quantidade maior de

energia elétrica é gasta para o controle da temperatura. A utilização de uma célula de carga permitiu que o secador não fosse aberto durante o ensaio experimental (eliminando os problemas descritos).

Figura 4 - Célula de carga e bandejas em balanço



Fonte: Arquivo pessoal.

Em relação à utilização da madeira para a redução das perdas térmicas, o secador construído, segundo Fonseca (2012) apresentou eficiência térmica variando entre 82% a 95%. Os altos valores alcançados de eficiência térmica consolidam o sucesso da utilização da estrutura de madeira do secador. Todavia maiores variações de temperatura implicam em maiores perdas térmicas no secador, uma vez que as perdas condutivas através da carcaça do dispositivo são proporcionais à diferença de temperatura (Lei de Fourier para condução).

A configuração geométrica e a presença de três telas transversais, antes de o escoamento atravessar as bandejas, deveriam favorecer a uniformidade do escoamento e reduzir a heterogeneidade da secagem (comumente observada na maioria dos secadores). Entretanto, mesmo com sua viabilidade técnica de secagem, a configuração geométrica proposta não foi efetiva. Nos ensaios realizados foram observadas grandes variações de temperatura, em consequência disso as amostras das bandejas superiores secavam mais rapidamente do que as amostras das bandejas inferiores (FONSECA, 2012).

Sendo assim, é de grande interesse, para viabilizar tecnicamente a utilização do protótipo tecnológico construído, a realização de estudos experimentais que permitam

identificar as causas dos problemas de heterogeneidade de secagem observada no secador construído. Além disso, é necessária, a partir da identificação do problema observado, a elaboração de propostas de mudanças que permitam que o secador realize a secagem do produto de forma homogênea.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal corrigir, por método experimental, a causa da secagem heterogênea (para diferentes posições da bandeja, suas condições de ar e temperatura na secagem) do protótipo construído de um secador elétrico do tipo cabine para banana. Para que a partir das análises feitas, possamos identificar o melhor nível de secagem com a minimização de perdas térmicas e um gasto energético que seja satisfatório para o processo. Por fim, serão estudados os parâmetros adequados de desidratação do fruto e suas condições sensorialmente aceitáveis para o mercado.

Para alcançar este objetivo principal, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliação experimental da temperatura do escoamento de ar de secagem, em função da posição da bandeja;
- Avaliação experimental da velocidade do escoamento de ar de secagem, em função da posição da bandeja;
- Estudo teórico e experimental da instalação de telas e obstruções do escoamento, no interior do secador, para uniformização de temperatura e de velocidade do escoamento de secagem, nas diferentes bandejas e suas respectivas posições;
- Realização de ensaios térmicos (avaliação de temperatura e velocidade do ar) para verificar a correção dos problemas térmicos que causam a heterogeneidade de secagem;
- Realização de ensaios de secagem com bananas para verificar a correção da heterogeneidade de secagem;
- Avaliação dos gastos energéticos nos diferentes tipos de ensaios que serão realizados, ao serem alteradas variáveis como velocidade do fluxo de ar, temperatura, estrutura interna e perdas térmicas por condução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A desidratação pode ser definida como aplicação de calor, sob condições controladas, para remover a maior parte da água normalmente presente em um alimento, por evaporação, de modo a melhorar a conservação de um produto e estender sua vida útil, permitindo a estocagem e distribuição no mercado. Quando o ar aquecido é soprado sobre o alimento, o calor é transferido para a superfície e o calor latente de vaporização provoca a retirada de sua umidade. O vapor de água difunde-se numa película delimitante do ar e é carregada por este em movimento. Isso cria uma região de menor pressão de vapor de água na superfície do alimento e um gradiente de pressão é estabelecido do seu interior úmido para o ar seco. Esse gradiente provê a força motriz para a remoção da água do alimento.

A primeira e mais danosa limitação da vida de prateleira é a atividade microbiana (KAREL, 1975). O ambiente propício ao desenvolvimento e crescimento destes é criado pela água, um componente inerente aos alimentos (SPOTO, 2006). Por essa razão, vários métodos de conservação são projetados para evitar a deterioração causada por microorganismos, através da redução da disponibilidade de água. Outros processos químicos e físicos podem ocorrer no alimento durante o armazenamento e distribuição, os quais prejudicam sua qualidade e que também devem ser prevenidos.

A investigação da secagem e o cálculo de suas dimensões devem levar em conta vários problemas nas áreas da mecânica dos fluidos, da química das superfícies e da estrutura dos sólidos, além dos problemas de velocidade de transferência e de temperatura. A espessura da camada formada no produto também possui relevância, pois está diretamente ligada a tensão superficial e das características de coesão da suspensão. Logo, a espessura controla o grau de secagem e, conseqüentemente o teor final de umidade. A forma do produto, cor, estabilidade e textura possuem grande relevância, pois estas características fixam seu valor de venda e dependem do processo de secagem a que foi submetido.

2.1 Princípios Físicos de Secagem

Pode-se definir a secagem como a transferência de um líquido que está num sólido molhado para uma fase gasosa não saturada (FOUST et al., 1982). A desidratação envolve simultaneamente a aplicação de calor e a remoção de água dos alimentos (FELLOWS, 2006). Existe um grande número de fatores que controlam a taxa de secagem. Eles podem ser agrupados entre:

- Aqueles relacionados às condições de processamento;
- Os relacionados à natureza do alimento;
- Os relacionados ao projeto do secador.

Atualmente há inúmeras investigações sobre secagem e o cálculo das dimensões de seu equipamento. Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás a uma temperatura e a uma umidade fixa, manifesta-se sempre certo tipo de comportamento. Imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente (FOUST et al., 1982).

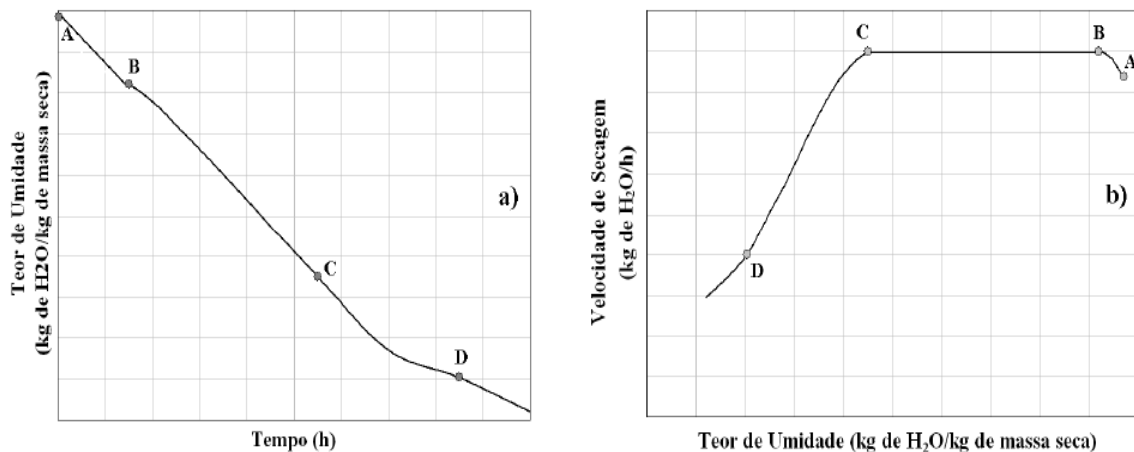
Também existem três fatores inter-relacionados que controlam a capacidade do ar de remover água de um alimento:

- A quantidade de vapor d'água presente no ar;
- A temperatura do ar;
- A quantidade de ar que passa pelo alimento.

A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições do regime permanente. Neste regime, uma prova de medida de temperatura mostra que a temperatura da superfície do sólido molhado é a temperatura de *bulbo-úmido* do meio secante. As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, mas a concordância entre elas é imperfeita em virtude das defasagens entre o movimento de massa e de calor. Quando a temperatura do sólido atinge a temperatura do bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante, este período de secagem é chamado de *secagem constante*. As temperaturas do sólido e de bulbo úmido são utilizadas para encontrar a umidade relativa do ar, fator este que pode interferir significativamente no processo de secagem.

Uma vez que as temperaturas do sólido tenham atingido a temperatura do bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante. Este período de secagem é o período de secagem a taxa constante. Ele termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico. A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor de umidade atingível durante o processo de secagem. A Figura 5 apresenta duas curvas típicas de secagem.

Figura 5 - (a) Curva padrão de secagem e (b) velocidade de secagem

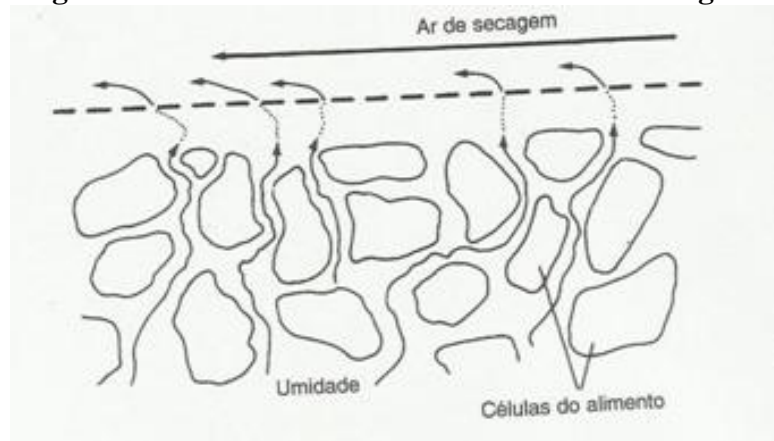


Fonte: Foust et al. (1982).

De acordo com a Figura 5 (a) e (b), o período AB representa o primeiro contato entre o meio secante e o material a ser seco, é o intervalo de aquecimento. Nesta etapa a taxa de secagem é crescente. O intervalo BC representa à secagem a taxa constante cujo sistema atinge o equilíbrio, ou seja, a temperatura do sólido atinge a temperatura do bulbo úmido do meio secante, implicando que a superfície do sólido esteja saturada de água. O período CD representa a primeira etapa a taxa decrescente. A velocidade da massa no interior do material para a superfície se torna mais lenta do que a massa que sai da superfície, podendo ocasionar a secagem da superfície do material mais rápida do que o seu interior e, por conseguinte surgem rachaduras no mesmo. Por fim, o ponto D representa a não saturação da superfície do material e a secagem ocorre somente a partir do interior do sólido até atingir o teor de umidade de equilíbrio, o qual representa o segundo período de taxa decrescente, neste a pressão de vapor sobre o material é igual à pressão parcial do vapor no gás secante afluyente (FOUST et al.,1982).

Outro fator que controla a taxa de secagem além da temperatura e umidade do ar é a velocidade. Quando o ar quente é soprado sobre um alimento úmido, o vapor d'água se difunde através da camada limite de ar ao redor do alimento e é levado pelo ar em movimento (Figura 6). Um gradiente de pressão de vapor d'água é estabelecido entre o interior do alimento úmido e o ar seco. Esse gradiente provê a “força motriz” para a remoção de água do alimento (FELLOWS, 2006).

Figura 6 - Movimento da umidade durante a secagem



Fonte: Fellows (2006).

O mecanismo do deslocamento do líquido e por isso, a velocidade deste movimento, varia acentualmente com a própria estrutura do sólido. Nos sólidos que tem espaços vazios e abertos relativamente grandes, o movimento será controlado pela tensão superficial e pelas forças da gravidade no interior do sólido. Nos sólidos com estruturas fibrosas, ou amorfas, o movimento do líquido ocorre por difusão através do sólido.

Fisicamente a água movimenta-se do interior do alimento para a superfície pelos seguintes mecanismos:

- Movimento do líquido por forças capilares, particularmente em alimentos porosos;
- Difusão de líquidos, causadas por diferenças na concentração dos solutos na superfície e no interior do alimento;
- Difusão de líquidos que são absorvidos em camadas na superfície dos componentes sólidos do alimento;
- Difusão de vapor d'água em espaços de ar dentro do alimento causada por gradientes de pressão de vapor.

A camada limite atua como uma barreira tanto para a transferência de calor quanto para a remoção de vapor d'água durante a secagem. A espessura da camada limite é determinada principalmente pela velocidade do ar. Se a velocidade é baixa, a espessura da camada limite é maior, o que reduz o coeficiente de transferência de calor quanto à taxa de remoção de vapor d'água. Este sai da superfície do alimento e aumenta a umidade do ar ao redor dele, causando uma redução no gradiente de pressão de vapor d'água e, conseqüentemente, na taxa de

secagem. Portanto, quanto maior a velocidade do ar, menor a espessura da camada limite e maior a taxa de secagem (FELLOWS, 2006).

A aspereza da superfície sólida, sobre a qual se estende a película líquida, provoque aumento dos coeficientes de transferência de massa e de calor, mas este efeito não está firmemente estabelecido (FOUST et al., 1982).

O teor de umidade que existe ao final do período a taxa constante é o teor de umidade crítico. Neste ponto, o movimento do líquido para a superfície do sólido torna-se insuficiente para substituir o líquido que está sendo evaporado. O teor de umidade crítico depende da facilidade com que a umidade se desloca no interior do sólido diante da velocidade de secagem. Portanto as condições de ensaio devem envolver parâmetros compatíveis com os do sólido real a ser seco. As condições de secagem devem ser fixas de modo que a velocidade de secagem, durante o período a taxa constante, esteja de acordo com que se espera ter na fábrica.

2.1.1 Classes de Materiais de Acordo com seu Comportamento

De acordo com o comportamento durante a secagem, é possível dividir os materiais a serem secados em duas classes principais. A primeira destas é constituída por sólidos granulares ou cristalinos, que retêm a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros superficiais, rasos e abertos. Nestes materiais, o movimento da umidade é relativamente livre e ocorre em consequência da integração das forças gravitacionais e das forças de tensão superficial. Nesta classe o sólido é usualmente inorgânico e pouco afetado pela presença do líquido e não sofre grande ação do processo de secagem (FOUST et al., 1982).

A outra classe é a dos sólidos orgânicos (ou amorfa). Estes materiais retêm a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então a retêm no interior de fibras ou de poros delgados internos. Nestas substâncias, o movimento da umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido. A velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido. Os teores de umidade no equilíbrio são em geral elevados, o que indica ser significativa a quantidade de água que é retirada intimamente na estrutura do sólido.

Portanto os sólidos são afetados pela remoção da umidade. E a condição a ser escolhida tem de ter em vista os efeitos que podem ocorrer na qualidade do produto: a economia do processo ou a comodidade da operação (FOUST et al., 1982).

2.1.2 Cálculo da Taxa de Secagem

Em operações comerciais é necessário estimar quão rapidamente um alimento pode ser desidratado em um secador em particular, para calcular a quantidade que pode ser produzida por hora ou por dia. Quando o comportamento de secagem é simples e são conhecidos os dados dos teores de umidade crítica e de equilíbrio ou as propriedades térmicas dos alimentos, os tempos de secagem podem ser calculados. Entretanto, esses dados não são conhecidos para muitos alimentos, sendo então, utilizados os resultados de testes de secadores em escala-piloto para estimar os tempos de secagem (FELLOWS, 2006).

O teor de umidade de um alimento pode ser expresso em base úmida (massa de água por unidade de massa de alimento úmido) ou em base seca (massa de água por unidade de massa de sólidos secos no alimento). Os cálculos mostrados a seguir são realizados em base seca.

A taxa de transferência de calor pode ser definida como aquela em que a evaporação da superfície líquida associada ao sólido ocorre sem interferência deste último. A taxa de secagem é então determinada pela taxa de difusão de vapor na superfície do material. Neste período, as equações de transferência de calor e de massa são estabelecidas, fazendo referência às teorias da camada limite. As relações mais simples e que geralmente dão boa concordância com os resultados experimentais são:

i) *Transferência de calor por convecção* (FELLOWS, 2006):

$$Q = h_c A (\theta_a - \theta_s) \quad (1)$$

Onde Q (J s^{-1}) = taxa de transferência de calor, h_c ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) = coeficiente de transferência de calor na superfície por convecção, A (m^2) = área superficial disponível para a secagem, θ_a = Temperatura média do bulbo seco do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), θ_s = Temperatura média do bulbo úmido do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$).

ii) *Transferência de massa em relação à pressão* (FELLOWS, 2006):

$$N = h_m A (P - P_a) \quad (2)$$

Onde P representa a pressão da água na superfície do alimento e P_a a pressão do ar seco, ambas fornecidas em Pascal.

Durante o período de taxa constante, sem desconsiderar as perdas, o calor fornecido é igual ao calor necessário para evaporar a água e pode ser calculado pela transferência de massa N e obter a taxa de secagem pela equação:

$$N = \frac{h_c A (T_\infty - T_s)}{\lambda} \quad (3)$$

Esta última equação é geralmente mais utilizada uma vez que o coeficiente de transferência de calor é mais fácil de determinar experimentalmente do que o coeficiente de transferência de massa (MASSARANI e TELLES, 1992).

A taxa de transferência de massa em relação à unidade (FELLOWS, 2006):

$$-m_c = k_g A (H_s - H_a) \quad (4)$$

Onde m_c (kg s^{-1}) = Taxa de secagem, mudança de massa com o tempo; k_g ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) = coeficiente de transferência de massa; H_s (kg de umidade por kg de ar seco) = Umidade na superfície do alimento (umidade de saturação); H_a = Umidade de ar (Kg de umidade por Kg de ar seco).

Segundo Fellows (2006), considerando que durante o período de taxa constante existe um equilíbrio entre a taxa de transferência de calor para o alimento e a taxa de transferência de massa na forma de perda de umidade do alimento, tem-se a seguinte relação:

$$-m_c = \frac{h_c A}{\lambda} (\theta_a - \theta_s) \quad (5)$$

Onde λ (J Kg^{-1}) = Calor latente de vaporização na temperatura de bulbo úmido.

O coeficiente de transferência de calor na superfície (h_c) está relacionado com a taxa de fluxo de massa do ar por meio das seguintes equações (FELLOWS, 2006):

$$h_c = 14,3 G^{0,8} \quad \text{Para Fluxo de ar paralelo} \quad (6)$$

$$h_c = 24,2 G^{0,37} \quad \text{Para Fluxo de ar perpendicular} \quad (7)$$

Onde G ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) = Taxa de fluxo de massa de ar por unidade de área

Para uma bandeja de alimento, na qual evapora água só da superfície superior, o tempo é calculado através de duas fórmulas (FELLOWS, 2006):

$$-m_c = \frac{h_c}{\rho \lambda x} (\theta_a - \theta_s) \quad (8)$$

$$t = \rho \lambda x (M_i - M_c) / hc (\theta_a - \theta_s) \quad (9)$$

Onde t (s) = Tempo de secagem; ρ (Kg m^{-3}) = Densidade volumétrica do alimento; x (m) = Espessura da camada do alimento; M_i (Kg por Kg de sólidos secos) = Umidade inicial; M_c = (Kg pó/Kg de sólidos secos) = Teor de umidade crítica.

Todavia esta relação para o tempo pode variar com o tipo de secador artificial a ser utilizado.

2.1.3 Lei da Conservação da Massa

Todo o processo de secagem envolve fluxos mássicos para dentro ou para fora de equipamentos de secagem. Dessa forma, a equação de conservação de massa estabelece um procedimento de análise de tais fluxos para que eles possam ser analisados e contabilizados. A equação da conservação de massa ou balanço de massa para um volume de controle qualquer possui a seguinte forma (CREMASCO, 2002):

$$\left(\frac{d_m}{d_t}\right)_{VC} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (10)$$

Onde m_e e m_s são a vazão mássica de entrada e saída do volume de controle.

Em sistemas de secagem onde o ar e o fluido secante a equação de balanço de massa deve tanto ser aplicada para o fluxo de ar totalmente seco, quanto para o fluxo de água (no estado líquido ou no estado de vapor).

2.1.4 Balanço de Massa para o Ar Seco

Considerando a vazão em regime permanente, a equação de balanço de massa segundo Cremasco (2002) para o ar seco fica:

$$\sum m_e - \sum m_s = 0 \quad (11)$$

2.1.5 Balanço de Massa de Água

De acordo com Cremasco (2002) a água, contida no ar seco em forma de vapor, originando o ar úmido, tem seu balanço de massa na entrada e na saída definido como:

$$\sum \dot{m}_e w_{he} - \sum \dot{m}_s w_{hs} \pm \sum \dot{m}_l = 0 \quad (12)$$

Onde w_{he} e w_{hs} são as quantidades de vapor d'água na entrada e saída respectivamente. E \dot{m}_l é a taxa de condensação ou de vaporização de água.

2.1.6 Lei da Conservação da Energia

A equação de balanço de energia aplicada a um volume de controle qualquer possui a seguinte forma (CREMASCO, 2002):

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{VC} = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + Z_e\right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + Z_s\right) + Q - W \quad (13)$$

Onde h_e e h_s são as entalpias específicas de entrada do ar úmido na entrada e saída respectivamente.

2.1.7 Equação do Balanço de Energia do Ar Úmido

Considerando o sistema em regime permanente, a derivada temporal é nula, e admitindo que a energia cinética e potencial seja desprezível, a equação 14 toma a seguinte forma (CREMASCO, 2002):

$$\sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s \pm \sum \dot{m}_l h_l + Q - W = 0 \quad (14)$$

Onde h_l é a entalpia específica do condensado.

2.1.8 Energia Total e Eficiência do Secador

A energia total (E_T) usada para operação do secador calculada pelo Wattímetro é dada por

$$E_T = \int \dot{W} dt \quad (15)$$

De acordo com Leon *et al.* (2002), a eficiência térmica do secador vazio (η_{hc}) pode ser avaliada a partir da equação 18.

$$\eta_{hc} = \frac{E_C}{E_T} \quad (16)$$

Durante a realização do processo de secagem, a energia útil se torna o calor latente para vaporização da água do produto a ser secado (E_V). O calor latente é determinado pelo produto entre o calor latente de vaporização da água (h_{lv}) e a massa de água removida ($m_{\text{água}}$), que foi avaliada pela célula de carga e conferida pela medição de umidade pelos termo-psicrômetros a serem instalados na entrada e na saída do escoamento no dispositivo (Leon *et al.*, 2002).

$$E_V = m_{\text{água}} \cdot h_{lv} \quad (17)$$

A eficiência do secador, no processo de secagem, pode ser calculada pela razão entre a energia de vaporização da água do produto e a energia gasta pelo secador (Leon *et al.*, 2002)

$$\eta = \frac{E_V}{E_T} \quad (18)$$

Além disso, torna-se possível quantificar as perdas térmicas por condução através da carcaça (E_p)

$$E_p = E_T + \int \dot{m} \left(\frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} \right) dt - E_C - E_V \quad (19)$$

A energia útil devido ao aquecimento do escoamento de ar no interior do secador vazio (E_c) foi determinada em função da vazão mássica do escoamento de ar (\dot{m}), do calor específico à pressão constante (C_p), temperaturas ambiente (T_e) e de saída (T_s) do fluxo de ar.

$$E_c = \dot{m}\Delta h \quad (20)$$

2.1.9 Modelagem do Teor de Umidade

De acordo com a norma NBR 9939 (1987) a umidade inicial pode ser calculada a partir da seguinte Eq.:

$$U_{i(B,U)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (21)$$

Onde $U_{i(B,U)}$ representa o teor de umidade inicial em base úmida, m_i a massa inicial da amostra e m_f a massa final da amostra seca.

2.1.10 Cálculo das Perdas Radiantes

De acordo com Incropera (1990) o cálculo das perdas radiantes pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$q_P = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (22)$$

Onde Q_p representa a quantidade de calor transferido (W/m^2), σ é a constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$. ε é a emissividade; A é a área da superfície (m^2). T_s é a temperatura da superfície e T_{viz} é a temperatura da vizinhança. Ambas as temperaturas são definidas em Kelvin.

De acordo com Incropera (1990) o cálculo da porcentagem de perdas radiantes pode ser realizado pela seguinte equação:

$$\%q_P = \frac{\int \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{viz}^4) dt}{E_T} \quad (23)$$

Onde E_T representa a energia total para a operação e pode ser calculada de pela Eq. (15).

2.2 Tipos de Secadores

Atualmente existem no mercado e em fase de pesquisa diversos tipos de secadores para determinados fins. Secadores solares, artificiais e híbridos estão sendo testados no intuito de melhorar a qualidade e o processo como um todo.

A secagem solar é normalmente utilizada em pequenas produções e feita expondo-se os frutos ao sol durante alguns dias, no entanto o tempo decorrente irá depender do tipo de

produto a ser secado e da região onde ocorrerá a secagem. A fim de se obter os benefícios da energia gratuita e renovável provida pelo sol, muitos esforços têm sido feitos nos últimos anos no desenvolvimento e aperfeiçoamento de secadores solares para conservação de produtos agrícolas e florestais.

O objetivo desse secador é fornecer ao produto uma quantidade de energia térmica maior do que a disponível em condições ambientes, elevando de forma suficiente à pressão de vapor da água contida no produto; além de reduzir significativamente a umidade relativa do ar de secagem (EKECHUKWU e NORTON, 1999). O alto tempo de secagem para alguns produtos, a falta de radiação solar em determinadas regiões durante alguns meses e a dependência constante das condições climáticas fazem com que a secagem solar não seja tão eficaz em comparação a outros tipos de desidratação.

Já a secagem artificial consiste na utilização de um secador com aquecimento utilizando uma fonte de energia não renovável para a retirada da umidade dos frutos, apresentando como benefício, em relação à secagem solar, o controle do processo e a possibilidade de uso contínuo. Além disso, secadores artificiais proporcionam a retenção de vitaminas em alimentos secos, geralmente superior à dos alimentos secos diretamente ao sol (GAVA, 2008). Contudo, é necessário averiguar variáveis importantes que devem ser analisadas neste tipo de secagem, como temperatura e velocidade do ar, a fim de se atingir os níveis ideais de aceitação.

Assim, esta secagem requer minuciosas observações experimentais de alguns fenômenos que ocorrem durante o processo. Algumas considerações sobre conteúdo inicial e final de umidade do material, sua respectiva umidade de equilíbrio, como também de que maneira a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte de água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem, todos estes fatores devem ser analisados servindo para fundamentar o fenômeno de secagem e aperfeiçoar o processo.

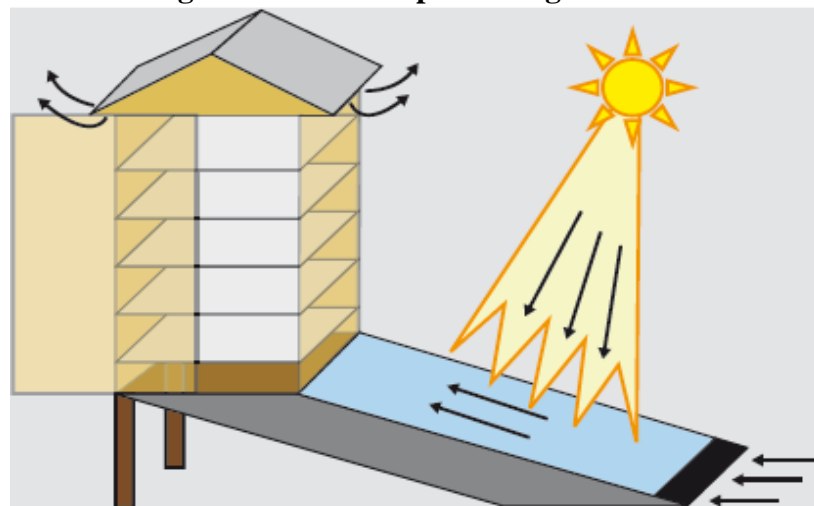
Para tal, deve ser levado em conta todo o processo de manufatura do produto. Desde a matéria-prima, produto intermediário, até as características e especificações do produto final, todos estes precisam estar claramente definidos (VEGA et al., 2001). Contudo é necessário verificar qual é a melhor relação custo benefício para se escolher qual a melhor maneira para se secar determinado alimento.

2.2.1 Secadores Solares

A secagem solar é um processo relativamente barato, mas irá depender de alguns fatores, principalmente do tipo de produto a ser desidratado para se ter uma condição ótima de armazenagem. Todavia, por ser mais simples que os demais processos e requerer baixos custos de funcionamento (praticamente apenas mão-de-obra), este procedimento pode ser utilizado em países com fracos recursos econômicos e quando a energia requerida estiver prontamente disponível no local.

Tradicionalmente, os alimentos eram colocados no solo, nos tetos das habitações ou em tabuleiros, os quais recebiam a radiação direta do sol. Os alimentos que são desidratados desta maneira apresentam uma coloração mais intensa que os desidratados artificialmente. No entanto, ocorrem mais perdas nutricionais do que na secagem sob condições controladas. Os secadores solares possuem uma inclinação e um tampo de vidro que permite a absorção da radiação térmica. O ar é aquecido nessa cabine de vidro, diminui a densidade e atravessa as bandejas com o produto a ser seco, sendo expelido por uma parte superior em razão das correntes de convecção que são geradas com a entrada de mais ar frio à cabine de secagem (Figura 7).

Figura 7 – Secador para secagem natural



Fonte: Solar 2009.

A determinação do ponto final de secagem é feita por meio de pesagem dos frutos. Para isso, uma pequena bandeja de peso conhecido é pesada e recebe uma amostra de frutos com peso conhecido. Essa é disposta sobre uma das bandejas de secagem propriamente dita para ser submetida ao processo normal de secagem. A pequena bandeja contendo os frutos é

pesada duas vezes ao dia, e o peso correspondente ao teor de umidade final desejado de acordo com a equação proposta por Gava (2008).

$$M_f = \frac{M_i (100 - U_i)}{100 - U_f} \quad (23)$$

Onde M_f = Massa líquida final (subtraído o peso da bandeja), M_i = Massa líquida inicial (subtraído o peso da bandeja), U_i = Umidade inicial, U_f = Umidade final desejada.

O ponto final de secagem, de qualquer forma, é dado pela experiência do produtor, que avaliará as qualidades sensoriais (cor, aroma, sabor e textura) da fruta seca. O produto seco naturalmente, para ter uma melhor qualidade, deve ter sua umidade reduzida de 50% a 70% ao sol, e continuada sua secagem à sombra para que se preserve a cor e o aroma natural (GAVA, 2008). Durante todo o período de secagem, a fruta deve ser revirada no mínimo três vezes ao dia para garantir a homogeneidade do produto seco.

Segundo Imre (2006), os secadores solares apresentam as seguintes partes principais:

- Coletor para converter a radiação solar em energia térmica;
- Espaço de secagem, onde o material a ser secado é colocado e onde a secagem toma lugar;
- Fonte de energia auxiliar (opcional);
- Equipamento de transferência de energia térmica, para transferir energia térmica ao ar de secagem ou ao material;
- Meios para manter o ar de secagem em movimento;
- Umidade de armazenagem de energia térmica (opcional);
- Equipamento de controle e aquisição de dados (opcional);
- Ductos, tubos e outros aparatos que irão depender do produto a ser secado.

A secagem solar apresenta várias vantagens sobre a tradicional secagem ao sol, como por exemplo:

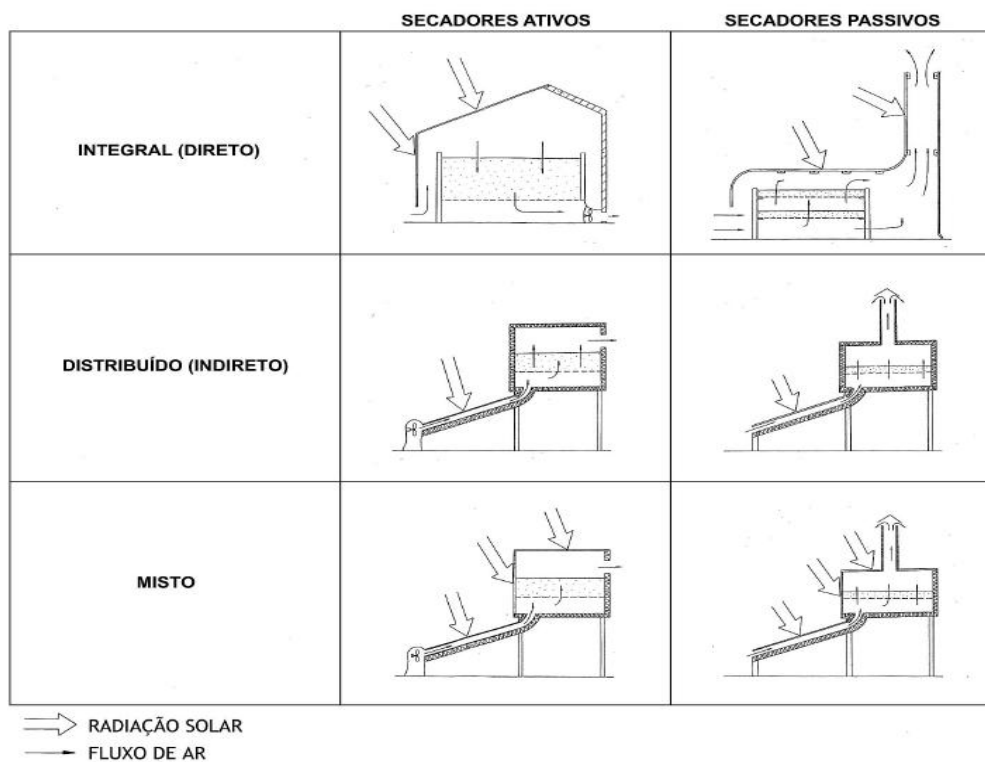
- Requer uma área de terra menor para secar a mesma quantidade de produto que seria secado ao ar livre;
- A produção e a qualidade são relativamente maiores, pois dificulta a ação de insetos e do tempo.

- Período de secagem mais curto e economicamente viável, pois possui um custo de manutenção e de materiais relativamente baixo.

Algumas desvantagens da secagem solar são a não periodicidade da sua radiação, sendo que uma possível solução é a armazenagem de energia térmica e um sistema de controle e coletores solares externos.

Vários são os critérios que podem ser utilizados na classificação de secadores solares, e essa classificação pode variar dependendo do autor, como pode ser visto em (BRENNENDORFER et al., 1985; EKECHUKWU E NORTON, 1999; IMRE, 2006; SHARMA et al., 2009). Segundo Ekechukwu e Norton (1999), os sistemas de secagem solar podem ser classificados de acordo com dois critérios: o modo pelo qual é gerado o fluxo de ar de secagem e a maneira pela qual a energia solar é utilizada (Figura 8).

Figura 8 - Classificação dos secadores solares



Fonte: EKECHUKWU e NORTON (1999).

- *Sistema de secagem solar passivos*: convencionalmente chamados de secadores solares de convecção natural;

- *Sistema de secagem solar ativos*: secadores solares de convecção parcialmente forçada, que utiliza uma ventoinha para fazer o ar passar pelo produto; também chamados se secadores solares híbridos.

Os secadores *ativos* e *passivos* podem ser subdivididos em três tipos que podem variar de acordo com o arranjo físico dos componentes do sistema e o modo como a energia solar é utilizada. São eles: *integral* ou *direto*; *distribuído* ou *indireto*; e *misto*. Nessa classificação, o processo de aquecimento do produto pode envolver sua exposição direta à radiação solar; a passagem de ar pré-aquecido através do produto; ou uma combinação de ambos, respectivamente (EKECHUKWU e NORTON, 1999; IMRE, 2006).

O secador tipo *integral* ou *direto* é composto por uma só peça transparente que desempenha simultaneamente a função de coletor solar (Figura 9) e de uma câmara de secagem onde a radiação solar incide diretamente sobre o produto colocado no secador. O ar é aquecido por efeito de estufa, a circulação do ar é feita por convecção natural, a secagem é rápida e os custos são baixos. Os produtos são protegidos das poeiras e insetos, no entanto, verifica-se uma perda de qualidade dos produtos por exposição direta aos raios solares. Todavia, a sua exposição direta realça a cor apropriada de maturação de frutos verdes por permitir, durante a desidratação, a decomposição de clorofila residual nos tecidos (EKECHUKWU e NORTON, 1997).

Figura 9 - Secador solar de convecção natural tipo direto



Fonte: AGUIRRE (2002).

O secador tipo *distribuído ou indireto* é constituído por duas partes: um coletor solar que converte a radiação solar em calor e por uma câmara de secagem onde os produtos são colocados sem exposição direta à radiação solar (Figura 10). O ar é aquecido num coletor solar e sobe por convecção natural até à câmara de secagem. Para melhorar a circulação do ar por convecção natural, pode-se colocar no secador uma chaminé solar. A secagem é rápida e os custos são pouco mais elevados que o anterior. Melhora a qualidade dos produtos, nomeadamente a sua cor, aspecto e mantém o valor nutritivo, porque não recebem a radiação solar diretamente. Esses secadores também são recomendados para o caso de algumas hortaliças e frutas com alto teor de pigmentação.

Figura 10 - Secador solar de convecção natural tipo indireto



Fonte: AGUIRRE (2002)

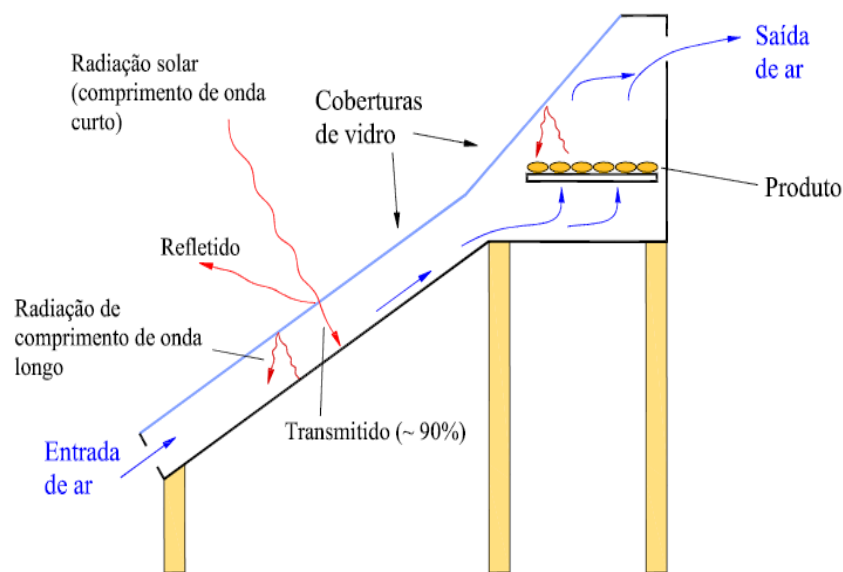
O secador solar *misto* combina as características dos dois tipos de secadores: o direto e o indireto. Alguns trabalhos, como Zaman e Bala (1989) e Simate (2003) comparam esses tipos de secadores, sugerindo que o do tipo misto é o que apresenta melhor desempenho em termos de secagem e custo. Este secador consiste de um coletor solar plano conectado em série com uma câmara de secagem, como no tipo indireto. Um coletor é composto por uma placa metálica, pintado de preto fosco, de modo a aumentar sua capacidade de absorção, coberta por uma placa de plástico ou vidro transparente (Figura 11). Esta mesma cobertura encontra-se também na câmara de secagem, no caso do secador misto.

Uma parte da radiação solar incidente na cobertura de vidro é refletida de volta para a atmosfera e outra parte (cerca de 90%) é transmitida para dentro do secador. Parte dessa radiação transmitida é refletida pela superfície do produto, da câmara e da placa absorvedora,

e outra parte é absorvida por essas superfícies. Devido à radiação solar, a temperatura do produto, da câmara e da placa absorvedora aumenta e começam a emitir radiação de comprimento de onda longo, cuja saída para a atmosfera é impedida pelas coberturas de vidro.

Dessa forma, a temperatura do sistema fica mais alta, visto que a cobertura de vidro também reduz as perdas convectivas de energia térmica para o ambiente.

Figura 11 - Princípio de funcionamento de um secador solar misto



Fonte: AGUIRRE (2002).

2.2.2 Secadores Artificiais

Na maioria dos processos de secagem artificial o ar quente com uma velocidade entre 0,5 m/s a 3 m/s, dados baseados na literatura, e baixa umidade, são utilizados para a transferência de calor por convecção para o alimento, porém, os mecanismos de transferência de calor por condução e radiação também ocorrem.

Entre os equipamentos de secagem industriais, mais de 85% são de tipo convectivo que empregam ar quente ou gases de combustão como meio de secagem direta. Dentro das aplicações, mais de 99% envolvem a remoção de água. Existem diversos tipos de desidratadores que são usados normalmente, alguns patenteados, outros que não apresentam importância prática muito grande. A escolha de um determinado tipo é ditada pela natureza do produto que vai ser desidratado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operação.

De modo geral, podem-se dividir os secadores mais usados em duas classes:

- *Secadores adiabáticos*: quando o calor é conduzido por meio de ar quente. Neste grupo incluímos o secador de cabine, secador de túnel, atomizador (spray-dryer), leiteo fluidizado, fornos secadores, entre outros.
- *Transferência de calor por superfície sólida*: geralmente nesses tipos trabalha-se com vácuo. Aqui temos o secador de tambor (drum-dyer) e outros desidratadores a vácuo.

2.2.2.1 Secadores de Câmara (Secador de bandeja)

Os secadores de bandeja são os mais simples, operam de forma descontínua (batelada) e são utilizados para produção em pequena escala. O meio secante utilizado nestes secadores pode ser vapor d'água, gás ou ar aquecido eletricamente, sendo este último meio o mais usual.

De acordo com Amanhou et al. (2010) os secadores do tipo cabine são os mais utilizados pelos agricultores para secagem de frutas, devido à simplicidade da estrutura e baixo custo de instalação, porém apresentam como desvantagens uma não uniformidade na secagem o que tem dificultado a utilização deste sistema de secagem.

Em um secador de bandeja, o alimento sólido é espalhado uniformemente sobre uma bandeja com fundo tipo tela (de metal ou plástico) a uma espessura de 10 mm a 100 mm (FOUST et al., 1982). A circulação de ar é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento do ar de entrada (Figura 12). O controle da temperatura é por meio de um termostato. Após a secagem, o secador é aberto e as bandejas descarregadas. Durante a secagem, são feitas pesagens de uma pequena bandeja com uma amostra do produto para verificar o processo final.

Figura 12 - Secador de bandejas operando com circulação de ar

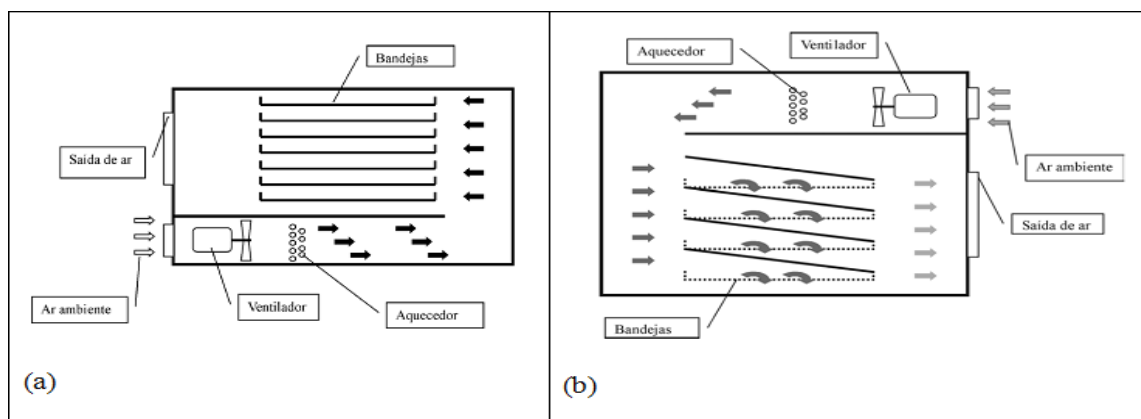


Fonte: Arquivo pessoal.

Estes secadores possuem custos de capital inicial e de manutenção baixos e são flexíveis para operar com diferentes alimentos. O secador de bandeja também pode ser encontrado com operação a vácuo, o que possibilita a utilização de temperaturas mais baixas para a secagem de produtos termossensíveis ou facilmente oxidados com o calor.

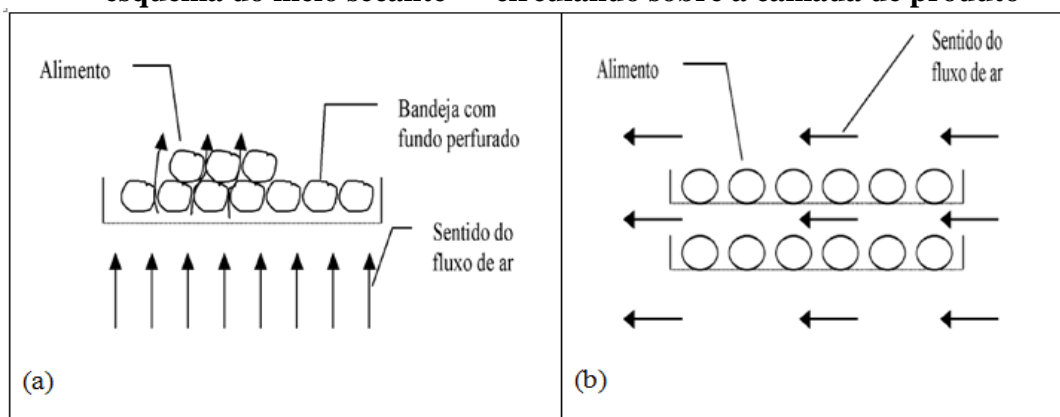
Os secadores de bandeja podem ser de dois tipos, os de fundo fechado, onde o meio secante circula através das mesmas e os de fundo telado, em que o ar circula em torno do produto a ser seco (MELONI, 2003). O movimento do fluxo de ar através das bandejas pode ser observado com mais detalhes nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Secadores de Bandeja. (a) com fundo fechado e (b) com fundo telado



Fonte: MELONI (2003).

Figura 14 - (a) esquema do meio secante atravessando a camada de produto, (b) esquema do meio secante circulando sobre a camada de produto



Fonte: MELONI (2003).

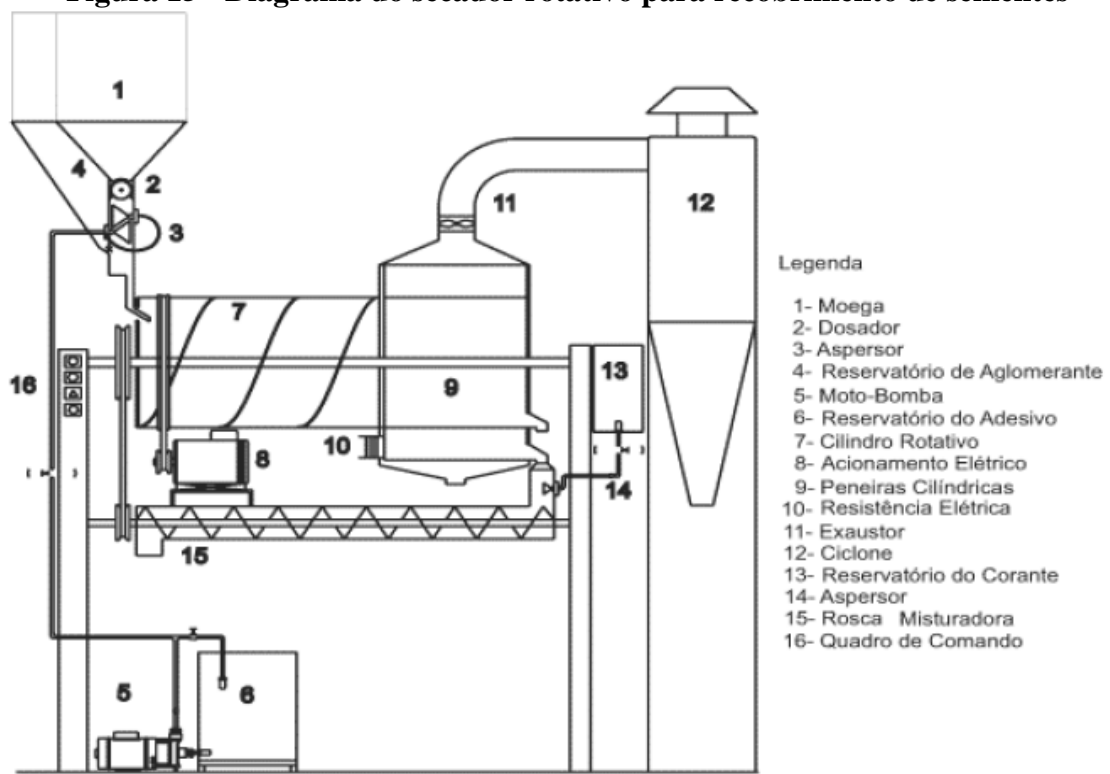
2.2.2.2 Secador de tambor rotativo (Secador de rolo)

São constituídos de um ou dois tambores rotativos, com diâmetro variável (0,5 a 1,5 m), medindo de 2 a 5 m de comprimento, aquecidos internamente com injeção de vapor (120

a 170°C) e usados na desidratação de produtos especiais, principalmente aqueles com alto teor de amido. O alimento é aplicado na superfície do tambor e forma-se uma película, que é desidratada, por causa do contato com a parede quente do tambor, é raspada quando se apresenta seca.

Apresentam também altas taxas de secagem e eficiência energética, no entanto, o alto custo inicial dos equipamentos e o dano pelo calor a alimentos termossensíveis, causado pelas altas temperaturas do tambor tem motivado certa mudança para outros tipos de secagem (FELLOWS, 2006).

Figura 15 - Diagrama do secador rotativo para recobrimento de sementes



Fonte: Perez (2001).

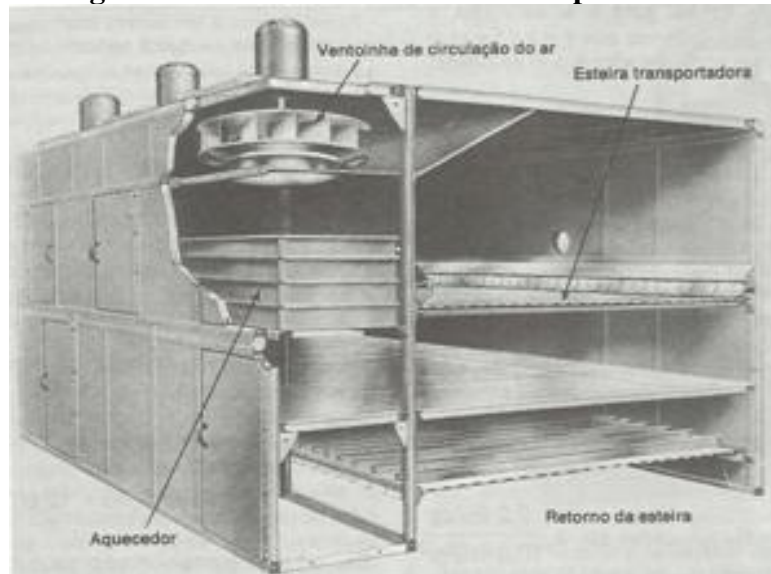
2.2.2.3 Secador Transportador (Secador de Esteira)

O secador de esteira consiste de várias sessões em série, cada qual com o seu ventilador e aquecimento próprio. Essas sessões são unidas por meio de uma esteira construída de aço inoxidável que tem até 20 metros de comprimento e 3 metros de largura (Figura 16). Cada sessão pode ter suas próprias condições de processo como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. Normalmente, as primeiras sessões de entrada do alimento úmido

apresentam maiores temperaturas e velocidade do ar, tendo essas variáveis seus valores reduzidos à medida que o alimento percorre as outras sessões.

O alimento é seco até um teor de umidade de 10 a 15% e, posteriormente, finaliza-se com a *secagem de caixa*. Esse equipamento possui um bom controle das condições de secagem e altas taxas de produção.

Figura 16 - Secador com esteira transportadora



Fonte: FOUST et al. (1982).

2.2.2.4 Secador de Caixa

Os secadores de caixa são grandes recipientes compridos, retangulares ou cilíndricos, providos de uma base de tela. O ar quente passa através de uma camada de alimento em velocidades relativamente baixas. Esses secadores possuem uma alta capacidade e baixos custos iniciais e de funcionamento e são principalmente indicados para “terminar” a secagem (até uma umidade de 3 a 6%) depois de uma secagem inicial com outros tipos de secadores (FELLOWS, 2006).

2.2.2.5 Secador de Túnel

São bastante usados na desidratação de frutas e hortaliças. São constituídos de túneis de 10 a 15 metros de comprimento, que recebem nos seus interiores transportadores ou vagonetes com a matéria-prima (GAVA, 2009). Neste secador, os sólidos são colocados em

bandejas que estão apoiadas sobre uma base móvel (carrinho), o que possibilita a movimentação no interior do túnel de secagem.

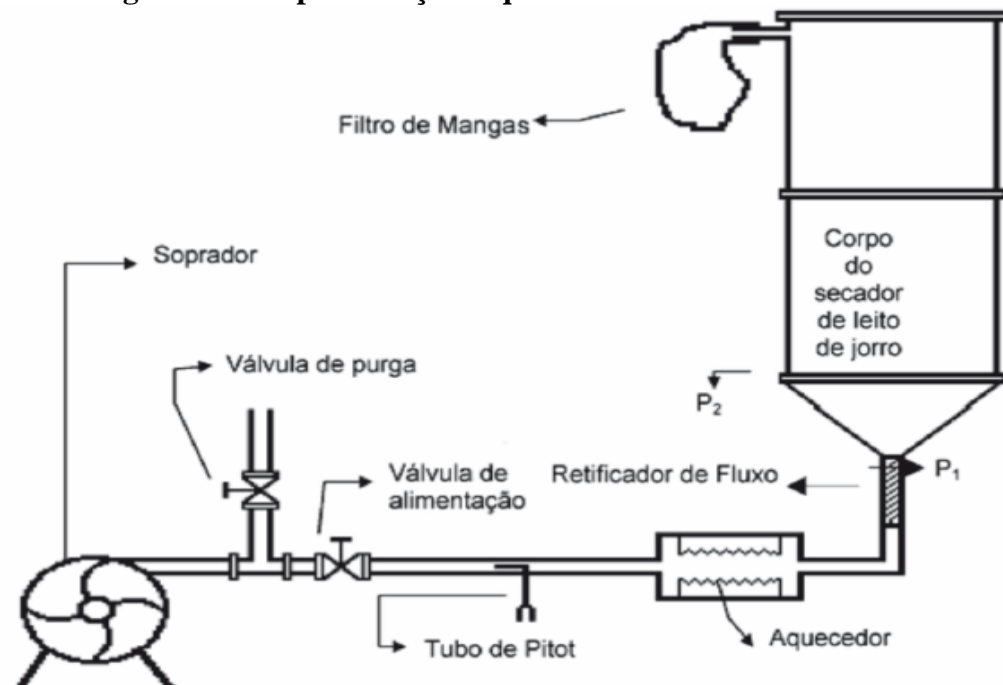
A circulação de ar no secador também é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento do ar de entrada (semelhante ao que acontece na secagem feita com bandejas), o qual circula em contracorrente com as bandejas. A circulação de ar poderá ser natural ou forçada. A velocidade de evaporação é bem maior quando comparada ao processo por secador de bandejas.

2.2.2.6 Secador de leito fluidizado

Nesse tipo de secador, o ar quente atravessa um leito, onde o alimento sólido está depositado e, pela sua alta velocidade, o ar quente é capaz de fluidizar esse alimento (Figura 17). A vantagem é um alimento seco de forma mais homogênea e rápida.

O alimento sólido deve suportar danos mecânicos e é sustentado por uma chapa perfurada, a qual permite a passagem do ar. Os alimentos secos nesse tipo de secador são: ervilha, farinha, café, sal, açúcar, carne em cubinhos e outros.

Figura 17 – Representação esquemática de um leito fluidizado

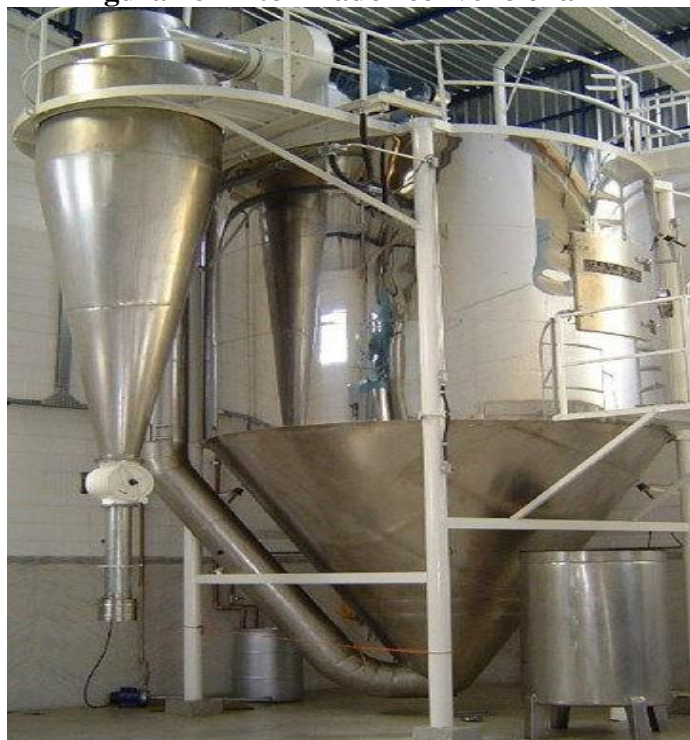


Fonte: DIAS et al. (2000).

2.2.2.7 Secador por atomização ("*spray dryer*")

Esse secador é utilizado para a secagem de alimentos na forma líquida e o produto resultante é um pó. O alimento líquido é introduzido na câmara de secagem na forma de gotículas por bicos atomizadores (Figura 18) para o aumento da superfície de contato com o ar quente, que percorre a câmara em fluxo contracorrente, concorrente ou como uma combinação dos dois. A secagem ocorre sob condições constantes de evaporação, sendo assim, a temperatura do produto não é muito superior à temperatura de bulbo úmido do ar.

Figura 18 - Atomizador convencional



Fonte: Arquivo Pessoal.

2.2.2.8 Secadores de Forno

São construções, em geral, de dois pisos, usadas em alguns países na secagem de malte, maçã e batata. Na parte superior coloca-se o produto a desidratar. O ar quente, obtido no primeiro piso pelo uso de forno ou estufa, passa pelo produto por movimentação natural ou com ajuda de ventilador. O material é mantido em contínua agitação, sendo o tempo de secagem relativamente longo (GAVA, 2009). Apesar disso, esses secadores possuem uma alta capacidade de produção, fácil construção e baixos custos de manutenção.

2.2.2.9 Puff-Dryer

É um sistema especial de desidratação utilizado na secagem de cereais expandidos e sucos de frutas. O produto desidratado apresenta uma estrutura porosa que permite uma boa reconstituição em água fria ou outro líquido qualquer.

2.2.2.10 Formatizador (foam-mat dryer)

O líquido a ser desidratado é transformado numa espuma estável para dar maior superfície de evaporação antes de receber o ar quente num sistema contínuo similar ao túnel de secagem.

2.2.2.11 Liofilização (freeze-drying)

É um processo de desidratação de produtos em condições de pressão e temperatura tais que a água, previamente congelada, passa do estado sólido diretamente para o estado gasoso. Como esse processo é realizado a baixas temperaturas e na ausência de ar atmosférico, as propriedades químicas e organolépticas praticamente não são alteradas.

Inconvenientes como modificações indesejáveis, desnaturação de proteínas ou formação de camadas impermeáveis na superfície são contornados pela liofilização.

Figura 19 - Esquema de um liofilizador



Fonte: Arquivo Pessoal

Cada tipo de secador operando de um modo diferente atende as exigências de processo de diferentes produtos, e com características exemplificadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Relação dos produtos com seus secadores mais adequados

Secador	Produtos							
	Filme	Granulares	Lama	Líquido	Lodo ou pasta	Pasta Compacta	Pré formados	Sólido fibroso
Agitado		•	•	•	•			
Bandeja	•	•			•	•	•	•
Com ar circulado		•					•	•
Esteira	•	•	•		•	•	•	•
Fluidizado		•			•		•	•
Pneumático		•			•		•	•
Rotativo direto		•						•
Rotativo indireto		•				•		•
Spray			•	•	•			
Tambor	•		•	•	•			

Fonte: ALONSO (2001)

Tabela 2 - Características de secadores selecionados

Tipo de secador	Capacidade de e-vaporação (kg de água/m ² h)	Consumo de energia (kJ/kg de água)	Eficiência térmica (%)	Tempo de residência (s, min, h)
Bandeja ou Cabine	0,1-1	3000-4500	50-80	2-24 h
Túnel ou transporte	5-18	4000-6000	35-60	10-180 min
Rotativo	30-120 ^a	3500-6000	40-70	10-60 min
Leito fluidizado	30-90	3100-6000	40-80	5-30 min
Pneumático	10-100 ^a	3500-5000	50-75	2-15 s
Pulverizador	1-30 ^a	4000-5000	50-60	5-120 s
Tambor	4-30	3000-3500	70-85	10-30 s
Vácuo e Congelamento	1-7	>7500	-	1-24 h

^a em kg de água/m²h

Fonte: CRAPISTE *et al.* (1997).

2.2.3 Secadores Híbridos

Tanto o secador solar direto como o secador solar indireto são dependentes das condições meteorológicas, pelo que em dias nebulosos e com chuva, o rendimento do secador diminui drasticamente podendo até em situações extremas ocasionar a perda dos produtos a secar, por apodrecimento.

Para ultrapassar este inconveniente os investigadores criaram os secadores híbridos, os quais utilizam uma energia suplementar, que tem por finalidade manter uma temperatura constante no secador e aumentar a circulação do ar através da utilização de ventiladores elétricos. A energia solar é utilizada apenas para pré-aquecimento do ar à entrada da câmara de secagem.

Este tipo de secador funciona independente das condições atmosféricas, permite um melhor controle da secagem e um aumento da produção porque o secador pode funcionar 24 horas por dia. No entanto, devido ao custo de investimento e de produção elevados necessita-se de abastecimento fuel, eletricidade, gás ou resíduos agrícolas para o queimador e mão-de-obra qualificada para a sua manutenção.

2.3 Alterações provocadas pela desidratação

Todos os produtos sofrem mudanças durante a secagem e a estocagem o que reduz a sua qualidade, quando comparada com a de um produto fresco. Portanto o objetivo de melhorar as tecnologias de secagem é minimizar essas mudanças e maximizar a eficiência do processo.

No decorrer da desidratação, os alimentos podem sofrer alterações em suas qualidades nutricionais e sensoriais. As características mais afetadas são cor, aroma, textura e sabor.

2.3.1 Alterações na textura

Importante causa de deterioração. Em alimentos adequadamente branqueados, a perda de textura é provocada pela gelatinização do amido, cristalização da celulose e variações localizadas no teor de umidade, as quais distorcem permanentemente as células rígidas, conferindo ao alimento aparência de enrugado (OETTERER, 2006).

A velocidade e a temperatura de desidratação possuem efeito substancial na textura dos alimentos. Em geral, secagem rápida e temperaturas altas provocam maiores alterações do

que taxas moderadas desses fatores. Altas temperaturas provocam alterações químicas e físicas complexas na superfície e formação de crostas, dificultando a retirada de umidade do interior do alimento.

2.3.2 Alterações no sabor e no aroma

O calor não apenas vaporiza a água durante a secagem, mas também provoca perdas de componentes voláteis do alimento. A velocidade de deterioração é determinada pela temperatura de armazenagem e pela atividade de água do alimento.

2.3.3 Alterações na cor

A oxidação e a atividade enzimática provocam escurecimento durante o armazenamento, o que pode ser evitado por tratamento térmico (branqueamento) e tratamentos com SO₂ e ácido ascórbico.

O escurecimento depende da atividade da água e da temperatura de armazenagem, aumentando progressivamente com a elevação da temperatura, quando a umidade excede 4 a 5% e com temperatura acima de 38°C. Redução da umidade a menos de 2% e aplicação de ácido sulfuroso ou outra fonte de enxofre podem prevenir o escurecimento.

2.3.4 Alterações no valor nutritivo

A vitamina C é sensível ao calor e à oxidação, porém tempo curto de secagem, baixa umidade e baixo nível de oxigênio podem reduzir sua perda. A retenção das vitaminas nos alimentos desidratados em geral é superior à dos alimentos secos ao sol.

2.3.5 Efeito sobre microrganismos e enzimas

Existem fungos capazes de desenvolverem-se em substratos com baixo teor de umidade (12%), ao passo que bactérias e leveduras requerem níveis de umidade superior a 30%.

Frutas secas apresentam certo teores de umidade (15% a 25%) capaz de propiciar o desenvolvimento de alguns microrganismos. No entanto, outras são passíveis de ser consideradas ilesas por longo tempo.

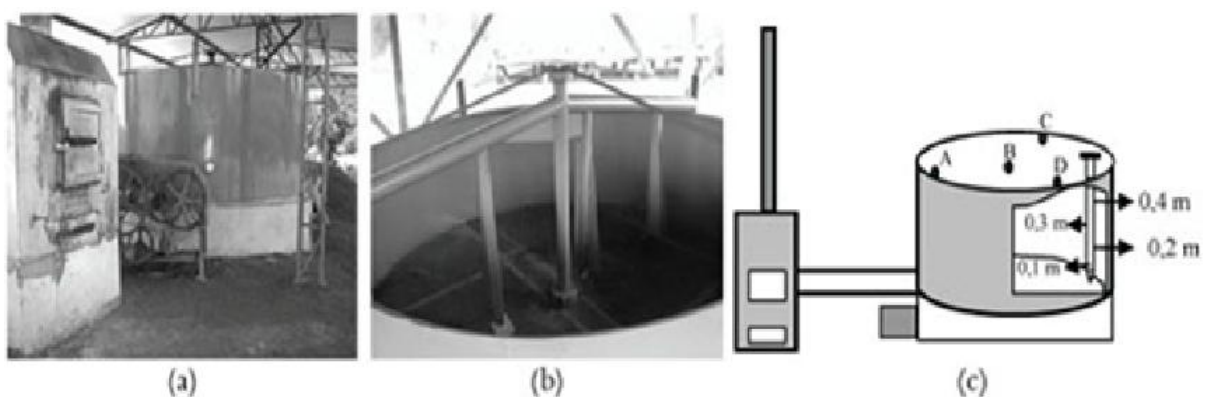
Quanto às enzimas, pode-se dizer que a grande maioria é sensível aos tratamentos que empregam o calor úmido combinado com temperaturas superiores às de suas atividades, porém não são sensíveis ao calor seco. Essa propriedade inerente às enzimas é atenuada pelo uso de calor úmido ou pela aplicação de agentes químicos na etapa anterior à desidratação da matéria-prima.

2.4 Estado da Arte

Atualmente vários trabalhos estão sendo realizados no Brasil e no exterior com o intuito de melhorar a eficiência e minimizar os custos energéticos dos secadores elétricos. Variáveis de fluxo de ar, temperatura e velocidade, além de materiais que diminuam a perda de calor por radiação, condução ou convecção são testados para se obter uma melhor qualidade no processo de desidratação.

Greco et al. (2010) desenvolveu um secador de camada fixa para café. O secador foi construído sobre uma base de alvenaria, com a câmara de secagem e fornalha confeccionadas em chapas de aço-carbono (Figura 20). Durante os testes ficou constatado que a eficiência energética não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, tendo média geral de $12,30 \text{ MJ kg}^{-1}$ de água evaporada.

Figura 20 - Secador mecânico de camada fixa para café, com sistema adaptado de revolvimento. (a) vista externa; (b) câmara de secagem (com sistema de revolvimento dotado de quatro pás); (c) espuma indicando os locais de amostragem de grãos de café dentro da câmara de secagem.



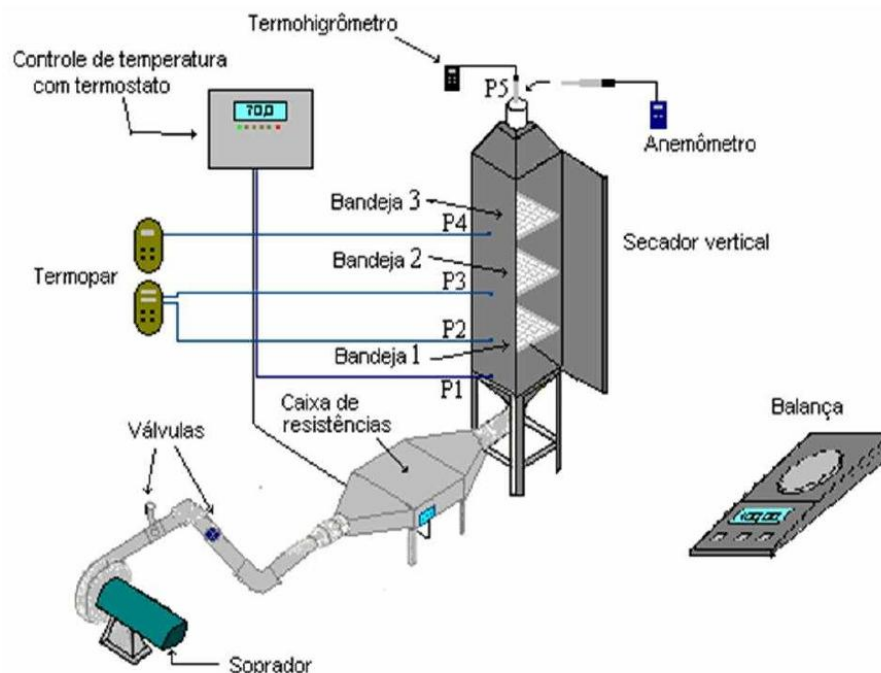
Fonte: GRECO, et al. (2010)

Lourenço (2011) analisou a desidratação parcial de tomates cereja em secador de badejas vibradas com reciclo. O secador estudado consiste basicamente de um túnel vertical

de secagem com quatro bandejas perfuradas por onde escoam de maneira cruzada o tomate e o ar aquecido. Todas as bandejas estão conectadas a um sistema de vibração que auxilia no escoamento dos tomates, para que durante o processamento os frutos sejam conduzidos a uma esteira que auxilia na recirculação dos frutos. Um software foi desenvolvido para quantificar a influência das variáveis significativas do processo: vazão de ar, temperatura e massa de tomate alimentada. Os resultados indicaram que as influências simultâneas da vibração e das esferas de porcelana intensificam o processo de secagem, resultando em uma cinética de secagem específica.

Outro processo de desidratação foi estudado por Machado (2009) em que foram determinados experimentos de secagem realizados em batelada no secador convencional de bandejas (Figura 21). Os materiais usados para construção deste secador foram alumínio, chapa de zinco, aço inox, tela de nylon, lã de rocha, vidro e metalon. O uso desses materiais se deu em razão da preocupação com as seguintes características: resistência, baixo custo, segurança, eficiência e qualidade final do produto desejado. No secador, o fluxo de ar passa perpendicular à bandeja, com velocidade previamente estabelecida através da regulagem em uma válvula gaveta disposta no sistema de admissão do ar. Para monitorar o perfil de temperatura, foram colocados termopares digitais ao longo da câmara de secagem.

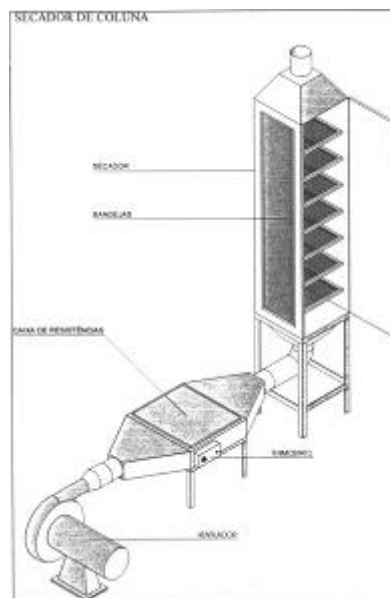
Figura 21 - Secador convencional de bandejas



Fonte: MACHADO (2009).

Costa (2008) realizou experimentos de secagem em um secador piloto tipo coluna estática (Figura 22). Nesse equipamento, o ar ambiente, impulsionado por um ventilador centrífugo, passa através de um conjunto de resistências elétricas, sendo aquecido pela energia fornecida pelas resistências. A temperatura do ar na entrada do secador é controlada por um termostato que liga ou desliga um conjunto de resistências elétricas. Foi realizada a secagem de bananas no secador de coluna estática, obtendo-se um produto comercial conhecido como banana passa. A partir dos experimentos realizados no secador piloto tipo coluna estática, foram modelados, a difusividade de água em bananas assim como o calor latente de vaporização de água.

Figura 22 - Secador de coluna estática, com aquecimento por resistências elétricas.



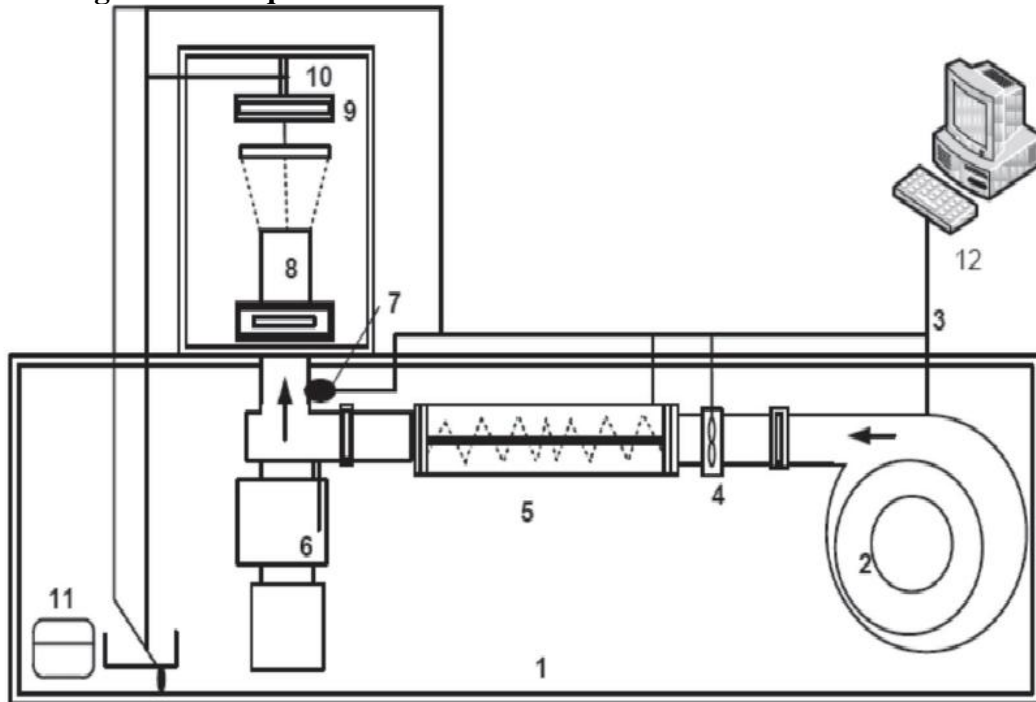
Fonte: COSTA (2008).

Vilhalva et al. (2012) utilizou para a secagem de cascas de mandioca um secador convectivo de bandejas (1,90 m de altura por 0,80 m de largura, com capacidade de cinco bandejas metálicas de 55 cm x 57 cm cada), com controle de temperatura e de fluxo do ar. Quanto maior a temperatura do ar, e nas condições intermediárias de fluxo de ar utilizadas, maior foi a taxa de secagem.

Rocha et al. (2012) utilizou cinco temperaturas do ar de secagem (30, 40, 50, 60, 70°C), em um secador de leito fixo com fluxo de ar ascendente (Figura 23). O secador dispunha de sistema de pesagem automático, que registrava em um microcomputador, a cada 5 min., a massa do produto, a umidade relativa, a temperatura do ar ambiente e do ar secagem

e velocidade do ar de secagem, fixada em 1 m s^{-1} em todos os ensaios de secagem. A secagem foi finalizada quando o produto atingiu o teor de água de 10%.

Figura 23 - Esquema do secador de leito fixo com fluxo de ar ascendente

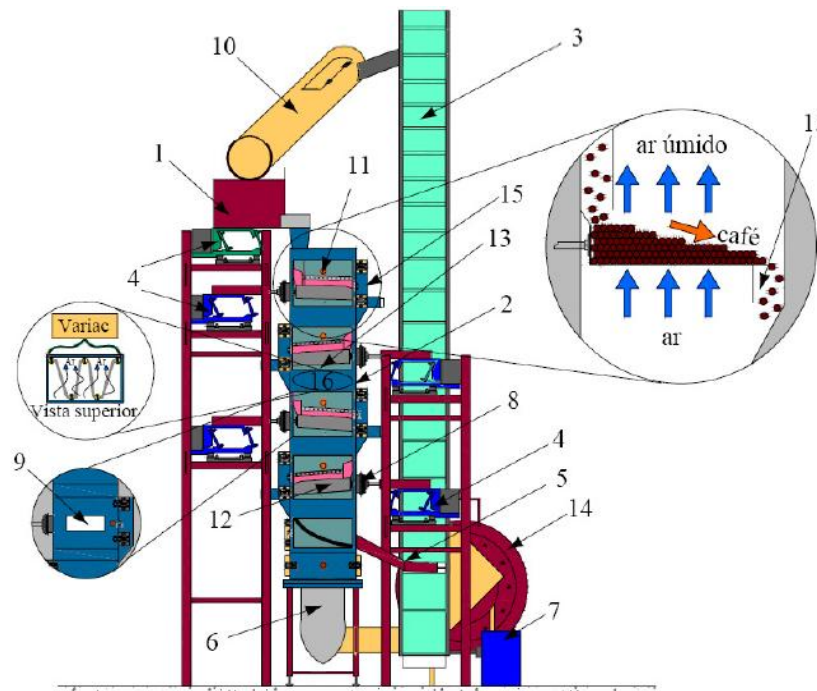


1. Suporte; 2. Ventilador; 3. Controle do fluxo de ar; 4. Anemômetro; 5. Resistências elétricas; 6. Válvula pneumática; 7. Sensor de temperatura; 8. Câmara de secagem; 9. Balança; 10. Elevador; 11. Compressor; 12. Computador de aquisição de dados e controle.

Fonte: ROCHA et al. (2012).

Rezende (2011) utilizou na modelagem e simulação da secagem de frutos de café um secador constituído basicamente de quatro seções: túnel vertical de secagem, sistema de vibração, sistema de injeção de ar aquecido no túnel de secagem e sistema de reciclo dos frutos de café. O túnel de secagem contém quatro bandejas perfuradas por onde escoavam os frutos de café e o ar, em fluxo cruzado (Figura 24). A secagem se inicia com a alimentação dos frutos de café no alimentador 1, estando a bandeja 1 com o dispositivo de vibração acionado (baixa intensidade). O café escoava para a segunda bandeja e o leito vai sendo formado, aciona-se o 2º dispositivo de vibração e assim sucessivamente. Os dispositivos de vibração são posicionados para que ocorra o escoamento dos frutos de café sobre as bandejas (se a vibração for insuficiente o leito não escoava, se for excessiva, principalmente nas etapas mais avançadas de secagem quando os frutos estão mais secos impossibilita a formação de leito de secagem).

Figura 24 – Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal)



1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4: vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos frutos de café; 6: tubulação de ar; 7: moto-reductor; 8: dispositivo de vedação; 9: janela de inspeção; 10: tubulação de PVC; 11: lâmpada; 12: bandeja; 13: termopar; 14: soprador; 15: vertedouro; 16: sistema de aquecimento do ar.

Fonte: REZENDE (2011).

Furtado et al. (2010) construiu um sistema de controle automático de baixo custo e simples operação, capaz de controlar a temperatura de um secador de bandejas. O secador descontínuo de bandejas em escala de bancada é constituído basicamente de um sistema de ventilação, composto por um ventilador axial acoplado dentro do secador e um sistema de aquecimento, composto de seis resistências elétricas de 500W. A partir da montagem do sistema controlador de potência foi desenvolvido um sistema de engrenagens responsável pelo controle da posição do potenciômetro.

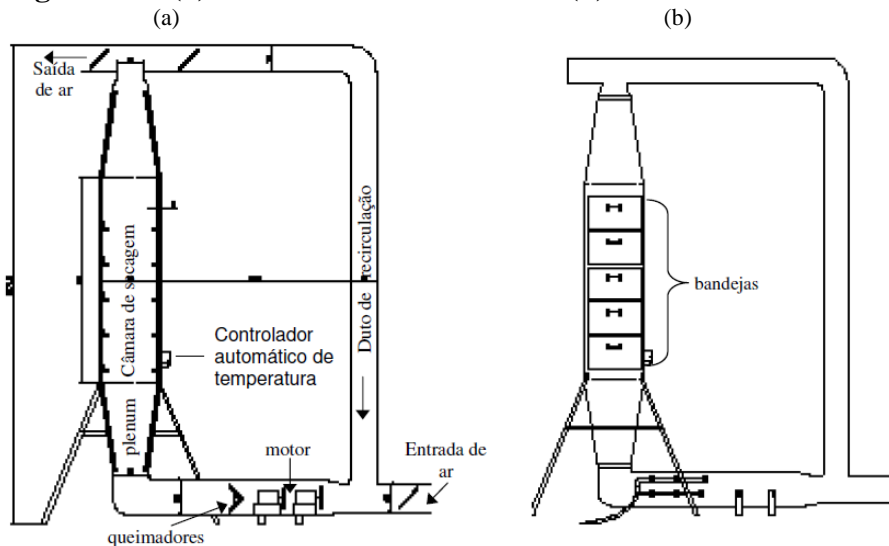
Na desidratação realizada por Ferreira et al. (2012) utilizou-se um secador de camada delgada experimental, com ar aquecido. O secador é constituído por um ventilador centrífugo, um aquecedor elétrico, e uma câmara de secagem com estrutura de sustentação para três bandejas de alumínio, além de um controlador de temperatura. A velocidade do ar de secagem foi ajustada, por meio da manipulação da válvula de admissão de ar no secador, e medida com auxílio de um termo-anemômetro digital portátil. O secador foi colocado em funcionamento sem carga, durante 30 min., para uniformização da temperatura do ar de secagem.

Solano e Garzon (2010) realizaram secagem de feijão com conteúdos de água de 21 e 18% em um secador experimental de camada delgada, com controle de temperatura (por meio de três resistências elétricas) e velocidade do ar de secagem (através da abertura e do

fechamento do diafragma acoplado, na entrada do ventilador). Os testes só foram iniciados quando a velocidade do ar de secagem atingia $0,7 \text{ m s}^{-1}$, medida por meio de um anemômetro digital de lâminas rotativas, e quando a temperatura do ar era de 30, 40, 50 e $60 \text{ }^\circ\text{C}$, e se mantinha constante; a temperatura foi medida com um termômetro de mercúrio de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de precisão, localizado imediatamente abaixo da bandeja, em que se encontravam os grãos de feijão.

Com o objetivo de desidratar hortelã para a produção de óleos, Randünz et al. (2006) propôs a construção de um secador à gás, com bandejas (Figura 25). A câmara de secagem era composta por cinco bandejas quadrangulares, com tampas teladas, construídas de aço inoxidável, com as dimensões $0,25 \text{ m}$ de lado e $0,15 \text{ m}$ de altura, perfazendo um volume total na câmara de aproximadamente $0,0469 \text{ m}^3$. Para a obtenção dos dados referentes à temperatura (do ar ambiente, do ar de secagem, do ar de exaustão e do ar na massa do produto) e da umidade relativa (do ar ambiente, do ar de secagem e do ar de exaustão), empregou-se um sistema automático de aquisição de dados acoplado, via placa de expansão, a um microcomputador, e mediante o uso de termopares tipo “T”, previamente calibrados.

Figura 25 – (a) Corte frontal do secador. (b) Vista frontal do secador



Fonte: Randünz et al. (2006)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi utilizado o secador elétrico proposto. A construção deste secador foi realizada no período de 2009 a 2011. Anteriormente à proposta apresentada neste trabalho, o secador apresentava um gradiente de temperaturas do ar de secagem, na câmara de secagem, que prejudicavam a qualidade de secagem.

Este secador tipo cabine foi desenvolvido nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, *no campus I* e possui dimensões de 3,4m de comprimento; 0,9m de altura e 1,1m de largura. Sua planta pode ser visualizada em detalhes, no APÊNDICE A.

Internamente, o secador é composto por um ventilador (cuja função é forçar o escoamento de ar para o interior do secador) e uma resistência elétrica com potência de 3kW (para o aquecimento do ar de secagem). Dentro do secador foram inseridas bandejas de aço com dimensões de 0,7m x 0,5m e área útil de secagem de 1,75 m² (Figura 26), fixadas em uma estrutura em balanço, ligadas por um cabo de aço a uma célula de carga para acompanhar a variação da massa instantânea do produto nas quais foram realizados posteriormente os ensaios de secagem e onde foram colocados os frutos para a desidratação. Como a área útil de secagem equivale a 1,75 m², de acordo com Leon *et al.* (2002), a capacidade total de carga deste secador em estudo seria de aproximadamente 7 kg de produto fresco para desidratação.

Figura 26 - Estrutura de bandejas do secador



Fonte: Arquivo Pessoal.

Para a realização dos experimentos, que são apresentados neste Trabalho de Conclusão de Curso II, foram utilizados sensores específicos para a realização de todas as medições de temperatura, velocidade de entrada e saída de ar e umidade relativa. Para fazer a medição de energia total ativa consumida pelo secador, foi utilizado um alicate wattímetro medidor de energia (ICEL, modelo AW-4700). Ele possui o tempo de resposta inferior a 1s, opera na faixa de 0 a 9,999kWh e apresenta incerteza de medição de 3%. As medidas de temperatura foram realizadas em um indicador de temperatura (ICEL TD-880) operando acoplado a dois termopares tipo “K” utilizados para medir a temperatura em pontos diferentes no secador e, também, a temperatura ambiente. A incerteza máxima absoluta da calibração dos termopares foi de 0,4°C, com uma probabilidade de enquadramento de 95%.

Para a medição da velocidade do escoamento de ar foi utilizado o termo-higroanemômetro ICEL AN-4870. De acordo com o manual de instruções do sensor, o erro máximo da medida de velocidade do escoamento de ar desse instrumento é de $\pm 3\%$ do valor lido.

3.2 Ensaios Experimentais

Para solucionar o problema da falta de homogeneidade e diminuir as perdas térmicas radiantes foi proposta uma mudança estrutural, com a colocação de chapas de aço no interior do secador. Foram colocadas placas metálicas, uma na entrada e outra na saída da câmara de secagem do secador, de modo transversal para que o fluxo de ar fique homogêneo e estabilizado.

Primeiramente, sem nenhuma mudança estrutural, o secador foi submetido a três testes iniciais. O primeiro foi para avaliar a temperatura interna em dois pontos diferentes do secador (parte inferior e parte superior das bandejas), em função do tempo de secagem. Essa análise serviu para avaliar a heterogeneidade que era apresentada pelo secador, as possíveis causas e o que poderia ser alterado no projeto estrutural inicialmente proposto.

Nos ensaios térmicos com o secador vazio, o controlador de temperatura foi ajustado para 60°C. Esta temperatura requerida foi controlada pelo controlador PID acoplado na parte superior externa do secador, fazendo com que o calor gerado pela resistência elétrica suprisse a demanda necessária a cada instante.

Primeiramente, foram realizados ensaios para a medição da temperatura do fluxo ar que passa nas bandejas em dois pontos diferentes do secador, sem a instalação prévia das placas metálicas e mudança estrutural. Os dados foram coletados a cada minuto durante vinte e dois

minutos, tempo suficiente para que o fluxo de ar se estabilizasse, permitindo averiguar como seria determinada a circulação de ar e sua possível homogeneidade.

Em seguida, foram analisados a velocidade máxima e mínima de secagem em função do tempo. Nesse teste a velocidade é um importante fator para o processo de secagem, pois um fluxo maior ou menor de ar pode alterar a transferência de massa, a qualidade de secagem e o tempo gasto para executar o processo e, conseqüentemente pode alterar a quantidade de energia elétrica gasta para a desidratação do produto.

Posteriormente, foram realizados ensaios variando a velocidade de escoamento do ar, como proposto pela literatura, com uma circulação de ar em baixa velocidade em torno de 2m/s, mas também se realizou testes com circulação forçada de ar que pode chegar a aproximadamente 7,4m/s. A partir da variação de temperatura e velocidade é possível, através de fórmulas e manipulações matemáticas, avaliar a umidade final do produto. Desta forma, a análise comparativa dos resultados obtidos, torna possível avaliar a forma de secagem mais adequada. Por último, com o secador ainda sem nenhuma mudança estrutural, avaliou-se a temperatura ambiente na qual o secador estava inserido.

Em seguida, o secador passou por uma mudança estrutural com a colocação de placas metálicas que fizeram com que o escoamento de ar ficasse mais homogêneo, sem que a circulação de ar se concentrasse apenas em uma determinada região do secador. Para a comprovação do êxito obtido com a mudança estrutural, foram analisados novamente a temperatura interna do secador em dois pontos diferentes. Os dados também foram coletados de 5 em 5 minutos durante 80 minutos, tempo suficiente para que o fluxo de ar se estabilize e entrasse em regime permanente.

O teor de umidade final, após o ensaio de secagem de bananas, também foi observado. Foram realizados ensaios com velocidade mínima de 3m/s e velocidade máxima de escoamento de aproximadamente 7m/s. Para se determinar esse teor, primeiramente, as amostras foram pesadas em uma balança. Posteriormente, foram colocadas nas bandejas em posições verticais diferentes. Após a secagem em um tempo pré-estabelecido a amostra é pesada novamente. Em seguida foi calculado o teor de umidade final da amostra, em base úmida.

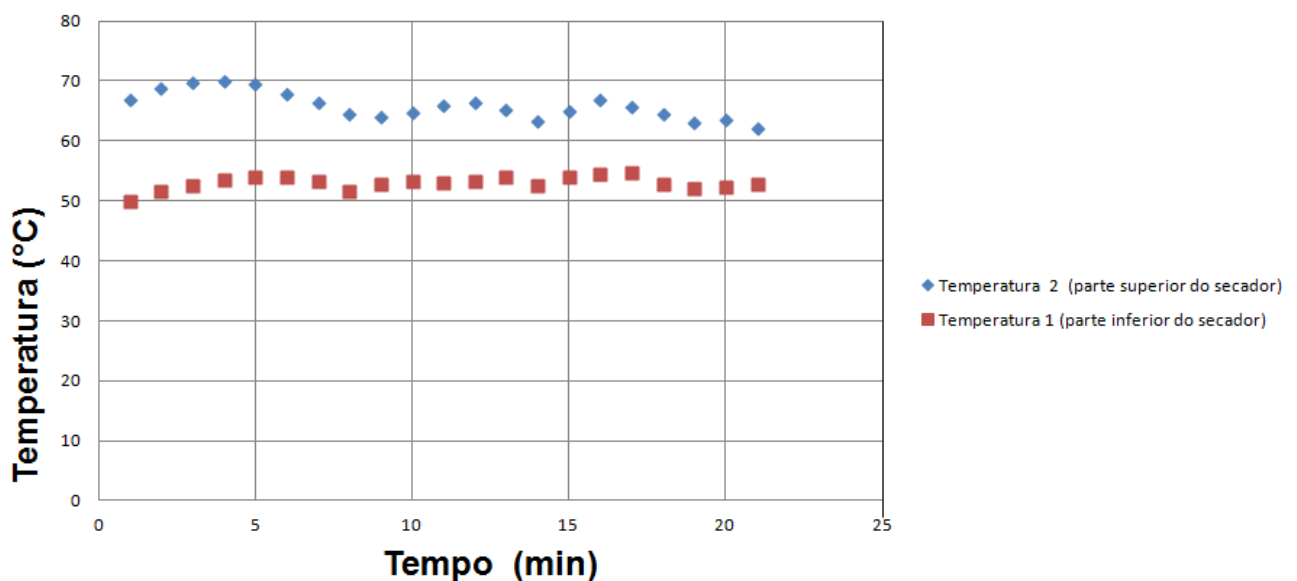
Por último, foram realizados testes com o secador na cor branca, onde se analisou a eficiência do secador e as perdas radiantes no processo. Esses testes foram executados com os mesmos critérios adotados com o secador na cor preta, para que não houvesse nenhuma interferência ou discrepância nos resultados posteriormente encontrados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios térmicos preliminares com o secador vazio

A temperatura do ar de secagem, dentro do secador, para uma região localizada em uma bandeja superior (azul) e para uma região localizada em uma bandeja inferior (vermelho), antes da instalação das placas metálicas, é mostrada na Figura 27.

Figura 27 – Temperatura em função do tempo sem as placas metálicas

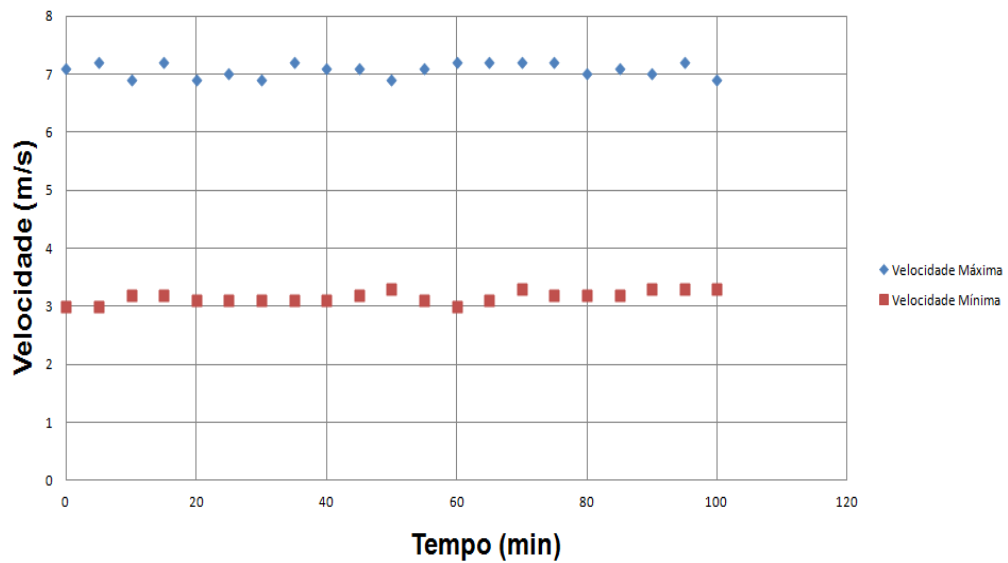


Fonte: Arquivo Pessoal.

Pode ser observado na Figura 27 que a temperatura média do ar na bandeja inferior durante o ensaio foi de $(52,9 \pm 0,8)^\circ\text{C}$, enquanto que a temperatura média do ar na parte superior foi de $(65,8 \pm 1,9)^\circ\text{C}$. Essa diferença de temperatura ocorreu devido à não uniformidade do fluxo de ar, concentrando o calor somente em algumas regiões do secador. A consequência dessa falta de homogeneidade térmica é resultado da diferença de temperatura de secagem em pontos diferentes do secador, resultando normalmente em um produto de baixa qualidade. É uma característica desejável a secadores que se tenha uma diferença mínima de temperatura em todas as bandejas de telas.

A velocidade do escoamento de ar, medido na entrada do secador elétrico estudado, em função do tempo de operação, é apresentada na Figura 28, para as condições de ajuste de vazão máxima (azul) e de vazão mínima (vermelho).

Figura 28 – Velocidade de entrada numa circulação mínima e forçada de ar

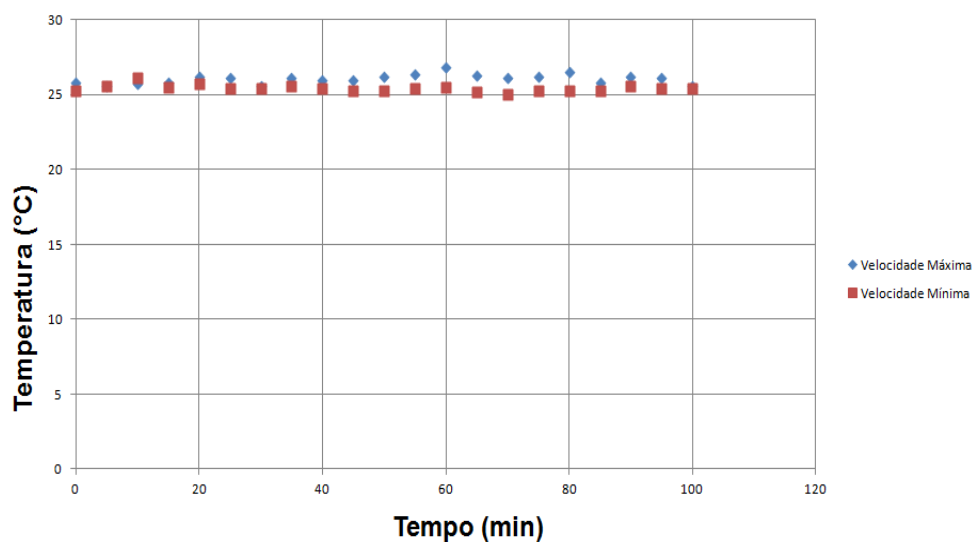


Fonte: Arquivo Pessoal.

Observa-se que, de acordo com a Figura 28, em ambas as situações, a velocidade de entrada do ar se mantém praticamente constante. Para a condição de vazão máxima, a velocidade máxima do ar medida foi de $(7,07 \pm 0,10)$ m/s e para a condição de vazão mínima, a velocidade mínima do ar foi de $(3,16 \pm 0,08)$ m/s.

Neste mesmo processo, também foram coletados os dados de medição da temperatura ambiente, que se manteve pouco variável durante todo o processo em ambas as situações de velocidade. A Figura 29 mostra a variação da temperatura ambiente com o tempo de secagem para velocidades com circulação forçada e mínima.

Figura 29 – Variação da temperatura ambiente em função do tempo



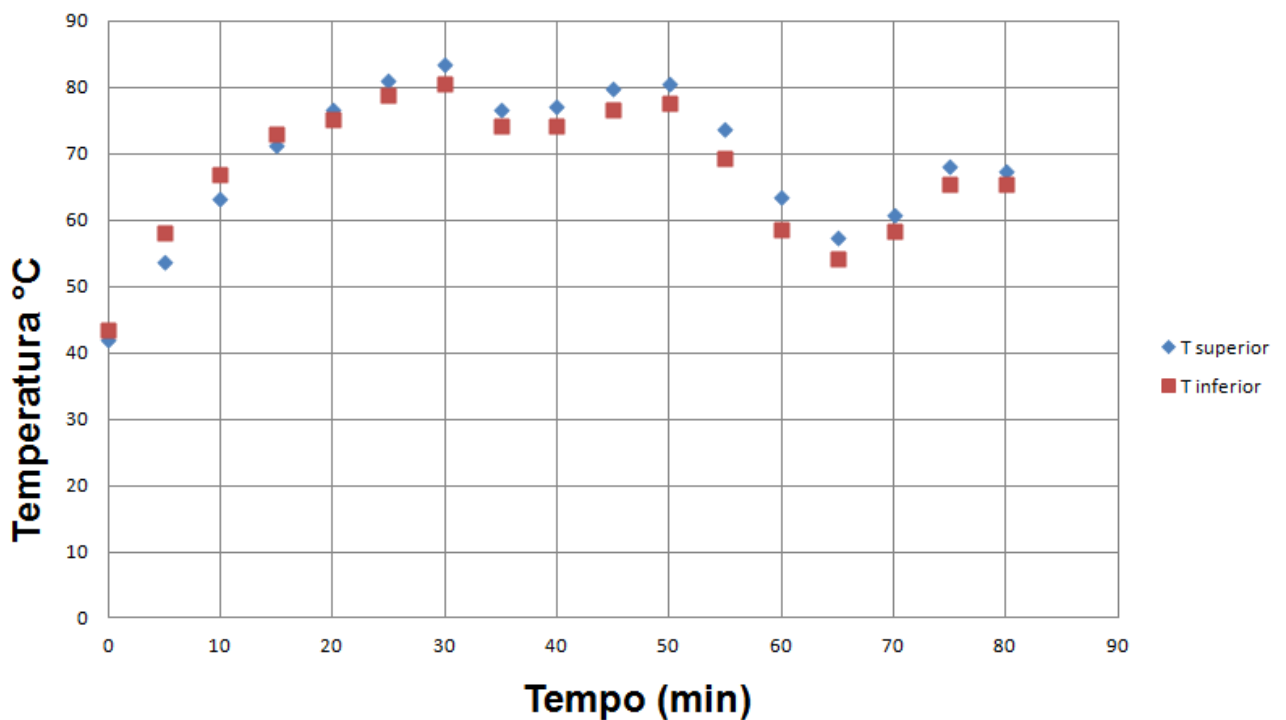
Fonte: Arquivo Pessoal

Percebe-se que as condições climáticas mantiveram-se praticamente inalteradas durante ambos os testes $(26,1\pm 0,2)^{\circ}\text{C}$ e $(25,4\pm 0,2)^{\circ}$, para velocidades máxima e mínima respectivamente.

4.2 Ensaios térmicos realizados com o secador modificado

A Figura 30 mostra a variação de temperatura do escoamento de ar, em função do tempo de operação, realizada através de termopares colocados na parte superior e inferior da câmara de secagem do secador, após a instalação de placas metálicas para uniformização do processo de secagem. Essa mudança estrutural propiciou um redirecionamento do escoamento de ar.

Figura 30 – Temperatura em função do tempo com as placas metálicas



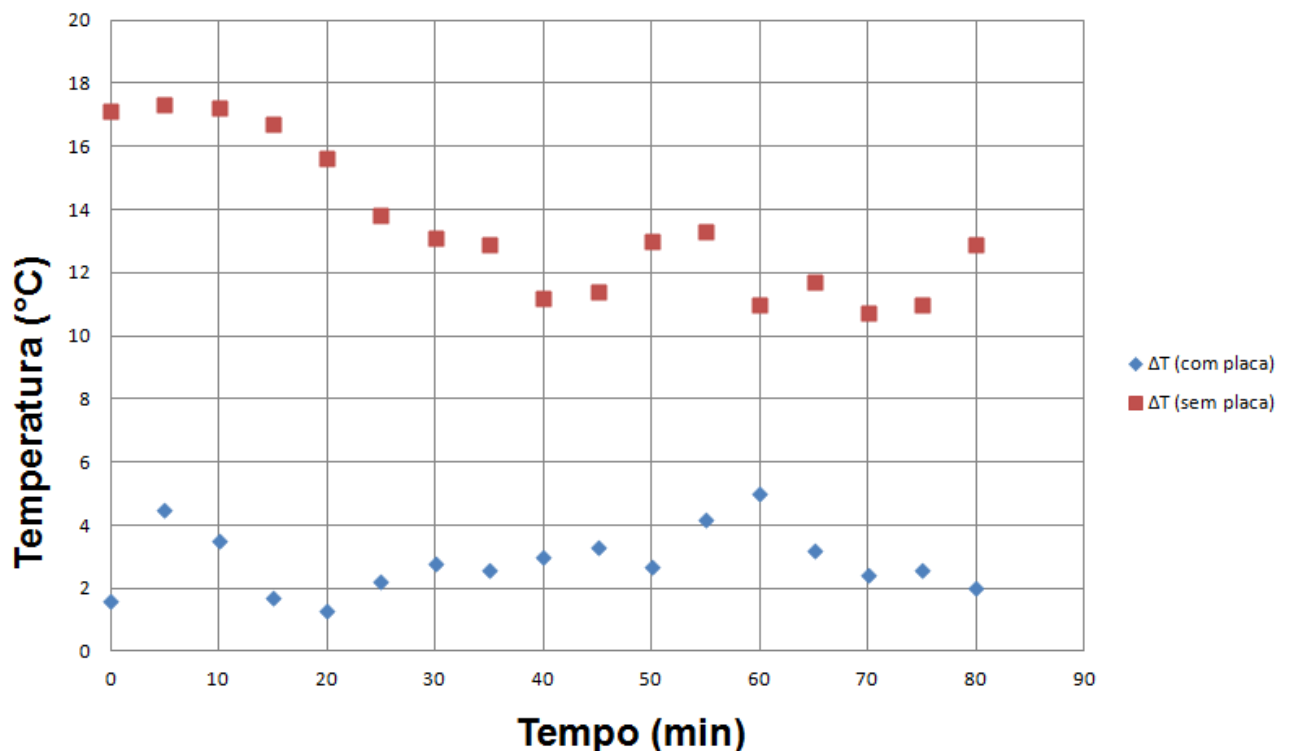
Fonte: Arquivo Pessoal.

Nota-se com a Figura 30 (comparada com a Figura 27), que com a instalação das placas metálicas houve uma grande redução da diferença de temperatura, devido a mudança no escoamento, forçando o ar a passar pela abertura projetada entre a placa e a superfície do secador. A medição foi feita nas mesmas posições em que foram feitas com o secador sem as placas metálicas. Obtendo-se uma temperatura na parte inferior e superior do secador de

($67,6 \pm 8,34$)°C e ($69,6 \pm 9,2$)°C, respectivamente. Essa variação de temperatura durante o ensaio em mais de 8°C é devido ao teste ter sido realizado com a configuração do controlador PID programado em 65°C, até os primeiros 45 minutos, e o restante do tempo o controlador PID foi programado em 55°C. Contudo, observa-se uma uniformização do escoamento de ar (comparando-se a diferença de temperatura entre bandejas diferentes no mesmo instante), promovendo uma homogeneidade do sistema, o que permite a circulação eficiente de ar quente nas bandejas e troca de ar úmido por ar seco com o ambiente.

Na Figura 31 são apresentadas as curvas com as diferenças de temperatura em função do tempo em dois pontos distintos no secador. Inicialmente foi realizado o teste sem a instalação das placas e posteriormente foi realizado o teste com a sua instalação. O teste foi realizado nas mesmas condições ambientes e os dados foram coletados de 5 em 5 minutos com um tempo total de 80 minutos. Este teste foi realizado com uma circulação de ar forçada com velocidade de fluxo de aproximadamente 7m/s.

Figura 31 – Diferença de temperatura no secador em função do tempo



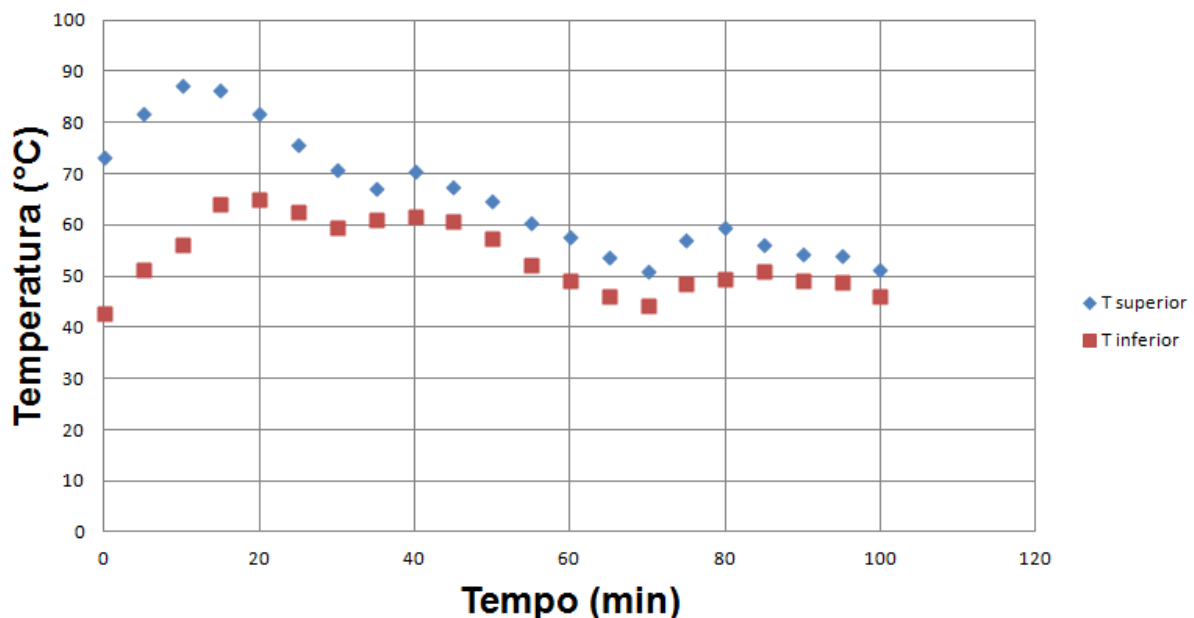
Fonte: Arquivo Pessoal.

Na Figura 31 percebe-se claramente que com a instalação das placas para uniformização do escoamento, houve uma redução drástica nas diferenças de temperatura na

parte superior e inferior do secador. Para a estrutura interna antiga do secador, a diferença média de temperatura era de $13,5^{\circ}\text{C}$ após entrar em regime permanente, mas chegando a picos de 17°C de diferença. Contudo, após a instalação das placas, a diferença média de temperatura no fluxo de ar caiu para $2,9^{\circ}\text{C}$, o que mostra a melhoria alcançada com a modificação do projeto estrutural, realizado neste trabalho.

A Figura 32 mostra a variação de temperatura do escoamento de ar nas bandejas localizadas na região superior e inferior do secador, em função do tempo de operação com uma velocidade mínima de escoamento de ar, na entrada, em torno de 2m/s .

Figura 32 – Temperaturas superior e inferior com velocidade mínima de escoamento



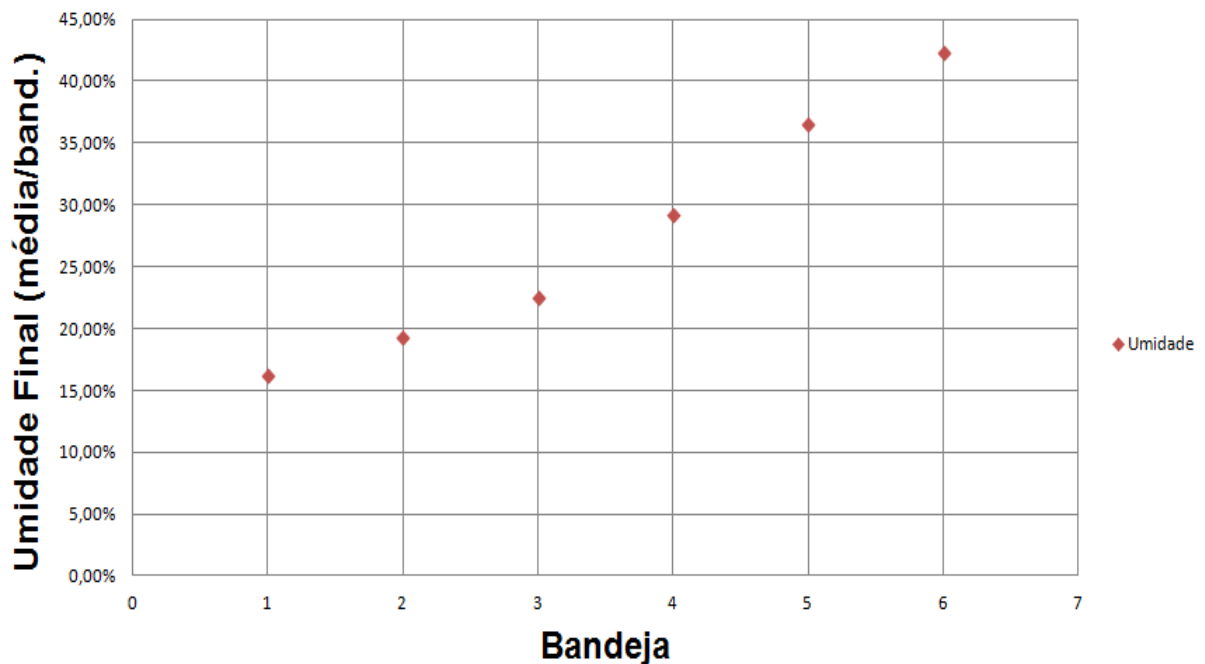
Fonte: Arquivo Pessoal

Observa-se na Figura 32 que com a redução da velocidade de fluxo ocorre um aumento no tempo para ocorrer a estabilidade, com a uniformidade da corrente de ar. Entretanto, esse regime lento de escoamento ocasionou um aquecimento da estrutura do secador, pois a massa de ar quente não está sendo totalmente absorvida. Mas essa redução na velocidade resultou numa diminuição no consumo de energia. A temperatura média superior registrada foi de $(65,8 \pm 9,9)^{\circ}\text{C}$, e a temperatura inferior de $(53,6 \pm 6,0)^{\circ}\text{C}$. Essa diferença no desvio padrão deve-se a configuração do controlador PID que até 40 minutos foi configurada na temperatura de 55°C e após foi configurada para 45°C até o restante do teste.

Para confirmar a melhoria operacional do secador, foram realizados ensaios de secagem de bananas, antes e após a instalação de placas para uniformização da temperatura do

escoamento. Inicialmente foram realizados testes de secagem para o secador sem alterações e foram avaliados os teores de umidade final da banana em todas as bandejas do secador. De acordo com a equação proposta para se calcular a umidade final do produto, pode ser observado o seu comportamento, em função da bandeja em que a amostra foi colocada (numeradas de 1 a 6, da parte superior para a inferior), de acordo com a Figura 33.

Figura 33 – Umidade final da amostra em cada posição vertical sem a instalação das placas metálicas

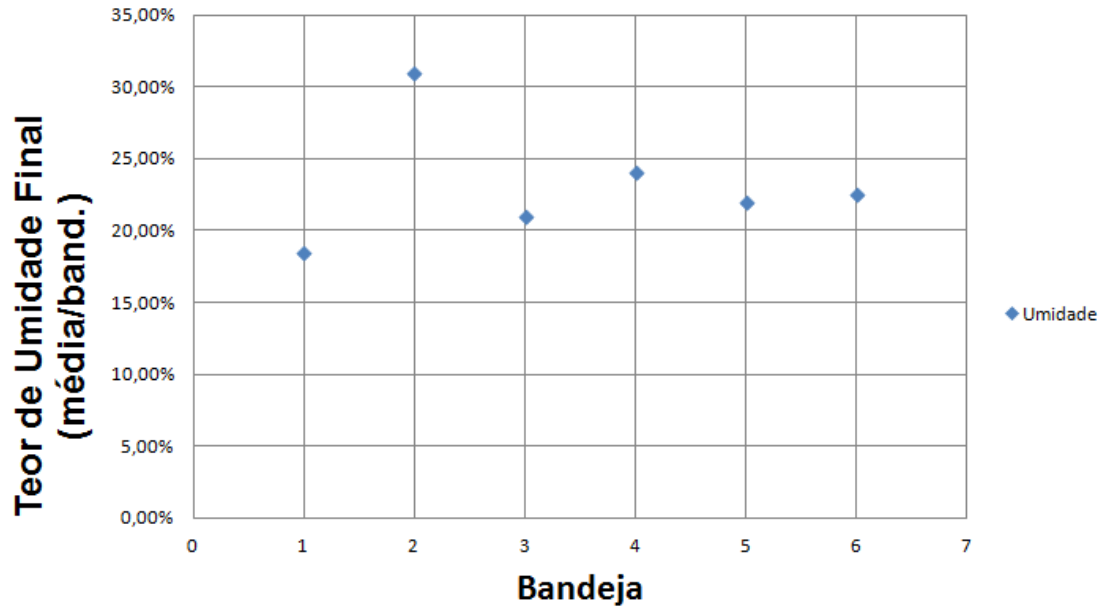


Fonte: Arquivo Pessoal

Nos ensaios realizados sem mudança estrutural de colocação das placas, não houve uma retirada uniforme de umidade, devido às diferenças de temperatura e à falta de homogeneidade encontrada no processo. Como na parte inferior a temperatura encontrada era muito menor que na parte superior, por consequência disso, a umidade média da bandeja 1 (superior) foi de $(16,3 \pm 1,3)\%$, enquanto que a umidade média da bandeja 6 (inferior) foi de $(42,3 \pm 8,4)\%$. Essa falta de uniformidade do fluxo de ar e heterogeneidade que era encontrada resultou em amostras de pouca qualidade final, devido à perda excessiva de umidade ou falta dela.

A Figura 34 representa a umidade média final em função das bandejas dispostas nas posições verticais numeradas de 1 a 6, com as alterações estruturais no secador.

Figura 34 – Umidade Final média da amostra com as placas metálicas e circulação máxima

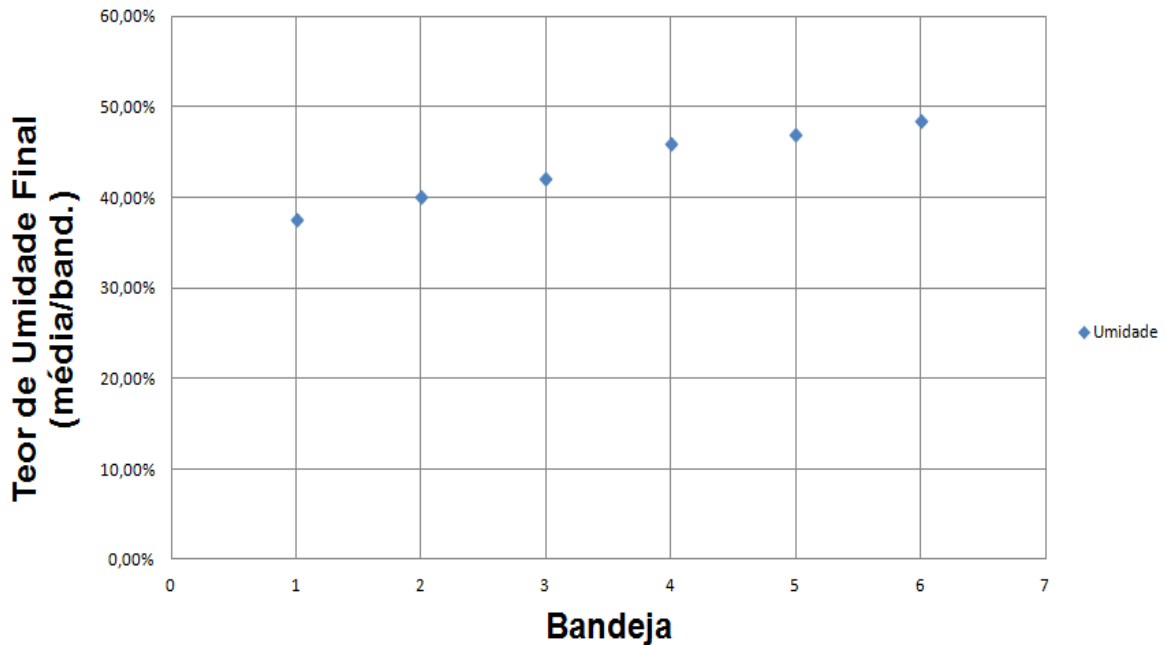


Fonte: Arquivo Pessoal.

Observa-se na Figura 34 que, com a instalação das placas, houve uma melhor concentração do calor, sem considerável perdas térmicas para o ambiente. Em consequência disso, o teor de umidade final ficou em torno de $(23,2 \pm 4,3)\%$ na média geral de todas as bandejas. Esse baixo teor de umidade registrado, resultou numa amostra com textura bastante dura, mas com índice bastante satisfatório para o produto desidratado.

A banana do tipo prata, quando submetida ao processo de secagem nas temperaturas de 50°C a 60°C demora aproximadamente 20 a 24 horas para atingir a umidade final de 30% de base úmida. Isso irá depender do alimento a ser secado, pois cada um terá umidade diferente, tempos de secagem diferentes para se atingir uma textura ideal para a conservação e qualidades suficientes para o consumo. A Figura 35 mostra o teor médio de umidade final em função das posições verticais. O teste foi realizado com a instalação das placas metálicas, nas mesmas condições de temperatura que o ensaio anterior, apenas alterando a velocidade do escoamento de ar passando a ser mínimo, em torno de 3m/s.

Figura 35 – Umidade Final média da amostra com as placas metálicas e circulação mínima



Fonte: Arquivo Pessoal.

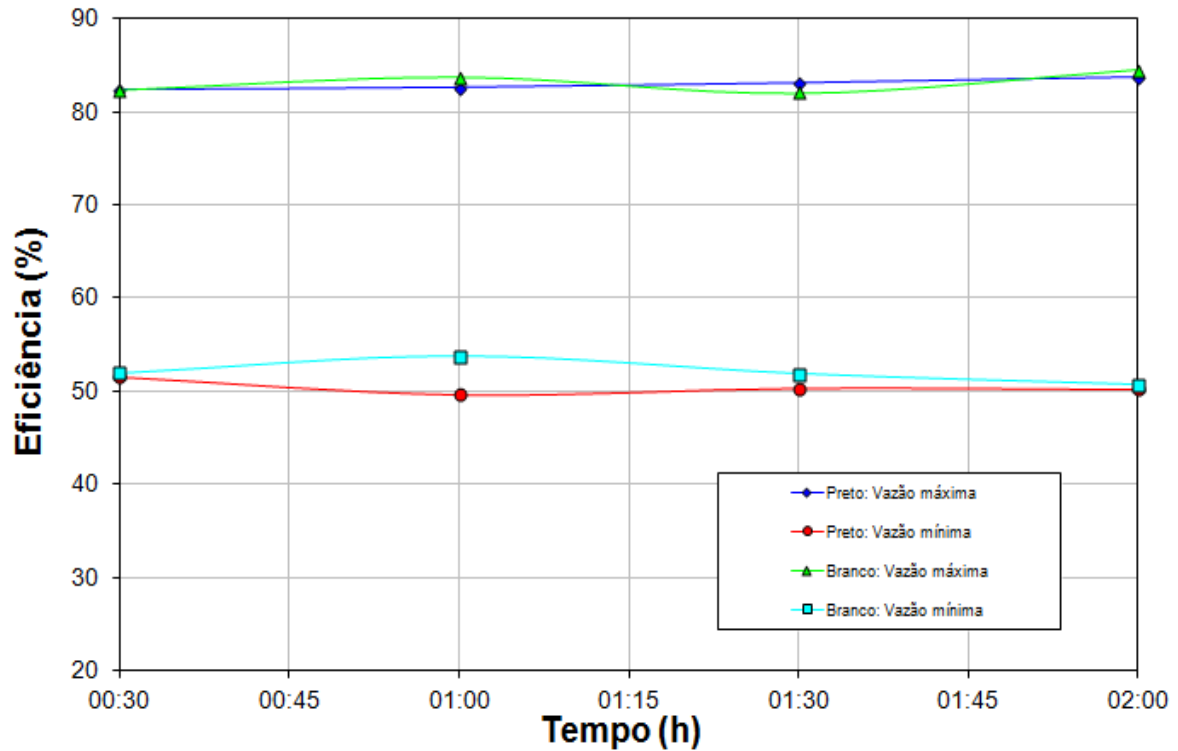
No ensaio realizado em baixas velocidades, nota-se que o teor de umidade final da amostra ficou maior que o teor de umidade num fluxo de ar com alta velocidade em torno de $(43,5 \pm 4,3)\%$. A amostra que reteve uma maior umidade foi da parte superior do secador, todavia a umidade final em todas as bandejas ficou com índices não muito discrepantes.

4.3 Ensaios térmicos de influência da cor do secador

A cinética de secagem descreve como ocorre a variação de umidade da amostra em função do tempo de secagem. Com este estudo, tem-se a possibilidade de se obter, por exemplo, informações sobre os períodos de secagem, taxas de secagem e determinar o teor de umidade crítico. Estas informações são importantes para descrever matematicamente o comportamento cinético do material durante o processo de secagem.

A eficiência do secador pode ser calculada a partir da Eq. (18). Na Figura 36, é apresentada a eficiência do secador em função do tempo para todos os testes realizados com o secador vazio (vazão máxima e mínima), com o secador preto e branco.

Figura 36 – Relação entre a eficiência do secador branco e preto em função do tempo de secagem



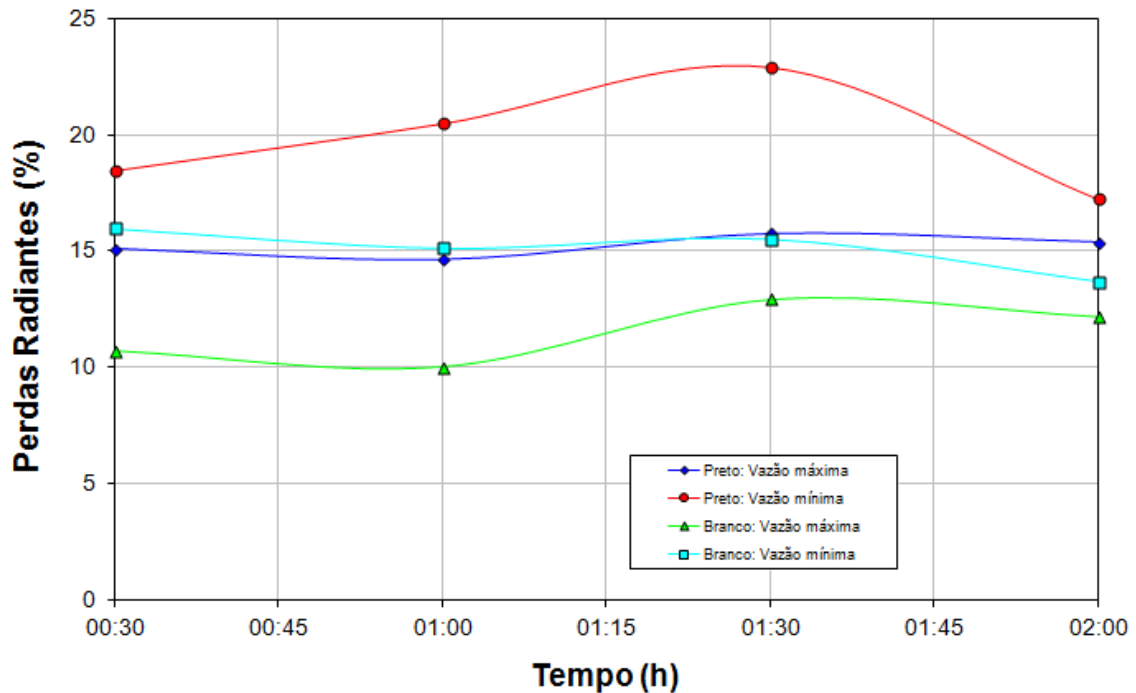
Fonte: Arquivo Pessoal.

Em relação à eficiência térmica do sistema, nota-se, a partir da Figura 36 que com uma vazão máxima em ambos os casos, preto e branco, a eficiência é praticamente a mesma ($82,9 \pm 0,5\%$) e ($83,2 \pm 0,9\%$) respectivamente. Eficiência muito superior a vazão mínima ($52,0 \pm 0,8\%$) e ($50,4 \pm 0,6\%$) encontrada para o secador preto e branco respectivamente.

Por último, foram analisadas as perdas radiantes em função do tempo de secagem, sob as mesmas condições anteriormente analisadas. As causas de perda durante operação em regime permanente são: condução, convecção, radiação, e ingresso de ar, resfriando o ar de secagem, ou, alternativamente, a perda de ar de secagem a alta temperatura. Surpreendentemente, as perdas de calor em regime permanente são dificilmente influenciadas pela temperatura do ar de secagem, uma vez que, independentemente do valor da temperatura de entrada do ar de secagem, o processo de secagem sempre ocorre a temperaturas de aproximadamente $68\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este fator é importante, pois como consequência da diminuição das

perdas térmicas, é possível obter temperaturas mais elevadas com melhor rendimento, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Perdas radiantes em função do tempo



Fonte: Arquivo Pessoal

Nota-se que as maiores perdas radiantes foram encontradas na circulação mínima de ar ($15,06 \pm 0,71\%$ e $19,77 \pm 1,92\%$) para o secador branco e preto, respectivamente. A vazão mínima requer um maior tempo para a estabilização e esse regime de escoamento ocasiona um aquecimento da estrutura do secador, devido à massa de ar quente não estar sendo totalmente absorvida. Já para uma vazão máxima, as perdas radiantes são inferiores: $11,44 \pm 1,16\%$ e $15,20 \pm 0,35\%$ secador branco e preto, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos, comparando todos os testes realizados, conclui-se que mesmo havendo um gasto maior de energia, aplicando-se uma circulação forçada de ar, o teor de umidade retirado é suficientemente aceitável para se ter um produto de qualidade e com uma eficiência térmica de aproximadamente 80%, pois com o secador branco, haverá pouca perda térmica para o ambiente. Em consequência disso, foi a instalação das placas metálicas que ocasionou uma diminuição de mais de 10°C , resultando num fluxo de ar mais homogêneo, pois as maiores variações de temperatura encontradas no início do processo implicavam em maiores perdas térmicas no secador, uma vez que as perdas condutivas

através da carcaça do dispositivo são proporcionais à diferença de temperatura de acordo com a Lei de Fourier para condução.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho de pesquisa foi feita uma análise térmica experimental em um secador de bandejas tipo cabine, no laboratório de secagem do Departamento de Engenharia de Materiais, no *campus I*, do CEFET-MG. Neste secador, foram avaliadas inicialmente as temperaturas de entrada e saída do fluxo de ar dentro do secador. Inicialmente, com o secador vazio, e após a instalação das placas metálicas, constatou-se uma redução significativa da temperatura em aproximadamente 11°C, o que proporcionou uma maior eficiência no processo de secagem em consequência da redução da heterogeneidade, gerando assim uma qualidade superior do produto a ser desidratado.

A velocidade do fluxo de ar também foi testada, e concluiu-se que, mesmo gastando um pouco mais de energia elétrica, a circulação forçada é mais eficaz que uma circulação de ar com baixas velocidades. Em virtude de diversos fatores, como o menor tempo gasto e a melhor qualidade do produto desidratado, é mais eficaz a utilização de uma circulação de ar mais alta. Em baixas velocidades, houve uma grande retirada de umidade, devido a maior concentração de calor dentro do secador, em consequência também da massa de ar quente não estar sendo totalmente absorvida, resultando, porém em um produto com baixa qualidade e pouca perspectiva de mercado.

Outra análise feita, foi com relação à influência da cor do secador. Testes de temperatura de entrada, saída e da carcaça do secador foram analisados para o secador pintado inicialmente de preto e posteriormente pintado de branco. A temperatura da parede externa também foi analisada para averiguar as perdas térmicas por condução. Neste teste, constatou-se que as diferenças de temperatura na entrada e na saída foram pouco relevantes em comparação com o secador preto e branco, entretanto, as perdas radiantes foram bem maiores para o secador preto.

Portanto, após a construção deste secador e dos vários testes realizados, chegou-se ao seguinte resultado: que para a realização de uma secagem em que se espere uma maior eficácia e um produto que tenha qualidade de mercado, é necessário que o secador seja branco, funcionando em uma circulação forçada de ar, mesmo com um gasto superior de energia, e que esse fluxo de ar na secagem tenha diferenças mínimas de temperatura quando este passar pelas bandejas do secador.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIRRE, J.M.; GASPARINO FILHO, J. **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. Campinas: ITAL, 2002. 205 p.
2. AMANLOU, Y.; ZOMORADIAN, A. **Applying CFD for designing a new fruit cabinet dryer**. Journal of food engineering, v.101, p. 8-15, Jun. 2010.
3. BRUNINI, M.A.; DURIGAN, J.F.; OLIVEIRA, A.L. **Avaliação das alterações em polpa de manga “Tommy Atkins” congeladas**. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal-SP, v.24, n.3, p.651-653, 2002.
4. CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: Fisiologia e Manuseio**. Lavras: ESAL/FAEPE, 2005. 785p.
5. COSTA, A.R. da S.; **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2008.
6. CRAPISTE, G. H.; ROTSTEIN, E. **Design and Performance Evaluation of Dryers**. Handbook of Food Engineering Practice. Boca Raton, New York: CRC Press. 1997. Cap. 4, p. 132-173.
7. CREMASCO, M. A. **Fundamentos de Transferência de Massa**. 2aEd. Campinas: Editora Unicamp, 2002.
8. DIAS, C.M.; MARQUES, W.M.; BORGES, S.V.; MANCINI, M.C. **Efeito da secagem em leite flidizado de jorro bidimensional sobre as propriedades físicas e tecnológicas do feijão preto (Phaseolus vulgaris, L.)**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.20, n.3, p 76-79, 2000.
9. EMBRAPA. **Embrapa Semi Árido**. Costa, J. G.; Santos, C. A. F. (organizadores). Sistemas de Produção 2. Cultivo da mangueira. 2006.
10. EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B. **Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers**. Energy Conversion & Management, Amsterdam, v.38, p. 1483-1500, 1997.
11. EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B. **Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology**. Energy Conversion & Management, Amsterdam, v.40, p.615-655, 1999.
12. FAO. **Food and nutrition division**. Disponível em: <http://www.fao.org/es/dept/es960003.htm>>. Acesso em: 30 de julho de 2003.
13. FAO. **Food and nutrition division**. Disponível em: <http://www.fao.org.br/publicacoes.asp.htm>>. Acesso em: 21 de novembro de 2009.

14. FELLOWS, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 326-346p.
15. FONSECA, L. P. **Análise experimental de um secador elétrico tipo para banana**. 2012. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.
16. FERREIRA, L.F.D.; PIROZI, M.R.; RAMOS, A.M.; PEREIRA, J.A.M. **Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado**. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.47, n.6, p.855-862, jun. 2012.
17. FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 401-412 p.
18. FURTADO, G.F.; SANTOS, P.; QUEIROZ, T.M.; PAULA, C.R.; SIQUEIRA, E.V. **Desenvolvimento de um estudo controlador de baixo custo para temperatura do ar em secador de bandejas**. IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial, Campo Mourão, PR, 2010.
19. GAVA, A. J. **Tecnologia de Alimentos**. São Paulo: Nobel, 2008. 304-320 p.
20. GRECO, M.; CAMPOS, A.T.; KLOSOWSKI, E.S. **Variação de diferentes tempos de revolvimento em secador de camada fixa para café**. *Acta Sci., Agron.* (Online). Maringá, SP, vol.32, n.4, Oct./Dec. 2010.
21. IMRE, L. **Solar drying**. In: MUJUMDAR, A.S. (Ed.). *Handbook of industrial drying*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. chap.13, p.308-356.
22. KAREL, M. **Physico-chemical modifications of the state of water in foods: a speculative survey**. In: DUCKWORTH, R. B. *Water relations of foods*. 2. ed. London: Academic Press, 1975. 180 p.
23. LEWICKI, P. P.; JAKUBCZYK, E. **Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples**. *Journal of Food Engineering*, v.64, p.307-314, 2004.
24. LEON, M. A.; KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S. A. **A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers**. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 6, p. 367-393, Ago. 2002.
25. LOURENÇO, G. A. **Desidratação parcial de tomate cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
26. MACHADO, A. V. **Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencionais e solar: Modelagem e simulação do processo**. 2009. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2009.

27. MELONI, P. L. S. **Desidratação de Frutas e Hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal, 10ª Semana Internacional da Fruticultura, Floricultura e Agroindústria. Fortaleza, CE, Set. 2003, 87 p.
28. MASSARANI, G.; TELLES, A.S. **Tópicos Especiais de Secagem**. v.1, São Carlos: Freire & Santori, 1992.
29. OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B.; SPOTO, M.H.F. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 1ª ed. Barueri: Manole, 2006. 485-508p.
30. RADÜNZ, L.L.; MELO, E.C.; BARBOSA, L.C.A.; SANTOS, R.H.S.; BARBOSA, F.F.; MARTINAZZO, A.P. **Influência da temperatura do ar de secagem no rendimento do óleo essencial de hortelã-comum (mentha x villosa huds)**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 250-257, Out./Dez, 2006.
31. REZENDE, D.R.; **Modelagem e simulação da secagem de frutos de café em um secador de bandejas vibradas**. 2011. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2011.
32. ROCHA, R.P.; MELO, E.C.; BARBOSA, L.C.A.; CORBÍN, J.B.; BERBET, P.A. **Influência do processo de secagem sobre os principais componentes químicos do óleo essencial de tomilho**. Revista Ceres, Viçosa, v. 59, n.5, p. 731-737, set/out, 2012.
33. RUFINO, M; ALVES, R.; BRITO, E.; PEREZ-JIMENEZ, J.; SAURA-CALIXTO, F.; MANCINI-FILHO, J. **Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 nontraditional tropical fruits from Brazil**. Food Chemistry, 121(4), p. 996-1002, 2010.
34. SHARMA, A.; CHEN, C.R.; LAN, N.V. **Solar-energy drying systems: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v.13, n 6/7, p. 1185-1210, 2009.
35. SIMATE, I.N. **Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers**. Renewable Energy, Amsterdam, v. 28, p.435-453, 2003.
36. SOLAR. Disponível em: <<http://www.ediurb.sites.uol.com.br/solar.htm>>. Acesso em: 25 de novembro de 2012.
37. SPOTO, M.H.F. **Desidratação de frutas e hortaliças**. In: OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B.; SPOTO, M.H.F. Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos. Barueri: Manole, 2006. cap 12 p 565-604.
38. VILHALVA, D.A.A.; SOARES Jr. M.S.; CALIARI, M.; SILVA, F.A.; **Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido**. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, GO, v. 42, n. 3, p. 331-339, jul./set. 2012.
39. ZAMAN, M.A.; BALA, B.K. **Thin layer solar drying of rough rice**. Solar Energy, Amsterdam, v.42, n.2, p. 167-171, 1989.

Apêndice A

Projeção em vistas do secador elétrico tipo cabine

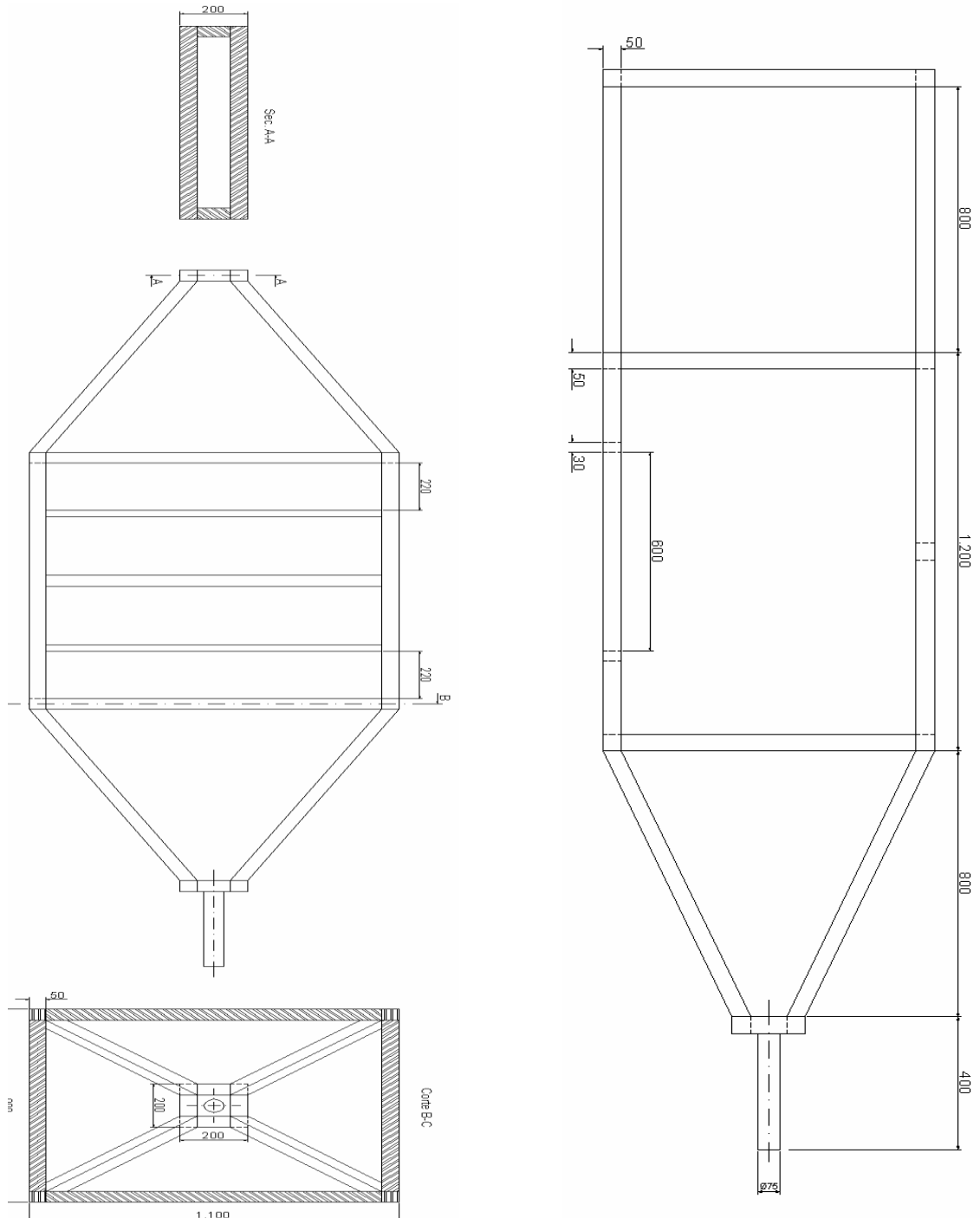


Figura A.1 - Estrutura em vistas frontal e perfil do secador artificial.
Fonte: Arquivo pessoal.

APÊNDICE B

Instrumentação utilizada para a realização da secagem



FIGURA B.1 - Display da célula de carga.



FIGURA B.2- Relé do sistema PID.



FIGURA B.3 - Jacarés do Wattímetro conectados nas fases.



FIGURA B.4 - Termopares tipo "K" na saída do secador.



FIGURA B. 5 - Ventoinha do anemômetro na entrada do secador.



FIGURA B.6 - Anemômetro acoplado na entrada do secador.

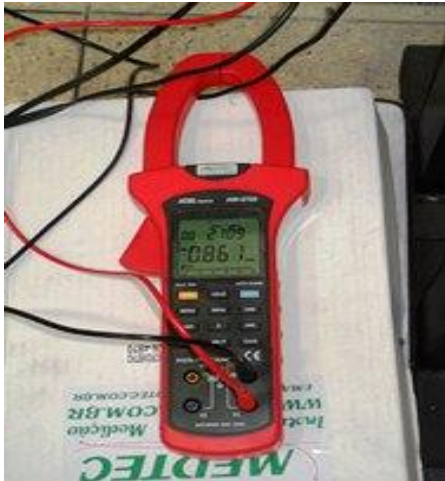


FIGURA B.7 – Wattímetro.

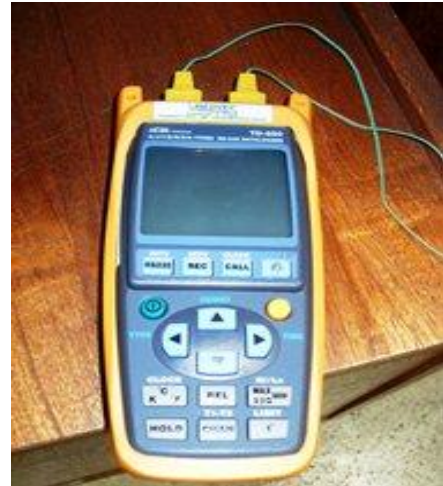


FIGURA B.8 – Termômetro digital.



FIGURA B.9 – Termo-higro-anemômetro.