**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa
do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural**

Luis Fernando Viviani Thomazini

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

Luis Fernando Viviani Thomazini
Bacharel em Física

**Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no
interior de um secador solar misto de ventilação natural**

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO OLIVEIRA MORAES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Thomazini, Luis Fernando Viviani

Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural / Luis Fernando Viviani Thomazini. - - Piracicaba, 2015.

113 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2015.

1. Energia solar 2. Desidratação de frutas 3. Variáveis meteorológicas I. Título

CDD 631.3
T465e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Aos meus pais, Rozegles
e Luiz, pelo amor e carinho.*

*Aos meus tios, Alice, Ângelo,
Sebastião, Maria Helena e José, pelo apoio
incondicional em todos os momentos.*

À minha família.

*Com amor, **DEDICO***

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade da realização do mestrado.

Ao Prof. Sergio Oliveira Moraes, pelos ensinamentos, auxílio e dedicação que demonstrou ao longo do trabalho, sempre disposto ao diálogo e à liberdade na construção do conhecimento.

Ao amigo Luciano R. Silveira, pela ajuda fornecida na coleta e tratamento dos dados, pelos ensinamentos em Delphi, Vim, Gnuplot e TeX simples, e pelas demais contribuições ao trabalho.

À minha querida Bruna E.D. Petrini, pelo amor, companheirismo, paciência e apoio incondicional muito importante nesta caminhada.

Aos amigos Dennis Lee e Gustavo Diniz, pela amizade e excelente convivência ao longo dos últimos anos.

Ao amigo Renato Tadao, pela amizade e ajuda com a elaboração tabelas dinâmicas na organização dos dados estatísticos.

Aos amigos das escolas *Sud Mennucci* e *Dr. Alfredo Cardoso*, da República do Buda e a todos aqueles que, apesar da distância, preservam a amizade.

Aos amigos Ismael, Roque, Helon, Fernando, Cristiane, Verena, Laiane e César, pela receptividade, companheirismo e troca de ideias ao longos destes anos.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, pelos ensinamentos e companheirismo.

Aos secretários do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, Fernando Novello, Ângela Derigi e Francisco Dias, pela disposição sempre em ajudar.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

O cientista não estuda a natureza porque ela é útil; estuda-a porque se delicia com ela, e se delicia com ela porque ela é bela. Se a natureza não fosse bela não valeria a pena conhecê-la e, se não valesse a pena conhecê-la, não valeria a pena viver.

Henry Poincaré

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Qualidade e conservação dos alimentos: pré e pós colheita	25
2.1.1 Fatores que influenciam a qualidade dos alimentos	27
2.2 Água nos alimentos	29
2.2.1 Atividade da água e isoterma de sorção	30
2.3 Processos de Secagem	33
2.3.1 Termodinâmica do secador	34
2.3.1.1 Balanço de massa	34
2.3.1.2 Balanço de energia	35
2.3.2 Cinética de Secagem	36
2.3.3 Influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem	39
2.4 Secador Solar	40
2.4.1 Tipos de secadores solares	41
2.4.2 Eficiência do secador solar	42
2.5 Psicrometria	45
2.5.1 Conteúdo de Vapor d'água	46
2.5.2 Pressão de vapor d'água	46
2.5.3 Umidade absoluta e relativa do ar	47
2.5.4 Temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido	48
2.5.5 Temperatura do ponto de orvalho	49
2.5.6 Capacidade calorífica do ar	49
2.6 As Variáveis meteorológicas	49
2.6.1 O tratamento das variáveis meteorológicas	50
2.6.2 Temperatura e umidade relativa do ar	51
2.6.3 Precipitação pluvial	53
2.6.4 Velocidade do vento	54
2.6.4.3 Radiação Solar	56

3 MATERIAL E MÉTODOS	59
3.0.1 Secador Solar e sensores utilizados	59
3.0.2 Organização e análise dos dados	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 Análise Estatística Descritiva: Posto Meteorológico ESALQ/USP	67
4.2 Estudo Qualitativo: Secador Solar e Posto Meteorológico	70
4.2.1 Estudo Quantitativo: Secador Solar e Posto Meteorológico	85
5 CONCLUSÕES	103
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
REFERÊNCIAS	107

RESUMO

Estudo do comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural

A utilização de secadores de produtos agrícolas é oportuna às necessidades do pequeno produtor rural, pois o produto desidratado possui maior valor agregado em relação ao mesmo produto fresco, requer menor espaço de armazenamento e tem maior durabilidade. É necessário, no entanto, oferecer ao produtor familiar equipamentos economicamente viáveis e, se possível, que utilizem recursos naturais e renováveis como fonte de energia, aliando sustentabilidade e crescimento econômico. Diante disso, os objetivos foram estudar o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior de um secador solar misto de ventilação natural em função das condições meteorológicas externas, e os períodos e épocas do ano mais ou menos favoráveis ao processo de secagem, em função da combinação das variáveis meteorológicas. Pode-se concluir que nem sempre elevados valores de radiação resultam em elevados valores de temperatura dentro do secador. Dias nublados e, principalmente chuvosos, comprometem mais o desempenho do secador do que, por exemplo, as perdas térmicas decorrentes da velocidade do vento que o circunda. O secador cumpre o papel de manter sua temperatura maior que a temperatura externa, predominantemente, entre 06h e 18h, enquanto que no restante do dia o comportamento da temperatura e da umidade relativa, dentro e fora do equipamento, assemelha-se. Períodos com elevada incidência solar e pouca chuva são os mais favoráveis à secagem. No entanto, é possível que meses de inverno e de pouca chuva tenham melhor desempenho do que meses situados ou próximos do verão que possuam dias nublados e chuvosos constantemente.

Palavras-chave: Energia solar; Desidratação de frutas; Variáveis meteorológicas

ABSTRACT

Study of temperature and relative humidity behavior inside a mixed-mode solar dryer with natural ventilation

The use of dryers to dehydrate agricultural products is appropriate to the needs of small farmers, because the dehydrated product has higher added value compared to the fresh one, requires less storage space and lasts longer. It is necessary, however, offer to the small farmer economically viable equipment and, if possible, using natural and renewable energy sources, combining sustainability and economic growth. Therefore, the objectives were to study the behaviour of temperature and relative humidity inside a mixed-mode solar dryer with natural ventilation due to external weather conditions. And also the periods more or less favorable to the drying process, depending on the combination of meteorological variables. It was concluded that not always higher solar radiation results in higher temperature values inside the dryer. Cloudy and mainly rainy days may disturb the performance of the dryer, more than, for example, thermal losses due to the wind speed surrounding it. The data showed also that It was possible for the dryer to maintain its temperature higher than the outside temperature, predominantly between 06h and 18 h, while in the rest of the day the behaviour of temperature and relative humidity inside and outside of the equipment, resembles. Periods of high sunlight intensity and little rain are the most favorable to drying. However, winter months with little rain may present better performance than months situated near or in the summer but having cloudy and rain constantly.

Keywords: Solar energy; Dehydration of fruits; Meteorological variables

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de conservação dos alimentos. Adaptado de Rahman (2007) . . .	26
Figura 2 - Processos metabólicos e crescimento microbiano em função da atividade de água. Adaptado de Park et al. (2007)	31
Figura 3 - Conteúdo de água nos alimentos em função da atividade de água (a_w) (MATHLOUTHI, 2001)	32
Figura 4 - Curva característica da secagem: conteúdo de água e temperatura do produto ao longo do processo de secagem. Adaptado de Park et al. (2007)	37
Figura 5 - Influência da temperatura e da velocidade do ar no processo de secagem. Adaptado de Vega-Gálvez et al. (2012)	39
Figura 6 - Tipos de secadores solares. Adaptado de Ekechukwu e Norton (1999) . .	41
Figura 7 - Constituição básica de um secador solar misto (SILVEIRA, 2011)	42
Figura 8 - Elementos de um coletor solar de placa plana. Adaptado de Gómez, Fandiño e Sarmiento (2010)	43
Figura 9 - Pressão de vapor d'água saturado (e_s) em função da temperatura (MORAES et al., 2011)	47
Figura 10 - Esquema de funcionamento de um psicrômetro de bulbo seco e úmido. Adaptado de Schneider (2012)	48
Figura 11 - Comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior do secador ao longo do tempo. Adaptado de Bekkiou et al. (2009)	52
Figura 12 - Representação do diagrama de um pluviógrafo. Adaptado de Sentelhas e Angelocci (2014)	54
Figura 13 - Definição do ângulo que determina a direção do vento e suas componentes zonal e meridional para dois vetores de vento de intensidades I e I_0 , e direções θ_0 (nordeste) e θ_1 (sudeste) (INMET, 2014b)	55
Figura 14 - Representação do movimento da Terra em torno do Sol (RABL, 1985) .	56
Figura 15 - Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera, na superfície terrestre e a emitida por um corpo negro a 5900 K	57
Figura 16 - Sistema de coordenada para o cálculo da incidência solar. Adaptado de Rabl (1985)	58
Figura 17 - Secador solar misto de convecção natural (SILVEIRA, 2011)	59

Figura 18 - Sensor de temperatura LM35, encapsulamento TO-92 (SILVEIRA, 2011)	60
Figura 19 - Sensor de umidade relativa HIH-4000 com diferentes espaçamentos entre terminais (SILVEIRA, 2011)	60
Figura 20 - Velocidade do vento em função do tempo no mês de agosto de 2011	64
Figura 21 - Densidade de fluxo de radiação solar em função do tempo no mês de fevereiro de 2013	64
Figura 22 - Densidade de fluxo de radiação solar <i>versus</i> Temperatura T_3 em 5 de agosto de 2011	65
Figura 23 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente registrada no Posto Meteorológico da ESALQ/USP no mês de agosto de 2011	70
Figura 24 - Densidade de fluxo de radiação solar <i>versus</i> temperatura do ar ambiente registradas no <i>posto meteorológico</i> da ESALQ/USP no mês de julho de 2012	71
Figura 25 - Densidade de fluxo de radiação Solar <i>versus</i> temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de julho de 2012	71
Figura 26 - Densidade de fluxo de radiação solar e temperatura do ar ambiente ao longo do tempo nos dias 3 e 4 de agosto de 2011	72
Figura 27 - Temperatura no secador (sensor 3) <i>versus</i> radiação solar no dia 4 do mês de agosto de 2011	73
Figura 28 - Temperatura no secador (sensor 3) <i>versus</i> radiação solar no dia 3 do mês de agosto de 2011	73
Figura 29 - Densidade de fluxo de radiação solar e temperatura no secador (sensor 3) no mês de agosto de 2011	74
Figura 30 - Densidade de radiação solar e densidade de fluxo de radiação solar no mês de agosto de 2011	75
Figura 31 - Densidade de radiação solar e temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de agosto de 2011	76
Figura 32 - Densidade de radiação solar e temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de agosto de 2011	76
Figura 33 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente no mês de junho de 2012	77

Figura 34 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente no mês de fevereiro de 2012	77
Figura 35 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente registrada pelo Posto Meteorológico da ESALQ / USP no mês de setembro de 2011	78
Figura 36 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de setembro de 2011	79
Figura 37 - Umidade absoluta do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de junho de 2012	79
Figura 38 - Umidade absoluta do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de fevereiro de 2011	80
Figura 39 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de outubro de 2011	80
Figura 40 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de junho de 2012	81
Figura 41 - Temperaturas e umidades relativas do ar no secador (sensores 1, 2 e 3) registradas no mês de junho de 2012	82
Figura 42 - Temperatura e umidade relativa do ar no secador (sensor 3) registradas no dia 25 de agosto de 2011	82
Figura 43 - Umidades relativas do ar no secador (sensores 1, 2 e 3) registradas no mês de setembro de 2011	83
Figura 44 - Umidade relativa do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de junho de 2012	84
Figura 45 - Umidade relativa do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de fevereiro de 2011	84
Figura 46 - Período em que a temperatura do secador solar ultrapassa 40 °C em outubro de 2011	85
Figura 47 - Distribuição de frequência da temperatura ambiente e na cabine de secagem (sensor 3) do secador solar no mês de agosto de 2011	86
Figura 48 - Distribuição dos valores de T_3 entre 00h e 06h e 18h e 24h do mês de junho de 2012 (exemplo do que ocorre nos demais meses estudados, exceto fevereiro)	88

Figura 49 - Porcentagem dos registros da umidade relativa do ar na cabine de secagem superiores à umidade relativa do ar ambiente ao longo dos meses estudados	89
Figura 50 - Umidade relativa <i>versus</i> temperatura na cabine de secagem	91
Figura 51 - Análise multivariada: variáveis meteorológicas favoráveis ou desfavoráveis à secagem	92
Figura 52 - Dias críticos e não críticos do mês de junho separados de acordo com a <i>Análise Multivariada</i>	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Qualidade da água ligada presente no alimento em função da atividade de água	31
Tabela 2 - Temperatura e umidade relativa do ar ideais à secagem de frutas e hortaliças	40
Tabela 3 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de agosto situados entre 1980 e 2010	67
Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de setembro situados entre 1980 e 2010	67
Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de outubro situados entre 1980 e 2010	67
Tabela 6 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de junho situados entre 1980 e 2010	68
Tabela 7 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de julho situados entre 1980 e 2010	68
Tabela 8 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de fevereiro situados entre 1980 e 2010	68
Tabela 9 - Média das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos seis meses estudados	68
Tabela 10 - Comparação dos valores médios das variáveis de interesse e as médias históricas	69
Tabela 11 - Porcentagem dos registros da temperatura da cabine de secagem superiores à 40 °C ao longo dos meses estudados	87
Tabela 12 - Porcentagem dos registros da temperatura da cabine de secagem superiores à temperatura ambiente ao longo dos meses estudados	89
Tabela 13 - Porcentagem dos dados de umidade relativa ambiente e da cabine de secagem inferiores à 50 % ao longo dos meses estudados	90

Tabela 14 - Análise Multivariada: comparação entre dias críticos e não críticos do mês de junho de 2012	96
Tabela 15 - Média da temperatura mínima no interior da cabine de secagem em dias críticos e não críticos para todos os meses estudados	96
Tabela 16 - Média da variação da umidade relativa do ar na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados	97
Tabela 17 - Média da umidade relativa do ar mínima na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados	98
Tabela 18 - Variação da temperatura na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados	99
Tabela 19 - Média da temperatura máxima na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados	99

1 INTRODUÇÃO

O conjunto de atividades agrícolas desenvolvidas pelo pequeno produtor rural e destinadas essencialmente à sua subsistência, nas quais se incluem manejo do solo, cultivo, colheita e armazenamento, é denominada de *agricultura familiar*. O domínio destas atividades, mesmo sob condições rústicas e espaço físico limitado, é fundamental às famílias que sobrevivem de recursos alimentícios próprios, pois é necessário garantir que todas as etapas do processo de produção e armazenamento sejam feitas de forma adequada, objetivando sempre um bom resultado final, que nada mais é do que um produto de boa qualidade para consumo.

As técnicas agrícolas referentes às etapas iniciais do processo de produção, tais como mobilização do solo, fertilização, nutrição e proteção das culturas, são de maior conhecimento e domínio por parte dos produtores rurais de pequeno porte, visto que são conhecimentos essenciais a qualquer processo produtivo, transmitidos de geração para geração, e estão intimamente atreladas a qualidade e rendimento do produto final. A atenção dada às etapas iniciais do processo produtivo não elimina, mas reduz as perdas, fato que também deveria ser observado quanto ao *pós colheita*, ou seja, ao processamento e armazenamento que visa a maior longevidade do produto.

Alguns cuidados, como limpeza, esterilização, branqueamento, etc., são mais acessíveis e aplicáveis às condições do *homem do campo*. Outros, no entanto, exigem capacidade estrutural e técnica, como é o caso de processos de conservação por irradiação, luz pulsante, campo elétrico pulsante, desidratação, etc., ou até mesmo no que concerne à armazenagem em ambientes adequados à boa conservação do produto, o que é raro ocorrer nas pequenas propriedades produtoras.

O domínio e aperfeiçoamento das técnicas de cultivo, colheita e armazenagem pode resultar em maior rendimento e, por sua vez, gerar um excedente na produção final, sendo plausível supor que tal excedente possa servir como moeda de troca por outros produtos, por acertos de dívidas, por favores diversos, etc., beneficiando diretamente o produtor. Por outro lado, pode também ser encarado como uma importante fonte de lucro, o que insere a pequena e média produção agrícola como parte integrante da cadeia econômica de qualquer país, vinculando o setor econômico agrícola aos demais setores da economia.

Não é por acaso que mais de 90% da produção agrícola mundial, e no Brasil não é diferente, está nas mãos de pequenos produtores, ou seja, aquele produtor que, antigamente, via na agricultura sua forma de subsistência, passa a encará-la como fonte de renda (TSCHARNTKE et al., 2012). O lucro é condição necessária para que o produtor rural expanda seus negócios: contrate mão-de-obra, adquira novos equipamentos e sementes de melhor qualidade, utilize-se de recursos mais adequados quanto à proteção da sua cultura, ou seja, aperfeiçoe as diversas etapas do processo produtivo e, como consequência, aumente o rendimento do produto final.

Melhorias estão diretamente atreladas a utilização de novas tecnologias que permitam não somente produzir mais, mas também agregar maior valor ao que é produzido. Mesmo havendo incentivos governamentais, é necessário oferecer ao produtor familiar equipamentos economicamente viáveis e, se possível, que utilizem recursos naturais e renováveis como fonte de energia, aliando sustentabilidade e crescimento.

É nesse cenário que a utilização de secadores solares torna-se oportuna às necessidades do pequeno produtor rural, pois o produto desidratado possui maior valor agregado em relação ao mesmo produto fresco, requer menor espaço de armazenamento e tem maior durabilidade. Além disso, trata-se de um equipamento sustentável e economicamente viável, uma vez que sua fonte de energia primária é limpa, inesgotável e não custosa.

Diante do apresentado, pretende-se compreender o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior do secador solar desenvolvido por Silveira (2011) - Sistema de Aquisição de Dados Utilizando Telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas, em função das condições meteorológicas externas, e ser capaz de avaliar períodos viáveis e não viáveis à secagem dos alimentos, bem como sugerir ações que possam melhorar seu desempenho.

Para isso, o secador conta com sensores de temperatura e umidade relativa do ar que coletam dados minuto a minuto em seu interior, enquanto que os dados externos são fornecidos pelo Posto Meteorológico da ESALQ/USP. Algumas variáveis meteorológicas, agindo de forma isolada ou conjunta, estabelecem uma gama de situações possíveis que, ora favorecem, ora dificultam o aumento e/ou a diminuição da temperatura/umidade relativa no interior do secador solar. Outras, por sua vez, estão simplesmente correlacionadas entre si, como é o caso da umidade relativa e temperatura do ar.

É fundamental averiguar situações consideradas críticas, como um dia nublado, chuvoso, de muito vento, de temperatura mínima extrema, etc. e também períodos favoráveis à secagem, buscando prever horários e épocas mais ou menos propícias para sua

utilização, bem como possíveis modificações no equipamento que o tornem utilizável em situações consideradas desfavoráveis, elucidando possíveis indagações que ainda existam sobre a viabilidade da utilização de um secador solar nas atividades agrícolas do pequeno produtor rural.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dividiu-se a revisão bibliográfica em seis partes: *Qualidade e Conservação dos Alimentos: pré e pós colheita*, *Água nos Alimentos*, *Processos de Secagem*, *Secadores Solares*, *Psicrometria* e *Variáveis Meteorológicas*.

As duas primeiras apresentam uma visão geral das características físico-químicas do alimento e seus processos de deterioração, almejando compreender o comportamento da água em seu interior e os processos de migração desta água para fora do produto.

Em *processos de secagem* e *secadores solares* são apresentados os tipos e princípios básicos de funcionamento dos secadores solares existentes, tendo como foco o secador solar misto que é alvo de estudo deste trabalho, bem como a dinâmica do transporte de massa e energia ao longo de todo e qualquer processo de secagem. No que concerne à *psicrometria*, busca-se compreender a dinâmica existente entre o ar seco e o vapor d'água presente no ar atmosférico.

Por fim, a revisão sobre as *variáveis meteorológicas* procura compreender melhor as variáveis estudadas e seus instrumentos de medição, assim como a maneira que o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e *Posto Meteorológico* da ESALQ as traduzem em dados estatísticos.

2.1 Qualidade e conservação dos alimentos: pré e pós colheita

A qualidade de um alimento é descrita por um conjunto de parâmetros (aparência, textura, sabor, aspectos nutricionais, etc.) e depende, essencialmente, das práticas de pré e pós colheita, das condições climáticas, variabilidade genética, maturação, entre outros fatores (KADER, 2002). Porém, é inevitável que haja alterações constantes na qualidade dos alimentos devido a sua natureza físico-química e biológica, não sendo possível isolar um mecanismo de reações químicas ou simplesmente modelos matemáticos elegantes que descrevam-nas (LABUZA, 1984).

Segundo Kader (2002), certas variedades de sementes de cenoura e tomate com altos índices de caroteno e vitamina A ou sementes de abacaxi com grandes taxas de ácido ascórbico, caroteno e açúcar, por exemplo, apresentarão melhor qualidade.

O enxerto em árvores frutíferas auxilia na absorção de água e nutrientes, aumentando também a resistência da planta quanto à pragas e doenças, assim como a utilização de agrotóxicos. Práticas simples e corriqueiras, tais como o manuseio cuidadoso, higiênico, somado ao uso de ferramentas de corte bem afiadas, por exemplo, evitam ferimentos

no produto, mantendo-os intactos e evitando o advento de microorganismos (RAHMAN, 2007).

Existem diversificados *métodos de conservação* pós colheita que inibem, inativam ou evitam a recontaminação do alimento, amenizando alterações que sempre tendem a diminuir a qualidade do produto (KADER, 2002; RAHMAN, 2007). Gould (1989), citado por Rahman (2007), apresenta alguns métodos de conservação dos alimentos (Figura 1).

Figura 1 - Métodos de conservação dos alimentos. Adaptado de Rahman (2007)

No entanto e independentemente do método, todo alimento possui, posteriormente à colheita, um tempo finito em que manterá níveis qualitativos desejáveis, denominado de *vida de prateleira*. Os métodos de conservação buscam o aumento da vida de prateleira dos alimentos, minimizando os efeitos dos microorganismos que são o maior limitante ao prolongamento da qualidade de um produto. Dentre vários processos, incluindo desidratação e congelamento, a redução da atividade microbiana passa, necessariamente, pela redução da disponibilidade de água no produto (KAREL et al., 1975).

Os fatores que estimam sua qualidade, ora facilmente detectáveis, como cor, sabor, etc., por vezes são subjetivos e necessitam de testes químicos, físicos e microbiológicos regulamentados por órgãos internacionais especializados no assunto (TAOUKIS; LABUZA; SAGUY, 1997).

O conhecimento e uso dos métodos de conservação pré e pós colheita por parte dos pequenos produtores agrícolas torna-se oportuno uma vez que estes correspondem a mais de 90 % da produção agrícola mundial segundo Tschardt et al. (2012), e estão, de certa forma, mais susceptíveis às intempéries climáticas que, por vezes, acarretam baixo rendimento ou até mesmo o desperdício da produção.

Uma vez inclusos num ambiente de mercado competitivo, é importante atentar-se ao manejo adequado e ao aperfeiçoamento das práticas de conservação que prolongam a qualidade, diminuem as perdas e aumentam o valor agregado do produto final (RAHMAN, 2007).

2.1.1 Fatores que influenciam a qualidade dos alimentos

Os parâmetros que descrevem a qualidade de um produto são comprometidos por processos físicos, químicos, mecânicos e microbianos, que ocorrem antes, durante e após a colheita, reduzindo assim sua vida de prateleira (TAOUKIS; LABUZA; SAGUY, 1997). As maiores causas da deterioração de frutas e vegetais são (RAHMAN, 2007):

- Lesões durante e posteriores ao manuseio da colheita levando-os à podridão;
- Perda de água devido à baixa umidade do ar e consequente murchamento;
- Secagem do produto sob condições de alta umidade ocasionando seu encharcamento;
- Microorganismos: fungos, bactérias, entre outros;
- Insetos e ácaros;
- Roedores em geral.

A deterioração dos produtos na pré colheita deve-se, essencialmente, a dois fatores: clima e práticas culturais inadequadas. No que se refere ao clima, radiação solar e temperatura do ar estão intimamente associadas a qualidade nutricional de frutas e vegetais, o que implica dizer que a localização geográfica da lavoura é fator determinante quanto a produção de vitaminas pelas plantas, entre elas o ácido ascórbico, a riboflavina, tiamina, etc. A alta luminosidade, por exemplo, implica numa maior produção de ácido ascórbico (vitamina C) (TAOUKIS; LABUZA; SAGUY, 1997).

A temperatura, por sua vez, age diretamente na absorção e metabolismo dos nutrientes minerais pelas plantas, já que sua transpiração aumenta com o aumento da temperatura (KADER, 2002). Devido à impossibilidade de controlar a temperatura ambiente, o produto na pré colheita está exposto e sujeito aos efeitos diretos da temperatura, sendo esta o principal fator a ser considerado quando se reporta à qualidade dos alimentos (TAOUKIS; LABUZA; SAGUY, 1997).

Tipo de solo, fertilização, irrigação, entre outras práticas culturais, influenciam a absorção de água e nutrientes pelas plantas e afetam a qualidade nutricional do produto pós colheita. O efeito do clima e das características genótípicas sobre a produção de vitaminas são mais importantes que uso de fertilizantes, situação contrária quando se reporta ao conteúdo mineral absorvido e presente nas plantas (KADER, 2002).

A presença de cálcio, por exemplo, está atrelada ao aumento da vida de prateleira do produto, pois reduz sua taxa de respiração e produção de etileno que, entre outras coisas, retarda sua maturação. De maneira oposta, o nitrogênio torna o produto mais susceptível à impactos mecânicos e frequentemente está associado à diminuição da vida de prateleira do produto (KADER, 2002).

São muitas as desordens fisiológicas associadas à deficiência de minerais: o azedo das maçãs ou as linhas vermelhas que surgem nos limões são devido ao deficit de absorção de cálcio; a deficiência de zinco resulta numa coloração empobrecida do fruto e o excesso de sódio, por exemplo, resulta na diminuição do seu tamanho.

A irrigação inadequada também resulta em desordens de natureza fisiológica, pois água em excesso faz com que o fruto amadureça irregularmente, contribuindo para uma textura mais rígida em certos casos, ao contrário da falta d'água, que está atrelada essencialmente à redução do fruto e ao aumento do teor de sólidos solúveis (KADER, 2002).

Quanto ao período de pós colheita e armazenamento, muitos também são os fatores que acarretam a deterioração dos produtos agrícolas, entre eles os danos mecânicos causados pela manipulação e transporte, temperatura de armazenamento, conteúdo de água e umidade relativa do ar.

Sob baixas temperaturas, por exemplo, pode ocorrer a cristalização dos carboidratos no estado amorfo, liberando água livre para outras reações. Elevados valores de temperatura, por sua vez, desnaturam as proteínas e, dependendo dos fatores estereoquímicos que estas reações apresentam, aumenta ou diminui a susceptibilidade das reações químicas que ocorrem no produto, o que afeta diretamente as atividades enzimáticas e o

crescimento de microorganismos (TAOUKIS; LABUZA; SAGUY, 1997). Segundo Kader (2002), a deterioração e as perdas nutricionais do produto são facilitadas a cada incremento de 10 °C na temperatura que se considera ideal à sua armazenagem.

O conteúdo de água presente no alimento é outro fator relevante ao processo de deterioração e requer, assim como a temperatura, níveis ótimos para que se prolongue a qualidade do produto; parte da água contida pode servir como solvente às reações químicas de proliferação de microorganismos (LABUZA, 1984).

A baixa umidade do ar, por sua vez, faz com que o produto perca água e, portanto, murche. Por outro lado, a alta umidade pode levar ao encharcamento do alimento, facilitando assim o ataque de microorganismos (RAHMAN, 2007). O que resulta dessa discussão é que o armazenamento das frutas e vegetais frescos sob adequadas condições de temperatura e umidade é fundamental para a manutenção da qualidade e minimização das perdas pós colheita (KADER, 2002).

2.2 Água nos alimentos

Os alimentos podem apresentar frações muito pequenas ou grandes porcentagens de água em seu interior, atingindo valores de até 98 % de sua massa para produtos frescos: parte da água constituinte do produto e parte adentrando-o no decorrer de seu processamento (LEWICKI, 2004).

Segundo Lewicki (2004), a água influencia diretamente as propriedades reológicas, térmicas e elétricas do produto, além de agir decisivamente sobre a transferência de massa. A presença de mais ou menos água num produto líquido o torna mais ou menos viscoso, enquanto que num produto sólido afeta sua resposta à força, ou seja, quanto maior o teor de água, maior é a deformação do produto quando uma força age sobre ele.

O alto calor específico da água altera significativamente o calor específico do produto, uma vez aceito que o calor específico, como propriedade física, obedece a lei da aditividade, ou seja, o calor específico do produto passa a ser a soma do calor específico das partes que o constituem. Por ser uma molécula polar, a água também age diretamente sobre as propriedades dielétricas do produto, o que, entre outras coisas, pode alterar a resposta do produto à influência de um campo elétrico externo.

A água, por sua vez, apresenta-se de duas maneiras no interior do alimento: uma parte fortemente ligada (*água ligada*) aos solutos e outra vinculada com menor firmeza (*água não ligada*). Segundo Okos et al. (1992) e Leung (1986), citado por Barbosa-Cánovas

e Vega-Mercado (1996), o termo *água ligada* está diretamente relacionado à pequena pressão de vapor, baixa mobilidade e reduzido ponto de congelamento da água pura.

A *água não ligada* se comporta como água pura no interior do alimento e é descrita como a massa de água removível do produto sem que haja alterações em sua estrutura (PARK et al., 2007). Para verificar como a água está ligada é necessária a utilização de alguns métodos de determinação do *grau de ligação da água no interior do alimento* (KAREL et al., 1975):

- Determinação do ponto de congelamento da água;
- Ressonância Magnética Nuclear(RMN);
- Determinação das propriedades dielétricas dos alimentos;
- Determinação da pressão de vapor.

As moléculas de *água ligada* apresentam cinética e propriedades termodinâmicas distintas da *água não ligada*, o que altera suas propriedades dielétricas. Sua resposta aos impulsos de um campo elétrico externo (RMN) é inferior, o que permite diferenciar e diagnosticar o *grau de ligação* da água no produto.

Segundo Karel et al. (1975), existe uma porção de água que permanece não congelada mesmo expondo o alimento a condições bem abaixo da temperatura de congelamento da água: se o porcentual de “água não congelada” for alto significa que a água disponível para ser removida do alimento é pequena, e vice-versa.

A despeito de sua relevância para o processo de deterioração, o porcentual de *água não ligada* não é suficiente para descrever o crescimento de microrganismos no alimento, sendo necessário determinar o que se denomina de *atividade da água* (MATHLOUTHI, 2001, PARK et al., 2007).

2.2.1 Atividade da água e isotermas de sorção

Para compreender o crescimento de microrganismos e a consequente deterioração dos alimentos, é de suma importância conhecer como a água se liga ao produto, e não simplesmente o quanto de água está presente (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996). Nunca foi simples avaliar a participação química, física e biológica da água nas reações de deterioração, principalmente devido a natureza heterogênea dos alimentos, que apresentam materiais orgânicos e inorgânicos solúveis em sua composição (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

Para tal, é necessário determinar a *atividade da água*, que é a relação entre a pressão de vapor d’água em equilíbrio no interior do produto (e_a) e a pressão de vapor

d'água saturado (e_s) presente no ar sob a mesma temperatura (FONTANA, 2008; KAREL et al., 1975; BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

$$a = \frac{e_a}{e_s} \quad (1)$$

É fácil verificar que tal termo é igual a umidade relativa do ar (%) dividida por 100, medida no momento em que o alimento se encontra em equilíbrio com o meio, ou seja, quando não há ganho nem perda de massa do produto (KAREL et al., 1975; FONTANA, 2008; AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002; BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

$$a = \frac{U_R}{100} \quad (2)$$

Consequentemente, os valores de *atividade da água* encontram-se entre 0 e 1: ao longo deste intervalo estão situações mais ou menos propícias à proliferação de microorganismos de acordo com a “qualidade” da água presente no alimento, que é mostrada na Tabela 1 (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

Tabela 1 - Qualidade da água ligada presente no alimento em função da atividade de água

Qualidade da água no alimento	Atividade da água
Fortemente ligada	< 0,3
Moderadamente ligada	0,3 a 0,7
Fracamente ligada	> 0,7
Não ligada	1

Ao indicar a “qualidade” da água presente no produto, ou seja, descrever “*o estado de energia da água no alimento e, portanto, seu potencial para atuar como solvente e participar das reações bioquímicas e de crescimento de microorganismos*”, a *atividade da água* se apresenta como uma propriedade essencial ao diagnóstico do crescimento microbiano e das conseqüentes reações de deterioração dos produtos de gênero alimentício (menores valores para a *atividade da água* indicam condições menos propícias à deterioração do alimento e vice-versa), conforme mostra a Figura 2 (FONTANA, 2008).

A temperatura, por sua vez, interfere no valor da *atividade da água* devido às alterações que ocorrem dentro do produto, essencialmente quanto à mudança de comportamento na interação água-soluto. Tais alterações variam de acordo como o tipo de alimento, sendo que uns aumentam outros diminuem sua *atividade da água* com o aumento da temperatura.

Figura 2 - Processos metabólicos e crescimento microbiano em função da atividade de água. Adaptado de Park et al. (2007)

Os efeitos coligativos (dipolo–dipolo, pontes de hidrogênio e ligação iônica) dos solutos dissolvidos na água induzem mudanças significativas na difusão da água por capilaridade e será tratado em *Processos de Secagem*(FONTANA, 2008).

Existem diversos métodos de determinação da *atividade de água*, entre eles a utilização de sensores de umidade relativa, manômetros ou até mesmo a exposição do alimento a condições constantes de umidade relativa do ar, descritos mais detalhadamente em Karel et al. (1975); Fontana (2008); Mathlouthi (2001).

É importante frisar que todos os métodos buscam estabelecer uma relação entre a quantidade de água retida no alimento e a *atividade da água*, sendo bem representada pelas isotermas de sorção apresentadas na Figura 3, que representam situações de equilíbrio entre o alimento e o ar (KAREL et al., 1975).

Essas isotermas possuem dois sentidos: adsorção e dessorção. O primeiro é gerado expondo o material seco à valores de umidade relativa do ar conhecidos, analisando-se o ganho de água pelo produto; o segundo é elaborado expondo o produto à secagem e mensurando sua perda de massa (MATHLOUTHI, 2001).

É possível verificar três regiões distintas no gráfico da Figura 3: no sentido ascendente das isotermas, a primeira região representa a água fortemente ligada ao produto, sendo baixa a pressão de vapor da água; a segunda região representa a água moderadamente ligada ao produto e retida na matriz sólida por condensação capilar; por fim, a terceira região, onde a água se apresenta em macro poros e, conseqüentemente, fracamente ligada ao alimento (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002; MATHLOUTHI, 2001).

Figura 3 - Conteúdo de água nos alimentos em função da atividade de água (a_w) (MATHLOUTHI, 2001)

A temperatura afeta a mobilidade das moléculas de água e, conseqüentemente, altera o equilíbrio água-vapor no produto. Geralmente, se a *atividade de água* é mantida constante, um aumento na temperatura significa um decréscimo na água adsorvida pelo produto (KAREL et al., 1975; AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002; FONTANA, 2008).

Os produtos se tornam menos higroscópicos sob elevadas temperaturas, talvez porque algumas moléculas de água elevam seus níveis de energia e rompem suas ligações dentro do alimento, diminuindo assim a umidade de equilíbrio e, conseqüentemente, a atividade de água (KAREL et al., 1975; AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002; FONTANA, 2008).

Porém, para valores de *atividade de água* superiores a 0,7 ocorre uma inversão no efeito da temperatura; a umidade de equilíbrio passa a aumentar com o aumento da temperatura, possivelmente porque até a segunda região (água moderadamente ligada) o aumento da temperatura facilita a absorção da água pelos solutos presentes no alimento, aumentando o teor de água no produto (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

2.3 Processos de Secagem

A desidratação de produtos agrícolas consiste na retirada da água presente no alimento basicamente por sublimação e/ou evaporação, diminuindo sua *atividade de água* e, conseqüentemente, a atividade microbiana e as reações químicas de deterioração (KAREL et al., 1975; VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

Ao longo da secagem ocorrem simultaneamente mecanismos de transferência de massa e energia. Entre os mecanismos de movimentação da massa de água contida no produto durante a secagem, estão: capilaridade, difusão devido ao gradiente de concentração, difusão superficial, difusão do vapor d'água pelos poros cheios de ar, fluxo devido ao gradiente de pressão, entre outros (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; KAREL et al., 1975).

Por sua vez, o movimento da massa d'água para fora do produto requer o fornecimento de energia sob forma de calor, além de um sorvedouro de água para remover o vapor d'água que circunda o alimento, viabilizando o processo (PARK et al., 2007).

Para tal, grande parte das indústrias de alimentos utilizam-se de secadores que transferem calor ao produto através do ar aquecido que passa por ele, sendo de suma importância o conhecimento dos processos de secagem. A compreensão da termodinâmica do secador, que inclui balanço de massa e energia e cinética de secagem, subsidiam a escolha de um equipamento mais apropriado, possibilitando melhor qualidade ao produto final (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; KROKIDA et al., 2003).

2.3.1 Termodinâmica do secador

2.3.1.1 Balanço de massa

O calor transferido ao alimento advém, essencialmente, da convecção do ar quente que atravessa o secador e passa ao redor do produto, mas outros processos de transferência de calor, tais como irradiação e condução, também podem estar presentes.

O balanço de massa expressa a conservação da massa de água ao longo da interação entre produto e ar atmosférico dentro do secador, e assumindo que o produto esteja exposto por um certo tempo à secagem sob condições estáveis, tem-se (KAREL et al., 1975):

$$m_s X_a + m_{ar} U_a = m_s X_d + m_{ar} U_d \quad (3)$$

rearranjando os termos, tem-se:

$$m_s (X_d - X_a) + m_{ar} (U_d - U_a) = 0 \quad (4)$$

Sendo,

m_s = massa do sólido seco (kg);

X_a = conteúdo de água presente no produto antes da secagem (kg de água/kg de sólido seco);

m_{ar} = massa de ar seco (kg);

U_a = conteúdo de vapor d'água no ar antes do contato com o produto (kg de água/kg de ar seco);

X_d = conteúdo de água presente no produto após secagem (kg de água/kg de sólido seco);

U_d = conteúdo de vapor d'água no ar após contato com o produto (kg de água/kg de ar seco).

O *conteúdo de água*, descrito como a razão entre a quantidade de água e a quantidade de sólido seco do produto, pode ser expresso em função do tempo por (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; BEKKIOU et al., 2009):

$$X = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (5)$$

Sendo,

$m(t)$ = massa total do produto em função do tempo (kg);

m_s = massa do sólido seco (kg);

A variação do conteúdo de água do produto ao longo do processo de secagem pode ser escrita da seguinte maneira (BEKKIOU et al., 2009):

$$m_s \frac{dX}{dt} = \frac{dm(t)}{dt} = -KS(X - X^*) \quad (6)$$

Sendo,

K = coeficiente global de transferência de massa (kg/m^2s);

S = Área de contato entre o produto e o ar de secagem (m^2);

X = conteúdo de água do produto (kg de água / kg do produto seco);

X^* = conteúdo de água do produto no equilíbrio (kg de água / kg do produto seco).

Seja, $\Delta U = U_d - U_a$ e $\Delta X = X_d - X_a$, a equação (4) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$m_s \Delta X + m_{ar} \Delta U = 0 \quad (7)$$

Derivando a equação (7) em função do tempo e supondo que num intervalo de tempo pequeno haja uma variação infinitesimal do *conteúdo de água* do alimento e do *conteúdo de vapor d'água* do ar ($\frac{\Delta U}{\Delta t} \simeq \frac{dU}{dt}$ e $\frac{\Delta X}{\Delta t} \simeq \frac{dX}{dt}$), obtém-se a equação global do balanço de massa em função do tempo no interior do secador (BEKKIOU et al., 2009).

$$\frac{dm_{ar}}{dt}(U_d - U_a) + m_{ar} \frac{dU}{dt} + m_s \frac{dX}{dt} = 0 \quad (8)$$

2.3.1.2 Balanço de energia

No balanço de energia, deve-se levar em conta que, essencialmente, a energia térmica atua em duas frentes: alteração da temperatura e mudança do estado físico da água presente no produto ou no ar que atravessa o alimento. Assumindo que a temperatura inicial do produto seja T_1 , que a vaporização da água no mesmo ocorra à temperatura (T_3), que as temperaturas de entrada e saída do secador sejam, respectivamente, T_2 e T_4 , a dinâmica de transferência de calor na interação produto-ar de secagem é compreendida da seguinte maneira (KAREL et al., 1975):

Calor fornecido para a vaporização da água no produto:

$$m_s(X_a - X_d)L_v \quad (9)$$

em que L_v é o calor latente de vaporização da água.

Calor fornecido para elevar a temperatura da parte sólida do produto até a temperatura de vaporização:

$$m_s c_s (T_3 - T_1) \quad (10)$$

em que c_s é o calor específico sensível da parte sólida.

Calor fornecido para elevar a temperatura da água presente no produto até a temperatura de vaporização:

$$m_s X_a c_a (T_3 - T_1) \quad (11)$$

em que c_a é o calor específico sensível da água no produto.

Calor fornecido para elevar a temperatura da água vaporizada até a temperatura de saída do secador:

$$m_s (X_a - X_d) c_v (T_4 - T_3) \quad (12)$$

em que c_v é o calor específico sensível do vapor d'água.

Calor retirado do ar seco que causa seu resfriamento:

$$-m_{ar} c_{ar} (T_4 - T_2) \quad (13)$$

em que c_{ar} é o calor específico sensível do ar seco.

Calor retirado do vapor d'água presente no ar de secagem que causa seu resfriamento:

$$-m_{ar} U_a c_v (T_4 - T_2) \quad (14)$$

Assumindo que q_e seja o calor que adentra o equipamento por meio da radiação solar e q_p seja a soma das perdas de calor ao longo do processo, tem-se que o balanço de energia é dado por:

$$q_p + m_s(X_a - X_d)L_v + m_s c_s(T_3 - T_1) + m_s X_a c_a(T_3 - T_1) + m_s(X_a - X_d)c_v(T_4 - T_3) - q_e - m_{ar}c_{ar}(T_4 - T_2) - m_{ar}U_a c_v(T_4 - T_2) = 0 \quad (15)$$

As propriedades relacionadas à mistura ar-água (variáveis psicrométricas) são de extrema importância à secagem de alimentos e devem ser consideradas no balanço de massa e energia do secador solar (KAREL et al., 1975).

2.3.2 Cinética de Secagem

A *cinética de secagem* estuda o comportamento do teor de água no produto em função do tempo de secagem, e pode ser melhor compreendida quando dividida em três etapas distintas, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 - Curva característica da secagem: conteúdo de água e temperatura do produto ao longo do processo de secagem. Adaptado de Park et al. (2007)

A primeira etapa ou primeiro período consiste nos instantes iniciais da secagem, quando o secador entra em operação: o produto está numa temperatura menor que o ar de secagem e a pressão de vapor d'água na superfície do produto é instável, de forma que a transferência de massa e a velocidade de secagem não são bem definidas (PARK et al., 2007; SHARMA; COLANGELO; SPAGNA, 1993).

O segundo período é denominado de *período de velocidade constante*, e como o próprio nome diz, a água evapora como água livre, sendo a pressão de vapor da água na superfície do produto igual a pressão de vapor da água pura. A temperatura do produto é

constante e seu valor corresponde à temperatura do bulbo úmido (ver *Psicrometria*). Este período ocorre enquanto houver migração de água do interior do produto para a superfície, suprimindo as perdas por evaporação (PARK et al., 2007; BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

No momento em que a água se torna escassa na superfície do produto, é sinal que a migração da água do interior do produto para a zona periférica já não ocorre simplesmente como água livre, caracterizando o terceiro e último período, denominado de *período de velocidade decrescente*: a evaporação da água diminui, assim como a velocidade de secagem (PARK et al., 2007).

Por outro lado, a temperatura do produto tende a subir assintoticamente até atingir a temperatura do ar, uma vez que a troca de calor entre produto e ar de secagem já não é mais compensada pela perda de massa de água. Ao final do terceiro período o conteúdo de água do produto se iguala ao conteúdo de água de equilíbrio naquela temperatura e a velocidade de secagem cessa (PARK et al., 2007).

Ressalta-se que tanto para os materiais higroscópicos quanto para os não higroscópicos a natureza das curvas de secagem são semelhantes ao longo do primeiro e segundo períodos. No entanto, no terceiro período a redução da velocidade de secagem é mais acentuada nos materiais higroscópicos, uma vez que a *água ligada* está mais presa à matriz sólida (PARK et al., 2007; SHARMA; COLANGELO; SPAGNA, 1993).

Entre os mecanismos de transporte de massa anteriormente comentados, a *teoria da difusão* e a *teoria capilar* são os mais importantes e significativas nos processos de secagem.

O primeiro salienta que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Assume-se, para tal, que a difusão da água é constante ao longo do tempo, que o produto é homogêneo e simétrico e não leva em conta o seu encolhimento durante a secagem (ITAL, 2010):

$$\frac{dX}{dt} = D_L \left(\frac{d^2 X}{dx^2} \right) \quad (16)$$

em que X é a umidade do material, D_L é o coeficiente de difusão do líquido, t é o tempo e x a distância percorrida na direção do movimento.

O movimento por difusão é lento e a curva de secagem pode não mostrar um período de velocidade constante (ITAL, 2010). A *teoria da capilaridade*, por sua vez, assume que o alimento é constituído por inúmeros tubos capilares e, devido às forças de

atração molecular entre o líquido e a parede do tubo, a água se movimenta do interior do produto para fora.

Tal teoria assume que a ascensão da água no interior do tubo capilar é proporcional à tensão superficial da água e inversamente proporcional ao seu raio (PARK et al., 2007; BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; ITAL, 2010).

$$-\Delta p = 2\frac{\sigma}{r} \quad (17)$$

em que Δp é a diferença de pressão causada pela tensão superficial, σ é a tensão superficial e r é o raio de curvatura da superfície do líquido dentro do tubo capilar.

Segundo ITAL (2010), assim que o material atinge o período de velocidade decrescente, o movimento da água para a superfície por difusão não é suficiente e a água passa a se movimentar por capilaridade. As diferenças no tamanho dos poros de um produto implicam em distintos valores de pressão sobre os mesmos e, como consequência, há o movimento da água dos poros maiores para os poros menores.

Quando a água esvaziada dos poros maiores encontra um estreitamento similar nos poros de menor tamanho, há um balanceamento das tensões superficiais. A perda de água pelos poros menores torna a superfície do produto cada vez menos saturada, o que faz aproximar sua temperatura da temperatura do ar que o circunda (ITAL, 2010).

Segundo Labuza e Simon (1970), citados por Park et al. (2007), a migração capilar da água em produtos vegetais é pouco significativa, mas por fornecer ferramentas que fundamentam as equações de transferência simultânea de calor e massa são amplamente estudadas.

2.3.3 Influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem

A secagem dos produtos alimentícios sob diferentes valores de temperatura e velocidade do ar provoca alterações significativas nas taxas de reidratação do produto, na sua capacidade de retenção de água, na cor, sabor, forma, etc., principalmente para valores elevados de temperatura e longos períodos de exposição do produto à secagem (VEGA-GÁLVEZ et al., 2012, VELIĆ et al., 2004).

Segundo Vega-Gálvez et al. (2012), o aumento da temperatura do ar de secagem é acompanhado pela diminuição do tempo de secagem e, assim como mostra a Figura 5,

Figura 5 - Influência da temperatura e da velocidade do ar no processo de secagem. Adaptado de Vega-Gálvez et al. (2012)

para uma mesma temperatura de secagem o aumento da velocidade do ar também implica numa diminuição do tempo de secagem.

Os secadores solares com ventilação forçada possuem maior *taxa de secagem*, ou seja, maior massa de produto desidratado por unidade de tempo em relação aos secadores de convecção natural, provavelmente porque o fluxo de calor fornecido ao produto aumenta e a redução da umidade relativa em seu entorno tende a ser mais efetiva (ABDULLAH; MIKIE; LAM, 2006). Em seus estudos com maçãs, Velić et al. (2004) mostram que o aumento da velocidade do ar de secagem diminui o teor de água do produto mais rapidamente.

No entanto, segundo os estudos de Krokida et al. (2003), o efeito da temperatura do ar de secagem é mais significativo sobre a curva de secagem do que, propriamente, a velocidade ou a umidade relativa do ar. Para Vega-Gálvez et al. (2012), a difusão da água no alimento aumenta com a temperatura do ar de secagem; a cor, a absorção de vitaminas C e E, a capacidade antioxidante, entre outros parâmetros qualitativos, por sua vez, tornam-se debilitados com tal aumento (VEGA-GÁLVEZ et al., 2012).

Os resultados apontam que o controle da temperatura do ar de secagem é essencial à qualidade do produto e à eficiência energética do equipamento (BENALI; AMAZOUZ, 2006). A Tabela 2 fornece, basicamente, condições de temperatura apropriadas para a secagem de algumas frutas e hortaliças ITAL (2010):

Tabela 2 - Temperatura e umidade relativa do ar ideais à secagem de frutas e hortaliças

Fruta e Hortaliza	$T_{secagem} (^{\circ}C)$	$U_{secagem} (\%)$	$U_{residual} (\%)$
Ameixa	72	60	16 – 19
Uva	35 – 37	...	...
Maçã	73	60	...
Damasco	65	...	18
Pêssego e Pêra	45 – 70	...	25 – 30
Cereja	75	...	5 – 10
Figo	35 – 40	...	...
Tâmara	...	...	12
Abacaxi	65	...	20
Banana	70	70 – 90	21
Aspargo	65	...	5
Vagem	45 – 90	...	5
Beterraba	70 – 100	...	...
Repolho	65 – 85	...	7
Cenoura	60 – 70	...	4 – 8
Couve flor	< 60	...	4
Cebola	55 – 90	...	6
Páprica	150	...	6
Ervilha	50 – 80	...	4 – 8
Espinafre	75	...	...
Batata	60 – 135	...	10 – 35

2.4 Secador Solar

A energia solar tem sido utilizada desde a antiguidade para a secagem de alimentos, expondo o produto diretamente ao sol e, concomitantemente, deixando-o susceptível ao ataque de fungos, insetos, pássaros, roedores, etc., sob as intempéries climáticas como chuvas, ventos, além de condições de secagem anti-higiênicas que levam a perdas de produtividade (EKECHUKWU; NORTON, 1997, EKECHUKWU; NORTON, 1999, SALEH; BADRAN, 2009, FONSECA et al., 2010).

Uma possibilidade para garantir melhores condições de proteção e higiene seria utilizar-se de “secadores convencionais”, mas estes demandam recursos energéticos significativos para sua operação, tornando o processo de secagem bastante custoso. A alternativa a estes problemas é a utilização de *secadores solares*, que são equipamentos simples e de baixo custo tecnológico (SALEH; BADRAN, 2009).

2.4.1 Tipos de secadores solares

Existem mais de 200 tipos diferentes de secadores solares destinados à diferentes aplicações, mas somente uns 20 modelos são realmente utilizados (SHARMA; CHEN; LAN, 2009). A grande diversidade na forma física dos alimentos, as taxas de produção

desejadas e até mesmo o maior ou menor apreço à qualidade do produto final são possíveis justificativas a tantos modelos projetados. A opção por um ou outro secador é mais influenciada por aspectos qualitativos do que pelos recursos energéticos envolvidos (MUJUMDAR, 1997).

Os modelos comumente encontrados são aqueles que utilizam os princípios básicos de uma estufa, classificados em dois grupos: os secadores solares passivos (de convecção natural) e os secadores solares ativos (utilizam ventoinha para que o ar circule entre os produtos). Estes secadores ainda se enquadram em outras três subcategorias, ou seja, secador solar integral ou direto, distribuído ou indireto e misto, mostrados na Figura 6 (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

Figura 6 - Tipos de secadores solares. Adaptado de Ekechukwu e Norton (1999)

No secador solar integral ou direto, o alimento é colocado na cabine de secagem e, via uma cobertura de material transparente, recebe a radiação solar diretamente sobre ele, realçando a cor apropriada da maturação de frutos verdes pois permite a decomposição da clorofila residual nos tecidos ao longo da secagem. Em secadores solares distribuídos ou indiretos, o produto é colocado sobre bandejas perfuradas e estas inseridas dentro de uma cabine opaca, de forma que o ar aquecido, proveniente do coletor solar, circule entre os alimentos (EKECHUKWU, 1997).

O secador misto, por sua vez, consiste numa combinação dos dois tipos de secadores expostos anteriormente e “é o que apresenta melhor desempenho em termos de taxa de secagem e custo” (EKECHUKWU; NORTON, 1999). De maneira geral, ele possui um

coletor solar constituído de alguma liga metálica pintada de preto fosco e recoberta por uma placa transparente, de vidro ou plástico. O ar aquecido nessa região flui, devido ao gradiente de temperatura e pressão existentes, entre a região do coletor e a região onde estão os alimentos, conforme a Figura 7:

Figura 7 - Constituição básica de um secador solar misto (SILVEIRA, 2011)

2.4.2 Eficiência do secador solar

O secador é um sistema termodinâmico cujo ar é o principal agente e sua eficiência depende, entre outros fatores, da otimização das suas dimensões (BEKKIOU et al., 2009). Quando a radiação solar incide sobre uma superfície ela pode refletir-se, ser absorvida ou atravessá-la, e assumindo que a parcela refletida da radiação incidente seja γ , a absorvida α e a transmitida τ , tem-se:

$$\gamma + \alpha + \tau = 1 \quad (18)$$

A placa de vidro que recobre o coletor deve possuir alta transmitância à radiação situada na faixa do visível, o que, em outras palavras, significa dizer que quase toda luz visível atravessa o vidro (somente uma pequena parcela é absorvida ou refletida por ele), enquanto que para radiação de grande comprimento de onda o vidro deve ser considerado opaco (RABL, 1985; AYENSU, 1997).

O coletor, por sua vez, deve ser opaco (baixa transmitância) e, por ser pintado de preto fosco, pouco reflectivo à luz visível (SHARMA; CHEN; LAN, 2009). Alguns autores informam que a absorbância dos coletores utilizados e a transmitância dos vidros comumente utilizados situam-se, comumente, entre 0,7 a 0,9 (AYENSU, 1997; SALEH; BADRAN, 2009; KOYUNCU, 2006; SINGH; SINGH; DHALIWAL, 2004).

Dessa maneira, grande parte da radiação solar visível que atravessa o vidro e atinge o coletor é absorvida por ele, eleva sua temperatura e o faz emitir radiação térmica

(alto comprimento de onda). Esta radiação, por sua vez, não consegue atravessar o vidro devido à sua alta reflectância para grandes comprimentos de onda. Assim, cria-se um efeito estufa no interior do coletor solar que permite elevar a temperatura do ar que o atravessa (GÓMEZ; FANDIÑO; SARMIENTO, 2010; EL-SEBAII et al., 2002). A Figura 8 mostra os elementos básicos de um coletor solar de placa plana:

Figura 8 - Elementos de um coletor solar de placa plana. Adaptado de Gómez, Fandiño e Sarmiento (2010)

Segundo Rabl (1985), a eficiência instantânea (η) de um coletor solar é definida como a razão entre a potência útil ($\dot{Q}$) por unidade de área (A) e a radiação solar total incidente (I):

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{AI} \quad (19)$$

sendo $\dot{Q}$ em Watts, A em m^2 e I em W/m^2 .

A potência útil, por sua vez, pode ser calculada conhecendo-se o fluxo de massa ($\dot{m}$) e a temperatura de entrada e saída (T_e e T_s) do coletor solar, ou seja (KOYUNCU, 2006):

$$\dot{Q} = \dot{m}c(T_s - T_e) \quad (20)$$

sendo c o calor específico do ar que atravessa o coletor ($kJ/kg^\circ C$).

De acordo com Rabl (1985), a eficiência depende dos fatores: temperatura do coletor, temperatura ambiente, radiação solar incidente, fluxo de massa e ângulo de incidência.

É possível estimar a parcela do fluxo de radiação solar absorvida pelo coletor (Q_{abs}) conhecendo-se sua eficiência óptica (η_0), que para coletores de placa plana é definida, aproximadamente, como o produto da transmitância do vidro (τ) pela absorbância

do coletor (α), ambas no que diz respeito a radiação visível (DUFFIE; BECKMAN, 2013, RABL, 1985):

$$\frac{\dot{Q}_{abs}}{AI} = \eta_0 \approx \tau\alpha \quad (21)$$

Quando a temperatura externa é inferior a temperatura do coletor, parte da energia absorvida por ele é transferida para o ar que o circunda, reduzindo assim sua eficiência:

$$\eta = \eta_0 - \frac{\dot{Q}_{per}}{AI} \quad (22)$$

Conhecendo-se o coeficiente de perda de calor do coletor (U), a temperatura do coletor (T_c) e a temperatura ambiente (T_A), é possível estimar o fluxo de energia térmica perdida por ele, ou seja:

$$\dot{Q}_{per} = AU(T_c - T_a) \quad (23)$$

sendo U dado em $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Substituindo o fluxo de energia térmica perdida (eq.(23)) na equação (22), tem-se:

$$\eta = \eta_0 - \frac{U(T_c - T_A)}{I} \quad (24)$$

Portanto, a eficiência do coletor solar pode ser estimada conhecendo apenas dois parâmetros de sua construção, η_0 e U (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Mesmo assim, medir a temperatura do coletor é mais complicado do que estimar a temperatura média do ar que o atravessa:

$$T_M = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (25)$$

Seja F_M o fator de transferência de calor do coletor para o ar, estima-se a eficiência do coletor solar da seguinte maneira:

$$\eta = F_M \left[\eta_0 - \frac{U(T_M - T_A)}{I} \right] \quad (26)$$

em que F_M é adimensional e depende, essencialmente, da construção do coletor, assumindo valores que variam entre 0,8 – 0,9 para coletores a ar.

Igualando as equações (19) e (26), obtém-se o fluxo de energia térmica absorvido pelo ar que atravessa o secador solar (GÓMEZ; FANDIÑO; SARMIENTO, 2010):

$$\dot{Q} = AIF_M \left[\eta_0 - \frac{U(T_M - T_A)}{I} \right] \quad (27)$$

Observa-se nas equações (20) e (27) que a estimativa da energia absorvida pelo ar que atravessa o secador pode ser feita medindo o fluxo de ar ou conhecendo os parâmetros

F_M , η_0 e U que se referem à construção do coletor, além, é claro, das demais variáveis que, de certa forma, são mais acessíveis.

A eficiência do processo de secagem também pode ser calculada conhecendo-se as temperaturas de entrada (T_e) e saída (T_s) do secador, além da temperatura de bulbo úmido (T_u) (BENALI; AMAZOUZ, 2006):

$$n = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_u} \quad (28)$$

Em alguns casos, a estimativa da eficiência do secador pode ser calculada à partir das temperaturas do ar de secagem (T_{as}), do ar de exaustão (T_{ae}) do ar ambiente (T_A)

$$\eta = \left(\frac{T_{as} - T_{ae}}{T_{as} - T_A} \right) 100 \quad (29)$$

Porém, é necessário especificar cuidadosamente as condições meteorológicas nas quais a eficiência é estimada. Os autores Gómez, Fandiño e Sarmiento (2010); Rabl (1985); Duffie e Beckman (2013) melhor esclarecem sobre outras estimativas de eficiência, bem como sobre as maneiras de determinar o coeficiente de perda de calor pelo coletor.

A comparação da eficiência entre diferentes tipos de coletores pode ser também vista em Koyuncu (2006) e, segundo Sharma, Colangelo e Spagna (1993), Bekkiou et al. (2009), a eficiência do secador solar está atrelada ao aumento da área da placa absorvedora, à maior razão entre o comprimento e a largura do coletor e a minimização das fugas de ar, assim como a posição da placa absorvedora em relação à radiação incidente (BEKKIOU et al., 2009).

2.5 Psicrometria

O ar seco é composto, basicamente, por nitrogênio ($\approx 78\%$), oxigênio ($\approx 21\%$), argônio ($\approx 1\%$), além de outros gases como dióxido de carbono, hidrogênio, hélio, etc. Ao ar atmosférico, por sua vez, inclui-se vapor d'água em sua composição e, de maneira bem razoável, pode-se interpreta-lo como um gás ideal, uma vez que as moléculas que o compõem pouco se interagem e ocupam volume próprio desprezível.

Dessa forma, para um volume V , tem-se (MORAES et al., 2011; VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001):

$$n_t = n_{ar} + n_a \quad (30)$$

em que n_t é o número total de moles, n_{ar} é o número de moles de ar seco e n_a é o número de moles de vapor d'água. Analogamente, pela lei de Dalton:

$$P_t = P_{ar} + e_a \quad (31)$$

sendo P_t a pressão total, P_{ar} a pressão parcial do ar seco e e_a a pressão parcial do vapor d'água, todas medidas em Pascal.

Assumindo que V seja o volume ocupado (m^3), R a constante universal dos gases ideais (J/Kmol) e T a temperatura do ar atmosférico (K), n_{ar} e n_a o número de moles de ar e vapor d'água, respectivamente, a lei dos gases ideais garante que:

$$P_a V = n_{ar} R T \quad (32)$$

$$e_a V = n_a R T \quad (33)$$

Ao longo da secagem de um alimento, a composição do ar atmosférico se modifica, essencialmente, devido à evaporação da água presente no produto, sendo conveniente expressar as mudanças no conteúdo de vapor d'água do ar em função da quantidade de ar seco, bem como apresentar algumas grandezas psicrométricas essenciais ao estudo dos processos de secagem, tais como: conteúdo de vapor d'água, pressão de vapor, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura do ponto de orvalho, umidade absoluta, umidade relativa, calor específico do ar úmido (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

2.5.1 Conteúdo de Vapor d'água

O *conteúdo de vapor d'água*, expresso em moles de vapor d'água por moles de ar seco, pode ser escrito da seguinte maneira:

$$U' = \frac{n_a}{n_{ar}} = \frac{e_a}{P_{ar}} \quad (34)$$

Em relação à massa de vapor d'água e de ar seco, tem-se:

$$U = U' \frac{M_a}{M_{ar}} \quad (35)$$

em que M_a e M_{ar} são, respectivamente, as massas molares da água e do ar seco.

2.5.2 Pressão de vapor d'água

A *pressão de vapor* da água é de grande importância para muitos fenômenos ligados à meteorologia e à agronomia pois, somada a outros eventos (vento, temperatura, radiação solar, etc.), é responsável pela evaporação da água líquida, a qual ocorre quando a pressão parcial do vapor d'água no ar atmosférico (e_a) é inferior a pressão parcial do vapor d'água no ar saturado (e_s).

A equação empírica de *Tetens* encontrada, por exemplo, em Moraes et al. (2011) expressa a relação entre a pressão de vapor saturado (e_s) e a temperatura:

$$e_s = \frac{Ae^{17,3t}}{237,3 + t} \quad (36)$$

sendo A igual a 610,8 Pa e a temperatura (t) dada em graus Celsius.

Nota-se na equação (36) que quanto maior a temperatura maior o valor de e_s , o que pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Pressão de vapor d'água saturado (e_s) em função da temperatura (MORAES et al., 2011)

2.5.3 Umidade absoluta e relativa do ar

Define-se *umidade absoluta* do ar (U_A) como a razão entre a massa de vapor d'água e o volume de ar, e pode ser calculada a partir da pressão parcial do vapor d'água no ar atmosférico, como segue:

$$U_A = e_a \frac{M_a}{RT} \quad (37)$$

Por sua vez, a *umidade relativa* do ar (U_R) estabelece uma relação entre a quantidade de vapor d'água presente no ar e a que poderia existir numa situação de saturação à mesma temperatura. Pode ser escrita como a razão entre a pressão parcial do vapor d'água (e_a) e a pressão parcial do vapor d'água saturado (e_s), também mostrado nas

equações (1) e (2) (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001, MORAES et al., 2011):

$$U_R = \frac{e_a}{e_s} \quad (38)$$

2.5.4 Temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido

O psicrômetro de bulbos seco e úmido, representado na Figura 10, constitui-se de dois termômetros, sendo o bulbo de um deles recoberto por um tecido molhado com água. Ambos estão no interior de um encapsulamento que pode ou não conter um exaustor cuja função é forçar a passagem do ar pelos termômetros. A *temperatura de bulbo úmido* (T_u) é dada pelo termômetro recoberto com tecido embebido com água, enquanto que a *temperatura de bulbo seco* (T_s) é obtida diretamente pela exposição do termômetro à passagem do ar dentro do encapsulamento.

Figura 10 - Esquema de funcionamento de um psicrômetro de bulbo seco e úmido. Adaptado de Schneider (2012)

O fluxo contínuo de ar atravessa ambos os termômetros, mas no caso do *termômetro de bulbo úmido*, desde que o ar não esteja saturado, a água embebida no tecido evapora e retira parte da energia térmica das moléculas do líquido presente no interior do tubo do termômetro, reduzindo sua temperatura à valores inferiores a do termômetro de bulbo seco (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

Conhecendo-se ambas as temperaturas é possível estimar e_a através da seguinte equação:

$$e_a = e_{s,T_u} - \gamma P_{atm}(T_s - T_u) \quad (39)$$

em que γ é a constante psicrométrica, a qual depende da geometria e da ventilação do psicrômetro, P_{atm} a pressão atmosférica e e_{s,T_u} a pressão de vapor à temperatura do bulbo úmido.

Quanto maior a evaporação da água no termômetro de bulbo úmido menor será T_u e, conseqüentemente, menor será o valor de e_a , o que implica num reduzido valor

da umidade relativa do ar (vice-versa). Quando T_u tende ao valor de T_s significa que a evaporação da água no termômetro de bulbo úmido tende à zero, o que faz e_a se aproximar à e_{s,T_u} e a umidade relativa do ar se aproximar de 100%.

2.5.5 Temperatura do ponto de orvalho

A saturação do ar atmosférico ocorre quando o vapor d'água contido nele é o maior possível para uma determinada temperatura. Isto pode ocorrer pela evaporação da água ou devido a redução da temperatura do ar até à *temperatura de orvalho* (t_o) apresentada na equação (40), que se estabelece quando $e_a = e_s$ (MORAES et al., 2011):

$$t_o = \frac{237,3 \ln \frac{e_a}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_a}{A}} \quad (40)$$

em que A é a constante definida na equação (36).

Valores de *temperatura do ponto de orvalho* próximas à temperatura ambiente mostram que o meio apresenta umidade relativa do ar elevada. Quando a temperatura de orvalho é superior à 0 °C, não há formação de geadas, pois a água se liquefaz antes mesmo de atingir seu ponto de solidificação e libera calor latente para o meio, aquecendo-o. Assim, a *temperatura do ponto de orvalho* pode ser encarada com um forte indicador das condições atmosféricas (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001; MORAES et al., 2011).

2.5.6 Capacidade calorífica do ar

A “*capacidade calorífica do ar úmido*” (C_u) é definida como a energia necessária para elevar 1kg de ar atmosférico (ar seco mais vapor d'água) em 1°C, Greankoplis (1983), citado por (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001):

$$C_u = C_{ar} + U_A C_a \quad (41)$$

sendo C_{ar} a “*capacidade calorífica do ar seco*” ($\approx 1,005$ kJ/kg) e C_a a capacidade calorífica do vapor d'água ($\approx 1,884$ kJ/kg).

2.6 As Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas que fazem parte deste estudo são: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, precipitação pluvial e velocidade do vento. Pretende-se compreender melhor cada uma destas variáveis, as possíveis interações que estabeleçam entre si, seus instrumentos de medição e a maneira que o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e o *Posto Meteorológico* da ESALQ as traduzem em dados estatísticos.

2.6.1 O tratamento das variáveis meteorológicas

Desde 1872, o Comitê Meteorológico Internacional recomenda que para a definição de um clima sejam utilizados, no mínimo, 30 anos de observações diárias das variáveis meteorológicas. No Brasil, as observações iniciaram-se, de forma sistemática, a partir de 1910, restringindo-se a valores médios mensais e anuais de pressão atmosférica, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura máxima absoluta, temperatura mínima absoluta, temperatura média, umidade relativa, nebulosidade, precipitação total, precipitação máxima em 24h, evaporação total e insolação total (INMET, 2014a).

Em 1992, o Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, hoje denominado INMET, publica as *Normais Climatológicas* 1961-1990, que foram aperfeiçoadas de 2000 para cá com o advento de estudos e regulamentações mais rigorosas (INMET, 2014b).

As variáveis meteorológicas apresentadas pelo INMET resultam de observações realizadas, diariamente, as 12h, 18h e 24h segundo o UTC, e são separadas em três grupos:

- I. Variáveis associadas a valores diários, como temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, intensidade do vento, entre outras;
- II. Variáveis associadas a valores acumulados no período de interesse, como precipitação, evaporação, insolação, entre outras;
- III. Variáveis que representam eventos observados em um período de interesse, com um mês ou um ano, por exemplo.

A determinação das normais de uma variável X depende do grupo que a mesma se encontra. No caso do grupo I, associado a valores diários, tem-se:

$$X_{ij} = \sum_k \frac{X_{kij}}{N}, \quad (42)$$

em que X_{kij} é o valor observado da variável X no dia k , do mês i , do ano j e do número de dias N .

No que concerne ao segundo grupo, a normal acumulada num determinado período é computada como a soma de todos os valores diários disponíveis para certo mês e ano, ou seja:

$$X_{ij} = \sum_k X_{kij}, \quad (43)$$

O terceiro grupo corresponde aos dados observados num período de interesse, como dias com chuva acima de um determinado limiar, períodos consecutivos de chuva, entre outros, calculados a partir de:

$$n(X_i) = \sum_k \frac{X_{kij}}{m_i}, \quad (44)$$

em que m_i é o número de anos de dados da variável X_{ij} .

2.6.2 Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura é uma variável de estado intensiva que mensura a energia dos átomos e moléculas cinética média de um sistema em equilíbrio térmico em um dado instante. Um conjunto de moléculas isoladas dentro de uma caixa (A) com paredes adiabáticas, por exemplo, apresentará maior temperatura que outro conjunto com igual número de moléculas isoladas em outra caixa semelhante (B) se, necessariamente, a energia cinética (translação, rotação ou vibração) das moléculas em A for maior que em B. No caso específico da matéria em estado gasoso, pode-se também induzir que uma maior temperatura está intimamente associada ao maior *livre caminho médio* ou a maior pressão das partículas no interior da caixa.

Ao colocar as caixas em contato de forma que as paredes justapostas sejam trocadas por um material que possibilite a passagem do calor, após algum tempo ambas apresentarão a mesma temperatura, ou seja, estarão em equilíbrio térmico, o que significa dizer que houve troca de calor entre elas. De acordo com a lei de resfriamento de Newton, a taxa com a qual o calor é transferido depende da condutividade térmica do material e é tão maior quanto maior for a diferença de temperatura (SARTORELLI; HOSOUME; YOSHIMURAY, 1999):

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = KA \frac{dT}{dx} \quad (45)$$

sendo Q a quantidade de calor(J), t o tempo (s), K a condutividade térmica ($J/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), A a área superficial (m^2), T a temperatura ($^\circ\text{C}$) e x a espessura (m) que separa as regiões que apresentam temperaturas diferentes.

O *calor*, portanto, é uma energia em trânsito que caminha de um corpo a maior temperatura para outro de menor temperatura e é responsável não somente pela alteração da temperatura do corpo, mas também pela alteração do seu estado físico. Maiores detalhes sobre os conceitos de calor e temperatura podem ser vistos em (NUSSENZVEIG, 2008).

O aumento da temperatura do ar atmosférico faz aumentar o valor da pressão de vapor d'água saturado, conforme mostra a Figura 9, e como a umidade relativa é a relação entre a pressão de vapor d'água e a pressão de vapor d'água saturado, tem-se que o aumento da temperatura do ar faz diminuir a umidade relativa do ar e vice-versa (considerando que não haja a inserção de vapor d'água no ar atmosférico) (MORAES et al., 2011). A Figura 11 mostra um exemplo do comportamento da temperatura e umidade relativa ao longo do tempo.

Figura 11 - Comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar no interior do secador ao longo do tempo. Adaptado de Bekkiou et al. (2009)

É como considerar o ambiente como um grande reservatório que aumenta sua capacidade em absorver vapor d'água à medida que aumenta sua temperatura e vice-versa. Em outras palavras, a umidade relativa é uma grandeza que representa, em termos percentuais, o quanto de vapor d'água há neste grande reservatório em relação ao máximo que poderia conter à mesma temperatura.

Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar são instalados a 1,5 metros do solo e nas estações convencionais, por exemplo, as temperaturas máxima e mínima são registradas em termômetros especiais, denominados *termômetros de máxima* e *termômetros de mínima*, lidas pelo observador nos três horários anteriormente descritos, ou por vezes, somente às 12h e às 24h (INMET, 2014b).

Existem diversos métodos para o cálculo da temperatura ou umidade relativa do ar média diária utilizando-se de poucas observações, entre eles o método aplicado pelo INMET, que se denomina *temperatura/umidade relativa do ar média compensada* (WEISS; HAYS, 2005; NECHET; PRESTE, 1998):

$$\hat{T} = \frac{T_{max,kij} + T_{min,kij} + T_{12,kij} + 2T_{24,kij}}{5} \quad (46)$$

e

$$\hat{U}_R = \frac{U_{Rmax,kij} + U_{Rmin,kij} + U_{R12,kij} + 2U_{R24,kij}}{5} \quad (47)$$

em que k, i e j referem-se ao dia, mês e ano, respectivamente.

Nas *estações automáticas* do próprio INMET, no entanto, os valores de temperatura e umidade relativa do ar são lidos minuto a minuto e, a cada hora os dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos via satélite ou via telefone celular para a sede do INMET. A média diária, por sua vez, é calculada somando todas as observações e dividindo-as pelo número de observações feitas ao longo do dia (INMET, 2014b).

$$\hat{j} = \frac{\sum_{i=1}^{24} J_i}{i}, \quad (48)$$

sendo J_i a i -ésima observação da variável meteorológica (temperatura ou umidade relativa do ar) e i o número de observações.

Na estação automática do *Posto Meteorológico da ESALQ*, são fornecidos a cada 15 minutos dados de temperatura, umidade relativa, densidade de fluxo de radiação solar, evapotranspiração, velocidade e direção do vento, além de médias diárias e mensais. Os valores máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa do ar, por sua vez, referem-se ao maior e menor valor do conjuntos de dados diários observados.

2.6.3 Precipitação pluvial

De forma bem abrangente, denomina-se *chuva* como a principal via de retorno da água presente na atmosfera para a superfície terrestre, seguindo um processo conhecido de evaporação/transpiração e condensação. Existem diversas formas de precipitação que decorrem da formação e desenvolvimento de fenômenos atmosféricos de pequena, média e grande escala. Em decorrência da sua ampla variabilidade espacial, associada a sua frequência não cíclica, é uma variável de difícil previsibilidade. Maiores detalhes podem ser vistos em Calveti et al. (2006).

De acordo com Moraes et al. (2011) entre outros, a condensação do vapor d'água é um processo exotérmico, ou seja, libera energia térmica e aquece o ar ambiente. Para que ocorra, é necessário que o ar atmosférico esteja saturado de vapor d'água, e isso pode acontecer de duas formas: aumentando a pressão de vapor d'água no ar e/ou resfriando o ar. Segundo Sentelhas e Angelocci (2014), este “resfriamento do ar se dá normalmente por processo adiabático”, ou seja, o ar sobe, encontra uma região de menor pressão e expande às custas da sua própria energia interna, o que lhe reduz a temperatura. Além disso, a condensação do vapor d'água também requer a presença dos *núcleos de condensação*, como o NaCl, por exemplo, em torno dos quais se formam as pequenas gotículas que permanecem em suspensão no ar (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2014).

Devido à sua pouca massa, as pequenas gotículas não conseguem vencer as forças que a fazem flutuar na atmosfera, sendo necessário a formação de gotas maiores para que ocorra a precipitação. A coalescência das gotas menores pode se dar de diferentes formas: diferença de temperatura, tamanho, carga elétrica, além do seu próprio movimento turbulento no interior da nuvem (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2014).

No que concerne aos instrumentos de medida, existem os pluviômetros e os pluviógrafos. Os pluviômetros coletam o volume de água precipitada sobre certa superfície. Os pluviógrafos fornecem também o horário e o tempo de duração da chuva e, portanto, sua intensidade. O volume ou *quantidade de chuva* acumulada (h) é medida em milímetros:

$$h = \frac{V_p}{A_c} \quad (49)$$

sendo V_p o volume precipitado (l) e A_c a área de captação (m^2). Equivalente a dizer que um litro d'água depositado sobre uma superfície lisa e horizontal de $1 m^2$ de área terá $1 mm$ de lâmina d'água.

Em um pluviógrafo, a intensidade da chuva é registrada em um diagrama semelhante ao representado na Figura 12, sendo medida em milímetros por hora (mm/h).

Figura 12 - Representação do diagrama de um pluviógrafo. Adaptado de Sentelhas e Angelocci (2014)

Segundo Santos et al. (2009), o conhecimento da intensidade, duração e frequência de chuvas intensas é essencial na previsão de eventos extremos relacionados às obras de controle de erosão e drenagem nos mais diversos campos da engenharia. A erosão do solo, por sua vez, não só depende das características da chuva (quantidade, intensidade e duração), mas também das características do solo e do declive (NETO; MOLDENHAUER, 1992). Por isso, os artigos nesta área mostram que a classificação das chuvas é algo subjetivo que varia de acordo com a localidade e com aquilo que se objetiva analisar.

2.6.4 Velocidade do vento

Os ventos se originam, basicamente, pela diferença de pressão entre duas regiões distintas, ou seja, o ar se desloca de uma região de maior pressão para outra de menor pressão, e segundo Ephrath, Goudriaan e Marani (1996), a velocidade do vento ao longo do dia parece ter um certo padrão de comportamento: baixa velocidade nas primeiras horas da manhã, aumento da velocidade até o final da tarde e a diminuição da velocidade ao cair da noite (DONN, 1965).

A velocidade e a direção do vento afetam significativamente certas atividades agrícolas, como a aplicação de defensivos, e estão intimamente atreladas à polinização e propagação de doenças nas plantações. Restringem o bom desempenho do secador solar, pois o ar ambiente em movimento age como um dissipador de calor fazendo diminuir a temperatura do ar de saída do coletor, o que acarreta o aumento do tempo de secagem. Quanto maior a velocidade do ar que circunda o coletor maior a perda de energia térmica por convecção e, conseqüentemente, maior a redução de sua temperatura (BENAMOUN; BELHAMRI, 2006).

O vento é tratado como uma variável do grupo I e sua intensidade é decomposta em duas componentes, zonal e meridional, conforme mostra a Figura 13. As unidades de medida mais encontradas para a intensidade do vento são m/s e km/h . Já sua direção é medida em graus (sentido horário), ou seja:

- 0 ou 360° equivale ao *Norte Geográfico*;
- 90° equivale ao *Leste Geográfico*;
- 180° equivale ao *Sul Geográfico*;
- 270° equivale ao *Oeste Geográfico*.

Os anemômetros são instrumentos que medem essencialmente a velocidade do vento (alguns tipos registram também a direção em graus), enquanto que os anemógrafos

Figura 13 - Definição do ângulo que determina a direção do vento e suas componentes zonal e meridional para dois vetores de vento de intensidades I e I_0 , e direções θ_0 (nordeste) e θ_1 (sudeste) (INMET, 2014b)

registram continuamente a direção (em graus), a velocidade instantânea (m/s), a distância total (km) percorrida pelo vento em relação ao instrumento e as rajadas (m/s).

2.6.4.3 Radiação Solar

O Sol é uma esfera de $1,39 \cdot 10^9 m$ de diâmetro, dista, em média, $1,495 \cdot 10^{11} m$ da Terra e a temperatura da sua superfície é de, aproximadamente, $6000K$. A Terra, por sua vez, gira em torno do Sol numa órbita elíptica de baixa excentricidade e está inclinada em torno de $23^\circ 45'$ em relação ao plano da órbita, conforme mostra a Figura 14. Esta inclinação é responsável por existirem as estações do ano, pois uma vez que a distância Terra-Sol não varia tanto, é ela que garante que um hemisfério ou outro receba mais ou menos energia dependendo da posição que a Terra se encontra em relação ao plano da órbita (RABL, 1985).

Figura 14 - Representação do movimento da Terra em torno do Sol (RABL, 1985)

O amplo espectro da radiação solar é mostrado na Figura 15, onde se verifica uma distinção entre a radiação que incide sobre a atmosfera terrestre e aquela que atinge a superfície terrestre. Dentre a mistura gasosa que compõe a atmosfera, água, oxigênio e ozônio são os principais responsáveis pelos desvios e/ou espalhamentos da radiação solar para outras direções, reduzindo assim a intensidade da radiação que incide diretamente sobre a superfície terrestre. Os gases que compõem a atmosfera também podem absorver e/ou refletir a radiação incidente (GRIMM, 2014).

Figura 15 - Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera, na superfície terrestre e a emitida por um corpo negro a 5900 K

Em média, as nuvens espalham 74%, absorvem 10% e transmitem 16% da radiação incidente. A nuvem absorve praticamente toda a radiação na faixa do infravermelho. As gotas de água também espalham fortemente a parcela da radiação de grande comprimento de onda. Por outro lado, para as microondas quase não há absorção, somente em nuvens carregadas (nuvem precipitante) é que há interação significativa com as ondas de comprimento curto, reduzindo a transmitância (YAMASOE, 2014).

De toda radiação que atinge a superfície terrestre, a parte que não interage com a atmosfera é denominada de *radiação direta* e a parte desviada ou espalhada denomina-se *radiação difusa*. O termo *radiação difusa* representa a parcela da radiação de grande comprimento de onda que vem de todas as partes do céu e que é mais difícil de ser estimada (LIU; JORDAN, 1960).

Cerca de 30% da radiação incidente sobre a atmosfera é refletida de volta para o espaço e 19% do que entra na atmosfera terrestre é absorvido pelos gases que a compõe, salientando que na faixa do visível (0,3 – 0,7 micrômetros) a absorção da radiação pela

atmosfera é praticamente nula, o que indica que é praticamente transparente à luz visível (GRIMM, 2014).

A parte da energia absorvida pelo gás pode ser transformada em movimento molecular interno, o que altera sua temperatura e o faz emitir energia térmica (calor). De outra maneira, pode também causar a excitação dos seus elétrons, fazendo-os emitir comprimentos de onda característicos do seu espectro (GRIMM, 2014).

A densidade de fluxo de radiação solar que atinge perpendicularmente a superfície da atmosfera terrestre é praticamente constante e equivale a, aproximadamente, $1372,7 \text{ W/m}^2$, denominada de constante solar I_0 . No entanto e apesar da baixa excentricidade da órbita elíptica da Terra em torno do Sol, a pequena variação da distância Terra-Sol ($\sim 1,7\%$) faz com que o valor da intensidade também varie (RABL, 1985).

O ângulo de incidência da radiação sobre a superfície terrestre é outro fator considerável que interfere na sua intensidade. Quanto mais perpendicular for a incidência do vetor radiação sobre um determinado corpo, melhor aproveitada será a radiação solar incidente. O ângulo de incidência pode ser interpretado segundo a álgebra vetorial, representada na Figura 16:

Figura 16 - Sistema de coordenada para o cálculo da incidência solar. Adaptado de Rabl (1985)

De acordo com a Figura 16, β indica o ângulo entre o vetor normal à superfície da Terra e o vetor normal a uma placa plana sobre a superfície da Terra, β_0 ângulo de inclinação entre os raios solares e o plano do equador e λ a latitude local, ou seja:

$$\beta = \beta_0 + \lambda \quad (50)$$

Assumindo que a placa plana seja um coletor solar, alguns artigos relatados por Shariah, Al-Akhras e Al-Omari (2002) mostram que não há um consenso sobre a inclinação do coletor que maximiza a eficiência frente à radiação solar incidente. No entanto, a Figura 16 mostra que esta deveria ser a soma da latitude local com a inclinação do plano da órbita da Terra em torno do Sol; para o hemisfério Sul o coletor deve ficar voltado para o norte geográfico terrestre.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.0.1 Secador Solar e sensores utilizados

O secador solar utilizado foi desenvolvido por Silveira (2011) em seu trabalho de mestrado. Trata-se de um secador solar misto de convecção natural, mostrado na Figura 17, constituído por um coletor de dimensões 53cm por 90cm, cuja base é feita de material reciclado pintado de preto fosco e recoberto por uma placa de vidro comum, associado a uma cabine de secagem e a uma chaminé também pintada de preto fosco, facilitando assim as correntes de convecção de ar.

Sua estrutura é toda feita em aço inox e está localizado na ESALQ, em Piracicaba, cuja latitude é aproximadamente 22°42'. O coletor está voltado para o norte, inclinado em 32°20' em relação à horizontal (SILVEIRA, 2011).

Figura 17 - Secador solar misto de convecção natural (SILVEIRA, 2011)

3.0.2 Organização e análise dos dados

A coleta dos dados de temperatura e umidade relativa do ar dentro do secador ocorre desde 2011 e, especificamente neste estudo, foram observados os seguintes meses: agosto, setembro e outubro de 2011, junho e julho de 2012 e fevereiro de 2013. Os dias analisados em agosto situam-se entre 02/08 e 31/08, em outubro entre 01/10 e 18/10, em julho entre 01/07 e 16/07, enquanto que em setembro, junho e fevereiro foram analisados todos os dias.

Para os referidos meses foram coletados dados de densidade de fluxo de radiação solar (RAD), temperatura do ar ambiente (T_A), umidade relativa do ar (U_{RA}), precipitação pluvial ($Precip$) e velocidade do vento (V), fornecidos pela estação automática do *Posto Meteorológico* da ESALQ / USP em intervalos de 15 em 15 minutos.

Utilizando a estação convencional do *Posto Meteorológico*, coletou-se, de 1980 a 2010, médias mensais de densidade de fluxo de radiação, temperatura *máxima*, *média* e *mínima*, umidade relativa *máxima*, *média* e *mínima*, precipitação e vento para cada um dos seis meses estudados. Todos os registros, dentro e fora do secador, foram organizados em planilhas eletrônicas e separados mês a mês.

Posteriormente, calculou-se uma “média histórica”, ou seja, a média das médias mensais dos dados históricos fornecidos pela estação convencional. Isso possibilitou a comparação entre a “média histórica” de cada uma das variáveis meteorológicas e a média das mesmas variáveis nos anos e meses analisados neste trabalho. O intuito foi observar o comportamento dos meses estudados em relação ao que aconteceu nos últimos 30 anos, atentando-se, especialmente, aos valores que, por ventura, destoassem dos comumente contidos na série histórica. Foram calculados também o *desvio*, a *máxima* e a *mínima* histórica, constituindo assim uma estatística descritiva básica desses dados.

Utilizou-se o *software* Gnuplot para construir diversos gráficos que, na maioria das vezes, combinaram duas ou mais variáveis entre si. O objetivo foi compreender o comportamento e a interação destas variáveis ao longo do tempo: identificar padrões de comportamento e/ou diagnosticar como uma variável influencia ou é influenciada por outra. Dentre os gráficos construídos, estão:

- Temperatura do secador (T_1 , T_2 e T_3) e temperatura ambiente (T_A) em função do tempo;
- Densidade de fluxo de radiação solar (RAD) e temperatura ambiente (T_A) em função do tempo;

- Densidade de fluxo de radiação solar (RAD) e temperatura do secador (T_1 , T_2 e T_3) em função do tempo;
- Umidade relativa do ar do secador (U_{R1} , U_{R2} e U_{R3}) e umidade relativa do ar ambiente (U_{RA}) em função do tempo;
- Umidade relativa do ar ambiente (U_{RA}) e densidade de fluxo de radiação solar (RAD) em função do tempo;
- Umidade relativa do ar do secador (U_{R1} , U_{R2} e U_{R3}) e densidade de fluxo de radiação solar (RAD) em função do tempo;
- Densidade de radiação solar ($DRAD^1$) e densidade de fluxo de radiação solar (RAD) em função do tempo;
- Densidade de radiação solar ($DRAD$) e temperatura do secador (T_1 , T_2 e T_3) em função do tempo;
- Densidade de radiação solar ($DRAD$) e temperatura ambiente (T_A) em função do tempo;
- Densidade de radiação solar ($DRAD$) e umidade relativa do ar do secador (U_{R1} , U_{R2} e U_{R3}) em função do tempo;
- Umidade relativa do ar ambiente (U_{RA}) e densidade de radiação solar ($DRAD$) em função do tempo;
- Temperatura (T_1 , T_2 e T_3) e umidade relativa (U_{R1} , U_{R2} e U_{R3}) do secador em função do tempo;
- Temperatura (T_A) e umidade relativa (U_{RA}) ambiente em função do tempo;
- Umidade absoluta do secador (U_{A1} , U_{A2} e U_{A3}) em função do tempo;
- Incremento de temperatura entre os sensores do secador ($\frac{T_3}{T_1}$, $\frac{T_3}{T_2}$ e $\frac{T_2}{T_1}$) em função do tempo;
- Precipitação pluvial (Precip) em função do tempo;
- Velocidade do vento (V) em função do tempo.

Os gráficos também possibilitaram o reconhecimento da ordem de grandeza das variáveis estudadas no interior do equipamento e, a partir das observações realizadas no gráfico de *temperatura do secador* (T_1 , T_2 e T_3) e *temperatura ambiente* (T_A) em função do tempo, aferiu-se os sensores instalados no secador, pois essencialmente à noite os registros destas variáveis deveriam ser muitos próximos.

¹ DRAD é a integração numérica da densidade de fluxo de radiação solar pelo método de Simpson

A comparação entre as condições internas e externas exigiu que os registros das variáveis, dentro e fora do aparato experimental, fossem feitos no mesmo horário e em intervalos de tempo semelhantes. Importante lembrar que os dados oriundos da estação automática do *Posto Meteorológico* foram fornecidos de 15 em 15 minutos, enquanto que os do secador, minuto a minuto.

Inicialmente, pensou-se em calcular médias a cada intervalo de 15 minutos com os dados fornecidos pelo secador, mas notou-se que a diferença entre as médias calculadas e o próprio valor situado ao final de cada intervalo não era significativa. Por isso, os dados intermediários foram excluídos, selecionando apenas os dados de 15 em 15 minutos de dentro do secador, a começar pelas 00h do dia, pareando assim os dados do secador com os da estação automática do *Posto Meteorológico*.

Apesar da análise gráfica demonstrar satisfatoriamente o comportamento das variáveis, os dados também foram organizados em tabelas. Algumas destas foram construídas a fim de verificar se os registros percentuais de temperatura mais elevadas, assim como os registros de umidade relativa mais baixas, seriam ou não encontradas em maior número dentro do secador, uma vez que o balanço de energia se diz favorável quando a temperatura interna é maior que a externa (BEKKIOU et al., 2009).

Como o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar entre 06 h e 18 h difere das condições estabelecidas à noite, fez-se necessário separar estas variáveis em períodos distintos do dia. Por isso, temperatura e umidade relativa do ar dentro e fora do secador foram separadas em quatro intervalos distintos, ou seja, entre 00 h e 06 h, 06 h e 12 h, 12 h e 18 h e entre 18 h e 24 h.

Reconhecer os momentos nos quais a temperatura do secador foi superior a temperatura ambiente, assim como os momentos em que a umidade relativa interna foi inferior à externa, é condição essencial e necessária aos propósitos deste trabalho, pois dá condições de que se intervenha com ações que agreguem melhorias ao equipamento.

Tão importante quanto comparar os valores internos e externos das variáveis, foi adquirir uma única medida diária para cada uma das variáveis estudadas que pudesse descrever, o mais fidedignamente possível, o comportamento do dia estudado. Para temperatura e umidade relativa do ar, por exemplo, foram calculadas *mínimas*, *médias* e *máximas* diárias. A diferença entre a máxima e a mínima originou as variáveis ΔT e ΔU_R , que se referem, respectivamente, à variação da temperatura e da umidade relativa ao longo do dia. No caso da chuva, simplesmente somou-se os milímetros diários. Em relação ao vento, calculou-se a média diária dos dados com auxílio do método numérico

de Simpson, pois, numericamente, a área sob a curva do gráfico apresentado na Figura 20 representa o deslocamento do vento que, dividido por 24, representa a velocidade escalar média diária do vento, fornecida em km/h .

Figura 20 - Velocidade do vento em função do tempo no mês de agosto de 2011

Além da média e da máxima da densidade de fluxo de radiação solar, calculou-se a densidade de radiação solar, que representa a quantidade de energia por metro quadrado que atinge a superfície da Terra. Novamente, utilizou-se da integração numérica diária dos gráficos semelhantes ao representado na Figura 21.

Figura 21 - Densidade de fluxo de radiação solar em função do tempo no mês de fevereiro de 2013

Outra variável que durante as observações mostrou-se significativa na descrição de um dia foi o coeficiente angular α_0 , estimado pela reta que interpola o gráfico da densidade de fluxo de radiação (RAD), em W/m^2 , *versus* temperatura média do coletor (T_M)¹ em $^{\circ}C$, mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Densidade de fluxo de radiação solar *versus* Temperatura T_3 em 5 de agosto de 2011

O conjunto de variáveis que descreveram o comportamento dentro e fora do secador solar ao longo de um dia foram²:

- Densidade média de fluxo de radiação solar RAD em (W/m^2);
- Densidade máxima de fluxo de radiação solar RAD_{max} em (W/m^2);
- Densidade de radiação solar $DRAD$ em (J/m^2);
- Coeficiente angular α_0 em ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$);
- $T_{A\ min}$, $T_{A\ med}$, $T_{A\ max}$ e ΔT_A em ($^{\circ}C$);
- $U_{RA\ min}$, $U_{RA\ med}$, $U_{RA\ max}$ e ΔU_{RA} em (%);
- $T_{1\ min}$, $T_{1\ med}$, $T_{1\ max}$ e ΔT_1 em ($^{\circ}C$);
- $U_{R1\ min}$, $U_{R1\ med}$, $U_{R1\ max}$ e ΔU_{R1} em (%);
- $T_{2\ min}$, $T_{2\ med}$, $T_{2\ max}$ e ΔT_2 em ($^{\circ}C$);
- $U_{R2\ min}$, $U_{R2\ med}$, $U_{R2\ max}$ e ΔU_{R2} em (%);
- $T_{3\ min}$, $T_{3\ med}$, $T_{3\ max}$ e ΔT_3 em ($^{\circ}C$);
- $U_{R3\ min}$, $U_{R3\ med}$, $U_{R3\ max}$ e ΔU_{R3} em (%);
- $Precip$ em (mm);

¹ $T_M = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$

²Nas variáveis citadas, max, med e min são abreviaturas para máximo, médio e mínimo, respectivamente

- V_{min} e V_{max} em (m/s) , e V_{med} em (km/h) .

Este conjunto de variáveis foi estimado para cada dia observado no estudo e analisado, mês a mês, segundo a estatística multivariada, mais precisamente ao que se denomina de *Análise de Componentes Principais (ACP)*, cujo objetivo é combinar $X_1, \dots, X_n$ variáveis e criar índices $Z_1, \dots, Z_n$ que sejam não correlacionados na ordem de sua importância e que expliquem a variação dos dados (MANLY, 2008). Utilizou-se o software *Statistica 8.0* para a análise dos dados, um programa que integra o banco de dados do Excel à análise estatística propriamente dita, incluindo procedimentos estatísticos elementares e pacotes que contemplam a *Análise Multivariada* de interesse.

A *Análise Multivariada* teve o intuito de encontrar possíveis correlações entre as variáveis externas e internas ao secador solar, verificando quais delas auxiliam ou comprometem seu bom desempenho, além de agrupar dias que apresentassem características comuns sob algum aspecto, essencialmente no que concerne às condições que se mostrem favoráveis ou desfavoráveis à secagem dos alimentos. Dessa forma, foi possível separar *dias críticos* e *não críticos* de um mesmo mês, comparando o desempenho do secador entre os meses estudados e entre as diferentes épocas do ano.

Espera-se, portanto, estabelecer relações de causa e efeito entre o comportamento termodinâmico do secador solar e as variações meteorológicas externas, apontando condições propícias à secagem e possíveis debilidades que implicam em modificações no equipamento para melhorar seu desempenho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Estatística Descritiva: Posto Meteorológico ESALQ/USP

Antes de qualquer análise mais detalhada dos dados fornecidos pelo secador solar, faz-se necessário compreender se os meses analisados (agosto/setembro/outubro de 2011, junho/julho de 2012 e fevereiro de 2013) concordam ou destoam dos registros históricos. Para tal, elaborou-se uma estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pela estação convencional do *Posto Meteorológico da ESALQ/USP*, de 1980 a 2010, para cada um dos seis meses estudados (Tabelas 3 a 8). A Tabela 9 apresenta os valores médios nos meses em que as medições foram realizadas.

Tabela 3 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de agosto situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	178,5	30,5	67,9	8,1	8,4	27,5	11,6	19,6
Desvio Padrão	29,5	34,8	5,8	1,3	1,0	1,2	1,2	0,9
Variância	871,2	1211,6	33,1	1,6	1,0	1,5	1,6	0,9
Valor Máximo	267,6	133,2	77,0	10,6	0,7	30,4	14,4	21,7
Valor Mínimo	112,4	0,0	52,4	5,3	7,1	25,3	9,8	18,3

Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de setembro situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	188,9	64,6	68,9	9,4	9,5	28,0	14,1	21,1
Desvio Padrão	32,1	48,8	7,3	1,1	1,1	1,9	1,1	1,3
Variância	1031,3	2381,5	52,9	1,3	1,2	3,7	1,2	1,6
Valor Máximo	267,3	197,4	83,2	12,0	11,3	32,0	16,8	23,7
Valor Mínimo	136,9	0,5	52,9	7,5	7,0	24,1	11,7	18,0

Tabela 5 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de outubro situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	212,7	114,2	72,3	9,9	9,5	29,6	16,5	23,0
Desvio Padrão	28,6	69,5	7,1	1,2	1,3	1,6	1,2	1,3
Variância	815,8	4835,2	50,8	1,4	1,8	2,7	1,3	1,6
Valor Máximo	283,8	254,5	83,4	11,9	12,2	33,8	18,8	26,3
Valor Mínimo	165,3	11,3	54,2	7,5	7,1	27,0	12,9	20,8

Tabela 6 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de junho situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	141,1	43,3	77,3	6,7	6,9	25,4	10,9	18,1
Desvio Padrão	20,9	45,1	5,8	1,2	1,1	1,4	1,4	1,2
Variância	437,3	2031,6	34,1	1,5	1,3	2,0	1,9	1,5
Valor Máximo	197,7	174,0	90,4	9,1	8,9	28,3	13,5	20,3
Valor Mínimo	93,8	0,0	65,1	4,3	4,6	23,5	8,1	15,6

Tabela 7 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de julho situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	150,2	33,1	72,9	7,2	7,8	25,6	10,5	18,0
Desvio Padrão	22,7	40,1	6,3	1,2	1,3	1,2	1,4	1,2
Variância	517,3	1604,8	39,6	1,5	1,8	1,5	2,1	1,4
Valor Máximo	208,0	169,3	87,3	9,2	10,1	28,1	12,9	19,8
Valor Mínimo	104,8	0,0	60,5	4,0	5,4	23,5	7,1	15,3

Tabela 8 - Estatística descritiva das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos meses de fevereiro situados entre 1980 e 2010

	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
Média	214,4	178,9	81,0	9,2	7,1	30,9	19,4	25,1
Desvio Padrão	36,6	93,8	6,0	1,3	1,2	1,2	0,7	0,9
Variância	1337,2	8798,3	35,9	1,8	1,5	1,4	0,4	0,9
Valor Máximo	332,2	415,6	90,1	11,4	9,7	34,5	20,5	27,3
Valor Mínimo	155,8	18,7	66,7	6,5	4,9	28,8	18,1	22,3

Tabela 9 - Média das variáveis meteorológicas fornecidas pelo Posto Meteorológico ESALQ / USP nos seis meses estudados

Ano	Mês	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
2011	AGO	181,1	1,0	65,9	8,8	7,1	27,9	13,2	20,5
2011	SET	249,8	0,1	60,5	9,6	8,1	30,3	12,6	21,4
2011	OUT	230,1	6,6	69,8	11,7	8,6	29,4	16,9	23,2
2012	JUN	132,4	5,7	84,8	7,5	4,9	24,4	13,9	19,1
2012	JUL	178,0	0,8	71,5	7,4	5,7	26,1	11,1	18,6
2013	FEV	233,8	4,1	82,4	10,0	5,4	31,7	19,9	25,8

Entre as Tabelas 3 e 8, vê-se que os valores médios de radiação solar nos últimos 30 anos são maiores em fevereiro, seguido de outubro, setembro, agosto, julho e junho, nesta ordem. De acordo Rabl (1985), entre outros, meses próximos ou situados no verão recebem mais energia solar do que meses situados no inverno devido à inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da órbita.

Quando se compara os dados históricos aos meses estudados (Tabela 9), os registros mostram que, exceto setembro, todos os meses apresentaram valores médios de densidade de fluxo de radiação solar dentro do esperado. No referido mês, o valor de

$249,8 W/m^2$ não somente supera a estimativa histórica de $(188,9 \pm 32,1) W/m^2$, como é o maior valor médio dentre os seis meses de estudo.

É relevante frisar que os dados de radiação solar e precipitação são os que apresentam maior variância, o que implica dizer que o valor médio, nestes casos, pode não ser uma medida de tendência central. Apesar disso, é necessário atentar-se ao valor elevado de radiação solar apresentado em setembro, uma vez que contraria a expectativa de que meses pertencentes ou situados próximos ao verão possuem maior incidência de radiação solar do que meses situados no inverno ou até mesmo nas estações ditas intermediárias (primavera e outono).

No que concerne à precipitação, o mês de agosto foi o único que se situou próximo da média histórica. Os meses de setembro e julho apresentaram valores de $1,7$ e $3,0 mm$, bem abaixo da média histórica, mas ainda dentro dos desvios padrão fornecidos pelas Tabelas 4 e 7, assim como o mês de fevereiro, que registrou média de $114,3 mm$, enquanto que a média histórica superou os $178 mm$. Já os meses de junho e outubro possuíram valores médios elevados que se aproximaram do valor máximo registrado nos últimos 30 anos. Em junho de 2012, por exemplo, choveu em média $169,7 mm$, enquanto que, historicamente, a média não superou os $45 mm$ e sua máxima atingiu $174 mm$. Em outubro de 2011, por sua vez, choveu em média $203,1 mm$, enquanto que a média e a máxima históricas foram de $114,2 mm$ e $254,5 mm$, respectivamente.

A umidade relativa do ar e as velocidades máxima e média do vento não destoararam significativamente dos registros históricos, assim como os valores das temperaturas mínima, máxima e média. Em resumo, os meses averiguados podem ser descritos da seguinte maneira:

Tabela 10 - Comparação dos valores médios das variáveis de interesse e as médias históricas

Ano	Mês	RAD (W/m^2)	Precip (mm)	U_R (%)	V_{max} (m/s)	V_{med} (km/h)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)
2011	AGO	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado
2011	SET	elevado	reduzido	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado
2011	OUT	adequado	elevado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado
2012	JUN	adequado	elevado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado
2012	JUL	adequado	reduzido	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado
2013	FEV	adequado	reduzido	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado	adequado

4.2 Estudo Qualitativo: Secador Solar e Posto Meteorológico

O estudo qualitativo consiste em traçar o panorama dos dados coletados, averiguando sua confiabilidade e compreendendo o comportamento das grandezas estudadas. Na medida do possível, tal estudo pode fornecer informações importantes para subsidiar o posterior estudo quantitativo.

Observa-se na Figura 23 que, no que concerne a temperatura mínima, os sensores do secador solar e do *Posto Meteorológico* registram comportamento semelhantes. Estes registros normalmente são ao longo da noite e da madrugada, quando o secador deixa de ter a função a que é destinado e passa a funcionar apenas como um recinto de passagem de ar como qualquer outro que se assemelhe. O fato dos sensores dentro e fora do aparato experimental apresentarem valores muito próximos de temperatura mínima permite induzir que os sensores de temperatura do secador se mostram confiáveis. Nota-se que o secador, pelo menos em parte do tempo, satisfaz a condição de manter a temperatura em seu interior maior que a temperatura externa, o que também suscita a ideia de que os sensores estão funcionando corretamente.

Figura 23 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente registrada no Posto Meteorológico da ESALQ/USP no mês de agosto de 2011

Neste momento, não há preocupação com os valores absolutos que os gráficos apresentam, mas sim com o comportamento de cada um deles. É possível observar nas

Figura 24 - Densidade de fluxo de radiação solar *versus* temperatura do ar ambiente registradas no *posto meteorológico* da ESALQ/USP no mês de julho de 2012

Figura 25 - Densidade de fluxo de radiação Solar *versus* temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de julho de 2012

Figuras 24 e 25 o comportamento oscilatório da radiação solar e, consequentemente, da temperatura dentro e fora do secador, algo também já esperado.

No entanto, vê-se que a temperatura no interior do aparato experimental responde de forma mais direta às variações da radiação solar, ou seja, se a radiação aumenta a temperatura do ar dentro do secador, essencialmente no que diz respeito ao sensor 3, também aumenta; se a radiação solar diminui, como mostra a Figura 25, a temperatura no interior responde quase que imediatamente.

Não se pode dizer o mesmo quanto à temperatura ambiente mostrada pela Figura 24, que não responde de forma rápida às variações da radiação solar, muito provavelmente devido à maior inércia térmica do ar ambiente. Observa-se que os valores máximos de temperatura ambiente estão defasados dos valores máximos de radiação solar; é como se o gráfico que descreve a temperatura ambiente estivesse deslocado em relação ao gráfico que descreve a radiação solar incidente, o que é compreensível, pois leva-se um certo tempo para que a radiação solar térmica aja sobre o ar ambiente e, de maneira quase que homogênea, altere sua temperatura.

Dentro do aparato experimental, por outro lado, a massa de ar confinada é relativamente pequena e a radiação solar térmica age de forma mais rápida e eficiente sobre a mesma. Além disso, pode-se dizer, de maneira bem razoável, que o secador “isola” o ar aquecido do ar que o atravessa, potencializa o efeito estufa em seu interior, o que implica num comportamento semelhante ao que se vê na Figura 25.

A Figura 26 mostra dias que apresentam comportamentos distintos para a radiação solar: no dia 3/08 ela foi baixa e intermitente; já no dia 4/08 foi elevada e seu comportamento não sofreu interrupções bruscas. Mesmo assim, a temperatura variou de forma semelhante em ambos os dias, o que implica dizer que nem sempre é garantido que dias com alta incidência solar e pouca intermitência (nuvens, dias nublados, etc.) registrem temperaturas elevadas, justificando a necessidade de olhar para outras variáveis meteorológicas a fim de compreender a situação.

Figura 26 - Densidade de fluxo de radiação solar e temperatura do ar ambiente ao longo do tempo nos dias 3 e 4 de agosto de 2011

Quando a radiação solar não apresenta fortes variações, o comportamento da temperatura em função da densidade de fluxo de radiação solar é praticamente linear (Figura 27), que é o caso do dia 4/08 e de outros tantos observados. Nos dias que apresentam intermitência no comportamento da radiação (dia 3/08, por exemplo), por outro lado, não se distingue adequadamente a curva de crescimento ou decrescimento da temperatura (Figura 28).

Figura 27 - Temperatura no secador (sensor 3) *versus* radiação solar no dia 4 do mês de agosto de 2011

Figura 28 - Temperatura no secador (sensor 3) *versus* radiação solar no dia 3 do mês de agosto de 2011

Na Figura 27, observa-se também que há um intervalo de tempo em que a temperatura continua subindo mesmo quando a radiação já começa a diminuir, o que faz a temperatura decrescer por um caminho diferente. No entanto, percebe-se no conjunto dos dados estudados que nos dias em que a radiação solar é “bem comportada”, tanto o caminho crescente quanto o caminho decrescente da temperatura, como mostra a Figura 27, poderiam ser interpolados por segmentos de reta que, numa análise visual, assemelham-se quanto à inclinação.

Devido a grande quantidade de dias observados, é inviável construir os gráficos das variáveis meteorológicas dia à dia. O que se faz é agrupar um conjunto de trinta dias de dados num mesmo gráfico para comparar os registros entre um dia e outro, o que, por vezes, pode gerar interpretações enganosas. Nem sempre, por exemplo, os gráficos que apresentam valores máximos semelhantes de densidade de fluxo de radiação correspondem a intervalos de temperaturas também semelhantes, como mostrado na Figura 29.

Apesar dos picos de radiação serem praticamente os mesmos em ambos os dias apresentados na Figura 29, no dia 10/08 a radiação é bem intermitente e, por não se tratar de um dia chuvoso, provavelmente são nuvens que atravessam o céu e barram a radiação direta, o que acarreta também uma situação intermitente e de menor valor para a temperatura no interior do secador.

Figura 29 - Densidade de fluxo de radiação solar e temperatura no secador (sensor 3) no mês de agosto de 2011

É provável que se a densidade de fluxo de radiação solar para os trinta dias do mês de agosto fosse apresentada num mesmo gráfico, não seria fácil distinguir detalhadamente o comportamento intermitente do dia 10/06 e não intermitente do dia 11/08, uma vez que seus picos assemelham-se. Portanto, quando um conjunto grande de dados é exposto de uma só vez, pode ser que o comportamento das variáveis seja, à primeira vista, enganoso.

Por isso, optou-se por transformar o gráfico de densidade de fluxo de radiação (W/m^2) em densidade de radiação solar (J/m^2) pelo cálculo da área sob a curva representada pela Figura 29, que gera o gráfico representado na Figura 30.

Figura 30 - Densidade de radiação solar e densidade de fluxo de radiação solar no mês de agosto de 2011

Nesse caso, o resultado passa a ser a quantidade de energia solar por unidade de área superficial que incide sobre a Terra ao longo do dia, e como se observa na Figura 31, o valor da densidade de radiação solar no dia 10/08 foi inferior ao do dia 11/08, o que traduz melhor o que ocorre com a temperatura no interior do secador.

Outro fato relevante é que nem sempre uma maior intensidade de radiação corresponde a uma maior temperatura no interior do secador, como se vê na Figura 32. Apesar da densidade de radiação ter diminuído entre os dias 4/08 e 10/08, o valor máximo da temperatura no interior do secador aumentou, situação encontrada em muitos gráficos observados ao longo dos seis meses estudados.

Não implica dizer que, necessariamente, uma baixa temperatura registrada no interior do secador esteja atrelada a uma baixa incidência da radiação solar no dia em questão. O que ocorre e se observa na Figura 32 é que a máxima de temperatura atingida pelo aparato experimental dependerá do valor da mínima ambiente, ou seja, é a variação

Figura 31 - Densidade de radiação solar e temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de agosto de 2011

Figura 32 - Densidade de radiação solar e temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de agosto de 2011

da temperatura que é diretamente proporcional a radiação solar incidente e não o valor máximo de temperatura atingida pelo secador solar.

A comparação entre os gráficos apresentados nas Figuras 33 e 34, por exemplo, mostra que a temperatura mínima em junho foi sempre menor que em fevereiro, ou seja, mesmo que junho apresente um incremento de temperatura maior que fevereiro, pode ser que a temperatura máxima interna atingida ainda seja inferior.

Em outras palavras, a variação de temperatura pode ser grande devido à elevada incidência de energia solar, mas se a temperatura mínima ambiente for pequena, o secador

Figura 33 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente no mês de junho de 2012

Figura 34 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente no mês de fevereiro de 2012

pode não atingir a temperatura necessária à secagem do alimento. Se a temperatura mínima ambiente for pequena o suficiente a ponto de atingir o ponto de orvalho, ocorrerá a condensação do vapor d'água presente no ar. Logo, a radiação solar no dia seguinte não somente servirá para aquecer o ar, mas também para evaporar a água, o que pode acarretar numa menor variação da temperatura ambiente e, conseqüentemente, da temperatura no interior do aparato.

No que concerne aos propósitos que o secador solar se dispõe, talvez o principal deles seja a elevação da temperatura interna quando comparada à temperatura ambiente. A Figura 35 mostra o comportamento da temperatura interna e externa ao secador no mês de setembro de 2011. Nota-se que o secador, pelo menos em boa parte do tempo, cumpre o papel que lhe é destinado ($T_3 \geq T_2 \geq T_1 \geq T_A$).

Figura 35 - Temperaturas no secador (sensores 1, 2 e 3) e do ar ambiente registrada pelo Posto Meteorológico da ESALQ / USP no mês de setembro de 2011

No entanto, a diferença de temperatura entre os sensores 1, 2 e 3, conjuntamente com a temperatura ambiente, ou de outra forma, as relações T_3/T_2 , T_3/T_1 , T_3/T_A , T_2/T_1 , T_2/T_A e T_1/T_A , crescem à medida que a temperatura aumenta. Em boa parte do tempo, a relação T_2/T_1 , que mostra a influência do coletor sobre o aumento da temperatura do ar de secagem, é maior que a relação T_3/T_2 , que traduz a influência da radiação solar que age diretamente sobre a cabine de secagem, fato relevante que demonstra a importância do coletor para o ganho de temperatura do sistema (Figura 36), conforme afirmam Sharma, Colangelo e Spagna (1993), Bekkiou et al. (2009).

Os meses de inverno contém um teor de vapor d'água no ar atmosférico menor que os meses próximos ou situados no verão (Figuras 37 e 38). Observa-se também que o incremento de temperatura do coletor tende a ser maior nos meses de inverno do que nos meses situados ou próximos do verão, conforme mostram as Figuras 39 e 40.

Partindo do pressuposto que as temperaturas dentro ou fora do secador crescem de forma homogênea, e que o ar úmido precisa de mais energia térmica para elevar sua temperatura do que o ar seco, uma vez que a capacidade calorífica do vapor d'água é quase

Figura 36 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de setembro de 2011

Figura 37 - Umidade absoluta do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de junho de 2012

o dobro da capacidade calorífica do ar seco, é razoável assumir que a presença de vapor d'água dificulta a elevação da temperatura (VEGA-MERCADO; GONGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

A Figura 35 mostra que a queda de temperatura dentro do aparato é mais rápida do que fora dele, não sendo raro encontrar períodos em que a temperatura interna se torna inferior à temperatura externa, talvez devido à mesma justificativa anteriormente descrita, que diz respeito a menor inércia térmica do ar dentro do secador.

Figura 38 - Umidade absoluta do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de fevereiro de 2011

Figura 39 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de outubro de 2011

De acordo com a lei de Newton do resfriamento, a quantidade de calor que flui de um corpo com temperatura mais alta para outro com temperatura mais baixa varia mais rapidamente quanto maior for o gradiente de temperatura, além de também ser influenciada pela condutividade térmica do material. A influência do gradiente de temperatura na queda brusca da temperatura interna provavelmente é mais significativa do que, propriamente, as perdas de energia térmica por correntes de convecção que circundam o secador, pois sua construção é em aço inox, que é um mau condutor térmico comparado

Figura 40 - Incremento de temperatura no secador (sensores 1, 2 e 3) no mês de junho de 2012

aos metais. No entanto, sua carcaça metálica ainda o torna um dissipador de calor, favorecendo as perdas e diminuindo a temperatura interna mais rapidamente, conforme visto em (SARTORELLI; HOSOUME; YOSHIMURAY, 1999).

Os sensores de umidade relativa do ar instalados no interior do equipamento demonstram comportamento já esperado, mas seu valor absoluto ultrapassa, em certos momentos, o limite de 100% como mostra a Figura 41, fato que diz respeito à margem de tolerância dos sensores utilizados, que para o LM35 é de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ (a 25°C) e $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ (-55 a 150°C) e para o HIH-4000 é de $\pm 3,5\%$ (a 25°C).

No entanto, a análise dos dados não foi afetada, pois a separação dos dados de umidade relativa foi feita de 25 % em 25 % (ver *Material e Métodos*), ou seja, os valores acima dos 100 % foram agrupados juntamente com grupo de valores situados entre 75 % e 100 %.

A umidade relativa do ar reage inversamente ao comportamento da temperatura, ou seja, quando uma cresce a outra decresce e vice-versa, conforme afirma Bekkiou et al. (2009), entre outros. O gráfico mostrado na Figura 42 demonstra justamente esta relação inversa entre umidade relativa e temperatura do ar no secador solar estudado, o que valida, pelo menos no que concerne ao comportamento, a funcionalidade dos sensores de umidade relativa utilizados.

Nos dias em que a temperatura não aumentou tanto (dias chuvosos ou de baixa incidência de radiação solar), como é o caso do dia 19/06 (Figura 41), assim como em

Figura 41 - Temperaturas e umidades relativas do ar no secador (sensores 1, 2 e 3) registradas no mês de junho de 2012

tantos outros dias observados, a umidade relativa do ar decresceu pouco, e a relação inversa entre umidade e temperatura se tornou intermitente. No entanto, para dias *não críticos* (“sem chuva” e elevada incidência solar), esta relação inversa é facilmente observada. A curva decrescente mostrada na Figura 42 apresenta, de outra maneira, a mesma relação inversa que há entre temperatura e umidade relativa em dias *não críticos*, observando um comportamento bem definido que permite identificar com clareza intervalos de temperatura que correspondam a intervalos de umidade relativa, e vice-versa.

Figura 42 - Temperatura e umidade relativa do ar no secador (sensor 3) registradas no dia 25 de agosto de 2011

Outra função de extrema importância atribuída ao secador solar é a redução da umidade relativa do ar em seu interior, consequência direta da elevação da sua temperatura, conforme descrito em Moraes et al. (2011), entre outros.

Entre os três sensores instalados, vê-se claramente na Figura 43 que a umidade relativa do ar decresceu mais rapidamente no final do coletor e na cabine de secagem (sensores 2 e 3), onde as temperaturas são maiores, e de maneira mais branda na entrada do secador (sensor 1), onde a temperatura se assemelha à temperatura ambiente. No entanto, os valores absolutos nos três sensores tendem a ser quase sempre inferiores à umidade relativa do ar ambiente, indicando que o secador cumpre seu papel de redução da umidade relativa do ar, criando-se uma espécie de “sorvedouro” de água que favorece a secagem (PARK et al., 2007).

Figura 43 - Umidades relativas do ar no secador (sensores 1, 2 e 3) registradas no mês de setembro de 2011

Percebe-se, no entanto, que a umidade relativa interna ultrapassou o valor da umidade relativa ambiente no momento que, após atingir um mínimo, seu valor começou a elevar-se, conforme apresentado no dia 3/09 (Figura 43), mais ou menos entre 18h e 24h, assim como em tantos outros dias analisados.

O fato é que a temperatura interna no referido intervalo se torna inferior à temperatura ambiente, o que, de acordo com Moraes et al. (2011); Bekkiou et al. (2009), faz com que a umidade relativa do ar interna se torne maior. Porém, e de maneira análoga ao que acontece com a temperatura, ambos valores são bem próximos na medida em que se aproxima o fim de noite ou o início da madrugada.

Figura 44 - Umidade relativa do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de junho de 2012

Figura 45 - Umidade relativa do ar dentro e fora do secador solar registradas no mês de fevereiro de 2011

O comportamento oscilatório da umidade relativa do ar, seja dentro ou fora do aparato experimental ao longo do tempo tende a ser muito equiparável entre os meses estudados (Figuras 44 e 45), estejam estes meses no verão ou no inverno.

A explicação, talvez, seja que uma grande massa de vapor d'água presente num ambiente sob alta temperatura pode acusar o mesmo valor de umidade relativa que outra situação em que se tenha uma pequena massa de vapor d'água sob condições de baixa temperatura.

De acordo com Benali e Amazouz (2006), ITAL (2010), condições propícias de temperatura e umidade relativa são essenciais à secagem de produtos alimentícios, e se tratando de produtos agrícolas, os estudos mostram que quase a totalidade das frutas e hortaliças requerem temperaturas de secagem acima de 40 °C.

Apesar da porcentagem de valores que apresentam temperaturas superiores à 40 °C ser maior no verão, em todos os meses analisados o período em que estes registros aparecem situam-se, mais ou menos, entre 10h e 16h (Figura 46).

Figura 46 - Período em que a temperatura do secador solar ultrapassa 40 °C em outubro de 2011

O estudo qualitativo respalda certas intenções iniciais deste trabalho, como compreender o comportamento de temperatura e umidade relativa do ar dentro e fora do aparato e dar suporte à uma investigação mais profunda que seja capaz de diagnosticar quando e como o secador é realmente viável à secagem dos alimentos. Também permite que se afira a confiabilidade dos sensores instalados no equipamento; condição necessária e anterior a qualquer estudo que se faça com os dados coletados.

4.2.1 Estudo Quantitativo: Secador Solar e Posto Meteorológico

De acordo com a análise qualitativa, o mês de agosto de 2011 enquadrou-se satisfatoriamente no perfil dos últimos 30 anos analisados. Isto significa dizer que o comportamento apresentado pelas variáveis meteorológicas estudadas não destoa do que se espera

Figura 47 - Distribuição de frequência da temperatura ambiente e na cabine de secagem (sensor 3) do secador solar no mês de agosto de 2011

em termos médios. A Figura 47 mostra como se deu a distribuição da temperatura (T_A e T_3) em agosto de 2011 em intervalos de cinco em cinco graus.

Assim como nos demais meses estudados, os gráficos apresentam maior frequência para valores menores, situados entre 15 e 25 °C, e cauda mais alongada à direita. Nota-se que na região que circunda o pico da distribuição, à direita, os percentuais referentes a temperatura ambiente são quase sempre maiores que os que dizem respeito à temperatura na cabine de secagem.

Devido ao pareamento dos dados (ver *Material e Métodos*), o número de registros coletados ao longo do dia pelo secador solar e pelo *Posto Meteorológico* é o mesmo. Portanto, se os valores de temperatura situados entre 15 e 35 °C aparecem em menor número dentro do secador, é sinal que o equipamento registra outros intervalos de temperatura. A Figura 47 mostra algo que acontece nos demais meses analisados, ou seja, intervalos de temperatura mais elevadas, essencialmente acima dos 40 °C, só existem no interior do equipamento, o que mostra mais uma vez que o secador cumpre, pelo menos em certos períodos, sua função de elevar a temperatura interna em relação a temperatura ambiente.

A Tabela 11 mostra que o percentual de registros de temperatura na cabine de secagem superior a 40°C foi maior em setembro e fevereiro, provavelmente devido ao reduzido volume de chuva (Tabela 10) e ao valor elevado na média da radiação solar (Tabela 9). Em contrapartida, outubro e junho apresentaram os dois menores percentuais, o que pode associar-se ao alto índice de chuvas anteriormente indicado pela Tabela 10.

Tabela 11 - Porcentagem dos registros da temperatura da cabine de secagem superiores à 40°C ao longo dos meses estudados

Mês	$T_3 > 40^{\circ}\text{C}$
AGO	16,0
SET	20,4
OUT	13,7
JUN	9,4
JUL	15,3
FEV	20,2

A influência da chuva sobre a elevação da temperatura interna do secador é evidente, uma vez que julho, situado no inverno, registrou temperaturas acima dos 40°C em maior quantidade que outubro, situado mais próximo do verão e com intensidade média de radiação maior (Tabelas 5 e 7).

Para valores situados antes do pico da distribuição, no entanto, os registros percentuais de T_3 em todos os meses analisados foram superiores aos registros da T_A , apontando algo que já fora discutido no *estudo qualitativo*, ou seja, que existem períodos, principalmente aqueles no quais a temperatura é inferior a 15°C , que a temperatura interna do secador acaba sendo menor que a temperatura ambiente, algo indesejável para o aparato experimental.

Na Figura 48, o pico da distribuição da temperatura ambiente (T_A) e da temperatura na cabine de secagem (T_3) entre 00h e 06h, situa-se entre 10 e 15°C em todos os meses, exceto fevereiro, quando o pico aumenta para a faixa dos 20 a 25°C . Isso demonstra que a temperatura mínima em fevereiro tende a ser maior que nos demais meses, o que favorece o alcance de temperaturas mais elevadas dentro do equipamento.

Das 18h às 24h a situação melhora e as temperaturas interna e externa conseguem atingir valores absolutos mais elevados que entre 00h e 06h. Todavia, o conjunto dos dados analisados nos seis meses de estudo mostram que o secador não mantém sua temperatura interna superior à externa durante o período que não há incidência solar, ou seja, mais ou menos entre 18h e 06h.

Figura 48 - Distribuição dos valores de T_3 entre 00h e 06h e 18h e 24h do mês de junho de 2012 (exemplo do que ocorre nos demais meses estudados, exceto fevereiro)

A Tabela 12 apresenta os registros percentuais de T_3 maior que T_A em quatro períodos distintos do dia. Nota-se que das 18h às 06h da manhã, o secador quase que não cumpre sua função, uma vez que os percentuais de T_3 maior que T_A são muito baixos. Em contrapartida, entre 06h e 18h (principalmente entre 12h e 18h), o secador manteve a temperatura interna superior à externa em boa parte do tempo. Exceto outubro, mais de 67 % dos registros de T_3 foram superiores à T_A dentre 06h e 18h.

A razão pela qual outubro obteve 21,1 % e 21,4 % nos registros de T_3 maior que T_A , entre 06h e 12h e entre 12h e 18h, respectivamente, foi que dos 19 dias analisados, 9 apresentaram-se como dias chuvosos; o comportamento intermitente da temperatura interna observado pode também significar dias nublados, nos quais a radiação solar não incide diretamente sobre o aparato, dificultando o aumento da sua temperatura.

Assumindo que “não haja” incidência solar entre 18h e 06h, não é anormal que o desempenho do secador seja inferior ao resto do dia, mas o desejado é que ele consiga manter sua temperatura interna superior à externa por um período maior, o que não ocorre, podendo até mesmo suscitar a hipótese que, nesta faixa de horário, as condições de temperatura no interior da cabine de secagem são piores que fora dela.

Tabela 12 - Porcentagem dos registros da temperatura da cabine de secagem superiores à temperatura ambiente ao longo dos meses estudados

	$\%T_3 > T_A$					
	AGO	SET	OUT	JUN	JUL	FEV
Mensal	41,6	44,3	42,7	39,2	40,7	45,8
00 – 06h	0,0	0,3	0,1	0,0	2,2	0,0
06 – 12h	67,9	79,0	21,1	69,9	67,9	85,3
12 – 18h	97,0	99,8	21,4	88,4	93,9	91,0
18 – 24h	1,8	2,3	0,1	0,0	0,0	3,8

No que se refere à umidade relativa do ar, todos os meses estudados apontaram registros similares aos apresentados na Figura 49. De maneira oposta ao que ocorre com a temperatura, o pico da distribuição dos registros de umidade relativa ambiente (U_{RA}) e umidade relativa na cabine de secagem (U_{R3}) ocorre à direita, entre 75 a 100 %, enquanto que a cauda da distribuição avança à esquerda.

Como foi anteriormente observado, entre 18h e 06h, portanto metade de um dia, a temperatura dentro e fora do secador permanece baixa, o suficiente para elevar a umidade relativa do ar. Portanto, metade dos dados observados situa-se em condições de baixa temperatura e alta umidade relativa do ar, mesmo na ausência de chuva, fazendo com que o pico da distribuição, em todos os meses, seja semelhante ao mostrado na Figura 49.

Figura 49 - Porcentagem dos registros da umidade relativa do ar na cabine de secagem superiores à umidade relativa do ar ambiente ao longo dos meses estudados

O percentual de registros de umidade relativa do ar abaixo dos 50 % é pequeno em relação ao conjunto de dados, uma vez que a elevada temperatura interna do aparato que garante a redução da umidade está limitada à metade de um dia. Estes registros

concentram-se, basicamente, no período em que há incidência solar, mas a despeito da presença do Sol, a alta pluviosidade compromete o resultado.

A Tabela 13 mostra, por exemplo, que devido ao elevado volume de chuva, junho e outubro apresentaram os menores percentuais mensais de umidade relativa na cabine de secagem (U_{R3}) inferiores a 50 %. O valor adotado como referência (50 %), por ora, serve apenas para demonstrar que os meses que apresentam elevada precipitação reduzem a capacidade do secador em atingir condições de umidade relativa mais baixas, mesmo sob condições adequadas e suficientes de incidência solar.

Os dados de julho indicaram que, apesar da média mensal de radiação solar ser inferior a de outubro, o reduzido teor de chuvas favoreceu os registros de umidade relativa inferiores a 50 % dentro da cabine de secagem. No entanto, a combinação entre alta incidência solar e baixo volume de chuvas fez de setembro o mês mais propício à secagem, sendo mais de 45 % dos dados de U_{R3} inferiores a 50 %.

Tabela 13 - Porcentagem dos dados de umidade relativa ambiente e da cabine de secagem inferiores à 50 % ao longo dos meses estudados

Mês	$U_{R3} < 50$ (%)
AGO	34,8
SET	46,6
OUT	29,8
JUN	20,1
JUL	30,5
FEV	31,9

Entre 18h e 06h da manhã, seja no interior da cabine ou fora dela, o percentual de registros de umidade relativa inferiores a 25 % mostrou-se praticamente nulo, exceto em fevereiro, em que 11 % das observações situaram-se entre 00h e 06h. Nesta faixa de horário, mais de 70 % dos dados encontraram-se acima dos 50 % de umidade relativa, o que não favorece o processo de secagem.

Quase que a totalidade dos dados de umidade relativa inferiores a 25 % ocorreu dentro da cabine de secagem, e em temperaturas maiores que 35 °C, ou seja, normalmente entre 06h e 18h, mostrando que a redução da umidade relativa do ar, que é outro atributo importante de todo processo de secagem, é favorecida (em certos períodos do dia) com a utilização dos secadores em comparação à secagem ao ar livre.

Nos meses mais chuvosos (fevereiro, junho e outubro), menos de 40 % dos dados de U_{R3} foram inferiores a 25 % no intervalo das 12h às 18h, enquanto que nos demais

este valor elevou-se para mais de 63 %, chegando até mesmo à 80,6 % dos registros em setembro.

A umidade relativa do ar dentro da cabine de secagem é inferior à umidade relativa do ar externa à medida que a temperatura interna é superior à temperatura externa (ver Tabela 12), o que normalmente se observa das 06h às 18h. Observou-se na Figura 43 que, entre 18h e 24h, a umidade relativa interna foi, por vezes, superior à externa, algo já esperado, pois neste período a temperatura externa também, por vezes, foi superior à temperatura interna.

Figura 50 - Umidade relativa *versus* temperatura na cabine de secagem

A relação entre as variáveis meteorológicas é dinâmica e complexa de tal forma que, mesmo que duas delas registrem os mesmos valores em dias distintos, não é possível afirmar que estes dias apresentam características comuns. A Figura 50 reforça o fato que, a despeito dos valores absolutos, os menores valores de umidade relativa ocorrem em temperaturas maiores, enquanto que os maiores localizam-se em temperatura mais baixas.

Uma vez discutido o comportamento da temperatura e da umidade relativa dentro e fora do secador solar, visto os fortes indícios de que a chuva compromete seu desempenho e que a radiação solar diretamente incidente é fator preponderante à elevação da sua

temperatura interna, fez-se necessário compreender o que mais favorece ou desfavorece suas funções básicas, ou seja, elevação da temperatura e redução da umidade relativa.

Diante das médias diárias das variáveis meteorológicas, elaborou-se um estudo multivariado a partir do método da *Análise das Componentes Principais (ACP)*. O intuito foi diagnosticar alguma relação de causa e efeito que, por ventura, existisse entre as variáveis ou até mesmo distinguir os dias que se mostraram favoráveis ou desfavoráveis à secagem dos alimentos em cada um dos meses estudados.

Com auxílio do *software* Statistica 8.0, elaborou-se, para todos os meses, gráficos semelhantes ao da Figura 51, que apresentam a localização das variáveis estudadas no plano cartesiano, cujos eixos referem-se aos dois principais fatores que justificam a maior parte das variâncias dos dados. O fator 1 explica em torno de 65 % da variância dos dados e pode ser descrito como o fator que separa as variáveis que respondem, direta ou indiretamente, à intensidade de radiação solar. O fator 2, por sua vez, descreve em torno de 12 % da variabilidade e interpreta a relação inversa entre temperatura mínima, média e a velocidade média do vento.

Figura 51 - Análise multivariada: variáveis meteorológicas favoráveis ou desfavoráveis à secagem

As variáveis que se localizam à direita (principalmente aquelas cujo fator 1 é maior que 0,7) respondem diretamente à incidência da radiação solar, tais como ΔU_{RA} , ΔU_{R3} , ΔT_A , ΔT_3 , $T_{3\max}$, $T_{A\max}$ e $T_{3\text{med}}$. Atenta-se ao fato da temperatura média ambiente não responder tão acentuadamente ao comportamento da radiação solar, apesar de estar atrelada a ela de forma direta, o que já foi discutido no *estudo qualitativo*.

Em contrapartida, as variáveis que se encontram próximas à extremidade esquerda do plano cartesiano são inversamente proporcionais à radiação solar, dentre elas a precipitação pluvial já discutida. Aquelas cujo os valores são menores que -0,7 possuem forte relação inversa, tais como $U_{RA\text{med}}$, $U_{RA\text{min}}$, $U_{R3\text{med}}$, $U_{R3\text{min}}$, $T_{A\text{min}}$, $T_{3\text{min}}$ e α_0 . Já as variáveis $U_{RA\max}$, $U_{R3\text{min}}$ e V_{med} também apresentam comportamento inverso à radiação, mas de forma menos acentuada.

A variável α_0 é o coeficiente angular da reta que melhor interpola a parte crescente (parte inferior) dos gráficos semelhantes ao apresentado na Figura 29. A unidade de medida desta variável é $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$, e pode ser interpretada como a potência térmica por unidade de área que precisa incidir sobre o coletor solar para que o mesmo varie sua temperatura em $1\text{ }^\circ\text{C}$.

Esta variável cresce fundamentalmente em dias chuvosos, pois nesta circunstância é compreensível que elevar a temperatura interna do secador exija maiores quantidades de energia. A velocidade do vento também dificulta a elevação da temperatura interna e, conseqüentemente, contribui no aumento da variável α_0 , mas de maneira bem menos significativa que a precipitação pluvial.

Os valores de α_0 calculados em cada um dos dias estudados situam-se, aproximadamente, entre 20 e $50\text{ }W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$, sendo que os valores menores associam-se a dias com incidência solar adequada, enquanto que os maiores valores atrelam-se a dias nublados e/ou chuvosos ou sob circunstâncias desfavoráveis à secagem. A interpretação desta variável é que para uma área de coletor de $1\text{ }m^2$, por exemplo, estima-se que a cada aumento de $1\text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura são necessários de 20 a 50 W de energia térmica.

Ressalta-se que, dentre os meses analisados, o aumento de temperatura entre os sensores T_1 e T_2 não ultrapassa os 60 %, ou seja, o valor da temperatura de saída do coletor (T_2) é, no máximo, 60 % maior que a temperatura de entrada. Os meses de fevereiro e outubro tiveram aumento de temperatura inferior aos demais meses, o que não significa dizer que o aparato não tenha atingido temperaturas elevadas. O que ocorre é que a temperatura do ar de entrada nestes meses é suficientemente grande para que, mesmo

com pouco ganho, atinja-se temperaturas superiores aos meses que, por ventura, tenham maior ganho, algo que também já foi visto no *estudo qualitativo*.

O fato do calor específico do vapor d'água ser quase o dobro do calor específico do ar seco, somado à hipótese de que a temperatura do ar aumenta de forma homogênea, justifica a dificuldade em se elevar a temperatura do ar em dias com alta umidade relativa. Segundo Vega-Mercado, Gongora-Nieto e Barbosa-Cánovas (2001), o vapor d'água presente no ar atmosférico “rouba” boa parte do calor necessário para elevar a temperatura da composição ar-água.

Como a umidade absoluta do ar foi maior em fevereiro e outubro, o aumento da temperatura e o ganho nestes meses tornou-se reduzido. De maneira análoga ao que acontece durante o dia, é provável que a eficiência de qualquer sistema de aquecimento funcionando à noite e/ou na madrugada seja maior nos meses de inverno, quando o teor de água presente no ar é inferior.

A *Análise Multivariada* também foi capaz de separar os dias que apresentaram condições meteorológicas normais daqueles que apresentaram comportamento intermitente ou diferentemente do esperado. Trata-se, de certa forma, de um conceito subjetivo, já que a dinâmica climática é complexa o suficiente para definir, com rigor, o que é um dia “normal”.

Realizou-se, em todos os meses estudados, a separação entre dias *críticos* e *não críticos*, sendo que a Figura 52 mostra apenas o resultado do mês de junho. Observa-se, novamente, os eixos compostos pelos fatores que apresentam a maior parte da variabilidade dos dados e os trinta dias do referido mês expostos ao longo dos quatro quadrantes do gráfico.

A *Análise Multivariada* indica que os dias localizados no 2° e 3° quadrantes, principalmente aqueles mais afastados da origem (como referência o fator 1, eixo horizontal), são considerados “críticos”. Em contrapartida, os que se situam no 1° e 4° quadrantes possuem um comportamento mais adequado, ou seja, *não crítico*.

Dentre todos os meses estudados, 51 dos 141 dias apresentaram-se como *críticos*, sendo 31 dias *críticos* com registros de chuva. Dos 21 dias *críticos* não chuvosos, 18 apresentaram densidade de fluxo de radiação solar média inferior à média dos dias *não críticos*, talvez por serem dias nublados ou com muitas nuvens, o que também dificulta o bom desempenho do secador. Os três dias não chuvosos, de elevada incidência solar e considerados *críticos* pela *Análise Multivariada* pertencem a setembro, que foi um mês

Figura 52 - Dias críticos e não críticos do mês de junho separados de acordo com a *Análise Multivariada* pouco chuvoso e de elevada incidência solar, ou seja, é provável que, nestes três dias, os ventos fortes tenham desempenhado papel negativo.

Em agosto foram 14 dias críticos (46,6 %), em setembro 10 (33,3 %), em outubro 9 (50 %), em junho 12 (41,4 %), em julho 3 (20 %) e em fevereiro foram 7 (50 %). A baixa precipitação pluvial fez de julho um mês com poucos dias críticos, mesmo sendo um mês de inverno, confirmando o que foi discutido no *estudo qualitativo*, ou seja, que é possível encontrar situações no inverno mais favoráveis que no verão.

A Tabela 14 compara os dias *críticos* e *não críticos* do mês de junho separados pela *Análise Multivariada*, onde se pode notar as diferenças existentes entre as médias das variáveis estudadas.

A Tabela 15 mostra que a média da temperatura mínima em todos os meses, considerando o desvio padrão, foi quase sempre menor em dias considerados *não críticos* do que em dias *críticos*. A justificativa, talvez, seja que nos dias críticos (i.e. nublados/chuvosos e de baixa incidência solar) se atinja a temperatura do ponto de orvalho, o que faz com que o vapor d'água libere calor ao se condensar, elevando a temperatura mínima do dia seguinte.

Tabela 14 - Análise Multivariada: comparação entre dias críticos e não críticos do mês de junho de 2012

Variável	Dias críticos				Dias não críticos			
	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
$RAD_{Média} (W/m^2)$	66,8	38,6	130,6	25,2	179,7	16,9	203,7	147,6
$DRAD (10^5 J/m^2)$	53,3	31,3	100,9	19,0	145,6	12,7	160,9	117,9
$\alpha_0 (W/m^2\text{°C})$	38,5	8,0	51,4	28,8	23,6	2,4	28,4	20,2
$T_{Amin} (°C)$	16,2	1,8	18,6	13,1	13,2	2,0	16,5	10,7
$T_{Amed} (°C)$	18,2	1,3	19,8	15,0	19,1	1,7	22,9	16,4
$T_{Amax} (°C)$	21,0	2,2	24,8	16,4	26,3	2,2	30,1	22,3
$U_{RAmin} (\%)$	86,7	13,8	100,0	56,0	54,6	13,3	78,9	40,0
$U_{RAmed} (\%)$	96,9	4,0	100,0	87,0	82,8	7,4	95,3	73,1
$U_{RAmax} (\%)$	100,0	0,0	100,0	100,0	99,8	0,7	100,0	97,0
$\Delta T_A (°C)$	4,8	2,5	9,2	2,1	13,1	2,0	15,8	9,0
$\Delta U_{RA} (\%)$	13,3	13,8	44,0	0,0	45,2	13,2	60,0	21,1
$T_{1min} (°C)$	14,9	1,9	17,5	11,6	12,0	2,1	15,0	9,0
$T_{1med} (°C)$	17,9	1,3	19,2	14,7	19,7	1,9	23,8	16,8
$T_{1max} (°C)$	23,4	4,1	30,1	17,0	33,4	2,9	40,0	28,1
$U_{R1min} (\%)$	83,2	22,5	106,2	49,9	36,9	7,4	52,4	26,2
$U_{R1med} (\%)$	101,4	7,2	110,0	90,4	83,0	5,2	91,6	74,8
$U_{R1max} (\%)$	110,1	2,2	113,3	106,5	108,1	1,3	110,5	105,2
$\Delta T_1 (°C)$	8,5	5,0	16,0	2,7	21,4	2,3	25,3	17,3
$\Delta U_{R1} (\%)$	27,0	21,2	59,6	5,7	71,2	7,0	82,5	57,4
$T_{2min} (°C)$	15,2	1,9	17,8	12,0	12,2	2,0	15,0	9,3
$T_{2med} (°C)$	19,0	1,7	21,3	15,3	22,6	2,0	26,4	18,6
$T_{2max} (°C)$	27,9	7,3	41,7	18,1	44,3	2,7	48,2	38,9
$U_{R2min} (\%)$	68,7	24,8	100,8	29,5	23,3	4,3	33,1	17,0
$U_{R2med} (\%)$	101,1	7,5	110,7	90,0	80,4	5,1	89,7	72,9
$U_{R2max} (\%)$	113,8	1,9	116,8	109,2	112,2	1,9	115,4	109,1
$\Delta T_2 (°C)$	12,6	8,1	27,4	4,3	32,1	2,7	35,1	26,4
$\Delta U_{R2} (\%)$	45,0	24,4	84,7	13,8	88,9	3,5	93,1	79,6
$T_{3min} (°C)$	15,2	1,8	17,7	12,0	12,2	2,0	15,3	9,4
$T_{3med} (°C)$	19,2	1,8	22,0	15,3	23,2	2,0	26,8	19,0
$T_{3max} (°C)$	29,5	8,3	45,6	18,9	47,3	2,8	50,9	40,9
$U_{R3min} (\%)$	62,8	24,5	98,7	25,2	20,4	4,1	29,6	14,7
$U_{R3med} (\%)$	97,1	7,9	107,5	85,9	77,1	4,9	85,6	69,4
$U_{R3max} (\%)$	110,2	1,7	112,0	105,9	109,1	1,6	111,6	106,4
$\Delta T_3 (°C)$	14,3	9,0	31,2	4,3	35,0	3,3	39,8	28,2
$\Delta U_{R3} (\%)$	47,4	24,2	85,4	12,1	88,7	3,4	93,6	80,2
$Precip(mm)$	11,6	15,4	44,3	0,0	0,5	1,4	5,7	0,0
$V_{med} (m/s)$	3,5	2,1	7,9	1,2	2,7	1,5	6,3	1,2

Tabela 15 - Média da temperatura mínima no interior da cabine de secagem em dias críticos e não críticos para todos os meses estudados

Mês	$T_{3min} (°C)$			
	Dias críticos		Dias não críticos	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AGO	10,8	3,9	13,5	2,7
SET	12,5	3,4	11,4	1,9
OUT	17,4	0,9	15,4	1,7
JUN	15,2	1,8	12,2	2,0
JUL	13,4	2,9	9,5	2,7
FEV	19,0	0,4	19,3	1,2

A variação da umidade relativa do ar na cabine de secagem (ΔU_{R3}), por sua vez, não diferiu tanto entre dias *críticos* e *não críticos*, mas notou-se um valor ligeiramente menor em dias *críticos* (i.e., com chuva). A Tabela 16 mostra que (ΔU_{R3}) superou os 70 % em todos os meses averiguados, a não ser junho, devido ao seu elevado volume de chuva atrelado ao fato de ser um mês de inverno (menor incidência de radiação solar).

Tabela 16 - Média da variação da umidade relativa do ar na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados

Mês	ΔU_{R3} (%)			
	Dias críticos		Dias não críticos	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AGO	73,0	19,9	83,8	11,1
SET	81,6	9,2	89,9	6,6
OUT	73,5	14,0	83,2	9,3
JUN	47,4	24,2	88,7	3,4
JUL	74,6	5,2	93,2	1,9
FEV	77,8	12,3	86,6	3,2

Porém, a média da umidade relativa mínima na cabine de secagem ($U_{R3\ min}$) tende a ser maior em dias *críticos* do que em dias *não críticos*. Dentro do conjunto de dias críticos, por exemplo, os meses mais chuvosos, como junho e outubro, apresentaram média de $U_{R3\ min}$ superior aos meses menos chuvosos. Em junho, especificamente, esta média foi ainda maior que outubro, pois além de chuvoso, é um mês com menor incidência solar. Em setembro, por sua vez, a média da umidade relativa mínima, mesmo nos dias considerados *críticos* pela *Análise Multivariada*, foi baixa, possivelmente por ser um mês com elevada incidência solar e por não apresentar um volume de chuva significativo em nenhum dos dias averiguados.

Os dias separados como *não críticos* normalmente não apresentam chuvas e possuem “significativa” incidência solar. Nos dias *não críticos* a $U_{R3\ min}$ atingiu valores baixos em todos os meses averiguados (Tabela 17). A radiação solar, mesmo menos intensa no inverno, diminui a umidade relativa dentro da cabine de secagem a níveis relativamente próximos dos meses situados ou próximos do verão. Isso induz pensar que, desde que não haja chuva e/ou dia nublado, é possível obter condições propícias de umidade relativa seja no inverno ou no verão; todavia, os dados mostram que no verão tais condições perduram por mais tempo.

Em todos os meses, a diferença encontrada na média da densidade de fluxo de energia (W/m^2) e da densidade de energia (J/m^2) entre dias *críticos* e *não críticos* é nítida. No entanto, nem sempre um dia de baixa radiação para um certo mês corresponde

Tabela 17 - Média da umidade relativa do ar mínima na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados

Mês	$U_{R3\ min} (\%)$			
	Dias críticos		Dias não críticos	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AGO	31,0	18,8	10,2	2,7
SET	17,2	6,9	9,0	2,5
OUT	33,7	14,8	12,2	3,2
JUN	62,8	24,5	20,4	4,0
JUL	32,0	3,7	14,8	1,9
FEV	29,9	12,5	17,4	2,1

a um dia classificado como de baixa radiação em outro mês; por isso, a separação dos dias *críticos* e *não críticos* deve ser analisada com cautela.

Em setembro, por exemplo, a *Análise Multivariada* destacou dias considerados críticos mesmo com incidência de radiação solar elevada se comparada a outros meses. Existiram dias que, devido a temperatura mínima na noite anterior ser muito baixa, não alcançaram temperaturas elevadas no interior do secador solar, mesmo com alta incidência solar. Isso não somente ressalta a importância de manter a temperatura dentro do secador em níveis adequados, mas também exemplifica o conceito subjetivo que se estabelece na caracterização de um dia crítico, pois o que pode ser crítico num certo mês pode não ser em outro.

Acredita-se que, caso fosse feita uma única análise para todos os dias, não os separando mês a mês, aumentaria a variabilidade dos dados, já que dias sob situações totalmente diferentes seriam englobados numa só análise, não sendo possível distinguir as condições que cada mês oferece à secagem dos alimentos.

A média da variação da temperatura na cabine de secagem (ΔT_3) em dias *críticos* foi maior que em dias *não críticos*, conforme mostra a Tabela 18. A não ser junho, todos os demais meses apresentaram por volta de 10 °C a mais na variação da temperatura nos dias *não críticos* em comparação a dias *críticos*. Nos meses de inverno (julho, agosto e até mesmo setembro), os dias *não críticos* mostraram maior variação de temperatura na cabine de secagem ΔT_3 que, por exemplo, outubro ou fevereiro. Como já havia sido discutido, o incremento de temperatura é maior no inverno do que no verão, e isso provavelmente justifica os dados da Tabela 18.

No entanto, não significa dizer que o valor máximo atingido por T_3 seja maior nos meses de inverno. O que se observa na Tabela 19 é a tendência dos meses com maior incidência solar apresentarem os maiores registros de temperatura máxima na cabine de

Tabela 18 - Variação da temperatura na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados

Mês	$\Delta T_3 (^{\circ}C)$			
	Dias críticos		Dias não críticos	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AGO	26,0	11,6	39,9	4,5
SET	31,2	6,4	41,8	3,1
OUT	22,0	6,5	36,2	3,4
JUN	19,2	1,2	23,2	2,0
JUL	23,0	3,7	39,5	1,9
FEV	27,2	7,4	36,5	1,9

secagem. O fato é que estes meses apresentam temperatura mínima elevada e, mesmo com menor ΔT_3 , o valor de $T_{3\ max}$ acaba sendo maior. A temperatura máxima atingida no interior da cabine de secagem ($T_{3\ max}$) foi maior nos dias não críticos, como já era de se esperar. Em dias favoráveis à secagem, a média da $T_{3\ max}$ situou-se entre 47 e 56 °C, enquanto que nos outros dias este valor reduziu para menos de 47 °C.

A Tabela 2 mostrou que as temperaturas ideais de secagem das frutas e hortaliças, segundo ITAL (2010), tendem a ser maiores que os valores encontrados no interior do secador. A rigor, seja em dias *críticos* e *não críticos*, apenas uva e figo poderiam ser desidratados dentro do aparato obedecendo suas condições ideais. Cerca de 13 das 20 frutas exigem temperaturas de secagem situadas entre 35 e 75 °C, e para contemplar esta necessidade o secador deveria sofrer um aumento significativo em torno de 20 °C em sua temperatura máxima.

Tabela 19 - Média da temperatura máxima na cabine de secagem em dias críticos e não críticos em todos os meses estudados

Mês	$T_{3\ max} (^{\circ}C)$			
	Dias críticos		Dias não críticos	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
AGO	36,8	10,4	53,3	3,6
SET	43,7	5,4	53,2	2,0
OUT	39,4	6,7	51,6	3,9
JUN	29,5	8,3	47,3	2,8
JUL	36,4	3,3	49,0	3,4
FEV	46,2	7,6	55,8	1,5

Assim como acontece nos demais dados analisados até o presente momento, é necessário atentar-se ao desvio das medidas, que por vezes demonstram que a média dos dados não é uma medida representativa do que ocorre em cada dia, tornando possível que dias *críticos* assemelhem-se a dias *não críticos*.

Para o processo de secagem não basta que o secador atinja a temperatura máxima requerida, mas que haja a manutenção da temperatura ideal por mais tempo, o que requer o auxilio de fontes de energia externa ou mudanças significativas na estrutura do secador solar. Ressalta-se na Figura 46 que em todos os meses estudados a temperatura no interior da cabine de secagem só foi maior que 40 °C entre 10h e 16h, o que restringe a secagem à apenas 25 % do dia.

Os dias que apresentam elevada incidência de radiação e pouca chuva possuíram as maiores variações de temperatura, sendo o vento um mero coadjuvante nesta questão. Não foi raro dias com vento médio elevado que atingissem altas temperaturas, nem mesmo dias com vento médio reduzido que também apresentassem temperatura elevada, o que dificultou a análise, justamente por não haver relação nítida de causa e efeito entre as variáveis.

O mês de setembro, por exemplo, apresentou chuva inferior a 0,3 mm nos dias 1, 2 e 25/09, mas mesmo assim foram considerados como críticos pela *Análise Multivariada*. Estes dias, por sua vez, registraram os três maiores valores de velocidade média do vento de todo o mês, que foram, respectivamente, 8,1 km/h, 10,2 km/h e 11,5 km/h, enquanto que os demais dias quase que não ultrapassaram os 5 km/h. A influência do vento sobre o desempenho termodinâmico do secador é menos significativa do que das chuvas, mas como em setembro o volume de chuva foi abaixo do esperado, é provável que seja realmente a contribuição dos “ventos fortes”, comuns neste mês, que, mesmo que “sutilmente”, tenham influenciado a separação dos dias *críticos* realizada pela *Análise Multivariada*.

Para se ter uma ideia, ventos que se situam entre 1 km/h e 5 km/h são denominados de “aragem” e causam, por exemplo, pequenas rugas na superfície do mar. Entre 6 km/h e 11 km/h tem-se a *brisa leve*, onde as folhas das árvores se movem e os moinhos começam a trabalhar. Para os ventos acima de 12 km/h existem outros efeitos sobre o mar e a terra que podem ser consultados em Wheeler e Wilkinson (2004).

Em setembro, 15 dias (50 %) apresentaram ventos médios superiores a 5 km/h, enquanto que em agosto foram 7 dias (25 %), em outubro 10 dias (55,5 %), em junho 5 dias (16,6 %), em julho 2 dias (12,5 %) e 1 dia (5 %) em fevereiro. As diferenças entre dias *críticos* e *não críticos* em setembro, uma vez que o volume de chuva foi pequeno, referem-se, essencialmente, à intensidade da radiação solar e velocidade do vento. A radiação tende a ser mais significativa nesse processo, mas não se descarta o indício que, de acordo como já se tinha verificado, os ventos fortes desempenham um papel negativo.

Outubro se mostrou um mês propício à análise da influência da precipitação pluvial, pois todos os dias *críticos* tiveram chuva, enquanto que nenhum dia *não crítico* sinalizado pela multivariada apresentou chuva acima de 0,3 mm. Novamente, observou-se que a temperatura mínima, dentro ou fora do secador, foi inferior em dias *não críticos*. A média da T_{3max} foi inferior à agosto, setembro e fevereiro e sua capacidade de redução da umidade relativa do ar também se mostrou deficiente devido a elevada precipitação pluvial. Isso reforça o já discutido, ou seja, que a chuva é, dentre as variáveis meteorológicas em estudo, a que mais compromete o bom desempenho do secador.

Em junho, a média da chuva nos dias considerados *críticos* esteve por volta de 11,6 mm, enquanto que nos *não críticos*, 0,5 mm. A média da variação da umidade relativa praticamente dobrou nos dias *não críticos*, e a variação de temperatura nestes dias esteve por volta dos 35 °C, enquanto que nos dias *críticos*, 14,3 °C. A grande responsável por estes resultados é a intensidade da radiação solar, que em dias *não críticos* apresentou-se quase que três vezes maior que a média em dias *críticos*. Dias nublados também são responsáveis pela baixa incidência solar, e não somente dias chuvosos, o que acarreta na menor variação de temperatura e umidade relativa do ar.

No mês de julho, a média da intensidade de radiação solar em dias *críticos* foi a metade dos dias *não críticos*. Por ser um mês em que apenas dois dos dias analisados apresentaram chuva e que a velocidade média do vento no mês todo quase não ultrapassou os 5 km/h, a diferença de mais de 15 °C no valor do ΔT_3 e de mais de 10 °C na T_{3max} , entre dias *críticos* e *não críticos*, se deve, quase que exclusivamente, à diferença entre os registros médios da radiação solar.

Em fevereiro, nem todos os dias *críticos* foram chuvosos nem mesmo apresentaram ventos intensos. Ocorre também que a temperatura mínima, dentro e fora do aparato experimental, não diferiu tanto, uma vez que a média de chuvas nos dias *críticos* foi de 4 mm e nos *não críticos*, 1,2 mm. A média de radiação solar em dias *críticos* foi 195,6 W/m² e em dias *não críticos* foi 271,5 W/m². Neste mês, percebeu-se que chuva e vento não interferiram tanto assim sobre as médias dos resultados que separam dias *críticos* de dias *não críticos*, pois se observou dias chuvosos e não chuvosos, com ventos médios elevados e reduzidos, tanto em dias *críticos* quanto em dias *não críticos*.

Vale novamente ressaltar que o que é considerado *crítico* para um determinado mês pode não ser para outro. Apesar disso, não seria interessante analisar todos os dias sem distingui-los nos meses que se situam. Percebeu-se que não somente os dias chuvosos e/ou com baixa incidência de radiação solar são considerados *críticos* pela *Análise*

Multivariada; dias com alta radiação e baixa elevação da temperatura também o são. Ao longo do *estudo qualitativo*, a observação dos gráficos de radiação *versus* temperatura do secador, objetivando diagnosticar possíveis dias *críticos*, foi satisfatória e, de maneira bem razoável, aproximou-se significativamente dos dias *críticos* separados pela *Análise Multivariada*.

5 CONCLUSÕES

- Apesar da radiação solar ser a única responsável pela elevação da temperatura interna, nem sempre dias com alta incidência solar registram temperaturas elevadas. Dias nublados e, principalmente, chuvosos comprometem a elevação da temperatura e a redução da umidade relativa no interior do secador. A velocidade do vento favorece as perdas de energia térmica do secador, mas de maneira bem menos significativa.
- O secador solar utilizado cumpriu a função de manter a temperatura interna superior à externa, predominantemente, entre 06 e 18h, enquanto que das 18 às 06h, a temperatura interna teve comportamento similar a temperatura ambiente. Temperatura interna acima dos 40 °C somente entre 10 e 16h no período estudado. Os períodos que associam alta incidência solar e pouca chuva são os mais favoráveis ao processo de secagem. Aqueles que situam no inverno (menor intensidade de radiação solar), mas são pouco chuvosos, podem apresentar condições melhores de secagem do que os com elevada incidência solar, mas que tenham períodos nublados e chuvas constantes. A variação da temperatura interna tende a ser maior nos meses situados no inverno, mas a temperatura máxima atingida é maior nos meses próximos ou situados no verão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A chuva desempenha forte influência negativa sobre o comportamento da temperatura e umidade relativa no interior do equipamento e, por isso, sugere-se que o secador fique protegido caso ocorra. O vento, por sua vez, age de maneira menos significativa sobre as perdas térmicas do secador e, por isso, não é prioritário o isolamento contra o ar que circunda o secador.
- Quando a temperatura mínima de um determinado dia é muito baixa, o secador não consegue atingir temperaturas elevadas, mesmo com alta intensidade de radiação solar. Isso sugere o fornecimento de energia extra, que pode se dar de diferentes maneiras: utilizando os *materiais de armazenamento térmico* descrito por Madhlopa e Ngwalo (2007), Devahastin e Pitaksuriyarat (2006), armazenando água aquecida pelo sol em tambores e circulando-a no interior do secador ou, até mesmo, optando pelo aquecimento elétrico. Todas essas possibilidades não somente contribuem para a elevação da temperatura interna, mas podem permitir que o secador mantenha condições de temperatura e umidade relativa do ar favoráveis por mais tempo.
- Não foi possível estimar a eficiência do secador solar por não haver medidor de fluxo ou psicrômetro em seu interior. É interessante que os próximos projetos contem com estes recursos, pois a estimativa da eficiência é um passo importante na descrição mais completa e detalhada do seu comportamento termodinâmico.
- Artigos sobre novas tecnologias em secadores solares são descritos por VijayaVenkataRaman, Iniyar e Goic (2012), Ekechukwu e Norton (1999), Sharma, Chen e Lan (2009)

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M.; MIKIE, F.; LAM, C. Drying performance and thermal transient study with solar radiation supplemented by forced-ventilation. **International journal of thermal sciences**, Elsevier, v. 45, n. 10, p. 1027–1034, 2006.
- AL-MUHTASEB, A.; MCMINN, W.; MAGEE, T. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and Bioproducts Processing**, Elsevier, v. 80, n. 2, p. 118–128, 2002.
- AYENSU, A. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. **Solar Energy**, Elsevier, v. 59, n. 4, p. 121–126, 1997.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEGA-MERCADO, H. Physical, chemical, and microbiological characteristics of dehydrated foods. In: **Dehydration of foods**. [S.l.]: Springer, 1996. p. 29–99.
- BEKKIOU, N.; ZOULALIAN, A.; HAKAM, A.; BENTAYEB, F.; SESBOU, A. Modelling of a solar wood dryer with glazed walls. **Maderas. Ciencia y tecnología**, SciELO Chile, v. 11, n. 3, p. 191–205, 2009.
- BENALI, M.; AMAZOUZ, M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: Quality and energy aspects. **Journal of Food Engineering**, Elsevier, v. 74, n. 4, p. 484–489, 2006.
- BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Numerical simulation of drying under variable external conditions: Application to solar drying of seedless grapes. **Journal of Food Engineering**, Elsevier, v. 76, n. 2, p. 179–187, 2006.
- CALVETTI, L.; BENETI, C.; GONÇALVES, J.E.; MOREIRA, I.; DUQUIA, C.; BREDA, A.; ALVES, T.A. Definição de classes de precipitação para utilização em previsões por categoria e hidrológica. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis-SC**. [S.l.: s.n.], 2006.
- DEVAHASTIN, S.; PITAKSURIYARAT, S. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. **Applied thermal engineering**, Elsevier, v. 26, n. 14, p. 1705–1713, 2006.
- DONN, W.L. **Meteorology**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1965.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- EKECHUKWU, O.; NORTON, B. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 38, n. 14, p. 1483–1500, 1997.
- _____. Review of solar-energy drying systems ii: an overview of solar drying technology. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 40, n. 6, p. 615–655, 1999.
- EL-SEBAIL, A.; ABOUL-ENEIN, S.; RAMADAN, M.; EL-GOHARY, H. Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 43, n. 16, p. 2251–2266, 2002.

- EPHRATH, J.; GOUDRIAAN, J.; MARANI, A. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. **Agricultural systems**, Elsevier, v. 51, n. 4, p. 377–393, 1996.
- FONSECA, S.F.; RODRÍGUEZ, J.L.A.; TEN, A.T.; ENRÍQUEZ, J.P. Análisis térmico del secador solar de tamborrotatorio para granos. **Tecnología química**, v. 20, n. 3, 2010.
- FONTANA, J. A. **Measurement of water activity, moisture sorption isotherms, and moisture content of foods**. [S.l.]: Blackwell Publishing Professional: Ames, IA, USA, 2008.
- GÓMEZ, A.E. Á.; FANDIÑO, J.M. M.; SARMIENTO, J.F. B. Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta. **Revista Científica Ingeniería y Desarrollo**, v. 27, n. 27, p. 93–112, 2010.
- GRIMM, A.M. **Meteorologia Básica: Notas de aula**. 2014. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Acesso em: 10 dez. 2014.
- INMET, I.N. de M. **Normais Climatológicas do Brasil, Período 1961–1990**. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/textos/apresentacao.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2014.
- _____. **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET – Nota Técnica No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET**. 2014. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 16 out. 2014.
- ITAL. **Apresentação do curso sobre desidratação de frutas e hortaliças**. 2010. Disponível em: <<http://www.ital.sp.gov.br/fruthotec/eventos/desidratacao/apresentacao.html>>.
- KADER, A.A. **Quality parameter of fresh-cut fruit and vegetable products**. [S.l.]: CRC Press Boca Raton, FL, 2002.
- KAREL, M.; FENNEMA, O.R.; LUND, D.B. et al. **Principles of food science. Part II. Physical principles of food preservation**. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc., 1975.
- KOYUNCU, T. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 31, n. 7, p. 1073–1088, 2006.
- KROKIDA, M.K.; KARATHANOS, V.; MAROULIS, Z.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some vegetables. **Journal of Food engineering**, Elsevier, v. 59, n. 4, p. 391–403, 2003.
- LABUZA, T.P. Application of chemical kinetics to deterioration of foods. **Journal of Chemical Education**, ACS Publications, v. 61, n. 4, p. 348, 1984.
- LEWICKI, P.P. Water as the determinant of food engineering properties. a review. **Journal of food engineering**, Elsevier, v. 61, n. 4, p. 483–495, 2004.
- LIU, B.Y.; JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 1–19, 1960.

MADHLOPA, A.; NGWALO, G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. **Solar Energy**, Elsevier, v. 81, n. 4, p. 449–462, 2007.

MANLY, F.J.B. (Ed.). **Métodos Estatísticos Multivariados: uma introdução**. 3th ed. [S.l.]: Bookman, 2008.

MATHLOUTHI, M. Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. **Food control**, Elsevier, v. 12, n. 7, p. 409–417, 2001.

MORAES, S.; LIER, Q.; LIBARDI, P.; MIRANDA, J. **Notas de aula - Umidade do ar**. 2011. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce200/Cap6.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2014.

MUJUMDAR, A. 2 drying fundamentals. **Industrial drying of foods**, Springer, p. 7, 1997.

NECHET, D.; PRESTE, A. Comparação de médias diárias e mensais de temperatura do ar obtidos por vários métodos. In: **CONGRESSO DA FEDERAÇÃO LATINO-AMERICANA E IBÉRICA DE SOCIEDADE DE METEOROLOGIA**. Brasília: [s.n.], 1998. v. 8.

NETO, F.L.; MOLDENHAUER, W. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em campinas, sp. **Bragantia**, v. 51, n. 2, p. 189–196, 1992.

NUSSENZVEIG, H. **Curso de física básica: Fluidos, oscilações e ondas, calor**. Edgard Blucher, 2008. (Curso de física básica). ISBN 9788521202998. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=UXMVAAAACAAJ>>.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.d.; PARK, K. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. **Obtido no site: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>**. Acessado em setembro de, 2007.

RABL, A. **Active solar collectors and their applications**. [S.l.]: Oxford University Press, 1985.

RAHMAN, M. (Ed.). **Handbook of Food Preservation**. 2th ed. [S.l.]: CRC Press, 2007.

SALEH, A.; BADRAN, I. Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 34, n. 10, p. 2239–2245, 2009.

SANTOS, G.G.; FIGUEIREDO, C.d.; OLIVEIRA, L.d.; GRIEBELER, N.P. Intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado de mato grosso do sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 13, p. 899–905, 2009.

SARTORELLI, J.; HOSOUME, Y.; YOSHIMURAY, E. A lei de esfriamento de newton: Introdução as medidas em física - parte ii. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 1, 1999.

SCHNEIDER, P.S. **Termometria e Psicrometria**. 2012. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/medterm/areas/area-i/termometria.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2014.

- SENTELHAS, P.; ANGELOCCI, L. **LCE 360 Meteorologia Agrícola**. 2014. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula7.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2014.
- SHARIAH, A.; AL-AKHRAS, M.A.; AL-OMARI, I. Optimizing the tilt angle of solar collectors. **Renewable Energy**, v. 26, n. 4, p. 587 – 598, 2002.
- SHARMA, A.; CHEN, C.; LAN, N. V. Solar-energy drying systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 13, n. 6, p. 1185–1210, 2009.
- SHARMA, V.; COLANGELO, A.; SPAGNA, G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 293–308, 1993.
- SILVEIRA, L. **Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrícolas) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- SINGH, S.; SINGH, P.P.; DHALIWAL, S. Multi-shelf portable solar dryer. **Renewable energy**, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 753–765, 2004.
- TAOUKIS, P.S.; LABUZA, T.P.; SAGUY, I.S. Kinetics of food deterioration and shelf-life prediction. **Handbook of food engineering practice**, CRC Press Boca Raton, FL, p. 361–403, 1997.
- TSCHARNTKE, T.; CLOUGH, Y.; WANGER, T.C.; JACKSON, L.; MOTZKE, I.; PERFECTO, I.; VANDERMEER, J.; WHITBREAD, A. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biological Conservation**, Elsevier, v. 151, n. 1, p. 53–59, 2012.
- VEGA-GÁLVEZ, A.; AH-HEN, K.; CHACANA, M.; VERGARA, J.; MARTÍNEZ-MON-ZÓ, J.; GARCÍA-SEGOVIA, P.; LEMUS-MONDACA, R.; SCALA, K. D. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (granny smith) slices. **Food Chemistry**, Elsevier, v. 132, n. 1, p. 51–59, 2012.
- VEGA-MERCADO, H.; GONGORA-NIETO, M. M.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, Elsevier, v. 49, n. 4, p. 271–289, 2001.
- VELIĆ, D.; PLANINIĆ, M.; TOMAS, S.; BILIĆ, M. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. **Journal of Food Engineering**, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 97–102, 2004.
- VIJAYAVENKATARAMAN, S.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar drying technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 16, n. 5, p. 2652–2670, 2012.
- WEISS, A.; HAYS, C.J. Calculating daily mean air temperatures by different methods: implications from a non-linear algorithm. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, v. 128, n. 1, p. 57–65, 2005.

WHEELER, D.; WILKINSON, C. From calm to storm: the origins of the beaufort wind scale. **The Mariner's Mirror**, Taylor & Francis, v. 90, n. 2, p. 187–201, 2004.

YAMASOE, M.A. **Interação entre Nuvens e Radiação**. 2014. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/radiacao-I/aula_nuvens_radiacao.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2014.