

Rafael Queiroz

Secagem de Tomates Utilizando
Secadores Resistivos e com Bomba de Calor



1910001202



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS – DETA
CAMPUS DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO - SP

SECAGEM DE TOMATES UTILIZANDO
SECADORES RESISTIVOS E COM BOMBA DE CALOR

Rafael Queiroz
Eng. Alimentos

Prof. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis
Orientadora

São José do Rio Preto – SP

2003



RAFAEL QUEIROZ

SECAGEM DE TOMATES UTILIZANDO SECADORES RESISTIVOS E COM BOMBA DE CALOR

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São
José do Rio Preto, para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia e Ciência de Alimentos (Área de
Concentração: Engenharia de Alimentos).

Orientadora: Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis



São José do Rio Preto

Março/2003



+ 664,834
Q35

50702009

RAFAEL QUEIROZ

SECAÇÃO DE TOMATES UTILIZANDO SECADORES

RESISTIVOS E COM BOMBA DE CALOR

SECAGEM DE TOMATES UTILIZANDO

SECADORES RESISTIVOS

E COM BOMBA DE CALOR

Queiroz, Rafael.

Secagem de tomate utilizando secadores resistivos e com bomba de calor / Rafael Queiroz. – São José do Rio Preto : [s.n.], 2003
102 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Vânia Regina Nicoletti Telis

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Tomate - Secagem - Bomba de calor.
3. Tomate - Propriedades físicas - Densidade. 4. Alimentos - Textura. 5.
Tomate - Reidratação. I. Telis, Vânia Regina Nicoletti. II. Universidade
Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III.
Título.

CDU – 664.85

RAFAEL QUEIROZ

**SECAGEM DE TOMATES UTILIZANDO SECADORES
RESISTIVOS E COM BOMBA DE CALOR**

COMISSÃO JULGADORA

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis

Profa. Dra. Ana Lúcia Gabas

Prof. Dr. José Antonio Gomes Vieira

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Prof. Dr. Francisco Lopes Filho

São José do Rio Preto, de de 2003.



DADOS CURRICULARES

RAFAEL QUEIROZ

NASCIMENTO 11.09.1977 – ITAPEVA/SP

FILIAÇÃO Antonio Carlos Queiroz

Maria de Lourdes Cardoso Queiroz

07/95 à 12/96 Curso de Graduação em Engenharia –
Faculdade de Engenharia Industrial

01/97 à 12/00 Curso de Graduação em Engenharia de
Alimentos – Universidade Estadual Paulista

03/01 à 03/03 Curso de Pós-Graduação em Engenharia e
Ciência de Alimentos, nível mestrado, na
Universidade Estadual Paulista, Câmpus de
São José do Rio Preto/SP.

Um trabalho que temos a graça e a oportunidade de fazer é nossa realização. Dedicar a alguém é demonstrar, reconhecer que eles também ajudaram de algum modo.

Aos meus pais ANTONIO CARLOS QUEIROZ e MARIA DE LOURDES CARDOSO QUEIROZ, que muito amo e aos quais muito devo

DEDICO

Ao meu irmão Daniel Queiroz.

A minha esposa Viviane M. Silva Queiroz.

Aos meus grandes amigos Newton Mayer Filho e Marcos Alexandre Polizelli.

A meus tios Admar José Cardoso e Maria Elizabeth Cardoso

OFEREÇO



MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS

Este trabalho marca o fim de um processo e, como uma fronteira, também demarca o início de uma nova fase em minha vida. E neste espaço tenho a alegria de partilhar com meus amigos mais esse momento.

Meus agradecimentos iniciais são a Deus, por tudo e principalmente pela saúde e entusiasmo que me conferiu e à Prof. Dra. VÂNIA REGINA NICOLETTI TELIS. Não apenas por ter me orientado durante o mestrado, mas por ter me proporcionado um crescimento profissional e acadêmico. Tenho consciência que sua leitura cuidadosa, sua inteligência brilhante, seu raciocínio rápido me marcaram para sempre e em uma dimensão que agora não consigo mensurar.

Ao Prof. Dr. JAVIER TELIS-ROMERO pelo incentivo ao início da carreira acadêmica, apoio e sugestões feitas no decorrer do projeto, além da sua participação no Exame de Qualificação, juntamente com o Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO GOMES VIEIRA.

À todos os professores do DETA, que de uma forma direta ou indireta, colaboraram para a realização deste trabalho.

À COMISSÃO EXAMINADORA, pelas sugestões de correção da dissertação.

Ao técnico JOÃO JESUÍNO, pela ajuda na montagem de equipamentos.

Aos demais TÉCNICOS e SECRETARIA do DETA/IBILCE, pelas trocas de informação e convivência nestes dois anos.

Aos meus grandes amigos: TOURO, NARDO, KUKY, KEKA E GORDO.

Aos meus amigos que comigo compartilharam estes anos de estudo no programa de pós-graduação, em especial à GIANE, FERNANDA, ANA COUTO, ALAN, JOÃO CLÁUDIO, MARCELO (PARAGUAIO).

À FAPESP, pelo auxílio financeiro (Proc. 01/02037-1) e também pelo acompanhamento dos relatórios encaminhados.



O que sabemos é uma gota.
O que ignoramos é um oceano.

Isaac Newton
(1643-1727)



SUMÁRIO

	Página
<u>RESUMO</u>	17
<u>ABSTRACT</u>	18
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	19
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS</u>	24
2.1. Desidratação de Alimentos	24
2.1.1. Cinética de Secagem	25
2.1.2. Relações entre os Processos de Desidratação e a Qualidade do Produto Final	31
2.2. Bomba de Calor	35
2.2.1. Critérios para Avaliação do Desempenho	42
2.3. Tomate	45
2.3.1. Tomate Seco	49
<u>3. OBJETIVOS</u>	54
<u>4. EQUIPAMENTOS</u>	55
4.1. Secador Acoplado a uma Bomba de Calor (BC)	55
4.1.1. Bomba de Calor	56
4.1.2. Secador	57
4.1.3. Acoplamento dos Sistemas Secador / Bomba de Calor	58
4.1.4. Avaliação do Desenho do Sistema Secador/Bomba de Calor ..	60
4.2. Secador de Resistências Elétricas com Fluxo de Ar Cruzado (CR)	63
4.3. Secador de Resistências Elétricas com Fluxo de Ar Paralelo (PR)	63



<u>5. METODOLOGIA</u>	65
5.1. Matéria-prima	65
5.2. Cinética de Secagem	65
5.3. Densidade Aparente	66
5.4. Reidratação	66
5.5. Análise de Textura	66
<u>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	69
6.1. Desempenho da Bomba de Calor	69
6.2. Cinética de Secagem	74
6.2.1. Influência das Variáveis de Processo sobre as Constantes do Modelo de Page	84
6.3. Influência dos Parâmetros de Secagem sobre as Características do Produto	92
6.3.1. Densidade Aparente	92
6.3.2. Reidratação	96
6.3.3. Textura	97
<u>7. CONCLUSÕES</u>	101
<u>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	104

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1: Curva de secagem.....	26
Figura 2.2: Diagrama esquemático de um ciclo simples de refrigeração	38
Figura 2.3: Diagrama de pressão-entalpia do ciclo de compressão de vapor da bomba de calor	38
Figura 2.4: Secador com bomba de calor (E = evaporador, C = condensador, S = secador) (a) Disposição dos componentes (b) Ar de processo na carta psicrométrica.....	40
Figura 2.1: (a) Tomate do tipo Pêra e (b) Tomate do tipo Santa Cruz.....	49
Figura 4.1: Bomba de calor acoplado a câmara de secagem	56
Figura 4.2: Esquema de instalação da bomba de calor acoplada ao secador.....	57
Figura 4.3: Esquema do secador convectivo com fluxo de ar cruzado (vista lateral)	64
Figura 4.4: Esquema do secador convectivo com fluxo de ar paralelo (vista lateral)	64
Figura 5.1: Dispositivo para medida de força necessária para a perfuração de amostras de tomate seco	68
Figura 6.1: Comportamento de secagem do tomate tipo pêra utilizando diferentes secadores a temperatura de 45°C e velocidade de 1,5 m/s	73
Figura 6.2: Taxas de secagem do tomate tipo pêra utilizando diferentes secadores a temperatura de 45°C e velocidade de 1,5 m/s	73

Figura 6.3: Comportamento de secagem do tomate tipo pêra utilizando secador bomba de calor a uma velocidade de 2,0 m/s utilizando diferentes temperaturas	75
Figura 6.4: Taxas de secagem do tomate tipo pêra utilizando secador bomba de calor a uma velocidade de 2,0 m/s utilizando diferentes temperaturas	75
Figura 6.5: Comportamento de secagem do tomate tipo pêra utilizando secador bomba de calor a uma temperatura de 45°C utilizando diferentes velocidades	77
Figura 6.6: Taxas de secagem do tomate tipo pêra utilizando secador bomba de calor a uma temperatura de 2,0 m/s utilizando diferentes velocidades	77
Figura 6.7: Comportamento de secagem, utilizando secador Bomba de Calor a temperatura de 40°C, velocidade de 2,0 m/s, para os tomates do tipo Pêra e Santa Cruz	78
Figura 6.8: Taxas de secagem, utilizando secador Bomba de Calor a temperatura de 40°C, velocidade de 2,0 m/s, para os tomates do tipo Pêra e Santa Cruz	78
Figura 6.9: Gráfico em coordenadas semi-logarítmicas da umidade adimensional em função do tempo para tomate tipo Pêra, utilizando diferentes secadores a 45°C e 1,5 m/s.....	80
Figura 6.10: Influência da Temperatura e Velocidade no parâmetro k para tomate tipo Pêra utilizando secador bomba de calor.....	86
Figura 6.11: Influência da Temperatura e Velocidade no parâmetro n para tomate tipo Pêra utilizando secador bomba de calor.....	87

Figura 6.12: Densidade aparente versus umidade adimensional em função dos tipos de tomate, para diferentes secadores à temperatura de 40°C.....	94
Figura 6.13: Densidade aparente versus umidade adimensional em função dos tipos de tomate, para diferentes secadores à temperatura de 50°C.....	94
Figura 6.14: Comparação das amostras do tomate tipo Pêra (a) e tipo Santa Cruz(b) desidratadas até peso constante nas mesmas condições de secagem	95
Figura 6.15: Diagrama força versus tempo resultante de um teste de compressão de amostra de tomate tipo Santa Cruz desidratada no secador Bomba de Calor.	98
Figura 6.16: Força de ruptura em testes de compressão de amostras de tomate em função da temperatura e velocidade do ar de secagem	100
Figura 6.17: Distância percorrida antes da ruptura em testes de compressão de amostras de tomate em função da temperatura e velocidade do ar de secagem	100

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1: Coeficientes de desempenho de várias bomba de calor.....	44
Tabela 2.2: Composição Nutricional do Tomate (100g).....	47
Tabela 6.1: Coeficientes de desempenho efetivo.....	69
Tabela 6.2: Aumento do potencial de secagem e economia de energia para o secador bomba de calor.....	69
Tabela 6.3: Parâmetros do modelo de Page (eq. 2.8), para tomate tipo Pêra	81
Tabela 6.4: Parâmetros do modelo de Page (eq. 2.8), para tomate tipo Santa Cruz	82
Tabela 6.5: Coeficientes do ajuste do parâmetro k para o secador bomba de calor	85
Tabela 6.6: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador bomba de calor	85
Tabela 6.7: Coeficientes do ajuste do parâmetro k para o secador resistivo paralelo	89
Tabela 6.8: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador resistivo paralelo	89
Tabela 6.9 Coeficientes do ajuste do parâmetro k para o secador resistivo cruzado	89
Tabela 6.10: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador resistivo cruzado	89



Tabela 6.11: Índice de reidratação para amostras secas à peso constante, para diferentes tipos de secadores em diferentes condições de temperatura e velocidade do ar, para os tomates tipo Pêra e Santa Cruz	97
Tabela A.1: Coeficientes da equação de correção das temperaturas medidas pelos termopares	113
Tabela B.1: Cinética da secagem de tomate tipo Pêra, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s	114
Tabela B.2: Cinética da secagem de tomate tipo Pêra, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 2,0 m/s.	115
Tabela B.3: Cinética da secagem de tomate tipo Santa Cruz, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s	116
Tabela B.4: Cinética da secagem de tomate tipo Santa Cruz, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s	117
Tabela C.1: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 40°C	118
Tabela C.2: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 45°C	118



Tabela C.3: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 50°C	119
--	-----

Tabela C.4: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 40°C	119
--	-----

Tabela C.5: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 45°C	120
--	-----

Tabela C.6: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 50°C	120
--	-----

NOMENCLATURA

D_{EF} :	difusividade efetiva, $[L^2T^{-1}]$
t :	tempo, $[T]$
C :	constante, [adimensional]
X :	umidade em base seca, [adimensional]
r :	dimensão característica, $[L]$
X_{eq} :	umidade de equilíbrio em base seca, $[M_{vapor} / M_{ar\ seco}]$
X_0 :	umidade inicial em base seca, $[M_{vapor} / M_{ar\ seco}]$
K_L :	parâmetro de secagem de Lewis $[T^{-1}]$
K_P e n :	parâmetros de secagem de Page, $[T^{-n}]$, [adimensional]
M :	umidade adimensional $(X - X_{EQ}) / (X_0 - X_{EQ})$, [adimensional]
N :	número de pontos empregados, [adimensional]
$\dot{Q}_{AR}$:	capacidade de aquecimento do ar, $[FLT^{-1}]$
$\dot{m}_{AR}$:	vazão mássica do ar através do condensador, $[MT^{-1}]$
C_{pAR} :	calor específico do ar, $[FLM^{-1}T^{-1}]$
T_1, T_2, T_3 :	temperatura do ar referentes à figura 1, $[T]$
COP_R :	coeficiente de desempenho, [adimensional]
$COP_{AQ, EF}$:	coeficiente de desempenho efetivo de aquecimento, [adimensional]
r :	aumento do potencial de secagem do ar ambiente, [adimensional]
W_{BC} :	umidade absoluta do ar na saída da bomba de calor
$W_{BC, SAT}$:	umidade absoluta do ar saturado, com a mesma entalpia do ar na saída da bomba de calor

W_{AMB} : umidade absoluta do ar ambiente

$W_{AMB, SAT}$: umidade absoluta do ar saturado, com a mesma entalpia do ar ambiente

$\dot{W}_{BC}$ energia estimada para o sistema bomba de calor, [FLT⁻¹]

$\dot{W}_{RE}$ energia estimada para o sistema com resistências elétricas, [FLT⁻¹]

$\dot{W}_{CP}$ potência do compressor, [FLT⁻¹]

η_{RE} eficiência das resistências elétricas

RESUMO

Uma bomba de calor composta por compressor, condensador a ar, evaporador, válvula de expansão termostática, refrigerante R-22 e instrumentos de medição e controle foi montada e acoplada a um secador de bandejas.

O desempenho termodinâmico da bomba de calor foi avaliado durante ensaios de secagem nas temperaturas de 40, 45 e 50°C. A economia de energia elétrica em relação a um secador com o mesmo potencial de secagem e que utilize apenas resistência elétrica para aquecimento do ar, foi da ordem de 40%. O coeficiente de desempenho efetivo de aquecimento variou entre 2,14 e 2,20.

Curvas de secagem e encolhimento de quartos de tomate dos tipos Pêra (para uso industrial) e Santa Cruz (para consumo de mesa) foram determinadas no secador acoplado à bomba de calor e em secadores resistivos com fluxo de ar paralelo e cruzado. As temperaturas do ar de secagem foram de 40, 45 e 50°C e as velocidades de 1,5 e 2,0 m/s. O modelo de Page foi utilizado para representar as curvas de secagem experimentais. A influência dos parâmetros de secagem sobre as constantes do modelo foi analisada estatisticamente e verificou-se que a temperatura foi o fator mais significativo, seguido pela velocidade do ar. Para avaliação da qualidade do produto em função das condições de secagem, foram determinados curvas de compressão (força versus tempo), densidade aparente em função da umidade e o índice de reidratação do material seco.

De modo geral, concluiu-se que o emprego da bomba de calor foi conveniente, principalmente sob o aspecto energético.



ABSTRACT

A heat pump made up of a compressor, air-condenser, evaporator, thermostatic expansion valve, R-22 refrigerant, as well as measurement and control instruments, was set up and connected with a tray dryer.

The thermodynamic performance of the heat pump was evaluated during drying assays at 40, 45 e 50°C. The energy savings when compared to a drier with the same drying potential but using only electric resistances to air heating was about 40%. Values of the effective heating performance coefficient were in the range of 2.14 to 2.20.

Drying curves and shrinkage behavior of tomato quarters of Pear (for processing) and Santa Cruz (for fresh market) types were determined in the heat pump assisted dryer and in resistive dryers with air flowing in parallel and in cross-flow. Drying temperatures of 40, 45 and 50°C and air velocity of 1,5 and 2,0 m/s were tested. The Page model was fitted to experimental drying curves and the effect of drying parameters on the model coefficients was statistically analyzed. Temperature showed the highest significance, followed by air velocity. In order to evaluate product quality as affected by drying conditions, compression curves (force versus time), apparent density versus moisture content, and rehydration indexes of the dried material were determined.

As a general conclusion, the use of heat pump is recommended, mainly based in energy considerations.



1. INTRODUÇÃO

Ao longo da História da Civilização, o homem sempre buscou formas de produzir e armazenar energia. Afinal, é graças a ela que é possível aquecer ambientes, cozinhar alimentos, fazer funcionar máquinas e criar mais conforto e até mais saúde. Na busca por melhores formas de energia, aprendeu-se a utilizar o fogo, o petróleo, a força das águas, o vento, o sol, gases especiais e até o átomo.

De todas as fontes de energia, a hidrelétrica é a mais importante para o Brasil, onde quase toda a energia provém de usinas hidrelétricas. Infelizmente, uma parte significativa dessa produção acaba sendo desperdiçada por mau uso na cidade ou no campo.

A economia brasileira sofreu nos últimos anos o severo impacto de duas crises petrolíferas. A primeira, em 1973, teve curta duração, mas graves efeitos provocados pela alteração na estrutura dos preços, com a sua elevação a níveis irreversíveis e quase insuportáveis para os países em desenvolvimento. A herança desta primeira crise foi extremamente pesada para o Brasil, que sentiu, pela primeira vez, o elevado grau de sua dependência das multinacionais do petróleo e dos países produtores. Muito pouco foi feito para enfrentar a eventualidade de uma nova crise, que surgiu em 1979, com outras características, porém mais duradoura. Um confronto entre as principais forças políticas mundiais no âmbito de uma situação muito mais perigosa, colocou em risco não apenas a produção de petróleo, mas também o seu escoamento e o abastecimento do mundo



ocidental. No caso específico do Brasil, a crise de 1973 foi danosa na medida que gerou pressões inflacionárias e desequilibrou consideravelmente nossa balança de pagamentos, prejudicando toda estratégia de desenvolvimento iniciada em 1964 (Tamer, 1980).

Atualmente passamos por mais uma crise resultante do mau planejamento energético. A real dimensão e conseqüências dessa crise ainda não são totalmente conhecidas. Economistas costumam dizer que das crises surgem riscos e oportunidades. Por enquanto, a política energética pode ser analisada basicamente pelos custos nela embutidos, afinal o consumidor e as empresas estão pagando muito caro pelos erros governamentais. Por outro lado, abrem-se portas para que fontes alternativas de energia continuem sendo estudadas e sua tecnologia amadurecida, ao mesmo tempo em que sistemas já em uso continuem sendo otimizados no sentido de economizar ao máximo as fontes energéticas.

De toda a energia requerida por processos industriais, uma porção significativa é usada em processos de secagem (em torno de 12%). Em muitos casos as indústrias de secagem operam sem a preocupação de recuperar o calor, jogando grande parte desta energia para o meio ambiente. Com o reaproveitamento do calor latente de vaporização da água disponível no ar úmido que deixa um secador, pode-se conseguir uma redução significativa no consumo energético da operação (Shelton & Christiansen, 1999).

Vários são os métodos disponíveis para o condicionamento do ar utilizado nos secadores, dentre eles o aquecimento por resistências elétricas ou através de uma chama, ou ainda métodos considerados alternativos, como é o caso

da energia solar ou da bomba de calor. De acordo com Shelton & Christiansen (1999) o método mais difundido de secagem é o que utiliza ciclo de calor aberto, onde o ar quente é passado pelo produto úmido e a energia adicionada ao sistema é transferida para a água contida no produto, fazendo com que ela vaporize. Esta mistura psicrométrica (ar úmido) é descartada para o meio ambiente. O desempenho do ciclo é dependente das condições atmosféricas e muda com a umidade e/ou temperatura.

A aplicação da bomba de calor no condicionamento do ar apresenta todas as vantagens dos sistemas de secagem a baixas temperaturas e manifesta as mesmas características desejáveis das fontes de calor resistivas (confiabilidade e fácil controle), somado ao fato que é consideravelmente mais eficiente do ponto de vista termodinâmico. Embora seja suprida por fontes não renováveis da natureza, o que não ocorre com a energia solar, a bomba de calor não apresenta os problemas de intermitência e de confiabilidade intrínsecos da radiação solar, o que garante continuidade do processo e um produto de qualidade mais homogênea (Hogan *et al.*, 1983).

No secador a ar quente convencional, o ar de processo é aquecido até a temperatura de secagem. O aumento da temperatura faz com que a taxa de transferência de calor para o material seja maior, aumentando a pressão de vapor interna juntamente com a taxa de difusão de umidade para a superfície externa. A baixa umidade relativa do ar aumenta o potencial de secagem, porém, quando não é controlada, fica na dependência da umidade absoluta do ambiente e da temperatura de secagem. No estágio final, quando a taxa de secagem é

relativamente baixa, existe apenas uma pequena diferença entre as umidades na entrada e na saída da câmara de secagem. A diferença de temperatura correspondente também é mínima, resultando numa secagem ineficaz e de baixa eficiência térmica. O processo de secagem utilizando bomba de calor visa o controle da umidade e da temperatura do ar, bem como a recuperação do calor envolvido no processo. Desse modo é possível melhorar a qualidade do produto, utilizando menos energia (Prasertsan & Saen-Saby, 1998).

O refrigerador ou bomba de calor é um dispositivo que opera de forma cíclica e que necessita de trabalho para que se obtenha a transferência de calor de um corpo a baixa temperatura para outro a alta temperatura. Este ciclo de refrigeração, quando operando como sistema de aquecimento, troca calor do um meio externo, pelo evaporador, transferindo-o, juntamente com o calor equivalente ao trabalho de compressão, ao condensador que, por sua vez, transfere o calor total ao espaço a ser aquecido (bomba de calor). Por outro lado, quando operando como um sistema de resfriamento, o evaporador troca calor do meio interno, a ser resfriado, rejeitando-o ao meio externo, via condensador, juntamente com o calor equivalente do trabalho de compressão (ar condicionado). O sistema empregado no secador opera tanto como sistema de aquecimento - quando o ar passa pelo condensador -, como sistema de redução de umidade - obtida pelo resfriamento e condensação da umidade quando o ar passa pelo evaporador.

A possibilidade de desidratar produtos termo-sensíveis com temperaturas mais baixas, sem uma correspondente redução na taxa de secagem (devido ao efeito compensador da baixa umidade relativa do ar) permitem



vislumbrar melhor qualidade para os produtos secos - com menor encolhimento e textura menos rígida - aliada a um balanço energético mais favorável que o obtido em um secador convencional.

Considerando a importância econômica, nutricional e social do tomate no Brasil, mais especificamente no estado de São Paulo, a pesquisa e desenvolvimento de processos de desidratação que resultem em produtos de qualidade, com alto valor agregado e menor custo energético, é plenamente justificável. O objetivo deste trabalho é, portanto, comparar a secagem com baixas umidades relativas, através do uso da bomba de calor, com a secagem a ar quente não desumidificado, em secadores de fluxos paralelos e cruzados, visando à produção de tomate seco de melhor qualidade a um menor custo energético.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Desidratação de Alimentos

A desidratação de produtos alimentícios é um processo largamente empregado com distintos propósitos: aumento da vida-de-prateleira, redução de custos de embalagem, transporte e armazenamento e modificação de atributos sensoriais. Em decorrência de sua antigüidade e de seu importante papel na indústria de alimentos, a secagem é uma das operações unitárias mais estudadas. Entretanto, ainda apresenta-se como uma operação complexa e pouco compreendida, principalmente no que se refere à seleção e controle das condições do processo visando a manutenção da qualidade final do produto.

No caso de frutas e hortaliças, o consumidor vem aumentando suas exigências no sentido de produtos que mantenham características sensoriais e nutricionais o mais próximo possível do material fresco e, além disso, tragam facilidades no manuseio e preparo. Em termos industriais, isso significa o desenvolvimento de operações que minimizem os efeitos adversos do processamento. Na desidratação, em particular, implica na minimização da perda de aromas, de alterações de cor e textura, do encolhimento e da perda de nutrientes, sendo fundamental o controle das atividades enzimática e microbiana residuais em níveis que garantam estabilidade ao alimento. Finalmente, as propriedades de reidratação, dependendo do produto, têm importância crucial para a sua boa aceitação.



É fato conhecido que a textura, a densidade, a facilidade de reidratação, a aglomeração e as propriedades mecânicas de alimentos desidratados dependem das propriedades e características da matéria-prima, da temperatura e umidade do ar de secagem, da configuração do secador e do tempo de residência do produto. De acordo com Jayaraman e Das Gupta (1992), a melhoria das características de reidratação e a manutenção da qualidade de alimentos secos por ar quente através da alteração das variáveis de processo, de modo a melhorar a transferência de calor e diminuir a temperatura, vem sendo objeto de um número cada vez maior de estudos.

2.1.1. Cinética de Secagem

Baseados na análise de transferência de calor e massa, os sistemas de desidratação mais eficientes procuram manter no nível máximo possível os gradientes de temperatura e pressão de vapor entre o ar ambiente e o interior do produto. A transferência de calor, necessária para evaporação da umidade, é geralmente baseada no mecanismo de convecção. Quanto à transferência de massa, existem dois aspectos importantes a serem considerados: o transporte da água no interior do sólido a ser seco até a superfície e a remoção do vapor a partir da mesma. O processo, usualmente representado por uma curva de secagem (Figura 2.1), pode ser dividido em três fases:

1ª Fase (AB) - Aquecimento do material até a temperatura de secagem desejada: a elevação da temperatura causa um rápido aumento na taxa de secagem.



2ª Fase (BC)- Período de taxa constante: a velocidade de transferência de massa (umidade) no interior do sólido poroso é igual à velocidade de evaporação da água na superfície do mesmo.

3ª Fase (CD)- Período de taxa decrescente: a velocidade de transferência de massa no interior do sólido é menor que a taxa de evaporação na superfície; ocorre a elevação da temperatura do produto.

No estudo da secagem, depois da obtenção das curvas e da caracterização dos períodos de secagem, é interessante descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores.

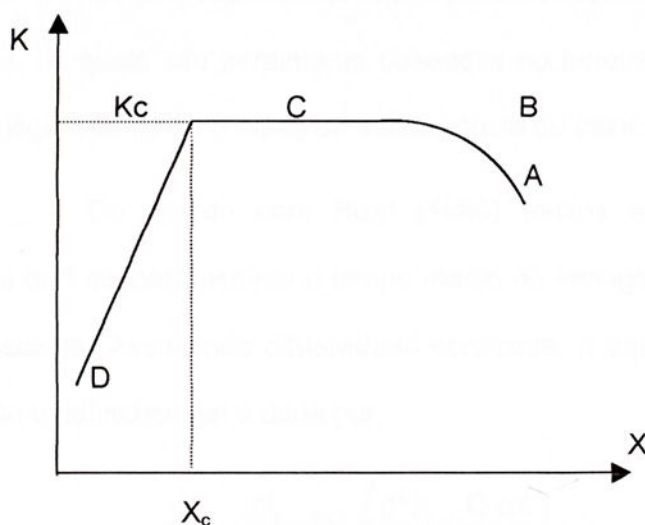


Fig. 2.1: Curva de secagem, onde X é a umidade em base seca (kg água/kg matéria seca), K é a taxa de evaporação de umidade (kg água/kg matéria seca.h), X_c é a umidade crítica e K_c a taxa crítica correspondente.

Muitos autores têm definido uma curva generalizada de secagem que inclui as regiões de taxa constante e taxa decrescente de secagem. Entretanto, nem todos os materiais seguem este padrão.

Um produto apresenta o período de taxa constante quando há um filme de água livremente disponível na superfície de secagem, sendo similar à evaporação da água de um reservatório. As regiões de taxa decrescentes são indicativas de um aumento da resistência tanto para a transferência de calor quanto de massa, ocorrendo quando a superfície do alimento já não está totalmente molhada, tendo a umidade que percorrer o sólido até chegar à corrente de ar. Em alguns casos, poderá não ser observado uma continuidade na curva de secagem, pois mudanças na estrutura do produto - endurecimento e/ou encolhimento - poderão interferir no processo de secagem (Hawladar et al., 1991).

Os processos de secagem utilizam modelos teóricos, semiteóricos e empíricos, os quais são geralmente baseados no fenômeno de transferência de massa, negligenciando-se o efeito de transferência de calor.

De acordo com Rizvi (1986) muitos autores têm utilizado a segunda lei de Fick para estimar o tempo médio de secagem durante o período de taxa decrescente. Assumindo difusividade constante, a equação diferencial parcial para difusão unidimensional é dada por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{EF} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

onde C é uma constante que assume valores de zero para geometria plana, 1 para geometria cilíndrica e 2 para esférica, X é a umidade em base seca, t é o tempo e D_{EF} é a difusividade efetiva. As condições iniciais de contorno geralmente utilizadas são:

$$\begin{aligned}
 X(r, 0) &= X_0 && \text{para } t = 0 \\
 X(0, t) &= X_E && \text{para } r = r_0 \text{ (na superfície)} \\
 X(0, t) &= \infty && \text{para } r = 0 \text{ (no centro)}
 \end{aligned}$$

Assumindo distribuição uniforme da umidade inicial e ausência de resistências externas, as soluções analíticas da equação (2.1) para as geometrias mais simples (Crank, 1975) são dadas na forma de séries infinitas:

1. Para placa plana infinita:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (2.2)$$

2. Para um cilindro infinito:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma n^2} \exp \left[-\frac{\gamma n^2}{4} \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (2.3)$$

3. Para uma esfera:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2}{9} \frac{D_{EF} t}{L^2} \right] \quad (2.4)$$

onde L é a dimensão característica, X_{eq} é a umidade de equilíbrio em base, X_0 é a umidade inicial em base seca.

A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, etc.) apresentam uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, a solução

analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no estudo destes materiais. Para alimentos de alto conteúdo de umidade como a maioria de frutas, a variação de volume é grande e, por esta razão, as soluções analíticas não podem ser aplicadas de forma exata e devem ser consideradas como aproximações da solução real. Diversos autores, como Nicoletti et al. (2001) - secagem de abacaxi fresco e com pré-tratamento osmótico, Murari (2000) - secagem de tomate com e sem tratamento osmótico, Golveia (1999) - secagem de gengibre e Hawlader et al. (1991) - secagem de tomates, a utilizaram obtendo bons resultados.

Alguns modelos teóricos e semi-empíricos baseados na teoria da difusão de líquido foram estudados por Parti (1998) para descrever a secagem. Dentre eles, dois modelos teóricos - Sherwood (eq. 2.5) e Newman (eq. 2.6) - e dois semi-empíricos - Lewis (eq. 2.7) e Page (eq. 2.8). Enquanto Sherwood despreza a resistência externa à transferência de massa para Biot de massa (Bi_M) > 100, Newman considera ambas as resistências, interna e externa.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \pi^2 \frac{Dt}{r^2} \right] \quad (2.5)$$

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi_M^2}{\beta_n^2 (Bi_M^2 - Bi_M + \beta_n^2)} \exp \left[-\beta_n^2 \frac{Dt}{r^2} \right] \quad (2.6)$$

Os modelos semi-empíricos de Lewis e de Page são baseados na teoria da difusão, assumindo que a resistência ocorre em uma fina camada na superfície das partículas. O modelo de Lewis, análogo à lei de resfriamento de Newton, estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre, sendo normalmente utilizada na sua forma integrada (eq. 2.7).

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_L t) \quad (2.7)$$

onde k_L é o parâmetro de secagem de Lewis.

A equação (2.7) aproxima-se da solução da equação da difusividade (eq. 2.1), para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da série for significativo. Esta correlação acaba sub ou super estimando os valores preditos na primeira ou segunda parte da secagem. Sua utilização é indicada para $Fo \approx 1$ e $Bi_M > 100$.

O modelo de Page (eq. 2.8), é uma modificação empírica do modelo de Lewis, sendo freqüentemente usado nos estudos de secagem de produtos agrícolas e alimentos, com excelentes resultados. A utilização de dois parâmetros faz com que sua aplicabilidade seja maior levando a valores estimados mais próximos dos reais.

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{qe}} = \exp(-k_p t^n) \quad (2.8)$$

onde k_p e n são os parâmetros de secagem de Page.

A taxa de secagem para o modelo de Page é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = (-k_p n t^{n-1})(X - X_{eq}) \quad (2.9)$$

A partir da eq. (2.9), Party (1998) define uma constante de secagem (k^*), dada pela eq. (2.10), que serve para demonstrar como a utilização de dois parâmetros corrige a deficiência apresentada pela equação de Lewis.

$$k^* = k_p n t^{n-1} \quad (2.10)$$

Se $n < 1$, k^* diminui durante o processo de secagem, de forma que altos valores de K_p podem ser utilizados para aproximá-la da equação de Fick nas fases iniciais de secagem sem subestimar os valores preditos nas fases posteriores. Quando $n = 1$, a equação se reduz ao modelo de Lewis, aproximando-se da solução da equação da difusividade.

Diversos autores como Panchariya, *et al.* (2002), Yaldiz, *et al.* (2001), Madamba *et al.* (1996), Diamante & Munro (1991), compararam diversos modelos de secagem obtendo bons resultados para o modelo de Page.

2.1.2. Relações entre os Processos de Desidratação e a Qualidade do Produto

Final

Entre as alterações sofridas pelos produtos alimentícios durante a desidratação, pode-se mencionar as modificações de sua estrutura física, as quais afetam a textura, a capacidade de reidratação e aparência (cor, encolhimento), além da ocorrência de reações químicas indesejáveis, como o escurecimento, a desnaturação de proteínas, a oxidação de lipídeos etc., com uma posterior perda do valor nutricional do produto (Kajiyama, 1998). A relação entre a qualidade do produto desidratado e as condições de secagem não são suficientemente exploradas na literatura devido à limitada compreensão dos mecanismos físico-químicos que afetam a qualidade do produto e do efeito destes mecanismos sobre as propriedades de transporte.

Strumillo e Adamiec (1996) apresentam um quadro indicando as principais alterações na qualidade de alimentos durante a secagem (Quadro 2.1). As

alterações bioquímicas, características das leveduras, bactérias e fungos, estão estreitamente conectadas com a perda de água nas células e nos seus elementos estruturais individuais. Alterações enzimáticas incluem principalmente as mudanças da atividade causada pela decomposição estrutural dos biopolímeros. Normalmente, as alterações químicas resultam no decréscimo do valor nutritivo do produto ou na formação de substâncias nocivas para o meio. As alterações bioquímicas e químicas manifestam-se muitas vezes como mudanças físicas: perda de solubilidade ou da capacidade de ligar-se à água e perda de componentes aromáticos devido à decomposição ou à alta volatilidade, além do escurecimento do produto.

Karathanos et al. (1993) observaram que durante a secagem de salsão, o uso de temperaturas mais baixas no ar de secagem resultou em um produto com melhores propriedades de reidratação. Além disso, à medida que o teor de umidade do produto era reduzido, a taxa de encolhimento diminuía. Entretanto, existem limitações práticas no uso de baixas temperaturas, que acarretam no aumento excessivo no tempo de processamento. Para contornar esse problema, Karel et al. (1993) ressaltaram a necessidade de identificar regimes de tempo-temperatura que permitam uma secagem relativamente rápida com o mínimo grau de encolhimento.



Quadro 2.1: Alterações da qualidade de produtos alimentícios durante a secagem (Strumillo & Adamiec, 1996)

Física	Química	Bioquímica
- Encolhimento - Perda de elasticidade - Alteração na forma e tamanho (fraturas, enrugamento, poros) - Cristalização ou mudança na estrutura cristalina - Perda de solubilidade - Reidratação limitada - Perda de aromas	- Diminuição e perda de atividade de reagentes - Quebra de componentes químicos	- Decomposição de microrganismos e biomoléculas - Oxidação de lipídeos - Desnaturação de proteínas - Escurecimento enzimático - Reação de Maillard - Oxidação ou inativação de vitaminas

Nicoletti et al. (2001) verificaram que existe uma interação entre os efeitos da temperatura e da velocidade do ar de secagem sobre o encolhimento de fatias de abacaxi desidratado. Para maiores velocidades o encolhimento foi independente da temperatura, enquanto para velocidades mais baixas o encolhimento foi mais intenso à medida que a temperatura de secagem diminuiu. Esses efeitos são compatíveis com a teoria da transição vítrea (Bhandari & Howes, 1999), considerando-se que a secagem a temperaturas mais baixas expõe o material a temperaturas maiores que a ambiente por um período mais prolongado. O resultado seria que a matriz, com viscosidade mais baixa devido ao estado borrachoso (acima da temperatura de transição vítrea, T_g), teria mais tempo para se deformar. Isso acontece principalmente quando a velocidade do ar é baixa, reduzindo a difusividade efetiva e prolongando ainda mais o tempo de secagem. Em temperaturas mais altas, ou em maiores velocidades do ar, devido às altas taxas de

secagem, a superfície da amostra se desidrata muito rapidamente, passando ao estado vítreo, que é caracterizado por uma estrutura mais rígida. Isso diminui a intensidade das deformações sofridas pela material. Por outro lado, Gabas et al. (1999) observaram que, na desidratação de uvas, o encolhimento aumentou com o aumento da temperatura de secagem na faixa de 40 a 80°C, enquanto o aumento da concentração de oleato de etila no pré-tratamento químico teve efeito contrário. Os mesmos autores (Gabas et al., 2002) verificaram que, na desidratação de ameixas, a temperatura teve pouca influência sobre o encolhimento.

Chua et al. (2001) secaram fatias de banana em um secador bomba de calor capaz de variar, em um mesmo experimento, a temperatura do ar de secagem de maneira progressiva ou regressiva, variando-o de 5°C a cada 60 minutos. Com este tipo de secagem ("stepwise") observaram significativas reduções na degradação da cor e no tempo de secagem quando comparada com uma secagem a temperatura constante.

Alves-Filho & Strommen (1996), ao estudarem a aplicação de bomba de calor na secagem de materiais biológicos, reidrataram maçãs, morangos e peixes comparando o tempo de imersão do produto seco, temperatura da água de reidratação (10 e 99°C), temperatura do ar de secagem (-5 a 40°C para peixes e -25 a 35°C para as frutas), forma e tamanho das amostras. Obtiveram maior porcentagem de reidratação para maiores tempos de imersão e temperaturas de secagem mais baixas. Observaram ainda, que a taxa de reidratação dos peixes secos a -5°C aumentou quando a amostra foi reidratada em água a 10°C e, para os

peixes secos a temperatura maior (30°C), a taxa se inverteu, tendo como resposta, a maior taxa de reidratação quando a reidratação se deu a 99°C .

2.2. Bomba de calor

A bomba de calor é um projeto termodinâmico que opera em ciclo e requer trabalho para transferir calor do corpo a baixa temperatura para o corpo de alta temperatura. O princípio do ciclo da bomba de calor é idêntico ao do ciclo de refrigeração, exceto que o propósito primário da bomba de calor é complementar calor mais do que removê-lo de um espaço fechado.

Entende-se por refrigeração, a manutenção de uma temperatura abaixo da temperatura da vizinhança e, para que isto se mantenha, o processo deverá ser contínuo. Uma forma de absorver o calor a uma temperatura baixa é mediante a evaporação de um líquido cuja temperatura de ebulição seja baixa na pressão de evaporação. Para que a operação seja contínua, o fluido evaporado deve retornar ao seu estado líquido inicial, de modo que possa absorver o calor uma outra vez, a uma baixa temperatura. A série completa de etapas através das quais o fluido passa constitui o ciclo de refrigeração.

O custo operacional de um sistema de bomba de calor é o custo da energia elétrica necessária para movimentar o compressor. Uma grande vantagem deste sistema é que mais energia está disponível para o aquecimento do que trabalho é requerido para operá-la. Isto foi salientado pela primeira vez em 1852, por Lord Kelvin, que projetou uma máquina para tal fim. Não obstante, o

dispositivo nunca foi construído. Cerca de 75 anos mais tarde, Haldane utilizou o princípio e aqueceu sua casa na Escócia.

Embora as vantagens da bomba de calor sob o ponto de vista termodinâmico sejam reconhecidas desde há muito tempo, seu desenvolvimento como um produto industrial, visando à recuperação de calor de rejeitos de processos, foi realmente iniciado no princípio da década de 70 (Rossi, 1993). Até hoje sua utilização em indústrias ainda é pouco difundida. A principal razão é a suspeita sobre o benefício econômico que ela gera em relação ao custo do investimento.

Os sistemas de bomba de calor são classificados, em relação à aplicação e ao tamanho, como *residencial*, cobrindo o setor doméstico do mercado, com capacidades de aquecimento até 400 kW; *comercial*, representando o setor de edifícios de escritórios, lojas, escolas etc., com capacidades de 20 a 1.000 kW; e o *industrial*, com sistemas entre 100 e 10.000 kW ou mais (Hodgett & Oelert, 1982).

O setor industrial inclui todas as bombas de calor que utilizam fluxos residuais de processos como fonte de calor e/ou aqueles sistemas empregados no aquecimento de fluidos de processo, constituindo-se num importante modo de conservação de energia. O ponto principal é que, com a utilização de uma pequena quantidade de energia disponível (ex. potência mecânica, gás ou diesel), uma quantidade maior de energia a uma temperatura mais baixa que, de outra forma não seria aproveitada, pode ser transferida a um nível mais elevado de temperatura, sendo então utilizada.

De acordo com Gluckman (1986 e 1987), a classe industrial das bombas de calor é a que apresenta a mais ampla variedade de sistemas instalados, com predominância daqueles com o ciclo fechado por compressão mecânica, particularmente o que utiliza motor elétrico como força motriz, seguidos do sistema por absorção. Quanto às áreas de aplicação, destacam-se a recuperação de calor de plantas de resfriamento e aquecimento, o aquecimento de ambientes ou de água, o acoplamento dos processos de aquecimento e resfriamento e a secagem.

Dependendo da escolha que se faça, pode-se conseguir desde pequenas elevações na temperatura do fluido de processo até elevações da ordem de 100°C ; as fontes de calor a baixas temperaturas podem apresentar temperaturas em torno de 0°C e as fontes receptoras a altas temperaturas podem estar entre 30 e 150°C . No caso dos sistemas por compressão mecânica, os refrigerantes mais utilizados são o R22, para temperaturas até 50°C , o R12 para temperaturas até 75°C e o R114 até 120°C (Gluckman, 1986 e 1987).

A Figura 2.2 mostra um ciclo por compressão de vapor, enquanto a Figura 2.3 indica as variações correspondentes de pressão e entalpia. O refrigerante entra no compressor como vapor ligeiramente superaquecido a baixa pressão. O vapor é descarregado do compressor e entra no condensador como vapor numa pressão elevada, onde a condensação do refrigerante é obtida pela transferência de calor para a água de refrigeração ou para o meio. O refrigerante deixa o condensador, como líquido, a uma pressão elevada. Sua pressão é reduzida ao escoar pela válvula de expansão ou válvula termostática, resultando numa evaporação instantânea de parte do líquido. O líquido restante, agora a baixa

pressão, é vaporizado no evaporador. Esta vaporização é o resultado da transferência de calor do espaço que está sendo refrigerado para o fluido refrigerante. Após esta operação o vapor retorna para o compressor.

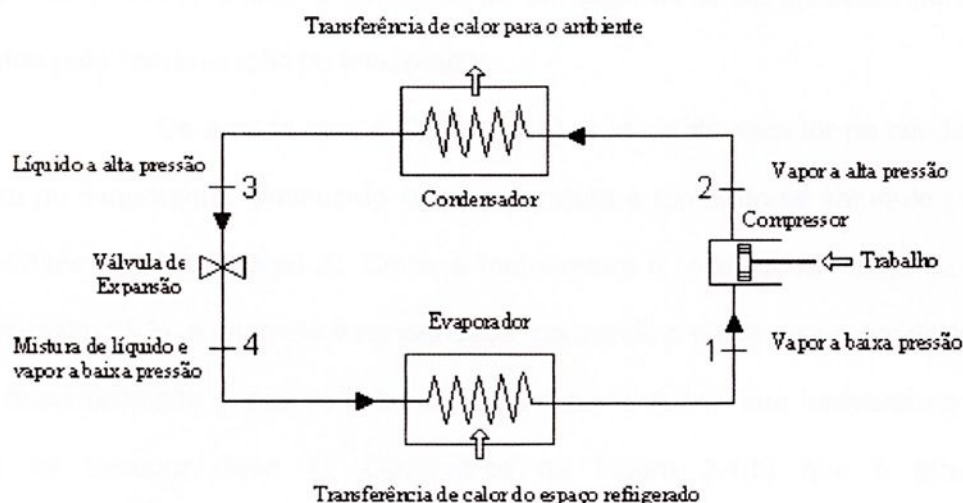


Fig. 2.2: Diagrama esquemático de um ciclo simples de refrigeração.

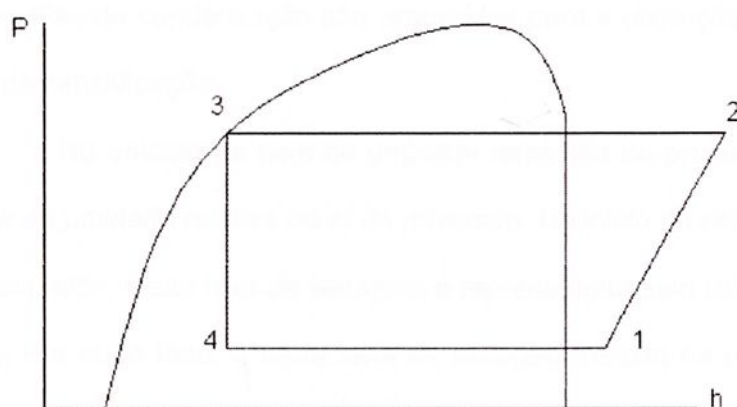


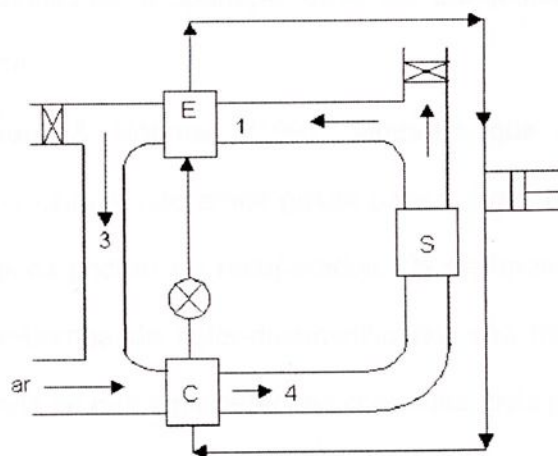
Fig. 2.3: Diagrama pressão-entalpia do ciclo de compressão de vapor da bomba de calor.

A bomba de calor acoplada a um secador é um equipamento que transfere ar quente com baixa umidade relativa para a secagem de um determinado produto, se ela for acoplada a um secador, como mostra a Figura 2.4(a), o evaporador recupera o calor que sai do secador e o devolve ao ar de processo no condensador. Sendo assim, o conteúdo de umidade do ar de processo pode ser regulado pela condensação no evaporador.

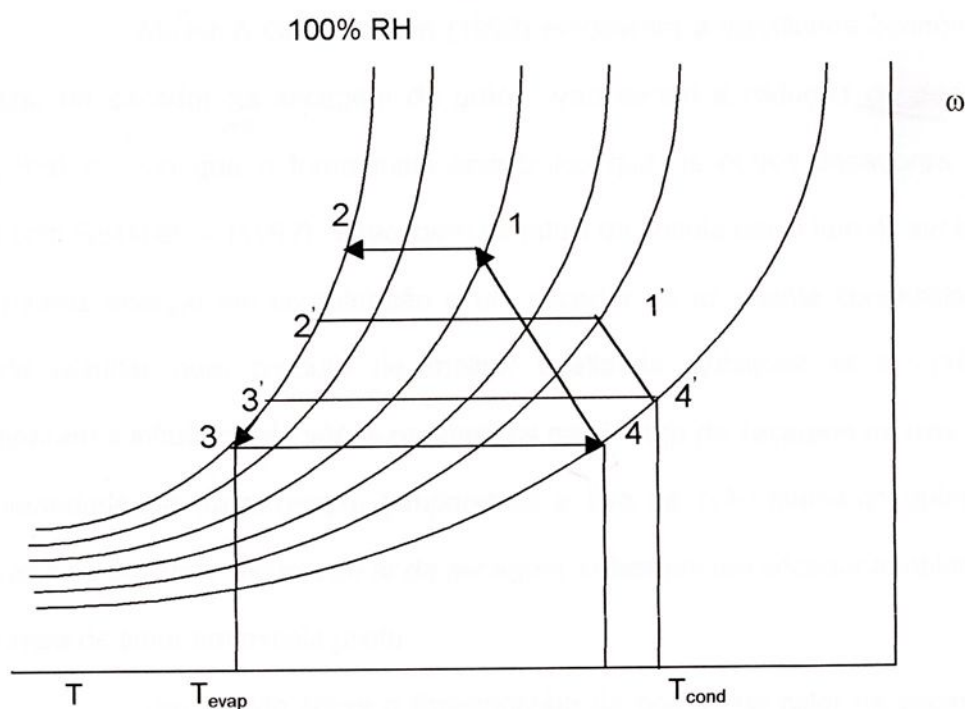
De acordo com a Figura 2.4(b), o ar sai do secador na condição 1 e entra no evaporador, diminuindo sua temperatura e tornando-se saturado (100% de umidade relativa, estágio 2). Como a temperatura é reduzida ao longo da linha de saturação (2-3), a umidade é condensada, causando o efeito da desumidificação. O ar desumidificado passa pelo condensador, aumentando sua temperatura para entrar no secador (fase 4). Observa-se na Figura 2.4(b) que o grau de desumidificação depende da temperatura de evaporação (T_{evap}). A temperatura do ar que entra no secador depende da temperatura de condensação (T_{cond}) do fluido de funcionamento da bomba de calor. Obviamente, baixas temperaturas de evaporação e altas de condensação são requeridas para a obtenção de um efetivo processo de desumidificação.

No secador, a taxa de umidade removida do produto depende da temperatura e da umidade relativa do ar de processo. No início da secagem, quando o produto está úmido, a alta taxa de secagem é representada pelo ciclo 1-2-3-4-1 na Figura 2.4(b). Por outro lado, a baixa taxa de secagem resulta na recuperação de um alto calor sensível, e baixa desumidificação, como no ciclo 1'-2'-3'-4'-1'. As

propriedades do ar de processo mudam com a taxa de secagem, como mostra o estado 4-4'.



(a)



(b)

Fig. 2.4: Secador com bomba de calor (E = evaporador, C = condensador, S = secador) (a) Disposição dos componentes (b) Ar de processo na carta psicrométrica

As condições ambientais exercem uma grande influência no desempenho deste tipo de secador (Prasertsan e Saen-Saby, 1998). Caso ocorram mudanças nessas condições, a operação deve ser adequadamente alterada para manter o desempenho.

Perera & Rahman (1997) lembram que esta tecnologia, ao trabalhar em circuito fechado, não emite gases para a atmosfera. O condensado e os voláteis nele contidos podem ser recuperados. Os mesmos autores afirmam que os sistemas secador-bomba de calor-desumidificador são mais apropriados para operações em batelada do que em operações contínuas, pois permitem recirculação total com baixo vazamento de ar, proporcionando aumento na eficiência térmica.

Meyer & Greyvenstein (1992) estudaram a viabilidade econômica deste tipo de secador na secagem de grãos. Verificaram a redução do período operacional mínimo que o torna mais econômico que os outros secadores. De acordo com Rossi et al. (1992), a secagem de fatias de cebola neste tipo de secador exigiu menos energia em comparação a um secador de ar quente convencional, além de resultar num produto de melhor qualidade. Vázquez et al. (1997) determinaram a influência de vários parâmetros na cinética de secagem de uva, tais como variedade da fruta, tempo, temperatura e tipo de pré-tratamento químico, temperatura e umidade relativa do ar de secagem, utilizando um secador acoplado a uma bomba de calor em escala piloto.

Um estudo sobre o desempenho da bomba de calor na secagem de produtos agrícolas foi realizado por Prasertsan & Saen-Saby (1998), que discutiram também o custo da utilização deste tipo de secador em comparação com

outras fontes de calor. Rahman et al. (1998) desenvolveram dois modelos exponenciais em função da temperatura e da umidade relativa do ar para prever o conteúdo de umidade na secagem de ervilhas utilizando um sistema com bomba de calor.

Braun et al. (2002), compararam o desempenho de um secador - bomba de calor com um secador elétrico convencional para secagem de roupas, e observaram que o primeiro ofereceu uma melhora de até 40% na eficiência energética.

2.2.1. Critérios para Avaliação do Desempenho de Bombas de Calor

A finalidade de qualquer sistema de refrigeração é trocar calor tanto quanto possível de um reservatório a baixa temperatura, com o mínimo gasto possível de trabalho. Pode-se dizer que a “potência efetiva” corresponde ao calor trocador do reservatório a baixa temperatura, enquanto a “potência aplicada” é o trabalho exercido pelo compressor. Por isso, uma medida conveniente do desempenho de um refrigerador é expressa pelo coeficiente de performance, COP, também chamado de coeficiente de performance ou razão de energia refrigerante, onde:

$$\text{COP}_R = \frac{\text{calor extraído do reservatório a baixa temperatura}}{\text{trabalho feito sobre o refrigerante}}$$

Se a máquina tiver, por exemplo, um coeficiente de desempenho (COP) igual a 4, tem-se:

$$\text{COP}_R = \frac{Q_{\text{entra}}}{W} = 4$$

$$Q_{\text{entra}} = Q_{\text{sai}} - W$$

em consequência:

$$\frac{Q_{\text{sai}}}{W} = 5,$$

de forma que o calor transferido do fluido refrigerante ao corpo a alta temperatura é igual a cinco vezes o trabalho realizado. Se o trabalho for fornecido por um motor elétrico, para cada joule de energia fornecida, 5 J de calor serão liberados; ao passo que se 1J de energia elétrica fosse dissipado em um resistor, poder-se-ia obter no máximo 1J de calor. Em consequência, parece ser sumamente vantajoso aquecer um ambiente resfriando-se os arredores.

Na avaliação de uma bomba de calor considera-se tradicionalmente o COP de aquecimento, ou $\text{COP}_{\text{AQ,EF}}$. É definido como a relação entre o calor transferido no condensador, usado para aquecer o fluido de processo, e o trabalho mecânico fornecido ao compressor. Desprezando-se as perdas de carga e trocas de calor na tubulação e acessórios e aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica, o calor trocado no condensador é igual à soma do calor trocado no evaporador com o calor equivalente ao trabalho de compressão. Assim, o COP de aquecimento de uma bomba de calor é sempre maior que 1 e aumenta, principalmente, com a redução da diferença entre as temperaturas de condensação e de evaporação (Rossi, 1993).

Dadas às condições de operação de uma bomba de calor de simples estágio operando com halogenados, utilizada na secagem de alimentos a baixas temperaturas, os valores médios do COP de aquecimento têm se situado

entre 3 e 6, diminuindo, no entanto, em praticamente 50% quando se leva em consideração o trabalho fornecido para movimentar os ventiladores do sistema (Rossi, 1993).

Feng & Berntsson (1997) apresentam os coeficientes de desempenho de várias bombas de calor em aplicações em escala industrial (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Coeficiente de desempenho de várias bombas de calor

	Compressão elétrica			Recompressão	Recompressão	Absorção
	R22	R12, R500	R114	mecânica de vapor	térmica de vapor	
COP	2,5-2,7	2,6-2,8	3,0-3,2	2,3-2,5	1,1-1,2	1,3-1,6

Do ponto de vista do desempenho da bomba de calor via análise energética, é interessante que o COP seja o maior possível, já que o mesmo representa a taxa de conversão da energia mecânica fornecida em energia térmica utilizada no aquecimento do ar.

Embora seja usual determinar a eficiência da bomba de calor pelo valor do COP, alguns autores sugerem que, no caso de haver desumidificação do ar de secagem, é mais apropriado medir a quantidade de água condensada por unidade de energia consumida (Perera & Rahman, 1997). Nesse caso utilizam-se a taxa de extração de umidade do sistema (MER, $\text{kgH}_2\text{O h}^{-1}$) e a taxa de extração de umidade específica (SMER, $\text{kgH}_2\text{O kW}^{-1} \text{h}^{-1}$). MER indica a capacidade de secagem ou a taxa de processamento, enquanto SMER refere-se à eficiência de energia

requerida no processo de secagem. O SMER para um bom “design” do desumidificador está na faixa de $1\text{--}4 \text{ kgH}_2\text{O kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$, com um valor médio de $2,5 \text{ kgH}_2\text{O kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Perera & Rahman, 1997). Um secador com bomba de calor, semelhante ao apresentado na Figura 2.4(a), forneceu valores de SMER de $0,57 \text{ kg/kW h}$ e $1,02 \text{ kg/kW h}$ para temperaturas do ar de secagem de 50°C e 80°C , respectivamente (Prasertsan e Saen-Saby, 1998). Para desumidificar e pré-aquecer o ar de processo, Prasertsan et al. (1994) utilizaram uma bomba de calor (similar à de Rossi et al., 1992) e obtiveram um aumento substancial no valor de MER com um tempo de secagem significativamente menor em relação a um sistema sem o auxílio da bomba de calor.

2.3. Tomate

O tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) pertence à família das solanáceas. Foi descoberto por volta de 1540 no sul do México.

Inicialmente de coloração amarela, era utilizado pelos índios mexicanos como planta ornamental devido à beleza de seu fruto, que encantou também os colonizadores europeus. Foi levado para a Itália com o nome de pomodoro (fruto de ouro). Em 1750, já com a coloração avermelhada devido às variações do clima europeu, foi para os Estados Unidos, ainda como planta ornamental, tornando-se alimento no século XIX.

No Brasil, o cultivo do tomate iniciou-se na virada do século, tendo se desenvolvido posteriormente com a chegada dos japoneses. As primeiras tentativas de produção de tomate como hortaliça, por um grupo de agricultores

japoneses em Mogi das Cruzes, datam de 1925. Uma das causas de sua rápida expansão foi a popularização da comida italiana, feita à base de tomate como tempero. Além disso, a redução cada vez maior do custo do tomate fez com que o consumo se estendesse para as camadas mais pobres. A produção chegou a crescer de tal forma que houve a necessidade de industrializar a produção, gerando o extrato de tomate. Hoje, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais, junto com Estados Unidos, Itália, Turquia, Espanha, Egito e México. Segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2001 sua área cultivada foi de 56.866 ha com uma produção de 3.004.797 toneladas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor brasileiro.

O tomate é uma hortaliça de grande importância nutricional e econômica (Tabela 2.2). Segundo Salunkhe & Desai (1984), tomando-se um grupo de 10 vitaminas e minerais, o tomate é o décimo sexto em concentração desses nutrientes, mas o primeiro em sua contribuição para a dieta. Carvalho (1980) relata que o valor nutricional do tomate pode ser atribuído quase que totalmente à vitamina C, pois os demais constituintes se apresentam em teores tão baixos que não o tornam fonte significativa desses nutrientes na alimentação (Costa & Caixeta Filho, 1996).

De acordo com Gould (1991) e Stevens (1985), citados por Camargo & Queiroz (1999a), o tomate contém cerca de 93 a 94% de água, sendo que o constituinte orgânico que prevalece é o açúcar. Os teores de açúcares redutores (frutose e glicose) correspondem à cerca de 50 a 65% da matéria seca do fruto e mais de 95% dos açúcares, ocorrendo em quantidades aproximadamente

iguais. A sacarose, quando presente nos tomates frescos, encontra-se em níveis baixos. Os componentes estruturais da fruta (sólidos insolúveis em álcool) também são constituintes importantes e representam cerca de 20% da matéria seca.

Tabela 2.2: Composição Nutricional do Tomate (100g)

Nutrientes	Teor
Água (%)	95,30
Energia (cal)	22,00
Proteína (%)	1,10
Ácidos Graxos (%)	0,20
Carboidratos (%)	4,70
Cálcio (mg)	13,00
Fósforo (mg)	27,00
Ferro (mg)	0,50
Sódio (mg)	3,00
Potássio (mg)	244,00
Magnésio (mg)	14,00
Vitamina A (UI)	900,00
Tiamina (mg)	0,06
Riboflavina (mg)	0,04
Niacina (mg)	0,70
Vitamina C (mg)	23,00

Fonte: Salunke; Bolin, Reddy (1991).

Quanto às condições de plantio e comercialização, distinguem-se duas categorias de tomate: o de cultura estaqueada e o de cultura rasteira. O primeiro destina-se ao consumo de mesa ou *in natura* e constitui a maior parte do produto comercializado no varejo. Seu custo de produção é maior, porém apresenta

maior produtividade. O de cultura rasteira é destinado à indústria e foi introduzido no Brasil a partir de 1970, pois a qualidade industrial do tomate estaqueado não era satisfatória (Costa & Caixeta Filho, 1996; Minami & Haag, 1989).

Tanto o tomate estaqueado quanto o rasteiro dividem-se em grupos ou tipos, caracterizados principalmente pelo formato, tamanho e coloração dos frutos. Cada grupo ou tipo de tomate inclui diversos cultivares.

De acordo com Minami & Haag (1989), as variedades da cultura estaqueada são classificadas em: a) grupo Santa Cruz e b) grupo Salada ou Caqui. Camargo Filho et.al. (1996) identificam os "grupos" como "tipos" e incluem um terceiro tipo, o Longa Vida, de desenvolvimento mais recente. Segundo estes autores, as variedades de tomate estaqueado mais difundidas são:

- Tipo Santa Cruz: Santa Clara (80%), Ângela Gigante, Kada e híbridos Débora Plus e Cláudia.
- Tipo Caqui: Oishi, Ogata, Fukuyu, Carmelo e Irazu; especiais para saladas.
- Tipo Longa Vida: híbridos Carmen, Débora e Diva, EF-49, EF-50 e Olimpo, do tipo cereja, mini Carol e Pepe; próprias para salada com boa aparência e mais resistentes à temperatura ambiente e viagens.

Para o tomate de cultura rasteira (industrial), a classificação mais usada é quanto à forma dos frutos (Minami & Haag, 1989):

- Periforme (tipo Pêra): Ventura, Napoli VF, Chico III, Petopeel, RomaVF.
- Longo: San Marzano, VF 65-433.
- Oval: Rio Grande, Máster 72.
- Globoso: Peto MH-1, Peto EARLY, Heinz 2274.



- Redondo: Campbell-35, Hyround 248.
- Quadrado: Red River, Petomech, Cal-J, Earlymech, Euromech.

A Figura 2.5 mostra frutos de cultura rasteira (tipo Pêra) e de cultura estaqueada (tipo Santa Cruz).

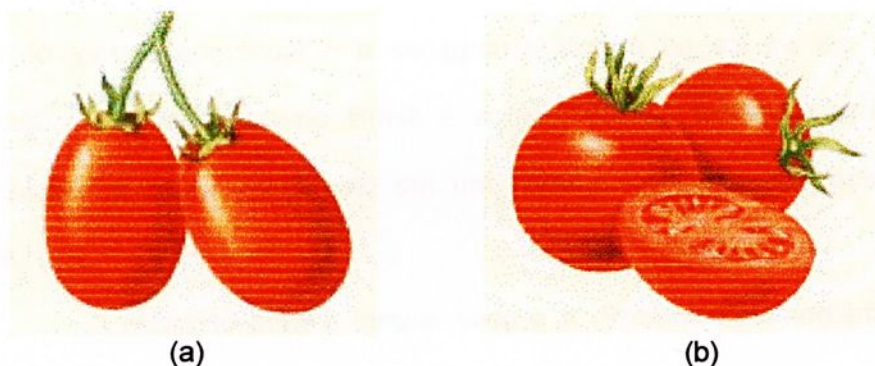


Fig. 2.5: (a) Tomate do tipo Pêra e (b) Tomate do tipo Santa Cruz.

2.3.1. Tomate Seco

Como uma das mais importantes matérias-primas para a agroindústria brasileira, o tomate é base para uma grande quantidade de produtos industrializados, dentre eles alguns bem difundidos no Brasil, como purê, polpa concentrada, extrato, catchup, molhos e sucos. Por outro lado, sua desidratação ainda não é realizada em grande escala. Há algum tempo, porém, algumas mudanças na política de importação fizeram com que a população brasileira tivesse contato com uma grande variedade de produtos tradicionalmente consumidos em outros países, como é o caso do tomate seco, bastante popular na Itália.

Segundo Murari (2000) o tomate seco é um produto diferenciado, tanto no aspecto do processamento como na comercialização. Trata-se de tomates

não inteiros desidratados até umidade intermediária, onde se obtém uma textura macia, sendo então imersos em óleo vegetal e temperados com sal, alho, orégano e outros condimentos. No Brasil, por tratar-se de um produto relativamente novo, o processamento é feito por pequenas e microempresas, em geral próximas às regiões produtoras. Os métodos utilizados são bastante artesanais, onde a preparação do tomate é manual e a secagem realizada ao sol ou em fornos convencionais. O tomate seco no Brasil é consumido em forma de aperitivo, guarnição, pizzas e como ingrediente em um número crescente de receitas e formulações.

O mercado para o tomate seco e a umidade intermediária vem crescendo consideravelmente, mas os produtos disponíveis não possuem uma boa qualidade visual, sensorial e nutricional. Ainda não se encontram disponíveis, de forma organizada, dados ou recomendações sobre os parâmetros mais adequados ao processo, tais como variedade ideal, temperatura adequada de secagem, tipo de corte indicado para o fruto e teor de umidade final. Entretanto, o número de pesquisas sobre o assunto tem aumentado e é possível encontrar informações importantes sobre o processo.

As características químicas que têm sido reportadas como importantes indicadores da aptidão do tomate à secagem compreendem o conteúdo de sólidos totais, a acidez total e o conteúdo de sólidos insolúveis. Dentre estes parâmetros, o conteúdo de sólidos totais é o mais importante, pois está relacionado ao rendimento do processo. Por outro lado, os parâmetros de acidez e conteúdo de açúcares podem estar relacionados com a preferência do consumidor. Camargo e

Queiroz (1999a) investigaram a aptidão de diferentes variedades de tomate estaqueado para a secagem considerando suas características químicas, sendo que as variedades Débora Plus e Santa Clara (ambos do tipo Santa Cruz) apresentaram maiores teores de sólidos solúveis e melhores índices brix/acidez total, diferindo significativamente da variedade Carmen (tipo Longa Vida). Dentre as variedades estudadas, Santa Clara e Débora Plus mostraram-se mais adequadas à secagem.

Hawlder et al. (1991) determinaram a influência de diferentes temperaturas (40 a 80°C) e velocidades do ar (0,4 a 1,8 m/s) na cinética de secagem de fatias de tomate, concluindo que as taxas de secagem aumentaram com o aumento da temperatura e da velocidade do ar. Giovanelli et al. (2002) utilizaram a mesma abordagem sugerida por Hawlder et al. (1991) para contornar os problemas causados pelo encolhimento na modelagem da cinética de secagem de diferentes produtos de tomate (polpa, metades e polpa enriquecida em sólidos insolúveis). Através do uso de uma espessura variável, expressa em função da umidade, foi possível ajustar a solução da segunda lei de Fick para placa plana aos dados experimentais de secagem.

Um dos primeiros trabalhos sobre parâmetros de secagem de tomate foi publicado por Olorunda et al. (1990). Os autores observaram maiores taxas de secagem com o aumento da temperatura no intervalo de 60 a 80°C, para a velocidade do ar fixa em 1,75 m/s. Também verificaram que a secagem com fluxo de ar cruzado foi mais eficiente que com fluxo paralelo, o que foi atribuído à maior eficiência de contato da massa total de ar com o produto no caso do fluxo cruzado. Finalmente observaram que os tomates secos apresentavam melhor aparência

quando as fatias eram pré-tratadas em uma solução de cloreto de sódio por 3 minutos antes da secagem.

Camargo & Queiroz (1999b) concluíram que o pré-tratamento com cloreto de sódio e sacarose aplicado diretamente sobre quartos de tomate, seguido de secagem em estufa a 60°C, resultou em menor tempo de secagem que o necessário para tomates sem pré-tratamento.

Uma série de outros trabalhos publicados aborda a qualidade do tomate desidratado que, quando seco em condições inadequadas, sofre escurecimento e tem baixa capacidade de reidratação (Tripathi & Nath, 1989). Mais recentemente, tem havido grande interesse na preservação das qualidades nutricionais do produto, uma vez que o tomate apresenta significativos teores de licopeno e ácido ascórbico, substâncias associadas à prevenção de algumas patologias (Zanoni et al., 1999). Nesse sentido, várias modalidades de pré-tratamentos e/ou processos de secagem têm sido estudados.

Zanoni et al. (1999) verificaram que durante a secagem convectiva do tomate em metades, ocorreu uma severa oxidação do ácido ascórbico. Por outro lado, os teores de licopeno apresentaram boa estabilidade, mesmo quando a secagem foi conduzida a 110°C.

Também com o objetivo de estudar a retenção de licopeno, Shi et al. (1999) compararam diferentes métodos de secagem de tomate e concluíram que o tratamento osmótico favoreceu a manutenção de praticamente todo o licopeno presente na matéria-prima, enquanto que a secagem em condições atmosféricas levou à degradação do mesmo através da isomerização e oxidação.



Outros autores que estudaram a desidratação osmótica do tomate foram Igarashi & Kieckbusch (1998) e Murari (2000), que utilizaram misturas de NaCl e sacarose, e Shi et al. (1997), que desidrataram tomates inteiros em soluções de sacarose.

Lewicki et al. (2002) testaram a adição de cloreto de cálcio (CaCl_2) no pré-tratamento osmótico de quartos de tomate em soluções de sacarose, seguido de secagem convectiva a 60°C . Estes autores concluíram que a adição de CaCl_2 aumentou as taxas de desidratação osmótica e facilitou a infiltração de sacarose, porém teve como efeito negativo o aumento da rigidez da estrutura, que por sua vez prejudicou a reidratação do produto.

Nenhum trabalho comparando secadores resistivos e com bomba de calor sobre a secagem de tomates, foi encontrado na literatura.



3. OBJETIVOS

- 1) Construção de um sistema de secagem utilizando bomba de calor com base no sistema mecânico por compressão de vapor operando com R22.
- 2) Avaliação do desempenho deste sistema no condicionamento de ar para a desidratação de quartos de tomate, visando à melhoria da qualidade do produto final, medida neste caso, através de curvas de compressão, densidade aparente em função da umidade adimensional e índice de reidratação do material seco.
- 3) Comparação do desempenho entre a secagem com bomba de calor e com o uso de resistências elétricas para o condicionamento do ar.



4. EQUIPAMENTOS

Para comparar a secagem com baixas umidades relativas, através do uso da bomba de calor, com a secagem a ar quente não desumidificado, em secadores resistivos, os ensaios de secagem foram conduzidos em três equipamentos distintos:

- Secador acoplado a uma bomba de calor - BC.
- Secador de resistências elétricas, de fluxo cruzado - CR.
- Secador de resistências elétricas, de fluxo paralelo - PR.

Com o objetivo de evitar que ensaios de secagem fossem realizados em dias que apresentassem umidades relativas diferentes, prejudicando a comparação entre o desempenho dos equipamentos, procurou-se trabalhar com os três secadores simultaneamente, utilizando os mesmos valores de temperatura e velocidade adotados para o secador BC. A seguir apresenta-se uma breve descrição de cada um dos secadores utilizados.

4.1. Secador Acoplado a uma Bomba de Calor (BC)

O secador acoplado a uma bomba de calor (Figura 4.1) foi construído no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA), localizado no Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da UNESP – Campus de São José do Rio Preto. Trata-se de dois sistemas distintos funcionando em conjunto, os quais serão detalhados separadamente.



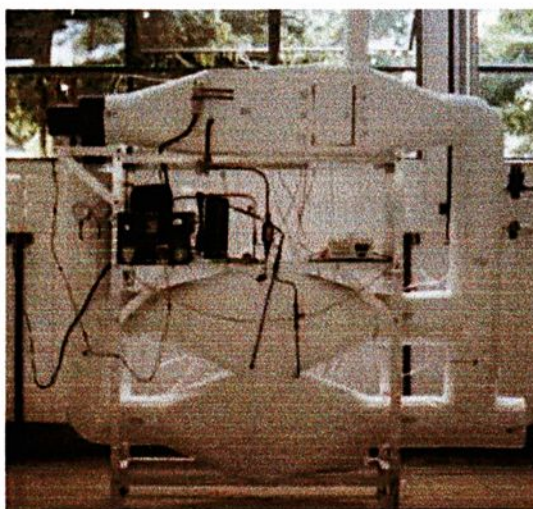


Fig. 4.1: Bomba de calor acoplada a câmara de secagem.

4.1.1. Bomba de Calor

O circuito da bomba de calor foi construído com base em um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, sendo utilizado como refrigerante o R22. O sistema consiste basicamente de um compressor hermético, dois condensadores, uma válvula termostática e um evaporador, conectados por tubulação de cobre, de acordo com a Figura 4.2.

Diversos elementos foram instalados no circuito do refrigerante, tais como manômetros para verificação da pressão de entrada e saída do compressor, válvula de expansão termostática com equalizador externo de pressão, filtro de linha, visor de líquido e garrafa de refrigerante. A localização desses elementos também é mostrada na Figura 4.2.

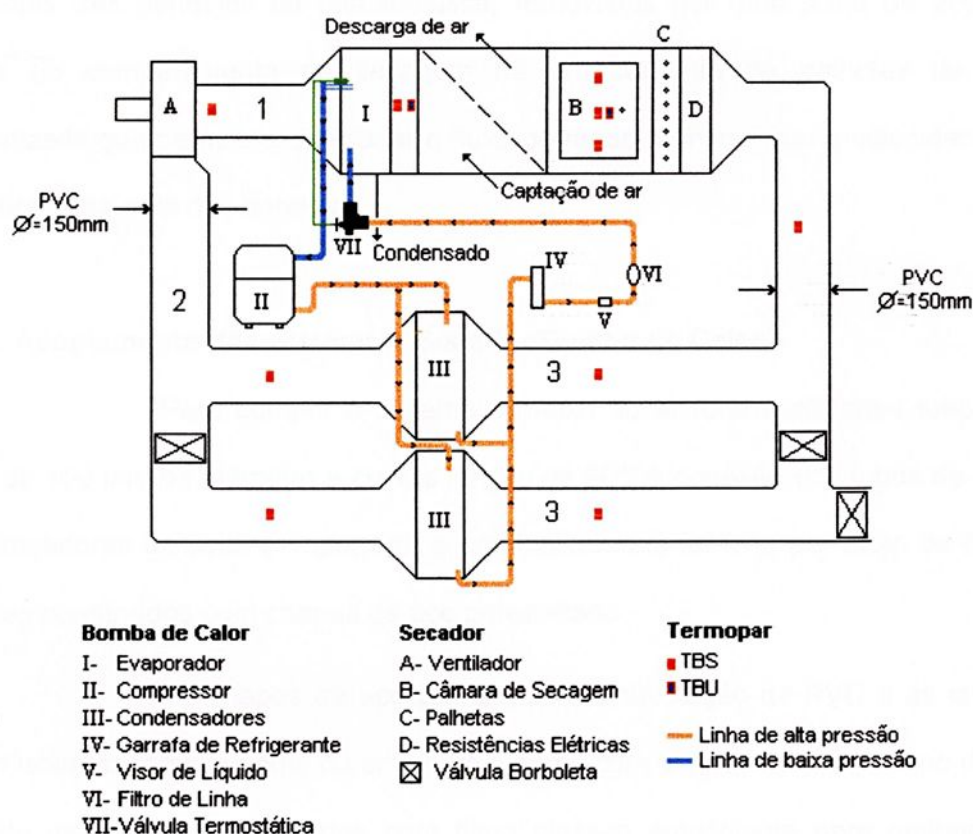


Fig. 4.2: Esquema da instalação da bomba de calor acoplada ao secador.

4.1.2. Secador

O secador consiste de três seções básicas: seção de aquecimento, seção de direcionamento do ar e compartimento de secagem. Um conjunto de resistências elétricas foi incluído para possibilitar o aumento da temperatura na câmara de secagem caso a bomba de calor não fosse suficiente para aquecer o ar até a temperatura desejada.

A câmara de secagem é do tipo horizontal com fluxo de ar paralelo em relação ao material a ser seco, como mostra a Figura 4.2. Em seu interior estão

dispostas três bandejas de tela metálica, removíveis por uma porta de acesso. Antes do compartimento de secagem há um conjunto de palhetas de aço galvanizado que permitem direcionar o fluxo de modo a uniformizar a velocidade do ar sobre cada uma das bandejas.

4.1.3. Acoplamento dos Sistemas: Secador/Bomba de Calor

Para compor o sistema de fluxo do ar foram utilizados tubos de PVC de 150 mm de diâmetro e curvas longas de 90°. A conexão dos tubos de PVC aos trocadores de calor (evaporador e condensadores) foi feita por meio de dutos cônicos construídos com chapas de aço galvanizado.

As chapas de aço galvanizado, a tubulação de PVC e as curvas foram isoladas termicamente do ambiente externo com chapas de poliestireno de 20 mm de espessura e recobertas com filme plástico autocolante para melhorar a aparência.

Na base do evaporador foi instalada uma bandeja destinada a recolher o condensado proveniente do resfriamento do ar atmosférico, o qual é descartado através de uma mangueira plástica.

A movimentação do ar é realizada por meio de um ventilador centrífugo, sendo a velocidade do fluxo determinada por um anemômetro de palhetas. O controle da vazão de ar é feito manualmente, através de válvulas do tipo borboleta instaladas nas posições indicadas na Figura 4.2.

Durante ensaios preliminares procurou-se variar a velocidade do ar na câmara de secagem com auxílio de um variador de frequência. Entretanto,

quando se utilizavam velocidades em torno de 1 a 2 m/s, o que corresponde a valores comumente usados em secadores convectivos, observou-se o superaquecimento do fluido refrigerante, causado pela insuficiência de troca térmica no condensador. Esse superaquecimento culminava no travamento do compressor. Tal limitação foi superada com a instalação de um conjunto de palhetas de aço galvanizado imediatamente antes do compartimento de secagem. As palhetas, que em conjunto formam uma espécie de persiana, são independentes entre si e podem ser posicionadas em diferentes inclinações, permitindo o direcionamento do fluxo de modo que se tenha um valor conveniente e uniforme de velocidade do ar sobre as bandejas de secagem. Assim era possível operar o equipamento com um fluxo de ar suficientemente alto para a completa liquefação do refrigerante no condensador e, ao mesmo tempo, estabelecer a velocidade do ar de secagem em um nível mais baixo.

Também se observou que durante as tentativas de recirculação do ar de secagem, devido ao contínuo recebimento da energia térmica correspondente ao trabalho de compressão do refrigerante, o ar recirculante sofria um aquecimento progressivo. Dessa forma, ao passar pelo evaporador, a entalpia cedida pelo ar, além de evaporar completamente o refrigerante, era suficiente para superaquecê-lo, ocasionando o travamento do compressor. Optou-se então, pela operação com fluxo de ar completamente aberto, o que se tornou possível pela instalação de uma chapa de aço galvanizado inclinada em 45° entre a câmara de secagem e o evaporador, fazendo com que o ar úmido fosse descartado e a captação ocorresse somente com ar ambiente.

Temperaturas de bulbo seco foram medidas através de termopares de cobre-constantan instalados nos locais indicados na Figura 4.2 e calibrados de acordo com o Apêndice A. A umidade relativa, no ambiente e na entrada da câmara de secagem foi medida por termo-higrômetros conectados a uma estação meteorológica portátil (Oregon Scientific, modelo WMR918).

Um multímetro (Minipa, modelo ET2700) foi utilizado para medir a corrente total do sistema. Procedimento análogo não pôde ser utilizado para o compressor, pois o amperímetro instalado apresentou-se pouco confiável devido às vibrações provenientes do conjunto secador/bomba de calor que interferiam em sua leitura. Foram então realizadas leituras periódicas da corrente dos demais componentes do sistema (ventilador centrífugo e ventilador axial) e, por eliminação, foi determinada a corrente consumida pelo compressor. A partir desses valores, determinou-se a potência do compressor ($\dot{W}_{CP}$) e dos ventiladores.

4.1.4. Avaliação do Desempenho do Sistema Secador/Bomba de Calor

A avaliação do desempenho do sistema foi feita com base nos parâmetros descritos abaixo.

a) *Capacidade de aquecimento do ar* ($\dot{Q}_{AQ}$), dada por:

$$\dot{Q}_{AQ} = \dot{m}_{AR} C_{p_{AR}} (T_3 - T_2) \quad (4.1)$$

onde

$\dot{m}_{AR}$ = vazão mássica de ar através do condensador

$C_{p_{AR}}$ = calor específico do ar

T_2, T_3 = temperaturas do ar na entrada e saída do condensador (os índices referem-se à Figura 4.2).

b) *Coeficiente de desempenho efetivo ($COP_{AQ,EF}$) de aquecimento, dado por:*

$$COP_{AQ,EF} = \frac{\dot{Q}_{AQ}}{\dot{W}_{CP}} \quad (4.2)$$

c) *Aumento do potencial de secagem do ar ambiente, r , calculado por (Rossi, 1993):*

$$r = \frac{(\Delta W_{BC})}{(\Delta W_{AMB})} \quad (4.3)$$

ou

$$r = \frac{(W_{BC,SAT} - W_{BC})}{(W_{AMB,SAT} - W_{AMB})} \quad (4.4)$$

onde:

W_{BC} = Umidade absoluta do ar na saída da bomba de calor.

$W_{BC,SAT}$ = Umidade absoluta do ar saturado, com a mesma entalpia do ar na saída da bomba de calor.

W_{AMB} = Umidade absoluta do ar ambiente.

$W_{AMB,SAT}$ = Umidade absoluta do ar saturado, com a mesma entalpia do ar ambiente.

d) *Economia de energia elétrica no condicionamento do ar de secagem, em relação a um hipotético sistema de condicionamento do ar por resistência elétrica (RE).*



Para este cálculo, admitiu-se que o ar aquecido possuísse o mesmo potencial de secagem, isto é, que a variação das umidades do ar condicionado por energia elétrica fosse igual ao condicionamento via bomba de calor. A energia elétrica consumida pela bomba de calor ($\dot{W}_{BC}$) foi determinada conforme descrito no item 4.1.3. A energia estimada para o sistema com resistências elétricas ($\dot{W}_{RE}$) foi calculada pela seguinte equação:

$$\dot{W}_{RE} = \frac{\dot{m}_{AR} C_{p_{AR}} (T_3^* - T_1)}{\eta_{RE}} \quad (4.5)$$

onde:

η_{RE} = eficiência eletro-térmica do trocador de calor = 0,80 (Rossi, 1993).

T_1 = temperatura do ar ambiente

T_3^* = temperatura do ar de secagem necessária para promover o mesmo potencial de secagem que o secador BC. A temperatura T_3^* é estimada por uma carta psicrométrica, considerando que a variação da umidade absoluta do ar condicionado por resistência elétrica e submetido por um processo de saturação adiabática, ΔW_{RE} (eq. 4.6) deveria ter o mesmo valor que ΔW_{BC} (ver eq. 4.3).

$$\Delta W_{RE} = (W_{RE,SAT} - W_{AMB}) = \Delta W_{BC} \quad (4.6)$$

onde $W_{RE,SAT}$ é a umidade absoluta do ar saturado com a mesma entalpia do ar com umidade W_{AMB} e temperatura T_3^* .

4.2. Secador de Resistências Elétricas com Fluxo de Ar Cruzado (CR)

O secador convectivo, aquecido por resistências elétricas, com fluxo de ar cruzado em relação às bandejas de produto (Figura 4.3) foi construído no DETA, já tendo sido utilizado em trabalhos anteriores.

O ar é forçado por meio de um ventilador axial, sendo a vazão controlada por um variador de tensão que permite um ajuste fino na mesma. A velocidade do ar é medida por um anemômetro de palhetas. Um conjunto de resistências elétricas é utilizado para o aquecimento, sendo a potência controlada por um variador de tensão que permite um ajuste fino de temperatura. A conexão entre as seções de movimentação e aquecimento do ar com a câmara de secagem é feita por uma curva em ângulo de 90° construída em chapas de aço, fazendo com que o ar escoe perpendicularmente às bandejas de tela de arame galvanizado que suportam o produto.

As temperaturas de bulbo seco dentro e fora da câmara de secagem foram determinadas por termo-higrômetros conectados à estação meteorológica portátil (Oregon Scientific, modelo WMR918). A umidade relativa do ar ambiente foi medida pelo mesmo equipamento, enquanto a umidade relativa no compartimento de secagem foi determinada pela carta psicrométrica a partir da temperatura de bulbo seco e umidade relativa em condições ambientes.

4.3. Secador de Resistências Elétricas com Fluxo de Ar Paralelo (PR)

O secador convectivo, aquecido por resistências elétricas, com fluxo de ar paralelo às bandejas de produto (Figura 4.4) foi construído a partir de um

equipamento já existente no DETA, similar ao descrito no item anterior, e do qual foram aproveitadas as seções de movimentação e aquecimento do ar, modificando-se apenas a disposição da câmara de secagem, que passou a ocupar a posição horizontal. Todos os elementos de operação, controle e medição são similares aos do secador CR.

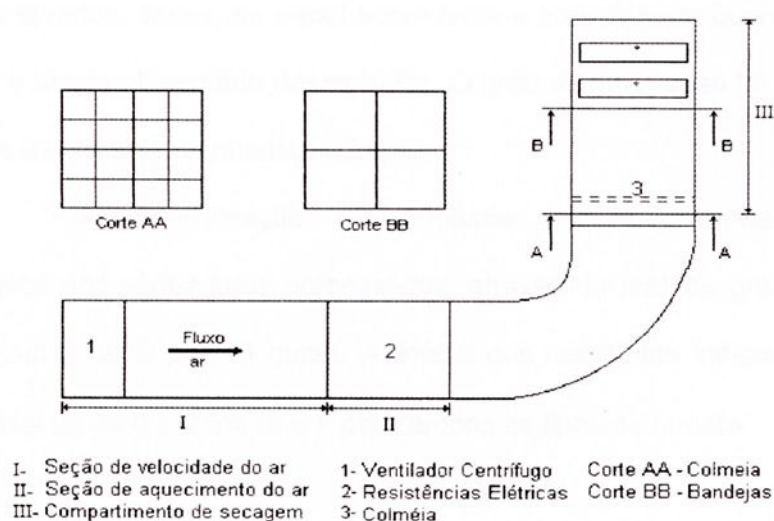


Fig. 4.3: Esquema do secador convectivo com fluxo de ar cruzado (vista lateral).

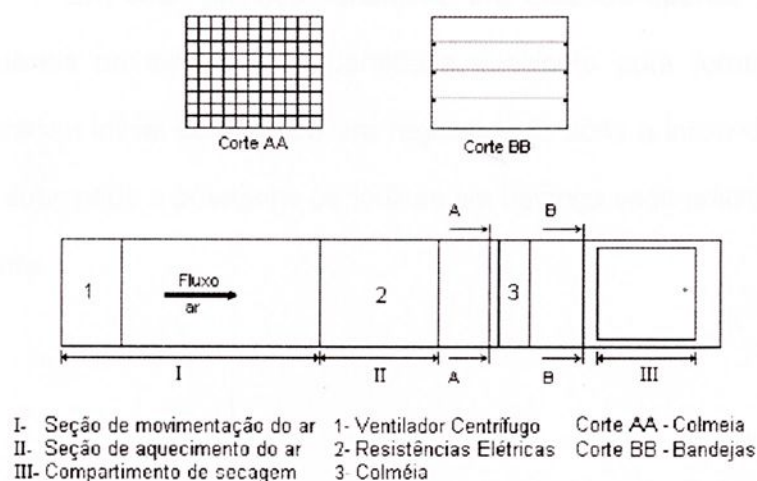


Fig. 4.4: Esquema do secador convectivo com fluxo de ar paralelo (vista lateral).

5. METODOLOGIA

5.1. Matéria-prima

Os tomates (*Lycopersicon esculentum* Mill.) dos tipos Pêra e Santa Cruz foram adquiridos no mercado local poucas horas antes do processamento. Os frutos foram lavados, secos em papel absorvente e cortados em quartos, sendo as sementes e o tecido placentário descartados. O grau de maturação foi avaliado pela textura firme e coloração vermelha uniforme.

A determinação da umidade inicial foi feita em frutos representativos dos vários lotes processados, através do método gravimétrico, em estufa a vácuo a 60°C por 48 horas. A média dos resultados indicou um teor de umidade inicial de $94,0 \pm 0,5\%$ (b.u.), para ambos os tipos de tomate.

5.2. Cinética de Secagem

Em cada um dos secadores era utilizada apenas uma bandeja, contendo quartos de tomate em quantidade suficiente para formar uma única camada. A massa inicial de amostra era registrada e, após o início da secagem, a bandeja era submetida a pesagens periódicas em balança semi-analítica, até atingir peso constante.



5.3. Densidade Aparente

Curvas de densidade aparente em função do conteúdo de umidade foram construídas a partir da medida do volume individual de amostras retiradas do secador em diferentes tempos de secagem.

Para as medidas de volume empregou-se o método de deslocamento de fluido. Uma proveta de 100 ml era parcialmente cheia de toluol, sendo o volume inicial anotado. Uma amostra de tomate, de massa conhecida, era completamente imersa no líquido e o volume final do sistema registrado, permitindo o cálculo da densidade aparente do material.

5.4. Reidratação

O índice de reidratação foi determinado em amostras desidratadas até peso constante. Aproximadamente 100 ml de água destilada eram aquecidos até a fervura, sendo então acrescentadas 5 fatias de tomate, previamente pesadas. Após 5 minutos de fervura, as fatias eram retiradas da água, levemente enxugadas em papel absorvente e deixadas em repouso no ar ambiente por 10 minutos. As amostras eram pesadas novamente e o índice de reidratação determinado por:

$$\text{índice de reidratação} = \frac{\text{massa da amostra reidratada}}{\text{massa da amostra seca}} \quad (5.1)$$

5.5. Análise de Textura

Amostras de tomate desidratadas até peso constante foram colocadas em dessecadores contendo solução supersaturada de cloreto de sódio (NaCl, URE = 75%) e armazenadas em sala com temperatura ao redor de 25°C por



tempo suficiente (4 semanas) para atingir a umidade de equilíbrio. Tal metodologia foi utilizada por Gabas, *et. al.* (2002), ao estudarem as propriedades reológicas de ameixas secas.

A textura das amostras foi então analisada no texturômetro TA-XT2i Texture Analyser (Stable Micro Systems) através de testes de compressão, medindo-se a força necessária para a perfuração das amostras por uma sonda ("probe") cilíndrica de 3 mm de diâmetro.

Os testes de compressão foram feitos em amostras individuais, colocadas em um dispositivo confeccionado especialmente para esse fim (Figura 5.1). Esse dispositivo consistia de um pequeno cubo de alumínio maciço com um orifício central de 14 mm de diâmetro e 20 mm de profundidade, provido de uma tampa também perfurada em posição correspondente. A tampa era conectada ao cubo por dobradiças e fixada por um fecho de pressão. As amostras, com o lado da casca para cima, eram presas entre o cubo e a tampa, tomando-se o cuidado de desenrolar as bordas, de forma a ficarem tão planas quanto possíveis. Após o fechamento da tampa, o dispositivo era alinhado sob o módulo de medida do texturômetro, de modo que a sonda pudesse perfurar livremente a amostra através do orifício central, sem provocar o deslocamento da mesma.

Curvas de compressão (força versus tempo) foram obtidas em função das diferentes variáveis utilizadas (tipo de secador e tomate, temperatura e velocidade do ar de secagem). Devido à heterogeneidade do material, as medidas foram feitas com cinco repetições.



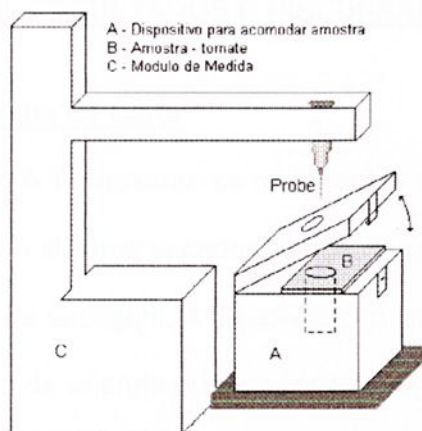


Fig. 5.1: Dispositivo para medida da força necessária para a perfuração de amostras de tomate seco.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Desempenho da Bomba de Calor

A Tabela 6.1 apresenta os coeficientes de desempenho efetivo da bomba de calor e de todo o sistema secador bomba de calor, para temperaturas de 40, 45 e 50°C na câmara de secagem. A Tabela 6.2 mostra o aumento do potencial de secagem e a economia de energia do secador bomba de calor em relação a um secador resistivo hipotético com o mesmo potencial de secagem, calculado de acordo com o descrito no item 4.1.4.

Tabela 6.1: Coeficientes de desempenho efetivo.

T (°C)	Demanda (kW)	UR _{EXT} (%)	UR _{INT} (%)	COP _{AQ,EF}	COP _{AQ,EF} *
40	2,196	18	15	2,68	2,20
45	2,372	16	13	2,68	2,20
50	2,603	12	10	2,56	2,14

UR_{EXT}: Umidade relativa do ar ambiente, aquecido a temperatura de secagem sem desumidificação
UR_{INT}: Umidade relativa dentro da câmara de secagem.

*Considerando o gasto energético do ventilador responsável pela movimentação do ar.

Tabela 6.2: Aumento do potencial de secagem e economia de energia para o secador BC.

Condições Ambientes		Condições na câmara de secagem		r	$\dot{W}_{RE}$ (kJ/s)	$\dot{W}_{BC}$ (kJ/s)	Redução (%)
T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)				
27	39	40	15	2,10	3,84	2,20	42,7
25	48	45	13	3,41	4,43	2,37	46,5
28	39	50	10	2,75	4,39	2,60	40,8

Apesar da existência de perdas de calor no condensador e na linha de alta pressão para o meio ambiente e de ineficiências inerentes aos processos do compressor, a taxa de conversão de energia mecânica em energia térmica foi satisfatória, uma vez que os valores obtidos para o coeficiente de desempenho efetivo de aquecimento se aproximam ou superam os valores encontrados na literatura. Rossi (1993) encontrou valores na faixa 1,3 a 1,7 com um sistema similar ao utilizado neste trabalho. Na Tabela 6.1 observa-se que o $COP_{AQ,EF}$ para temperatura de 50°C foi menor que os demais, o que se explica pela grande quantidade de refrigerante introduzida no sistema e conseqüente aumento da pressão ao nível máximo de operação, levando a um maior consumo energético.

A umidade relativa do ambiente constitui um fator fundamental para a eficiência do processo. Clements et al. (1993) concluíram que uma alta umidade relativa do ar na entrada do evaporador é muito importante para o êxito no projeto de secadores acoplados a bomba de calor. Seus resultados mostraram que o aumento da umidade relativa na entrada do evaporador de 30 para 80% dobrou o valor do SMER.

De modo geral, o clima na região de São José do Rio Preto é quente e seco, o que em princípio dispensaria sistemas destinados ao abaixamento da umidade relativa do ar, o qual, pelo menos em parte, é o objetivo da bomba de calor. Nos ensaios realizados nos dias mais secos, enquanto a umidade relativa do ar no secador BC ficou em torno de 11%, o valor correspondente aos outros secadores (PR e CR) ficou ao redor de 13% (Tabelas 6.3 e 6.4). Aparentemente, a diferença de apenas 2 pontos percentuais é pequena, mas a experiência mostra que



conseguir uma desidratação adicional do ar quando se trabalha com valores já tão reduzidos de umidade é bastante difícil. Observa-se que em dias mais úmidos, a diferença entre as umidades relativas no secador BC e nos demais secadores chegou a 7 pontos percentuais.

Por outro lado, o uso da bomba de calor justifica-se plenamente quando se observa a magnitude do $COP_{AQ,EF}$, o qual mostra a eficiência do equipamento em relação à conversão de energia mecânica em energia térmica, posteriormente absorvida pelo ar de secagem ao passar pelo condensador. Além disso, como mostra a Tabela 6.2, a economia de energia em relação a um secador resistivo hipotético com o mesmo potencial de secagem fica na faixa de 40 a 50%, de forma que, apesar das condições climáticas relativamente adversas, a bomba de calor utilizada apresentou desempenho satisfatório sob o ponto de vista energético, lembrando que o coeficiente de desempenho do secador bomba de calor é função direta do fluido refrigerante utilizado, projeto do secador, parâmetros e tipos de secagem.

Para analisar o desempenho da bomba de calor sob o ponto de vista de sua influência na cinética de secagem do tomate, é interessante comparar as curvas de secagem do produto obtidas nos equipamentos com e sem bomba de calor. A Figura 6.1 apresenta o comportamento de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando diferentes secadores à temperatura de 45°C e velocidade de 1,5 m/s, em ensaios realizados simultaneamente. A Figura 6.2 mostra as taxas de secagem correspondentes. Observa-se que no secador BC as taxas de secagem são superiores às observadas nos secadores PR e CR devido à menor umidade relativa



alcançada no primeiro. Para atingir um conteúdo de umidade adimensional, $M=(X-X_{eq})/(X_0-X_{eq})$, de 0,2 nas condições de secagem indicadas, seriam necessários 341 minutos de processo no secador BC e cerca de 386 minutos no secador PR, indicando uma redução de cerca de 12% no tempo de secagem. Rossi (1993) obteve reduções na faixa de 26 a 32% comparando o secador bomba de calor com o de resistências elétricas. Entretanto, seus ensaios foram conduzidos em Campinas – SP, cidade com umidade relativa média mais elevada que São José do Rio Preto.



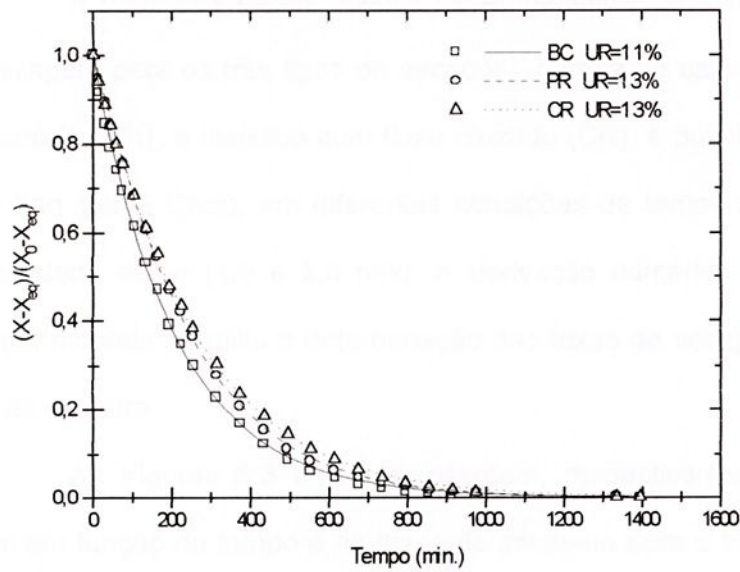


Fig. 6.1: Comportamento de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando diferentes secadores a temperatura de 45°C e velocidade de 1,5 m/s.

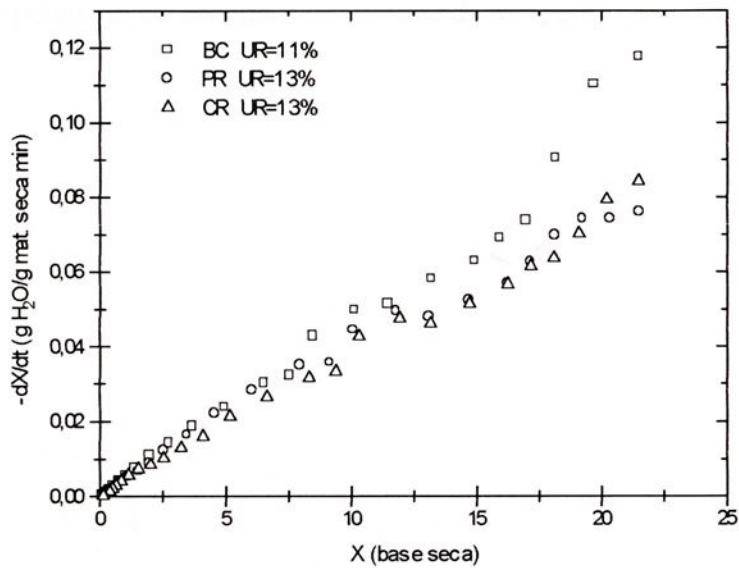


Fig. 6.2: Taxas de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando diferentes secadores a temperatura de 45°C e velocidade de 1,5 m/s.

6.2. Cinética de Secagem

A partir dos dados obtidos experimentalmente, foram construídas curvas de secagem para os três tipos de secador - bomba de calor (BC), resistivo com fluxo paralelo (PR), e resistivo com fluxo cruzado (CR), e dois tipos de tomate (tipo Pêra e tipo Santa Cruz), em diferentes condições de temperatura (40, 45 e 50°C) e velocidade do ar (1,5 e 2,0 m/s). A derivação numérica das curvas de secagem experimentais permitiu a determinação das taxas de secagem em função da umidade da amostra.

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam, respectivamente a umidade adimensional em função do tempo e as taxas de secagem para o tomate tipo Pêra no secador bomba de calor com velocidade de 2,0 m/s, em diferentes temperaturas. Nota-se que, para um mesmo tempo de residência do material no secador, o aumento da temperatura do ar conduziu a uma redução da umidade, indicando o aumento do potencial de secagem em função da temperatura.

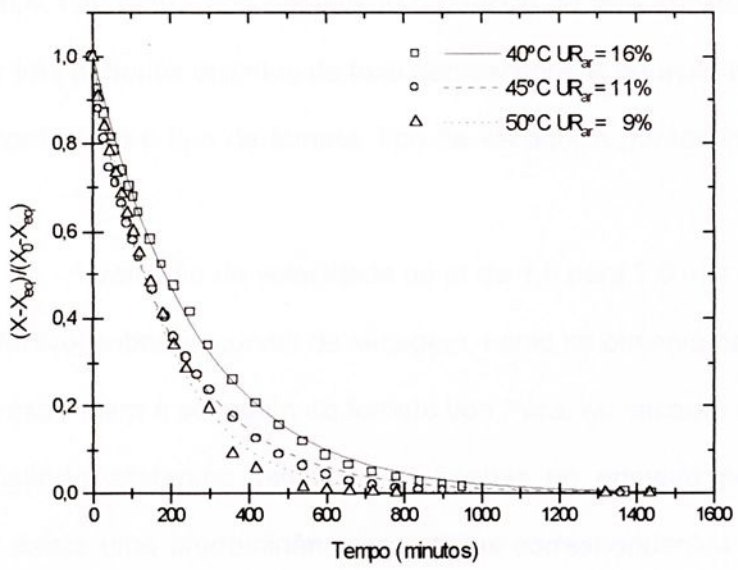


Fig 6.3: Comportamento de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando secador bomba de calor a uma velocidade de 2,0 m/s, em diferentes temperaturas.

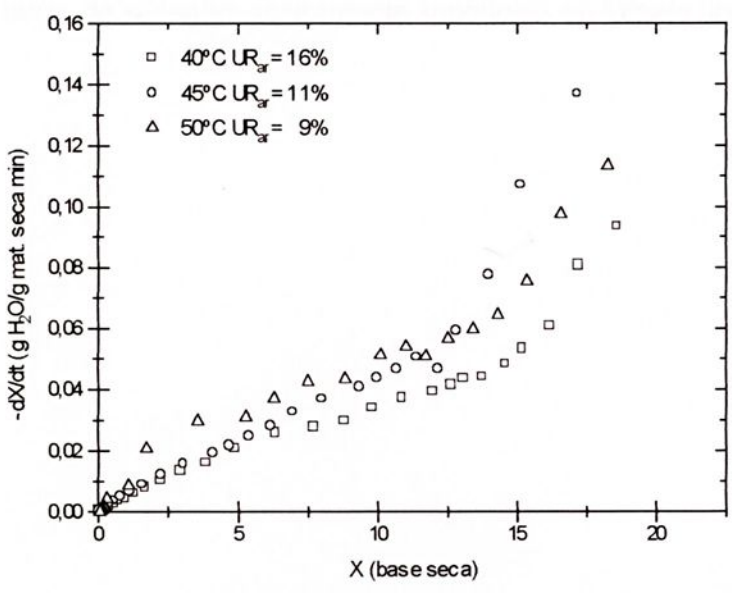


Fig 6.4: Taxas de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando secador bomba de calor a uma velocidade de 2,0 m/s, em diferentes temperaturas.

De modo geral, as taxas de secagem seguiram o padrão ilustrado pela Figura 6.4, não tendo sido observado o período de taxa constante e podendo-se identificar três períodos distintos de taxa decrescente. A duração de cada período variou de acordo com o tipo de tomate, tipo de secador e parâmetros de secagem utilizados.

A variação da velocidade do ar de 1,5 para 2,0 m/s não apresentou efeito considerável sobre as curvas de secagem, como se observa nas Figuras 6.5 e 6.6, que correspondem à secagem do tomate tipo Pêra, no secador bomba de calor a 45°C, utilizando diferentes velocidades. Apenas no primeiro período de taxa decrescente existe uma predominância das taxas correspondentes ao ensaio com maior velocidade.

Em relação ao comportamento dos diferentes tipos de tomate estudados, observa-se nas Figuras 6.7 e 6.8, que o tomate tipo Santa Cruz apresentou taxas de secagem ligeiramente superiores ao tomate tipo Pêra.

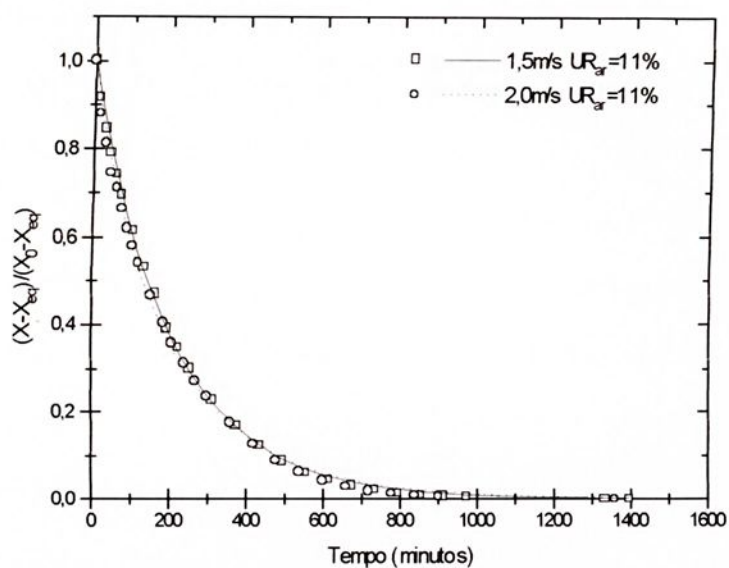


Fig 6.5: Comportamento de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando secador bomba de calor a uma temperatura de 45°C, em diferentes velocidades.

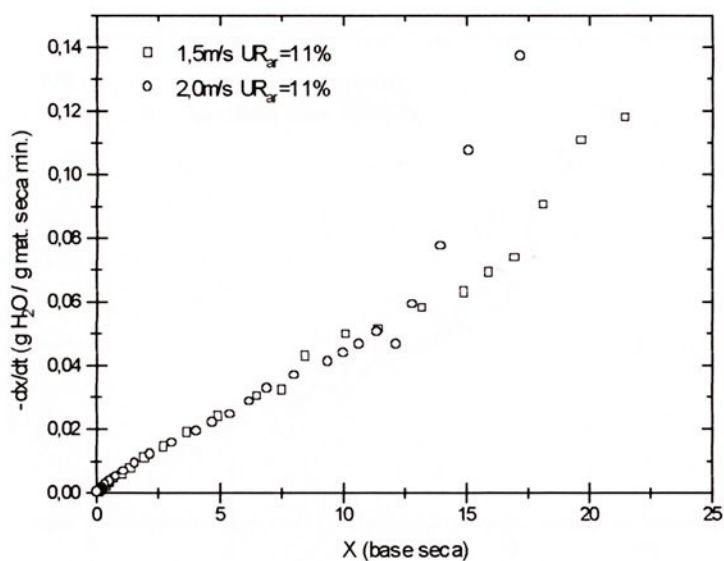


Fig 6.6: Taxas de secagem do tomate tipo Pêra, utilizando secador bomba de calor a uma temperatura de 45°C, em diferentes velocidades.

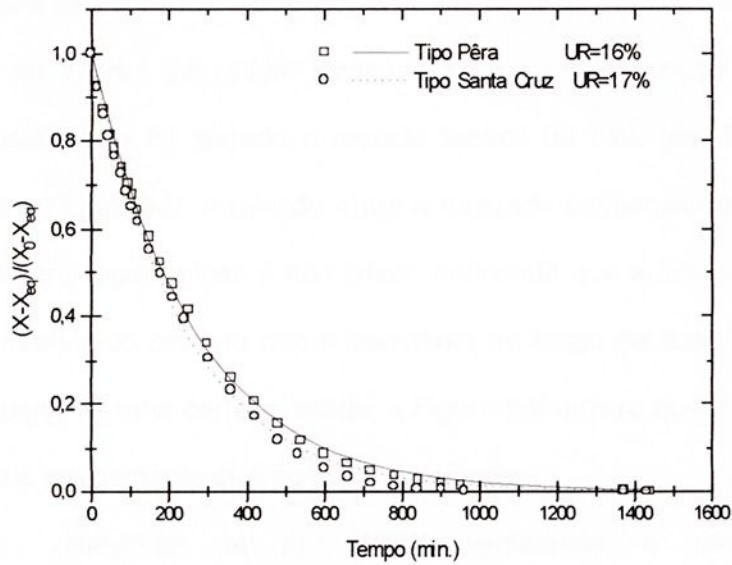


Fig 6.7: Comportamento de secagem, utilizando secador Bomba de Calor a temperatura de 40°C, velocidade de 2,0 m/s, para os tomates do tipo Pêra e Santa Cruz.

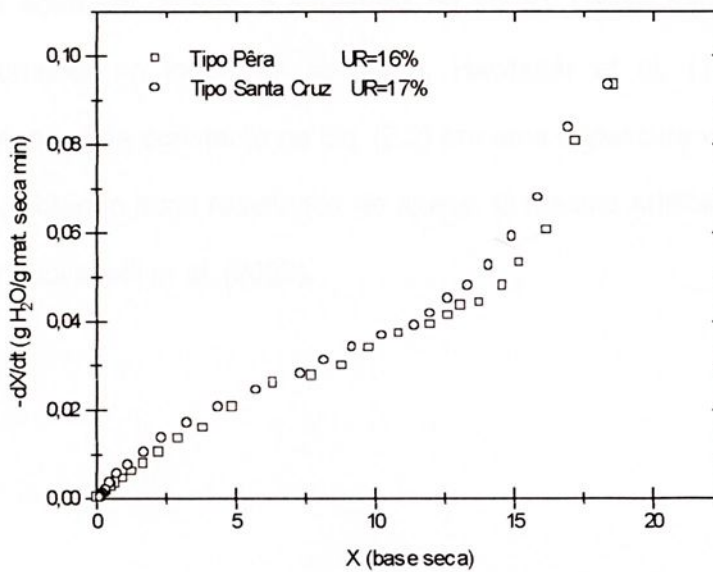


Fig 6.8: Taxas de secagem, utilizando secador Bomba de Calor a temperatura de 40°C, velocidade de 2,0 m/s, para os tomates do tipo Pêra e Santa Cruz.

Como discutido anteriormente, a secagem do tomate ocorreu no período de taxa decrescente, o que indica que o processo é controlado pela difusão da umidade no interior do sólido. Nesse caso, para a descrição da cinética de secagem, inicialmente foi testado o modelo teórico de Fick (eq. 2.2). Entretanto, como mostra a Figura 6.9, a relação entre a umidade adimensional e o tempo em coordenadas semi-logarítmicas é não linear, indicando que a difusividade aparente da água no interior do produto não é constante ao longo de todo o processo. Na realidade, a partir de uma certa umidade, a Figura 6.9 mostra que a umidade passa a diminuir mais rapidamente que no início do processo.

Hawlder et al. (1991) verificaram o mesmo tipo de comportamento no estudo da secagem de fatias de tomate em função da temperatura e velocidade do ar. A explicação para este fato é o encolhimento das amostras durante a secagem, o que leva a uma redução na espessura e diminui o percurso da água em direção à superfície do sólido. Dessa forma, a difusividade aparente aumenta ao longo da secagem. Hawlder et al. (1991) propuseram substituir a espessura constante na Eq. (2.2) por uma espessura variável em função da umidade, obtendo bons resultados de ajuste. O mesmo artifício foi adotado com sucesso por Giovanelli et al. (2002).



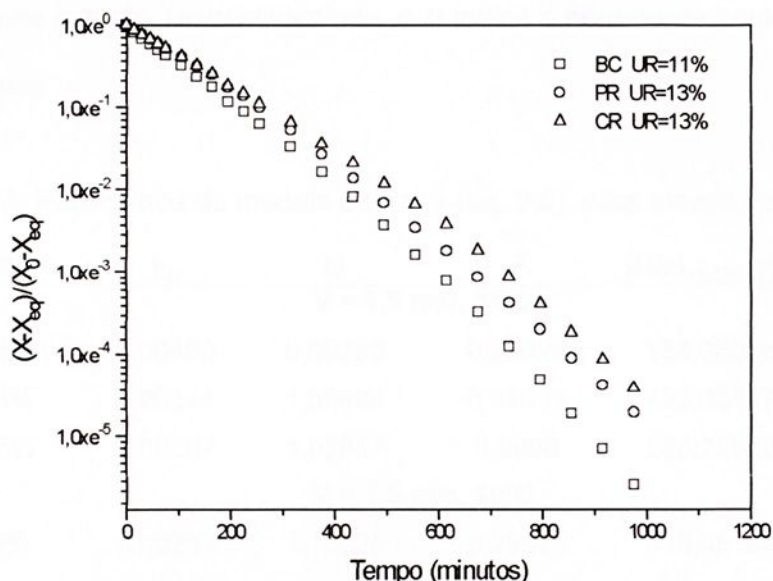


Fig. 6.9: Gráfico em coordenadas semi-logarítmicas da unidade adimensional em função do tempo para tomate tipo Pêra, utilizando diferentes secadores a 45°C e 1,5 m/s.

Optou-se, num segundo momento, pelo emprego do modelo de Page (eq. 2.8) que, com dois parâmetros, procura justamente compensar a variação da constante de velocidade de secagem ao longo do processo. Os parâmetros do modelo foram calculados por regressão não linear, utilizando-se o programa Origin 3.5 e os resultados são apresentados nas Tabelas 6.3, para tomate tipo Pêra, e 6.4, para tomate tipo Santa Cruz. Na avaliação da qualidade dos ajustes foram considerados os coeficientes de determinação (r^2) e as raízes das médias dos quadrados dos desvios (RMS), dada por:

$$\text{RMS} = 100 \sqrt{\frac{\sum ((M_{\text{OBS}} - M_{\text{PRED}}) / M_{\text{OBS}})^2}{N}} \quad (6.1)$$

onde os índices OBS e PRED indicam os valores observados experimentalmente e preditos pelo modelo, respectivamente, e N indica o número de pontos empregados para o ajuste.

Tabela 6.3: Parâmetros do modelo de Page (eq. 2.8), para tomate tipo Pêra.

	UR_{AR}	k_p	N	r^2	$RMS_{TOTAL} (%)$	$RMS^* (%)$
V = 1,5 m/s, 45°C						
BC	11%	0,00490	0,99359	0,99928	254,08986	1,32957
PR	13%	0,00244	1,08998	0,99953	423,02417	6,68581
CR	13%	0,00307	1,03867	0,9996	580,15820	11,29602
V = 1,5 m/s, 50°C						
BC	9%	0,00263	1,13025	0,99875	319,05188	15,40454
PR	11%	0,00259	1,10374	0,99918	114,81610	14,42914
CR	11%	0,00289	1,06713	0,99954	239,82702	4,21900
V = 2,0 m/s, 40°C						
BC	16%	0,00347	1,01441	0,99833	337,98453	24,2858
PR	23%	0,00316	1,03008	0,99939	8,07465	5,38516
CR	23%	0,00273	1,06713	0,99891	22,98695	13,61249
V = 2,0 m/s, 45°C						
BC	11%	0,00769	0,92114	0,9977	1022,00087	18,27567
PR	13%	0,00454	1,00524	0,99857	1588,75089	15,81455
CR	13%	0,00561	0,98468	0,99886	164183,375	15,04659
V = 2,0 m/s, 50°C						
BC	9%	0,00340	1,08619	0,99636	272,18946	18,68422
PR	11%	0,00269	1,09435	0,99671	133,40090	39,62323
CR	11%	0,00268	1,11429	0,99849	43,69325	20,70749

BC: Secador Bomba de Calor; PR: Secador Fluxo Paralelo; Cr: Secador Fluxo Cruzado.

* considerando umidades adimensionais $\geq 0,02$

Tabela 6.4: Parâmetros do modelo de Page (eq. 2.8), para tomate tipo Santa Cruz.

	UR_{AR}	k_p	n	r^2	$RMS_{TOTAL} (%)$	$RMS^* (%)$
V = 1,5 m/s, 40°C						
BC	15%	0,00192	1,12347	0,99564	198,80658	18,29481
PR	19%	0,00189	1,11403	0,99607	152,07695	28,82013
CR	19%	0,00167	1,72190	0,99743	247,19082	35,76451
V = 1,5 m/s, 45°C						
BC	13%	0,00308	1,06793	0,99863	63,97545	26,56690
PR	16%	0,00293	1,06851	0,99918	218,68882	16,57709
CR	16%	0,00696	0,93193	0,99608	185,69814	24,67387
V = 1,5 m/s, 50°C						
BC	9%	0,00296	1,09337	0,99572	99,26864	44,16560
PR	11%	0,00119	1,25327	0,99806	59,54326	20,85186
CR	11%	0,00239	1,12027	0,99592	157,40648	39,36750
V = 2,0 m/s, 40°C						
BC	17%	0,00358	1,02727	0,99723	198,80658	33,26109
PR	25%	0,00289	0,97620	0,99769	152,07695	2,88097
CR	25%	0,00224	1,06956	0,99743	247,19082	34,20380
V = 2,0 m/s, 45°C						
BC	12%	0,00477	0,95789	0,99683	333,40634	25,20119
PR	16%	0,00283	1,02572	0,99724	47,32441	24,07696
CR	16%	0,00308	1,05335	0,99780	218,31949	24,74268
V = 2,0 m/s, 50°C						
BC	10%	0,00229	1,13323	0,99625	57,00136	35,77849
PR	12%	0,00164	1,14571	0,99662	100,61113	28,76282
CR	12%	0,00158	1,16250	0,99729	43,63829	23,52020

BC: Secador Bomba de Calor; PR: Secador Fluxo Paralelo; CR: Secador Fluxo Cruzado.

* considerando umidades adimensionais $\geq 0,02$

Analisando a coluna RMS_{TOTAL} nas Tabelas 6.3 e 6.4, observa-se que os valores são bastante altos, o que poderia em primeira análise, sugerir que os dados experimentais não podem ser ajustados com boa eficiência pelo modelo utilizado. Isso, porém não reporta a realidade. Durante o tratamento dos dados, observou-se que os pontos correspondentes às umidades adimensionais inferiores a 2%, foram os principais responsáveis pelos altos resíduos, pois os valores M_{OBS} que entram no denominador da eq. (6.1), já estão muito próximos de zero. Dessa forma, mesmo que os desvios sejam pequenos, quando divididos pelo valor observado, contribuem de forma exagerada para a elevação da RMS. Uma análise superficial poderia, então, desqualificar um bom modelo baseado em dados experimentais correspondentes a uma região de pouco interesse prático, já que, de acordo com Zaroni et al. (1999), é recomendável que os tomates sejam desidratados até umidade final em torno de 20% (b.s.), correspondendo a uma atividade de água de cerca de 0,6 a 25°C, o que se considera adequado para a estabilidade de alimentos de umidade intermediária em temperatura ambiente.

A partir dessas considerações, optou-se por calcular o valor de RMS correspondente a $M \geq 2\%$ (última coluna à direita nas Tabelas 6.3 e 6.4). Nesse caso, a maior parte dos valores de RMS foi inferior a 25%, valor apontado por Lewicki (2000) como limite máximo para a aceitação de um modelo no ajuste de dados experimentais de isotermas de sorção de diversos produtos.



6.2.1. Influência das Variáveis de Processo sobre as Constantes do Modelo de Page

Considerando as diversas variáveis adotadas (temperatura, velocidade, tipo de tomate e tipo de secador), a análise de cada fator isoladamente dificulta a identificação do seu real efeito sobre a cinética de secagem. Além disso, através das figuras 6.1 a 6.8 apresentadas, não é possível afirmar com segurança se as diferenças observadas nas taxas de secagem são significativas. Sendo assim, o efeito das variáveis sobre os parâmetros do modelo de Page ajustado aos dados experimentais foi analisado estatisticamente, utilizando-se o programa Statistica v. 5.0. Considerou-se um delineamento experimental misto de 2 e 3 níveis, já que os fatores velocidade e tipo de tomate apresentavam 2 níveis e o fator temperatura apresentava 3 níveis. Em relação ao tipo de secador, optou-se por analisar os dados correspondentes a cada equipamento em separado. Para cada secador e para cada parâmetro do modelo de Page (k_p e n) foi ajustado um modelo representado genericamente pela equação (6.2), sendo este não-linear (ordem 2) em relação à temperatura e linear em relação à velocidade e ao tipo de tomate:

$$Y = Y_0 + \alpha * \text{tipo} + \beta_1 * T + \beta_2 * T^2 + \gamma * V \quad (6.2)$$

onde

Y = estimativa do modelo (k_p ou n do modelo de Page)

tipo = tipo de tomate (valor 1 para tipo Pêra e 2 para tipo Santa Cruz)

T = temperatura de secagem ($^{\circ}\text{C}$)

V = velocidade do ar de secagem (m/s)

Y_0 , α , β_1 , β_2 e γ = coeficientes de regressão.

As tabelas 6.5 a 6.10 mostram os valores dos coeficientes de regressão do modelo proposto, assim como o desvio padrão e os níveis de significância obtidos para cada uma das variáveis independentes. É importante salientar que os valores dos coeficientes α apresentados nas Tabelas 6.5 a 6.10 foram obtidos atribuindo-se os valores numéricos de 1 para tomate tipo Pêra e 2 para o tipo Santa Cruz na equação (6.2).

Tabela 6.5: Coeficientes do ajuste do parâmetro k_p para o secador bomba de calor:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância p
Y_0		-0,17544	0,52123	0,01500
Tipo de tomate	(α)	0,00107	0,00062	0,13400
Temperatura	(β_1)	0,00794	0,00230	0,01400
Temperatura	(β_2)	0,00009	0,00003	0,01300
Velocidade	(γ)	0,00225	0,00124	0,12000

Tabela 6.6: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador bomba de calor:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância p
Y_0		9,00057	1,93254	0,00348
Tipo de tomate	(α)	0,03087	0,02302	0,22835
Temperatura	(β_1)	-0,35460	0,08546	0,00602
Temperatura	(β_2)	0,00400	0,00095	0,00552
Velocidade	(γ)	-0,11360	0,04603	0,04860

Como esperado, a temperatura de secagem foi o fator de maior influência sobre o processo, principalmente para os secadores cujo fluxo de ar era paralelo ao produto (secador BC e PR). Os outros fatores estudados (tipo de tomate e velocidade do ar) não apresentaram efeito significativo ao nível de 5% (exceto a

velocidade sobre o parâmetro n no secador bomba de calor, de acordo com a Tabela 6.6).

Para o secador bomba de calor (Tabelas 6.5 e 6.6), os efeitos linear e quadrático da temperatura foram significativos ($P < 0,05$) para k_p e n . A velocidade teve efeito significativo para o parâmetro n e não-significativo para o parâmetro k_p , embora se tenha observado que sua consideração no modelo é importante para melhorar o ajuste. Quanto ao tipo de tomate, este também apresentou um efeito relativamente importante sobre o parâmetro k_p . Conclui-se, portanto, que para o secador BC os três fatores influenciaram a cinética de secagem.

As Figuras 6.10 e 6.11 ilustram o comportamento dos parâmetros k_p e n em função da temperatura e velocidade do ar para o secador bomba de calor e tomate tipo Pêra.

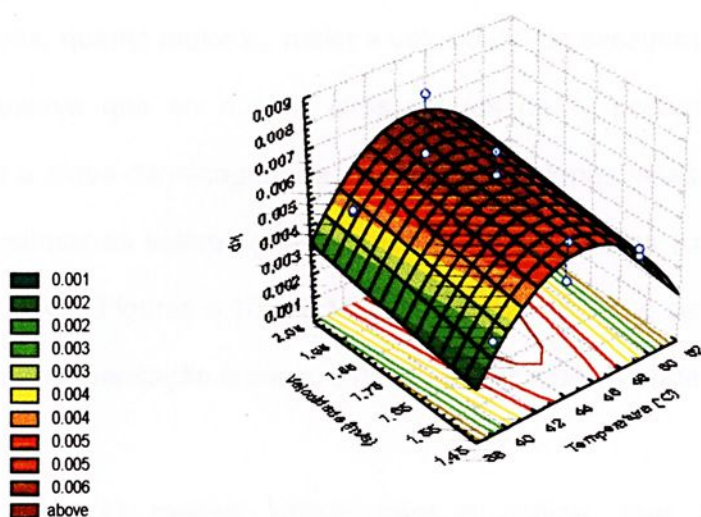


Fig. 6.10: Influência da temperatura e velocidade no parâmetro k_p para tomate tipo Pêra utilizando secador bomba de calor.

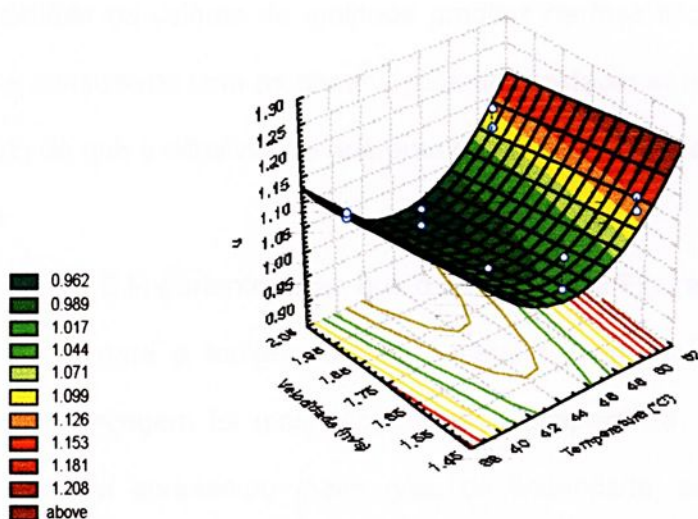


Fig. 6.11: Influência da temperatura e velocidade no parâmetro n para tomate tipo Pêra utilizando secador bomba de calor.

Embora k_p e n não tenham um significado físico direto, pode-se afirmar que o parâmetro k_p está ligado à inclinação média da curva de secagem, enquanto n reflete o grau de não-linearidade da mesma (Cronin e Kearney, 1998). Dessa forma, quanto maior k_p , maior a velocidade de secagem. Por outro lado, Parti (1998) observa que se $n < 1$, altos valores de k_p podem ser utilizados para aproximar a curva de secagem da equação de Fick nas fases iniciais do processo, sem subestimar os valores preditos nas fases posteriores (conforme discutido no item 2.1.1). Nas Figuras 6.10 e 6.11 é justamente isso que se observa. Existe uma espécie de compensação entre k_p e n , isto é, nas regiões onde k_p é maior, n diminui e vice-versa.

O modelo obtido para n estima, que a maior parte das combinações de temperatura e velocidade de secagem levaria a valores de n maiores que 1, o que indica que, no caso da secagem do tomate, o modelo de Fick

iria superestimar os valores de umidade preditos na fase final da secagem. Esse resultado é consistente com as observações de Hawlader et al. (1991) e Giovanelli et al. (2002) de que a difusividade aparente da água aumenta ao longo da secagem do tomate.

É importante notar, que o fato de que a Figura 6.10 indique valores máximos de k_p para a temperatura de secagem intermediária (45°C), isso não implica que a secagem foi mais rápida nessa temperatura, mas sim que nessa condição a curva apresentou maior grau de linearidade, pois os valores de n correspondentes são mais próximos da unidade. Assim, os valores de k_p preditos para essa temperatura estariam em maior concordância com a constante de secagem estimada por um modelo linear.

Para o secador resistivo paralelo (Tabelas 6.7 e 6.8), os fatores tipo de tomate, temperatura e velocidade podem ser considerados significativos para o parâmetro k_p , enquanto para n o fator mais significativo foi a velocidade. Finalmente, considerando o secador resistivo cruzado (Tabelas 6.9 e 6.10), praticamente o único efeito significativo foi o da temperatura sobre o parâmetro k_p . Qualitativamente, o comportamento dos parâmetros k_p e n para os secadores resistivos de fluxo paralelo e cruzado foi similar ao representado nas Figuras 6.10 e 6.11, isto é, observa-se um máximo de k_p na região central do eixo temperatura e um mínimo de n em posição correspondente.

Tabela 6.7: Coeficientes do ajuste do parâmetro k_p para o secador resistivo paralelo:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância P
Y_0		-0,06281	0,02889	0,72667
Tipo de tomate	(α)	-0,00080	0,00034	0,05958
Temperatura	(β_1)	0,00295	0,00128	0,06053
Temperatura	(β_2)	0,00003	0,00001	0,05574
Velocidade	(γ)	0,00132	0,00069	0,10269

Tabela 6.8: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador resistivo paralelo:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância P
Y_0		4,86073	2,39919	0,08916
Tipo de tomate	(α)	0,03255	0,02858	0,29805
Temperatura	(β_1)	-0,17114	0,10610	0,15786
Temperatura	(β_2)	0,00202	0,00117	0,13671
Velocidade	(γ)	-0,13899	0,05715	0,05103

Tabela 6.9: Coeficientes do ajuste do parâmetro k_p para o secador resistivo cruzado:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância P
Y_0		-0,17157	0,07719	0,06793
Tipo de tomate	(α)	-0,00045	0,00092	0,64257
Temperatura	(β_1)	0,00791	0,00341	0,05959
Temperatura	(β_2)	-0,00009	0,00004	0,05836
Velocidade	(γ)	-0,00040	0,00184	0,83305

Tabela 6.10: Coeficientes do ajuste do parâmetro n para o secador resistivo cruzado:

		Coeficiente de Regressão	Desvio Padrão	Nível de Significância P
Y_0		17,6949	10,5570	0,14473
Tipo de tomate	(α)	0,09105	0,12574	0,49627
Temperatura	(β_1)	-0,71198	0,46687	0,17810
Temperatura	(β_2)	0,00773	0,00517	0,18495
Velocidade	(γ)	-0,25839	0,25148	0,34383

A comparação dos resultados obtidos para cada secador permite concluir que, de certa forma, o tipo de secador teve efeito sobre as curvas de secagem. Por exemplo, é nítido o fato de que no secador BC existe um efeito mais acentuado das variáveis estudadas sobre os parâmetros k_p e n , indicado pelos menores valores de p . Além disso, no secador CR, ao contrário dos demais, a variação da velocidade praticamente não afetou as curvas de secagem.

O efeito significativo da temperatura, observado principalmente sobre o parâmetro k_p em todos os secadores, é consistente com resultados de outros pesquisadores. Madamba et al. (1996), estudando a secagem de fatias de alho em camada fina, verificaram que a temperatura e a espessura das fatias tiveram efeitos estatisticamente significativos sobre as taxas de secagem, enquanto a velocidade e a umidade relativa não foram significativas. Esses mesmos autores afirmam que a temperatura é considerada, na maioria dos trabalhos publicados como sendo o mais importante e praticamente o único fator a afetar a cinética de secagem.

Murari (2000), verificou que o efeito da temperatura sobre a secagem convectiva de fatias de tomate foi mais acentuado quando a mesma mudou de 50°C para 60°C. As curvas de secagem obtidas a 40°C e 50 °C foram praticamente coincidentes.

Diamante e Munro (1991), por outro lado, relatam que além da temperatura e da espessura das fatias, o efeito da velocidade do ar, na faixa de 0,5 a 3,0 m/s, foi significativo na cinética de secagem de fatias de batata doce. Esses autores citam a conclusão de Islam & Flink (1982) de que em velocidades menores

ou iguais a 2,5 m/s, a resistência externa à transferência de massa é importante e deve ser considerada na análise de dados de secagem.

Neste trabalho, o efeito da velocidade mostrou-se importante nos valores do parâmetro n para os secadores BC e PR (ambos de fluxo paralelo), os quais diminuem com o aumento da velocidade, porém foi pouco importante para o secador CR. A Figura 6.1 mostra que, entre os secadores resistivos de fluxo cruzado e paralelo (que operavam na mesma umidade relativa), a velocidade de secagem foi ligeiramente maior no secador CR. Olorunda et al. (1990) também verificaram que a secagem de tomates com fluxo de ar cruzado foi mais rápida que com fluxo paralelo. Esse resultado foi atribuído à circulação mais eficiente da massa de ar quente através do produto no secador de fluxo cruzado. Desse conjunto de observações, pode-se supor que nos secadores de fluxo paralelo existe maior influência da resistência externa à transferência de massa durante a secagem.



6.3. Influência dos Parâmetros de Secagem sobre as Características do Produto

6.3.1. Densidade Aparente

As Figuras 6.12 e 6.13, ilustram os efeitos da temperatura sobre as curvas de densidade aparente versus o adimensional de umidade do tomate.

Em relação a esses resultados, é importante destacar que houve muita dificuldade experimental em obtê-los, devido a diversos fatores. Em primeiro lugar, a quantidade de amostra era limitada, pois se uma massa maior de produto fosse introduzida no secador, a cinética de secagem seria alterada. Portanto, era necessário retirar o mínimo possível de material em cada intervalo de tempo, de modo a obter amostras ao longo de todo o ensaio. Por outro lado, à medida que a secagem se aproximava do final, cada fatia de tomate já se encontrava com massa e volume muito pequenos, o que levava a erros consideráveis na leitura da densidade. Sendo assim, os resultados obtidos apresentaram uma grande dispersão, sendo possível identificar apenas algumas tendências.

Pela observação individual dos diversos ensaios realizados, verificou-se que o único fator a apresentar um efeito mais claro sobre o encolhimento foi a temperatura do ar de secagem, de forma que os dados foram agrupados em função dessa variável.

Para facilitar a observação do efeito da temperatura, o modelo proposto por Zogzas et al. (1994), dado pela equação (6.3), foi ajustado ao conjunto de dados (incluindo os dados obtidos nos diferentes secadores, com diferentes tipos

de tomate) obtidos em diferentes temperaturas, sem a intenção de reproduzir a densidade aparente, ρ_b , mas apenas para indicar um comportamento geral.

$$\rho_b = \frac{\rho_{b0}(1+M)}{1+\delta M} \quad (6.3)$$

Na equação (6.3), obtida a partir de considerações teóricas, M é a umidade adimensional $(X-X_{eq})/(X_0-X_{eq})$, e os parâmetros ρ_{b0} e δ representam a densidade aparente do material completamente seco (quando $X = 0$) e o coeficiente de encolhimento volumétrico, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 6.12 e 6.13 que, para a menor temperatura (40°C), a densidade apresenta-se praticamente constante em função da umidade, isto é, a amostra estaria perdendo massa e volume em uma razão constante. Nas amostras secas a 50°C, a perda de massa seria maior que a redução de volume, levando à diminuição da densidade ao longo da secagem e, portanto sendo o encolhimento menor para maiores temperaturas.

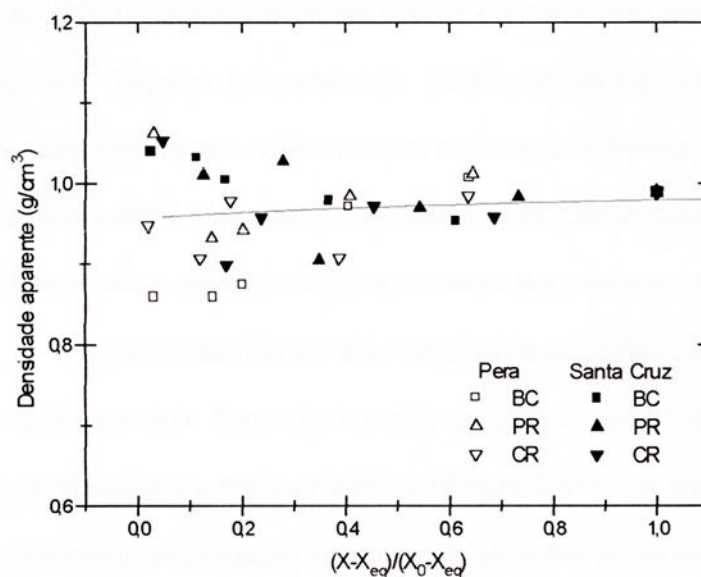


Fig. 6.12: Densidade aparente versus umidade adimensional à temperatura de 40°C.

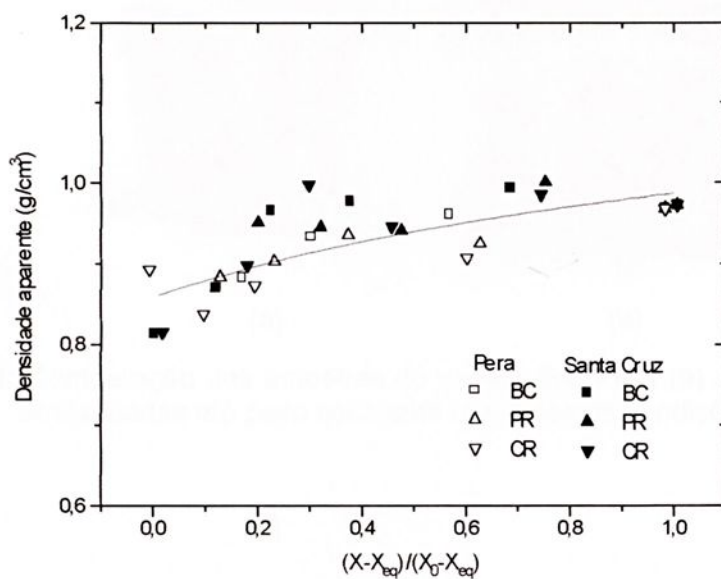


Fig. 6.13: Densidade aparente versus umidade adimensional à temperatura de 50°C.

Esses resultados são compatíveis com os apresentados por Nicoleti et al. (2001), que observaram menor encolhimento para fatias de abacaxi desidratadas em maiores temperaturas, porém contrários aos de Gabas et al. (1999), que obtiveram uma tendência a um maior encolhimento para uvas secas em temperaturas mais altas. Por outro lado, Gabas et al. (2002) relatam que a influência da temperatura sobre o encolhimento de ameixas durante a secagem é pequena.

Apesar de não ter sido possível a quantificação das diferenças de densidade entre os dois tipos de tomate, a análise visual das amostras secas mostra claras diferenças entre as mesmas (Figura 6.14). Os quartos de tomate tipo Pêra sofreram maior deformação – enrolando-se sobre si mesmos - que os do tipo Santa Cruz – que permaneceram mais planos.

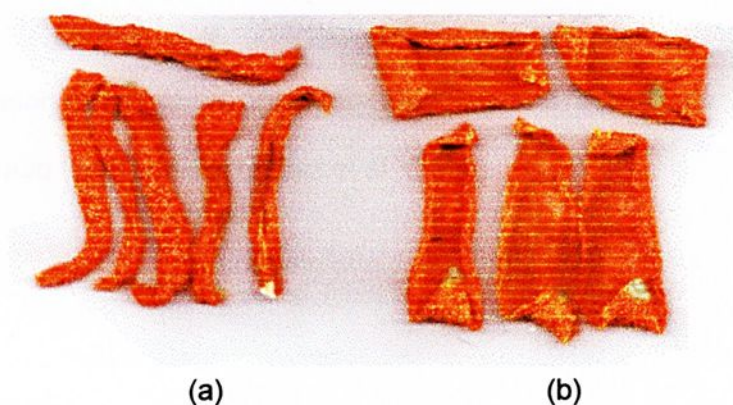


Fig. 6.14: Comparação das amostras do tomate tipo Pêra (a) e tipo Santa Cruz(b) desidratadas até peso constante nas mesmas condições de secagem.

6.3.2. Reidratação

Os índices de reidratação das amostras secas até peso constante, para os três tipos de secador e dois tipos de tomate em condições controladas de temperatura e velocidade do ar são apresentados na Tabela 6.11. Os valores situaram-se na faixa de 2 a 2,6 e a análise estatística dos resultados não revelou nenhum efeito significativo ($P > 0,05$) em função das variáveis estudadas.

Quanto à aparência do produto reconstituído, os testes de reidratação mostraram-se satisfatórios. Os tomates tipo Santa Cruz, principalmente os secos à temperatura de 50°C apresentaram-se mais próximos do produto *in natura*, provavelmente pelo menor encolhimento e, conseqüentemente, maior porosidade e área superficial, que facilitam a reidratação, de acordo com o discutido no item anterior.

Nicoleti et al. (2001) observou que, de modo geral, as amostras secas em maior temperatura apresentaram melhores índices de reidratação. O mesmo resultado foi obtido por Gabas et al. (1999).



Tabela 6.11: Índice de reidratação para amostras secas a peso constante, para diferentes tipos de secadores em diferentes condições de temperatura e velocidade do ar, para os tomates tipo Pêra e Santa Cruz:

	Índice de Reidratação		
	BC	PR	CR
Tomate Tipo Pêra			
T = 45°C, v = 1,5 m/s	2,31	2,20	2,33
T = 50°C, v = 1,5 m/s	2,13	2,16	2,39
T = 40°C, v = 2,0 m/s	2,33	2,03	2,02
T = 45°C, v = 2,0 m/s	2,42	2,21	2,53
T = 50°C, v = 2,0 m/s	2,22	2,17	2,19
Tomate Tipo Santa Cruz			
T = 40°C, v = 1,5 m/s	2,01	2,40	2,38
T = 45°C, v = 1,5 m/s	2,21	2,17	2,52
T = 50°C, v = 1,5 m/s	2,58	2,60	2,36
T = 40°C, v = 2,0 m/s	2,28	2,01	2,34
T = 45°C, v = 2,0 m/s	2,04	2,07	2,09
T = 50°C, v = 2,0 m/s	2,24	2,31	2,30

6.3.3. Textura

Para cada teste de compressão, realizado com as amostras reidratadas em atmosfera de URE = 75%, foi obtido um diagrama de força em função do tempo, sendo disponíveis também os dados de distância percorrida a partir do contato da sonda com a amostra. A Figura 6.15 mostra um diagrama típico obtido nos testes de compressão. O pico máximo corresponde à força necessária para a penetração na superfície (casca) da amostra. Após a penetração, a força diminui consideravelmente, enquanto a sonda continua a penetrar nos tecidos inferiores até uma distância pré-determinada.

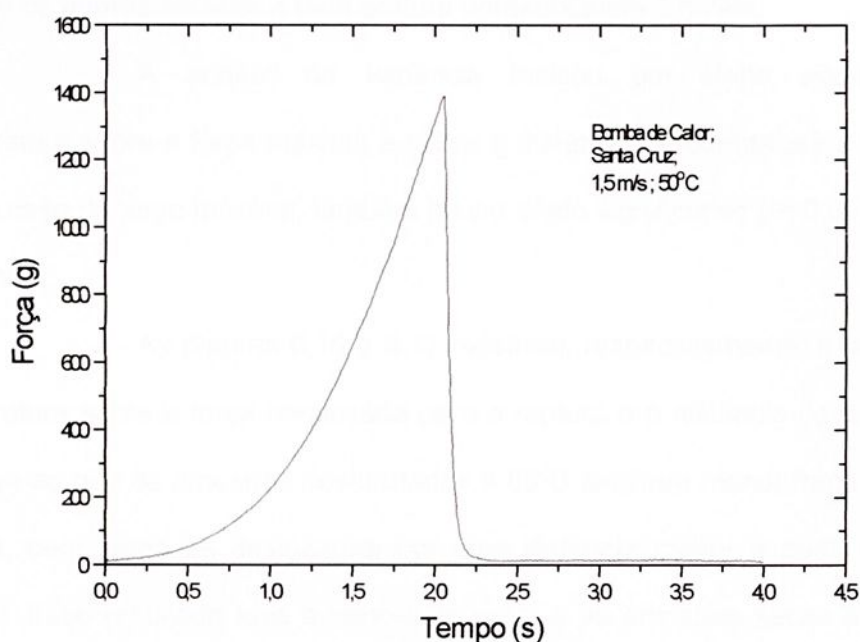


Fig. 6.15: Diagrama força versus tempo resultante de um teste de compressão de amostra de tomate tipo Santa Cruz desidratada no secador Bomba de Calor.

Os dados de força máxima e distância correspondente ao pico, obtidos para todas as repetições e condições de secagem, encontram-se tabelados no Apêndice C. Assim como no caso do encolhimento, nestes dados também foi observada uma grande dispersão dos resultados, decorrente da heterogeneidade de matérias-primas de origem natural, o que dificulta sobremaneira a interpretação dos resultados. Para contornar esse problema, o conjunto total de dados, incluindo todas as repetições sem o cálculo prévio de médias, foi submetido à análise estatística usando o programa Statistica v.5.0. Considerou-se um delineamento experimental

misto de 2 e 3 níveis, já que os fatores velocidade e tipo de tomate apresentavam 2 níveis e os fatores secador e temperatura apresentavam 3 níveis.

A análise de variância indicou um efeito significativo da temperatura sobre a força máxima e sobre a distância percorrida até a perfuração. Para o caso da força máxima, também houve efeito significativo ($P < 0,05$) do tipo de secador.

As Figuras 6.16 e 6.17 mostram, respectivamente, a influência da temperatura sobre a força necessária para a ruptura e a distância correspondente. Observa-se que as amostras desidratadas a 50°C exigiram menor força para a sua ruptura, bem como se deslocaram por uma distância menor a partir da posição original. Esse resultado leva à conclusão de que as amostras secas em menores temperaturas apresentaram-se mais elásticas, enquanto as secas em temperaturas mais altas mostraram-se mais macias.

Uma possível explicação para esse comportamento pode ser a tendência, discutida no item 6.3.1, de menor encolhimento durante a secagem a 50°C. O menor encolhimento faz com que as amostras apresentem maior porosidade e, portanto, sejam reidratadas com mais eficiência, ao passo que as demais teriam maior dificuldade de reidratação. Gabas et al. (2002), estudando a secagem de ameixas, obtiveram o mesmo tipo de comportamento em relação à temperatura, isto é, as amostras desidratadas em maiores temperaturas exibiram um comportamento menos rígido e mais viscoso.



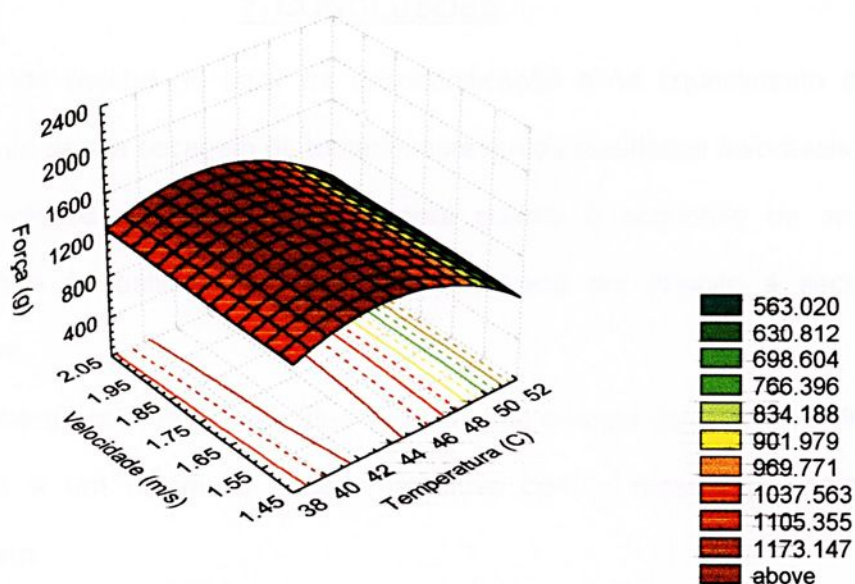


Fig. 6.16: Força de ruptura em testes de compressão de amostras de tomate em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.

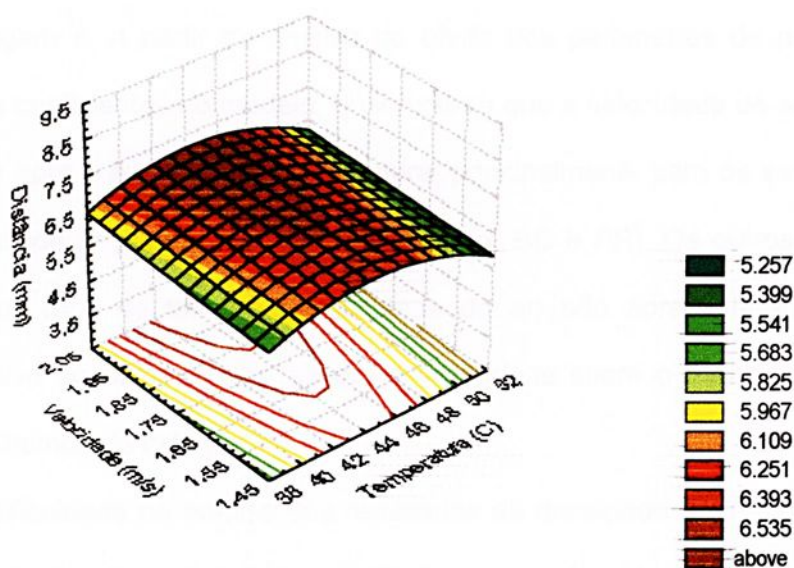


Fig. 6.17: Distância percorrida antes da ruptura em testes de compressão de amostras de tomate em função da temperatura e velocidade do ar de secagem.



7. CONCLUSÕES

- 7.1. O uso da bomba de calor na desumidificação e no aquecimento do ar ambiente para a secagem de tomates apresentou resultados favoráveis para as condições adotadas, principalmente quanto à economia de energia elétrica e à qualidade do produto desidratado em relação à secagem resistiva.
- 7.2. A bomba de calor promoveu uma economia de energia de 40,8 a 46,5% em relação a um hipotético secador resistivo com o mesmo potencial de secagem.
- 7.3. Ao comparar os secadores resistivos de fluxo cruzado e paralelo, observou-se que a velocidade de secagem foi ligeiramente maior no secador CR.
- 7.4. O modelo de Page mostrou-se adequado para a representação das curvas de secagem e, a partir da análise do efeito dos parâmetros de processo sobre os coeficientes do modelo, observou-se que a velocidade de secagem foi maior com o aumento da temperatura, principalmente para os secadores com fluxo de ar paralelo ao produto (secador BC e PR). Os outros fatores estudados (tipo de tomate e velocidade do ar) não apresentaram efeito significativo ao nível de 5% (exceto a velocidade sobre o parâmetro n no secador bomba de calor).
- 7.5. Houve dificuldade na análise dos resultados de densidade aparente, índice de reidratação, força máxima e distância percorrida até a perfuração das amostras devido à heterogeneidade das amostras. De modo qualitativo, pode-se concluir que houve um menor encolhimento nas amostras secas em

maiores temperaturas, não houve efeito significativo das variáveis estudadas sobre o índice de reidratação e houve efeito significativo da temperatura sobre a força máxima e distância percorrida até a perfuração das amostras submetidas a testes de compressão.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparar a qualidade nutricional de produtos secos em secadores resistivos e acoplados com bomba de calor, visto que o último possibilita trabalhar com menores temperaturas devido á redução da umidade relativa do ar ambiente.
- Estudar o efeito da recirculação parcial ou total do ar da saída do secador quanto ao desempenho do sistema e qualidade do produto desidratado obtido.
- Utilizar diferentes fluídos refrigerantes que possibilitem trabalhar com uma maior faixa de temperatura (ex. R-134a).
- Realizar simulações que possibilitem variações construtivas e operacionais, variando por exemplo a área de troca de calor, tanto do compressor quanto do evaporador.
- Utilizar o sistema bomba de calor acoplados a outros equipamentos de maneira a reduzir o consumo energético ou no caso de estar acoplado com secador solar, suprir eventuais problemas de intermitência de fornecimento de calor.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES-FILHO, O. & STRØMMEN, I. The application of heat pump in drying of biomaterials. *Drying Technology*, 14(9): 2061-2090, 1996.
- BHANDARI, B. R. & HOWES, T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1-2): 71-79, 1999.
- BRAUN, J. E., BANSAL, P. K. & GROLL, E. A. Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. *International Journal of Refrigeration*, v.5: 954-965, 2002.
- CAMARGO FILHO, W. P.;MAZZERI,A. R. Necessidade de reconversão da produção de tomate em São Paulo: ações na cadeia produtiva. *Informações Econômicas*, v.26, p.105-116, 1996.
- CAMARGO, G. A. & QUEIROZ, M. R. Avaliação de parâmetros químicos de tomates para a secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1999a, Pelotas-R. S. *Anais do Congresso*.
- CAMARGO, G. A. & QUEIROZ, M. R. Curvas experimentais de secagem de tomate, variedade debora plus, em duas temperaturas e pré-tratamento com sal e açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1999b, Pelotas-R.S. *Anais do Congresso*.
- CARVALHO, V. D.. Características químicas e industriais do tomate: ações na cadeia produtiva. *Informativo Agropecuário*, Belo Horizonte, 6(66), p.63-68, 1980.
- CHUA, K. J., MUJUMDAR, A. S., HAWLADER, M. N. A., CHOU, S. K. & HO, J. C. Batch drying of banana pieces – effect of stepwise change in drying air



- temperature on drying kinetics and product colour. *Food Research International*, v.34, p.721-731, 2001.
- CLEMENTS, S., JIA, X. & JOLLY, P. Experimental verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model. *International Journal of Energy Research*, v.17, p.19-28, 1993.
- COSTA, F. G., CAIXETA FILHO, J. V. Análise das perdas na comercialização de tomate. *Informações Econômicas – S.P.*, v.26, n.12, 1996.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- CRONIN, K & KEARNEY, S.. Monte Carlo modelling of vegetable tray dryer, *Journal of Food Engineering*, v.35, 233-250, 1998.
- DIAMANTE, L.M. & MUNRO, P.A. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slice. *International Journal Food Science Technology*, 26(1), p.99-109, 1991.
- FENG, X., BERNTSSON, T. Critical COP an Economically feasible industrial heat-pump application. *Applied Thermal Engineering*, v.17, p. 93-101, 1997.
- FOHR, J.P. & ARNAUD, G. Grape drying: from sample behavior to the drier project. *Drying Technology*, 10(2): 445-465, 1992.
- GABAS, A.L., MENEGALLI, F. & TELIS-ROMERO, J.. Effect of Chemical Pretreatment on the Physical Properties of Dehydrated Grapes. *Drying Technology* 17(6): 1215-1226, 1999.
- GABAS, A.L., MENEGALLI, F., FERRARI, F. & TELIS-ROMERO, J.. Influence of drying conditions on the rheological properties of prunes. *Drying Technology* 20(7): 1485-1502, 2002.

- GIOVANELLI, G., ZANONI, B., LAVELLI, V. & NANI, R. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, v.52, p.135-141, 2002.
- GLUCKMAN, M.A. Practical performance of industrial heat pumps. *Proc. Int. Inst. Refrig.* 83: 58-66, 1986 e 1987.
- GOLVEIA, J. P. G. Avaliação da cinética de secagem de gengibre (zingiber officinale, Roscoe) em um secador de leito fixo, *Tese de Doutorado*, FEA, UNICAMP, 1999.
- HAWLADER, M. N. A., UDDIN, M. S., HO, A. B. & TENG, A. B. W. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, v.14, p.259-268, 1991.
- HAWLADER, M.N.A., UDDIN, M. S., HO, J.C. & TENG, A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. *Journal Food Engineering*, 14, 259-268, 1991.
- HODGETT, D.L. & OELERT, G. IEA common study on advanced heat pump systems, technology survey. Part 1: Research and development trends. *Int. J. Refrig.* 5(3): 160-168, 1982.
- HOGAN, M.R., AYERS, D.L., MULLER Jr., R.E., RALL, E.C. & DOERING, O.C. Heat pump for low-temperature grain drying. *Trans. ASAE* 26(4): 1234-1238, 1983.
- IGARASHI, L.. & KIECKBUSCH, T. G. Modelagem de desidratação osmótica de fatias de tomate utilizando a atividade de água. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1998, Teresópolis –R.J., Anais do Congresso.

- ISLAM, M. N. & FLINK, J.M.. Dehydration of potato: I. Air and solar drying at low air velocities. *Journal of Food Technology*, 17, 373-385, 1982.
- JAYARAMAN, K.S. & DAS GUPTA, D.K. Dehydration of fruits and vegetables - recent developments in principles and techniques. *Drying Technology* 10(1): 1-50, 1992.
- KAJIYAMA, T. Simulação, avaliação e otimização energética e de qualidade do produto em secadores de leito deslizante. Tese de Doutorado, FEA, UNICAMP, 179 pág, 1998.
- KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal Food Engineering* 39: 337-344, 1999.
- KARATHANOS, V., ANGLEA, S. & KAREL, M. Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology* 11(5): 1005-1023, 1993.
- KAREL, M., BUERA, M.P. & ROOS, Y. Effects of glass transitions on processing and storage. In: *The Glassy State in Foods*. Ed. J.M.V. Blanshard & P.J. Lillford. 13-34. Nottingham University Press, Leicestershire, UK. 1993.
- LEWICKI, P.P., VUA LE, H. & POMARA-LAZUKA, W.. Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *Journal Food Engineering*, 54, 141-146, 2002.
- MADAMBA, P. S., DRISCOLL, R. H. & BUCKLE, K. A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, p.75-97, 1996.
- MEYER, J.P. & GREYVENSTEIN, G.P. The drying of grain with heat pumps in south Africa: a Techno-Economic Analysis. *International Journal of Energy Research*, vol. 16, 13-20, 1992.



- MINAMI, K. & HAAG, H. P. O tomateiro. 2ªed. *Fundação Cargil*, Campinas – SP, Brasil, 1989.
- MURARI, R. C. D. L. Cinética da desidratação osmo-convectiva de tomates. Tese de Mestrado DETA, Unesp, 2000.
- NICOLETI, J. F., TELIS-ROMERO, J. & TELIS, V. R. N. Rehydration and shrinking behavior of dried pineapple, In Proceedings of the Second Inter-American Drying Conference, ed. Krzysztof N. Waliszewski, 253-262, México, 2001.
- NIJHUIS, H.H., TORRINGA, E., LUYTEN, H., RENÉ, F., JONES, P., FUNEBO, T. & OHLSSON, T. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology* 14(6): 1429-1457, 1996.
- NSONZI, F. & RAMASWAMY, H.S. Quality Evaluation of Osmo-Convective Dried Blueberries. *Drying Technology*. 16(3-5): 705-723, 1998.
- OLORUNDA, A.O., AWORH, O. C. & ONUOHA, C.N. Upgrading quality of dried tomato: effects of drying methods, conditions and pre-drying treatments. *Journal Science Food Agriculture*, 52, 447-454, 1990.
- PANCHARIYA, P. C., POPOVIC, D. & SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering* v.52: 349-357, 2002.
- PARTI, M. Evaluation of diffusion based drying models: their bases and limitations. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry Vezprém*, v.26, 221-228, 1998.
- PERERA, C. O. & RAHMAN, M. S. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends in Food Science & Tecnology*, v. 8, 75-79, 1997.
- PRASERTSAN, S. & SAEN-SABY, P. Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology*, 16(1&2), 235-250, 1998.



- PRASERTSAN, S., SEN-NGAM, S. & KIRIRAT, P. Some experience in the testing of a heat pump air drier as applied to rubber smoking. *R&D Journal of Engineering Institute Thailand*, v. 5, p.25-36, 1994.
- RAHMAN, M.S., PERERA, C.O. & THEBAUD, C. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*, 30(7), 485-491, 1998.
- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering Properties of Foods*, (M.A. Rao e S.S.H. Rizvi, eds.) p. 155-165, Academic Press, New York, 1986.
- ROSSI, S.J. Desenvolvimento e avaliação de uma bomba de calor usada no condicionamento de ar para secagem de alimentos. Tese de Doutorado, FEA, UNICAMP, 214 pág, 1993.
- ROSSI, S.J., NEVES, L.C. & KIECKBUSCH, T.G. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying of vegetables, *Drying 92*, Ed. Mujumdar, A.S., Elsevier Science, p.1475-1478, 1992.
- SALUNKHE, D.K. & DESAI, B.B.. Postharvest biotechnology of vegetables, Boca Raton: CRC Press, v.(1): p.208, 1984.
- SALUNKHE, D.K., BOLIN, H.R. & REDDY, N.R.. Storage, processing and nutritional quality of fruits and vegetables. 2ªed. Boca Raton: CRC Press, v.(1): p.315, 1991.
- SHELTON, V.S. & CHRISTIANSEN, P. J. Analysis of a nozzle condensation drying cycle. *Applied Thermal Engineering*, v.19, p.831-845, 1999.



- SHI, J., MAGUER, M.L., KAKUDA, Y., LIPTAY A. & NIEKAMP, F. Lycopene degradation and isomeration in tomato dehydration. *Food Research International*, v.32, p.15-21, 1999.
- SHI, J.X., MAGUER, M.L., WANG S.L. & LIPTAY, A. Application of osmotic treatment in tomato processing – effect of skin tratments on mass transfer in osmotic dehydration of tomatoes. *Canadian Institute of Food Science and Technology*, v.30, p.669-674, 1997.
- StatSoft, Inc. (1995). STATISTICA for Windows [Computer program manual]. Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2325 East 13th Street, Tulsa, OK 74104, (918) 583-4149, fax: (918) 583-4376.
- STRUMILLO, C. & ADAMIEC, J. Energy and quality aspects of food drying. *Drying Technology*, 14(2), 423-448, 1996.
- SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. A. Shrinkage on drying behavior of potato salbs. *Journal of Food Technology*, v.13, p.103-104, 1991.
- TAMER, A. Petróleo, o preço da dependência: o Brasil na crise mundial, Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1980.
- TRIPATHI, R.N. & NATH, N. Effect of Starch Dipping on Quality of Dehydrated Tomato Slice. *Journal Food Science Technology*, v.26(3), 137-141, 1989.
- VAGENAS, G.K., MARINOS-KOURIS, D. & SARAVACOS, G.D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. *Drying Technology*, v.8, n.2, 323-342, 1990.
- VÁZQUEZ, G., CHENLO, F., MOREIRA, R. & CRUZ, E. Grape drying in a pilot plant with a heat pump. *Drying Technology*, 15(3&4), 899-920, 1997.

- YALDIZ, O., ERTEKIN, C. & IBRAHIM UZUM, H. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26: 457-465, 2001.
- ZANONI, B., PERI, C., NANI, R. & LAVELLI, V. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Research International*, 31(5), 395-401, 1999.
- ZOGZAS, N.P., MAROULIS, Z. B. & MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12(7), 1653-1666, 1994.



Apêndice A
CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Os termopares utilizados na medição das temperaturas do ar de secagem foram calibrados com base em termômetros de referência, em 3 diferentes situações:

- a) Em um béquer contendo cerca de 2,0 litros de uma mistura de gelo/água destilada, mantida sob agitação, a qual se mantinha à temperatura constante de 0,5°C.
- b) Em um banho termostático (Marca MLW), contendo em seu interior água destilada, à temperatura constante de 44,97°C.
- c) Em um béquer contendo cerca de 2,0 litros de água destilada em ebulição, sob pressão atmosférica, à temperatura constante de 97,5°C.

Adotou-se a hipótese de correlação linear entre os valores indicados pelos termopares e os indicados pelos termômetros de referência, obtendo-se assim, a curva de calibração para cada termopar considerado.

A Tabela A.1 mostra os coeficientes obtidos pela análise de regressão linear, para os valores de temperaturas medidas pelos termopares (T_{TP}) e os indicados pelos termômetros de referência (T_{REF}). Os coeficientes de correlação (r^2) foram satisfatórios, pois se apresentaram superiores a 0,99 para todos os ajustes.

$$T_{REF} = a * T_{TP} + b$$



Tabela A.1: Coeficientes da equação de correção das temperaturas medidas pelos termopares.

	A	B	r²
T01	-2.44	1.05	0.999
T02	-2.32	1.05	0.999
T03	-2.70	1.05	0.999
T04	-4.83	1.08	0.999
T05	-2.76	1.05	0.999
T06	-3.02	1.05	0.999
T07	-3.28	1.06	0.999
T08	-3.39	1.05	0.999
T09	-3.27	1.05	0.999
T10	-3.24	1.05	0.999
T11	-2.32	1.04	0.999
T12	-2.23	1.04	0.999
T13	-2.69	1.06	0.999
T14	-2.95	1.06	0.999
T15	-2.11	1.03	0.999
T16	-2.25	1.05	0.999
T17	-2.43	1.05	0.999

APÊNDICE B

DADOS DA CINÉTICA DE SECAGEM

Tabela B.1: Cinética da secagem de tomate tipo Pêra, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s.

T= 45°C				T= 50°C			
Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional		
	BC	PR	CR		BC	PR	CR
0	1	1	1	0	1	1	1
15	0.91744	0.94648	0.94077	15	0.92511	0.93813	0.93941
30	0.84504	0.89544	0.88835	30	0.86208	0.88117	0.87935
45	0.79048	0.84200	0.84183	45	0.80446	0.82692	0.82917
60	0.74141	0.79724	0.79886	60	0.75254	0.78062	0.78028
75	0.69347	0.75371	0.7554	75	0.70343	0.73337	0.73743
105	0.61309	0.68111	0.68302	90	0.65524	0.68944	0.69890
135	0.53076	0.60612	0.61048	105	0.61134	0.64650	0.65589
165	0.46859	0.54558	0.55318	120	0.56575	0.60395	0.61907
195	0.39130	0.46696	0.47694	150	0.48260	0.52917	0.54101
225	0.34856	0.42037	0.43306	180	0.41039	0.46167	0.47705
255	0.30092	0.36611	0.38353	210	0.34079	0.3966	0.41768
315	0.22686	0.27807	0.30504	240	0.28037	0.34290	0.36088
375	0.16726	0.20671	0.23519	300	0.18607	0.24836	0.26893
435	0.12270	0.15435	0.18524	360	0.11975	0.17617	0.19786
495	0.08703	0.11421	0.14526	420	0.07404	0.12561	0.14485
555	0.06122	0.08464	0.11227	480	0.04462	0.08968	0.10617
615	0.04428	0.06449	0.08807	540	0.02633	0.06010	0.07806
675	0.02991	0.04665	0.06489	600	0.01583	0.03891	0.05877
735	0.01990	0.03352	0.04670	660	0.00849	0.02230	0.04520
795	0.01335	0.02443	0.03318	720	0.00428	0.01131	0.03617
855	0.00876	0.01741	0.02347	780	0.00047	0.00276	0.02832
915	0.00575	0.01246	0.01709				
975	0.00372	0.00890	0.01205				
1335	0.00026	0.00048	0.00019				
1395	0.00011	0.00002	0.00019				



Tabela B.2: Cinética da secagem de tomate tipo Pêra, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 2,0 m/s.

T= 40°C				T= 45°C				T= 50°C			
Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional		
	BC	PR	CR		BC	PR	CR		BC	PR	CR
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
15	0.94754	0.9345	0.93289	15	0.88009	0.91015	0.90016	15	0.90672	0.92314	0.94669
30	0.89676	0.88263	0.88234	30	0.81226	0.84766	0.83166	30	0.83930	0.86339	0.88817
49	0.83579	0.82686	0.82567	45	0.74418	0.78389	0.76463	45	0.78254	0.81316	0.83000
60	0.80223	0.79367	0.79197	60	0.70871	0.75008	0.72804	60	0.7333	0.76738	0.77356
79	0.74721	0.747	0.74758	75	0.66263	0.70389	0.67562	75	0.68422	0.72815	0.71948
94	0.7063	0.71139	0.71246	90	0.62019	0.66041	0.62810	90	0.64012	0.68892	0.66805
105	0.67768	0.68562	0.68439	105	0.58087	0.62026	0.58520	105	0.60068	0.65072	0.61941
121	0.63802	0.6478	0.64618	120	0.54358	0.58222	0.54403	120	0.55135	0.60774	0.57359
150	0.57177	0.58662	0.58358	155	0.46339	0.49847	0.45618	150	0.48139	0.54479	0.49030
180	0.51029	0.52498	0.5208	185	0.40303	0.43537	0.39404	180	0.40845	0.47780	0.41757
210	0.45528	0.47028	0.46609	210	0.35811	0.38664	0.34609	210	0.34137	0.41229	0.35453
250	0.39089	0.40653	0.40236	240	0.31259	0.33653	0.29820	240	0.28681	0.35949	0.30020
300	0.32288	0.32899	0.32356	270	0.27217	0.29112	0.25472	300	0.19286	0.26701	0.21374
360	0.25652	0.25016	0.23889	300	0.23578	0.24976	0.21539	360	0.09152	0.17083	0.15098
420	0.20368	0.1983	0.18365	360	0.17477	0.18207	0.15346	420	0.05668	0.12493	0.10594
480	0.16164	0.15394	0.13654	420	0.12652	0.12772	0.10662	540	0.01417	0.03912	0.05128
540	0.12821	0.12014	0.10129	480	0.09024	0.09276	0.07387	600	0.00779	0.02139	0.03542
600	0.10166	0.09395	0.07619	540	0.06354	0.06583	0.05073	660	0.00462	0.01250	0.02436
660	0.08057	0.07331	0.05685	600	0.04315	0.04603	0.03517	720	0.00304	0.00759	0.01669
720	0.06384	0.05731	0.04314	660	0.02872	0.03232	0.02340	780	0.00145	0.00337	0.01139
780	0.05057	0.04507	0.03276	720	0.01862	0.02296	0.01556	1320	0.00006	0.00041	0.00032
840	0.04004	0.03508	0.02528	780	0.01181	0.01614	0.01009	1435	0.00001	0.00018	0.00015
900	0.0317	0.02757	0.01935	840	0.00767	0.01167	0.00673				
950	0.02608	0.02258	0.01596	900	0.00560	0.00877	0.00452				
1370	0.00504	0.0057	0.00208	1360	0.00005	0.00002	0.00001				
1440	0.00383	0.00468	0.00107								

Tabela B.3: Cinética da secagem de tomate tipo Santa Cruz, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s.

T= 40°C				T= 45°C				T= 50°C			
Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional		
	BC	PR	CR		BC	PR	CR		BC	PR	CR
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
10	0.95475	0.95674	0.95532	10	0.94611	0.95571	0.88550	15	0.92385	0.95036	0.95156
20	0.91804	0.92382	0.92445	20	0.90662	0.91774	0.85184	30	0.85842	0.8998	0.89768
35	0.86741	0.87637	0.87072	30	0.87065	0.88158	0.81676	45	0.79953	0.84815	0.84367
50	0.82519	0.83681	0.83021	40	0.83603	0.84665	0.78401	60	0.75286	0.80082	0.79085
65	0.79043	0.79959	0.78468	50	0.80479	0.81559	0.75682	75	0.70788	0.76047	0.73987
80	0.75192	0.76278	0.74521	60	0.77484	0.78530	0.72659	90	0.66471	0.70985	0.69104
95	0.71827	0.72966	0.70232	70	0.74556	0.75554	0.69805	105	0.62518	0.66765	0.64454
110	0.68646	0.69934	0.66638	100	0.66266	0.67237	0.61572	120	0.58515	0.62107	0.60044
140	0.62148	0.63824	0.59093	130	0.58301	0.59043	0.54031	150	0.51259	0.53834	0.51947
170	0.56304	0.58380	0.52611	160	0.51275	0.52031	0.47552	180	0.44816	0.46432	0.44782
200	0.50543	0.52855	0.46403	190	0.45285	0.46162	0.42212	210	0.39159	0.39940	0.38489
230	0.45141	0.47470	0.37466	220	0.39456	0.4077	0.37169	240	0.34138	0.34129	0.32993
294	0.34721	0.37205	0.29190	250	0.33918	0.35637	0.32315	300	0.23987	0.23113	0.24080
350	0.26624	0.29312	0.20855	310	0.24898	0.27107	0.24282	360	0.15354	0.13652	0.17440
410	0.19090	0.21645	0.13613	370	0.18312	0.20017	0.17363	420	0.08893	0.07322	0.12548
470	0.12568	0.15176	0.08016	430	0.12849	0.14484	0.12230	480	0.04485	0.03696	0.08977
520	0.08517	0.11165	0.04934	490	0.08805	0.10525	0.08787	540	0.02191	0.01724	0.06389
575	0.05296	0.07923	0.02360	550	0.05316	0.07039	0.06010	600	0.01214	0.01275	0.04527
710	0.01489	0.02648	0.00744	610	0.03362	0.04385	0.04320	660	0.00805	0.00767	0.03194
770	0.00871	0.01494	0.00421	670	0.02071	0.02925	0.02638	720	0.00623	0.00514	0.02245
830	0.00484	0.00780	0.00247	730	0.01192	0.01770	0.01570	1365	0.00319	0.00254	0.00042
1430	0.00010	0.00015	0.00014	790	0.0084	0.01201	0.01091				
				850	0.00644	0.00872	0.00696				
				910	0.00495	0.00595	0.00443				
				980	0.00414	0.00388	0.00223				
				1160	0.00272	0.00033					
				1400	0.00218						
				1460	0.00157						

Tabela B.4: Cinética da secagem de tomate tipo Santa Cruz, para diferentes temperaturas e secadores, a uma velocidade de 1,5 m/s.

T= 40°C				T= 45°C				T= 50°C			
Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional			Tempo (min.)	Umidade adimensional		
	BC	PR	CR		BC	PR	CR		BC	PR	CR
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
15	0.92297	0.95207	0.94673	15	0.92882	0.94662	0.93654	25	0.92959	0.95005	0.95552
30	0.86234	0.91136	0.90258	30	0.86364	0.90427	0.88599	30	0.86510	0.89811	0.90117
45	0.81117	0.87484	0.86022	45	0.81498	0.85654	0.83309	45	0.81780	0.85658	0.86046
60	0.76516	0.84071	0.82000	60	0.77078	0.81550	0.78438	60	0.76372	0.81305	0.80745
75	0.72477	0.80979	0.78299	75	0.73021	0.77688	0.73805	75	0.71903	0.77529	0.76804
90	0.68619	0.78001	0.74721	90	0.69360	0.74105	0.69605	90	0.67588	0.73742	0.72729
105	0.65046	0.75207	0.71351	105	0.65811	0.70626	0.65558	105	0.63782	0.70421	0.69506
120	0.61758	0.72696	0.68440	120	0.62454	0.67338	0.61823	120	0.59942	0.67064	0.65683
150	0.55496	0.67876	0.62440	150	0.56099	0.61067	0.54653	155	0.51576	0.59599	0.58122
180	0.49622	0.63208	0.56904	180	0.50516	0.55512	0.48363	180	0.46429	0.54791	0.52994
210	0.44207	0.58990	0.51592	210	0.45374	0.50361	0.42590	210	0.40715	0.49312	0.47504
240	0.39397	0.55289	0.47162	270	0.40600	0.45522	0.37197	240	0.35507	0.44452	0.42691
300	0.30662	0.48420	0.39348	330	0.32681	0.37300	0.28189	305	0.23747	0.34466	0.32250
360	0.23245	0.42366	0.32512	390	0.25918	0.30238	0.20613	360	0.15338	0.26891	0.24155
420	0.17141	0.36991	0.26231	450	0.20222	0.24305	0.14434	420	0.08488	0.19770	0.16602
480	0.12187	0.32078	0.20043	510	0.15472	0.19332	0.09729	490	0.04216	0.13056	0.09788
533	0.08695	0.27866	0.14981	570	0.11590	0.15258	0.06396	540	0.02604	0.08744	0.06652
600	0.05566	0.23671	0.10591	630	0.08467	0.09343	0.04118	600	0.01701	0.05217	0.04389
660	0.03447	0.20122	0.07558	690	0.06148	0.07054	0.02653	660	0.01233	0.02916	0.02868
720	0.02030	0.16513	0.05310	750	0.04168	0.05394	0.01563	720	0.00975	0.01640	0.01917
780	0.01183	0.13416	0.03393	810	0.02829	0.04091	0.00973	780	0.00835	0.00933	0.01284
840	0.00676	0.10747	0.02175	870	0.01903	0.04105	0.00537	840	0.00744	0.00571	0.00852
900	0.00431	0.08459	0.01385	930	0.01249	0.03101	0.00337	1335	0.00560	0.00116	0.00141
960	0.00295	0.06497	0.00146	990	0.00815	0.02285	0.00221				
1370	0.00069	0.00797	0.00049	1050	0.00548	0.01729	0.00144				
				1290	0.00060	0.00408	0.00037				

APÊNDICE C

Propriedades Reológicas – Força máxima e Distância

Tabela C.1: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 40°C:

Tomate tipo Santa Cruz, T = 40°C

BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
1046,0	6,012	1388,6	5,117	561,7	4,168	1891,0	5,780	1258,7	4,852	1018,8	6,863
671,6	5,605	693,2	7,188	965,5	5,512	1718,1	7,085	730,5	7,410	1704,6	5,793
1357,1	6,065	569,0	6,845	338,4	5,972	347,0	6,327	1612,4	6,602	469,7	5,475
696,8	3,858	1373,0	9,023	820,4	5,108	305,5	4,997	2203,7	6,610	-	-
669,6	4,923	561,3	6,997	343,6	3,983	415,8	3,172	-	-	-	-

Tabela C.2: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 45°C:

Tomate tipo Santa Cruz, T = 45°C

BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
1267,5	7,832	1499,8	5,037	1265,1	6,930	937,4	6,120	1536,5	7,470	1240,7	5,910
1529,2	5,835	1228,6	7,347	512,1	6,055	557,7	6,915	864,6	5,625	956,0	7,108
851,9	6,920	1184,1	5,690	1085,6	5,275	1056,6	6,628	975,5	7,008	1130,7	4,943
1557,0	8,087	485,0	5,048	2169,0	7,690	698,9	5,273	669,2	6,332	1116,1	7,030
1338,8	6,852	871,6	6,427	472,4	5,365	1140,7	7,012	-	-	643,6	6,423

Tabela C.3: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Santa Cruz, secos a temperatura de 50°C:

Tomate tipo Santa Cruz, T = 50°C

BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
682,7	6,102	723,7	5,415	271,7	5,762	937,4	6,120	561,4	5,273	1003,5	3,148
1024,4	7,260	498,9	4,830	505,6	3,755	591,7	7,425	499,0	4,505	1385,8	8,540
475,9	6,358	670,7	5,085	418,2	6,077	1056,4	6,628	421,6	3,572	1350,5	6,360
820,3	5,605	554,6	6,435	451,3	4,085	698,4	5,332	496,0	3,648	-	-
648,5	6,693	-	-	-	-	1138,9	7,012	306,8	5,247	-	-

Tabela C.4: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 40°C:

Tomate tipo Pêra, T = 40°C

BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
-	-	828,2	5,775	-	-	911,6	6,907	-	-	1018,8	6,863
-	-	1575,5	7,695	-	-	1718,8	8,842	-	-	1704,6	5,793
-	-	1752,2	6,045	-	-	715,8	6,733	-	-	469,7	5,475
-	-	1368,0	6,685	-	-	396,8	4,790	-	-	-	-
-	-	1676,1	5,210	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela C.5: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 45°C:

Tomate tipo Pêra, T = 45°C											
BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
1424,2	5,182	665,9	5,608	446,4	5,015	1778,9	8,170	1998,8	7,695	1240,7	5,370
1536,0	6,673	1288,9	6,017	391,7	4,508	550,2	6,015	1891,3	7,630	956,0	5,617
2274,6	6,052	1898,5	6,840	1605,7	5,782	930,2	6,113	1594,0	6,650	1130,7	6,807
1121,1	5,605	967,0	5,345	507,3	5,948	755,3	6,113	1144,1	6,510	1116,1	6,865
1840,7	7,395	1156,4	8,765	-	-	1058,3	8,105	-	-	643,6	5,750

Tabela C.6: Propriedades reológicas (força máxima e distância), para os diferentes tipos de secadores em diferentes condições de velocidade do ar para os tomates tipo Pêra, secos a temperatura de 50°C:

Tomate tipo Pêra, T = 50°C											
BC				CR				PR			
1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s		1,5 m/s		2,0 m/s	
Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)	Força (g)	Dist. (mm)
434,9	3,630	693,0	4,995	495,2	7,148	1812,0	8,170	1178,7	6,520	426,2	4,755
451,8	5,360	757,8	4,930	619,4	5,313	550,2	6,015	500,1	4,925	936,9	7,347
638,6	4,915	407,0	5,503	542,6	4,840	930,2	6,113	1159,5	5,977	425,4	5,992
408,1	5,575	566,0	5,847	414,3	7,247	755,3	6,133	1457,8	7,883	972,9	5,108
-	-	496,2	6,000	638,9	6,420	1058,3	8,105	498,9	4,597	377,8	3,483

