

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
CIÊNCIAS DE ALIMENTOS

**SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum*  
*Mill*) EM CAMADA DELGADA: AVALIAÇÃO DAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS**

**KAREN DIAS COELHO**  
ENG<sup>a</sup> DE ALIMENTOS

**Prof Dr Luiz Antônio de Almeida Pinto**  
ORIENTADOR

RIO GRANDE, RS  
2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE  
ALIMENTOS**

**SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum*  
*Mil*) EM CAMADA DELGADA: AVALIAÇÃO DAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS**

**KAREN DIAS COELHO**  
ENG<sup>a</sup> DE ALIMENTOS

Dissertação apresentada para  
obtenção de Título de Mestre em  
Engenharia e Ciências de  
Alimentos

**Prof Dr Luiz Antônio de Almeida Pinto**  
ORIENTADOR

RIO GRANDE,RS  
2010

“A persistência é o caminho para o êxito”  
(Charles Chaplin)

Dedico este trabalho ao meu vô Joaquim Simões Dias (in memorian) e a minha vó Itelvina Francisca Coelho (in memorian), que infelizmente não puderam acompanhar o final desta caminhada, mas com certeza estão me olhando, onde quer que estejam.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Aos meus pais Waldenir Francisco Coelho e Maria Helena Dias Coelho**

Agradeço por tudo, principalmente pelo incentivo de sempre lutar pelos meus sonhos

### **Aos meus irmãos Diego Dias Coelho e Pablo Dias Coelho**

Agradeço pelo carinho e incentivo de sempre seguir em frente

### **Ao meu noivo Matheus Ribeiro Pereira**

Que apesar da distância, sempre esteve presente com muito amor, carinho, dedicação e incentivo

### **A minha cunhada Juliana Mello**

Por me incentivar e me animar muito, principalmente no final desta caminhada

### **Ao meu orientador Luiz Antônio de Almeida Pinto**

Agradeço por todo ensinamento que recebi e continuo recebendo

### **Aos colegas do Laboratório de Operações Unitárias**

Agradeço pela ajuda, amizade e convivência recebida, em especial a Jaques Rizzi, Catarina Moura, Bruna Costa e Kelly Moraes

### **Aos professores do programa de pós-graduação**

Pelos conhecimentos e aprendizados adquiridos

### **Aos colegas do programa de pós-graduação**

Pela amizade e convívio durante esta caminhada

### **A secretária Islanda Passos**

Pela atenção e carinho ao longo deste período

### **A Universidade Federal do Rio Grande**

Pela formação profissional

### **A toda sociedade Brasileira, representa pelo Governo Federal e CAPES**

Pelo incentivo financeiro

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
RESUMO GERAL .....	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	4
1.1 GENERALIDADES.....	4
1.2 JUSTIFICATIVA.....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>8</b>
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 TOMATE.....	9
3.1.1 Classificação do Tomate.....	9
3.1.1.1 Classificação em Grupos .....	10
3.1.1.2 Classificação em Subgrupos.....	10
3.1.1.3 Definição da classe ou calibre.....	12
3.1.1.4 Classificação em tipo.....	13
3.1.2 Caracterização do Tomate.....	14
3.1.3 Licopeno.....	17
3.1.4 Produção de tomate.....	19
3.1.5 Tomates Secos.....	20
3.2 UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	21
3.3 SECAGEM.....	23
3.3.1 Definições.....	23
3.3.2 Características de secagem.....	25
3.3.3 Período de taxa constante.....	25
3.3.4 Período de taxa decrescente.....	26
3.3.5 Cinética da Secagem.....	27
3.3.5.1 Correlações Empíricas.....	27

3.3.5.2 Modelo Difusivo .....	28
3.3.6 Secagem em Camada Delgada.....	30
3.3.7 Secagem de Tomate em Camada Delgada.....	31
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>33</b>
4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	34
4.1 ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE TOMATE ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill) EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PARALELO DO AR.....	35
1. INTRODUÇÃO.....	35
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.1 Matéria-prima.....	37
2.2 Equipamento de Secagem.....	37
2.3 Procedimento Experimental de Umidade de Equilíbrio.....	37
2.4 Procedimento Experimental da Secagem .....	38
2.5 Procedimento Experimental de Reidratação.....	39
2.6 Procedimento de Cálculo.....	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.1 Umidade de Equilíbrio.....	42
3.2 Caracterização da Secagem.....	44
3.3 Reidratação.....	51
4. CONCLUSÃO.....	52
5. NOMENCLATURA.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
4.2 ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE LICOPENO, COR E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TOMATE ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill) SECO EM CAMADA DELGADA COM ESCOAMENTO PARALELO.....	57
1. INTRODUÇÃO .....	57
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
2.1 Matéria-prima.....	58
2.2 Equipamento de Secagem.....	59
2.3 Procedimento Experimental de Secagem.....	59
2.4 Metodologia Analítica .....	60
2.4.1 Determinação da cor.....	60
2.4.2 Determinação do Teor de Licopeno.....	60
2.4.3 Determinação da Capacidade de Produção.....	61

2.5 Metodologia Estatística .....	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.1 Secagem.....	63
3.2 Cor.....	63
3.3 Teor de Licopeno.....	64
3.4 Capacidade de Produção.....	65
3.5 Análise Estatística dos Resultados .....	66
4. CONCLUSÃO.....	73
5. NOMENCLATURA.....	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	77
5. CONCLUSÃO GERAL.....	78
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
<b>CAPÍTULO V</b> .....	80
7. REFERÊNCIAS GERAIS.....	81
APÊNDICES.....	88



## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

Figura 1: Esquema do processo de secagem convectiva de um material sólido.....	24
Figura 2: Curva típica de secagem.....	25

### CAPÍTULO III

#### **ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PARALELO DO AR**

Figura 1: Equipamento utilizado para determinar a taxa de reidratação.....	39
Figura 2: Isotermas de equilíbrio para o tomate nas temperaturas de estudo.....	42
Figura 3: Ajuste da equação de GAB para a isoterma de tomate a 60 e 70 °C.....	44
Figura 4: Curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem do tomate em escala linear.....	45
Figura 5: Curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem tomate em escala log-linear.....	45
Figura 6: Curvas do adimensional de água livre, a partir da umidade crítica em função do tempo para a secagem de tomate, para 60, 70 e 80 °C, 3, 5 e 7mm.....	47
Figura 7: Curvas dos valores de $\ln(D_{EF})$ em função do inverso da temperatura do ar de secagem, para o primeiro e segundo período de taxa decrescente da secagem de tomate em camada delgada.....	50
Figura 8: Curvas da umidade em função do tempo dos experimentos 1 e 3 de reidratação das amostras de tomate desidratada.....	51

#### **ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE LICOPENO, COR E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) SECO EM CAMADA DELGADA COM ESCOAMENTO PARALELO**

Figura 1: Curvas umidade em base úmida em função do tempo de secagem de tomate em camada delgada.....	63
---	----

Figura 2: Gráfico de Pareto para a resposta cor das amostras secas de tomate..	67
Figura 3: Gráfico de Pareto para a resposta teor de licopeno das amostras secas de tomate.....	67
Figura 4: Gráfico de Pareto para a resposta capacidade de produção das amostras secas de tomate.....	68
Figura 5: Superfície de Resposta para cor das amostras secas de tomate.....	71
Figura 6: Superfície de Resposta para teor de licopeno para as amostras secas de tomate.....	71
Figura 7: Superfície de Resposta para capacidade de produção para as amostras secas de tomate.....	72

## APÊNDICES

Figura 1: Secador descontínuo de bandejas, com escoamento paralelo do ar de secagem, em escala piloto – Artigos 1 e 2.....	89
Figura 2: Diagrama tridimensional de cores.....	89
Figura 3: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60°C e espessura de 3 mm – Artigo 1.....	90
Figura 4: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70°C e espessura de 3 mm – Artigo 1.....	90
Figura 5: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80°C e espessura de 3 mm – Artigo 1.....	91
Figura 6: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60°C e espessura de 5 mm – Artigo 1.....	91
Figura 7: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70°C e espessura de 5 mm – Artigo 1.....	92
Figura 8: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80°C e espessura de 5 mm – Artigo 1.....	92
Figura 9: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60°C e espessura de 7 mm – Artigo 1.....	93
Figura 10: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70°C e espessura de 7 mm – Artigo 1.....	93
Figura 11: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80°C e espessura de 7 mm – Artigo 1.....	94
Figura 12: Curva de Umidade em base úmida em função do tempo de secagem de tomate em camada delgada com escoamento perpendicular do ar de	

secagem – Artigo 2.....	95
-------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO II

Tabela 1: Classes do tomate em função do diâmetro transversal, em mm.....	12
Tabela 2: Composição dos frutos maduros de tomate.....	15
Tabela 3: Teores de vitaminas nos frutos maduros de tomate.....	16
Tabela 4: Equações de isotermas para a determinação da umidade de equilíbrio	22

### CAPÍTULO III

#### **ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PARALELO DO AR**

Tabela 1: Ensaio realizado para a secagem de tomate.....	39
Tabela 2: Equações de isotermas para a determinação da umidade de equilíbrio	40
Tabela 3: Equações empíricas para secagem de alimentos.....	41
Tabela 4: Parâmetros das equações de isoterma em estudo e coeficientes de determinação.....	43
Tabela 5: Caracterização da secagem de tomate em camada delgada.....	46
Tabela 6: Resultados das correlações (R) para os ajustes dos modelos utilizados para a estimativa dos valores da constante de secagem.....	48
Tabela 7: Valores estimados para a constante de secagem ( $K_{S1}$ e $K_{S2}$ ) pelo modelo de Henderson e Pabis e da difusividade efetiva ( $D_{EF1}$ e $D_{EF2}$ ).....	49

#### **ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE LICOPENO, COR E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) SECO EM CAMADA DELGADA COM ESCOAMENTO PARALELO**

Tabela 1: Matriz do planejamento experimental da secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do ar.....	62
Tabela 2: Parâmetros obtidos na determinação da cor.....	64
Tabela 3: Teor de Licopeno em tomate seco.....	65

Tabela 4: Capacidade de produção de tomate seco.....	66
Tabela 5: ANOVA para a resposta cor das amostras secas de tomate.....	69
Tabela 6: ANOVA para a resposta teor de licopeno das amostras secas de tomate.....	69
Tabela 7: ANOVA para a resposta capacidade de produção das amostras secas de tomate.....	69

## **APÊNDICES**

Tabela 1: Estimativa dos Efeitos para a resposta Cor (ângulo de Hue) – Artigo 2	96
Tabela 2: Estimativa dos Efeitos para a resposta Teor de Licopeno – Artigo 2.....	96
Tabela 3: Estimativa dos Efeitos para a resposta Capacidade de Produção – Artigo 2 .....	97

## NOMENCLATURA

a	Constante equações 1 e 2; 1 e 2 (art 1)	Adimensional
$a_w$	Atividade de água	Adimensional
B	Constante equações 4; 4 (art 1)	Adimensional
C	Constante equações 9 e 10; 7 e 8 (art 1)	Adimensional
$D_{EF}$	Difusividade efetiva de umidade	$m^2.s^{-1}$
$\frac{dX}{dt}$	Taxa de secagem	Adimensional
$E_A$	Energia de ativação	$kJ.mol^{-1}$
$F_0$	Número de Fourier	Adimensional
$H_{ab}$	Ângulo de Hue	Graus
K	Constante de secagem	$min^{-1}$
k	Constante equações 1, 2, 3 e 4; 1, 2, 3 e 4 (art 1)	Adimensional
L	Espessura	m
N	Taxa de secagem por unidade de massa	$kg.kg^{-1}$
n	Constante equações 7 e 8; 9 e 10 (art 1)	Adimensional
R	Constante universal dos gases	$(8,314)J.mol^{-1}.K^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t	Tempo	s
X	Umidade (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_C$	Umidade crítica (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_E$	Umidade de equilíbrio (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_m$	Umidade da monocamada	$kg.kg^{-1}$
$X_0$	Umidade inicial (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_{Trans}$	Umidade de transição (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\frac{X - X_E}{X_0 - X_E}$	Adimensional de água livre	Adimensional
$Y_{cap.prod}$	Capacidade de Produção	$kg/m^2.h$
$Y_{cor}$	Cor (ângulo de Hue)	Graus
$X_{espes}$	Espessura da fatia de tomate	mm
$Y_{Licop}$	Teor de Licopeno	$\mu g/g$
$X_{temp}$	Temperatura do ar de secagem	$^{\circ}C$

## **CAPÍTULO I**

(RESUMO GERAL, ABSTRACT, INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS)

## RESUMO GERAL

O tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) constitui um alimento rico em vitaminas dos complexos A e B e minerais importantes, além de ácido fólico, cálcio e frutose. Ainda o tomate contém licopeno, que é um poderoso antioxidante, capaz de neutralizar a ação dos radicais livres, responsáveis pelo envelhecimento e degeneração das células. Poucos produtos *in natura* têm um conteúdo de umidade tão alto quanto o tomate (cerca de 95%, b.u.) e a sua desidratação tem sido um desafio. A secagem é uma importante operação unitária na conservação de alimentos, pois tem a finalidade de reduzir a atividade de água e conseqüentemente a ação microbiana, reações enzimáticas, oxidativas e hidrolíticas do produto e aumentar sua vida útil. Este trabalho teve como objetivo principal analisar as condições operacionais da secagem de tomate em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, avaliando as características do produto final. Os objetivos específicos foram caracterizar a secagem através de curvas características experimentais, determinar a constante de secagem, difusividade efetiva de umidade e energia de ativação e definir a condição mais adequada para a secagem em camada delgada de tomate utilizando a metodologia de superfície de resposta. As variáveis estudadas foram temperatura (60, 70 e 80 °C) e espessura da fatia de tomate (3, 5 e 7mm), buscando como resposta o teor de licopeno, cor, através do ângulo de Hue, e capacidade de produção. Os resultados mostraram que a secagem de tomate em camada delgada, com escoamento paralelo do ar, apresentou o período de taxa constante e primeiro e segundo períodos de taxa decrescente. A difusividade efetiva ficou entre  $1,56 \cdot 10^{-10}$  e  $2,67 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para o primeiro período de taxa decrescente e entre  $4,21 \cdot 10^{-11}$  e  $8,35 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s para o segundo período de taxa decrescente. A energia de ativação apresentou valores médios de 16,99 e 30,64 kJ.mol<sup>-1</sup> para o primeiro e segundo período de taxa decrescente, respectivamente. A condição mais adequada de operação encontrada foi temperatura do ar de secagem de 60 °C e espessura da fatia de tomate de 3 mm, onde apresentou cor de 47,70°, teor de licopeno de 301,69 µg/g e capacidade de produção de 1,65 kg/m<sup>2</sup>h.

**Palavras-chave:** camada delgada, licopeno, secagem, tomate.



## ABSTRACT

Tomato (*Lycopersicon esculentum Mill*) is a product rich in vitamins from complex A and B, and important minerals, besides folic acid, calcium and fructose. Tomato has also lycopene, that is a powerful antioxidant, able to neutralize radicals action, which causes the cell's aging and degeneracy. Few *in natura* products have moisture content as high as tomato (about 95%, w.b.) and its dehydration has been a challenge. Drying is an important unit operation for food conservation, because its aim is to reduce the water activity and therefore the microbial action, enzymatic reactions, oxidative and hydrolytic of the product and raise its expiration date. The main purpose of the present work is analyze the operational conditions of tomato thin layer drying, using parallel flow of drying air, evaluating the final product characteristics. The specific purposes were to characterize drying through characteristics experimental curves, to determine the drying constant, moisture effective diffusivity and activation energy and also define the more suitable condition to dry tomato in thin layer based on surface response methodology. The studied variables were temperature (60, 70 and 80 °C) and tomato thickness (3, 5 and 7mm), searching as responses the lycopene percentage, color through the Hue's angle, and manufacture capacity. The results showed that tomato's thin layer drying, using a parallel flow, reveals the constant rate period and the first and second periods of decreasing rates. The effective diffusivity was between  $1,56 \cdot 10^{-10}$  and  $2,67 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s for the second period of decreasing rate. The activation energy has shown average values of 16,99 and 30,64 kJ.mol<sup>-1</sup> for the first and second periods of decreasing rates, respectively. The best operational condition found was 60 °C of drying temperature and 3 mm of tomato thickness, where reveals 47,70 ° of color, 301,69 µg/g of lycopene percentage and manufacturing capacity of 1,65 kg/m<sup>2</sup>h.

**Key-words:** drying, lycopene, thin layer, tomato

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

### **1.1 Generalidades**

As frutas e vegetais exercem um papel fundamental na nutrição humana, constituindo fontes indispensáveis de nutrientes, vitaminas e minerais. Por representarem um alto teor de umidade (cerca de 80%) são altamente perecíveis e por isso, devem ser refrigerados ou processados o mais rapidamente possível após a colheita, a fim de diminuir as perdas. Em alguns países de clima tropical e subtropical, estas podem chegar a aproximadamente 40-45% da produção devido à inadequada refrigeração e armazenamento. O principal objetivo do processamento de alimentos é convertê-los em produtos mais estáveis que possam ser estocados por longos períodos, tendo como técnicas mais importantes o enlatamento, o congelamento e a desidratação (JAYARAMAN & DAS GUPTA, 1992).

A secagem é uma importante operação unitária na conservação de alimentos, pois tem a finalidade de reduzir a atividade de água e conseqüentemente a ação microbiana, reações enzimáticas do produto e aumentar o tempo de prateleira. Neste sentido, diversos trabalhos vêm sendo publicados, principalmente relacionados a industrialização de alimentos (FLORO, 2004).

O estudo da secagem de materiais sólidos em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação, obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também um maior conhecimento dos fundamentos e mecanismos envolvidos. O conhecimento da umidade de equilíbrio, uma característica termodinâmica do sistema, é de grande importância para os processos de transformação, preservação e acondicionamento de produtos alimentícios, sendo necessário determinar o seu valor para a avaliação da cinética de secagem (BATISTA, 2004).

Os legumes e as hortaliças desidratadas apresentam como principais vantagens a grande redução de peso e volume, não necessitam de refrigeração durante o transporte ou armazenamento, como é o caso dos produtos frescos ou congelados, e são compatíveis com outros ingredientes nas misturas desidratadas, como sopas. A secagem pode significar considerável economia no transporte, no manuseio e na estocagem do produto, além de prover um efetivo método de prolongamento de sua vida útil. O interesse por alimentos desidratados tem crescido

paralelamente ao aumento da demanda por alimentos “prontos para consumo”. (BARRET, 1990).

Entre as hortaliças mundialmente cultivadas para consumo *in natura* e, sobretudo, industrializado, o tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), hortaliça cuja parte comestível é o fruto, se sobressai, razão porque é considerado de produção e utilização universal. Este fruto climatérico é altamente perecível e as técnicas de conservação na pós-colheita podem contribuir para minimizar suas perdas e agregar valor (CAMARGO *et al.*, 2007).

O tomate seco foi introduzido no mercado brasileiro por imigrantes de países como Espanha e Itália e de algumas recentes produções domésticas nacionais (VEJA *et al.*, 2001). Suas principais vantagens e aplicações estão na culinária, substituindo o tomate *in natura* na maioria das receitas (BARRET, 1990).

Estudos recentes demonstram que o licopeno, o pigmento que dá cor vermelha ao tomate, é um potencial agente anticâncer. O licopeno é ainda um poderoso antioxidante, capaz de neutralizar a ação dos radicais livres, responsáveis pelo envelhecimento e degeneração das células (LUZ, 2008).

## **1.2 Justificativa**

O licopeno é a substância que dá a cor avermelhada ao tomate, melancia, beterraba, pimentão, entre outros alimentos - é um antioxidante que, quando absorvido pelo organismo, ajuda a impedir e reparar os danos às células causados pelos radicais livres, que são produzidos durante funções normais do corpo humano, como respiração e atividade física. Também são formados como resultado do hábito de fumar, superexposição ao sol, poluição do ar e stress. São altamente reativos e, se não controlados, podem danificar as moléculas importantes das células saudáveis do corpo humano. Isso pode contribuir para o desenvolvimento de várias doenças, como câncer e doenças cardiovasculares.

Os tomates são, de longe, a fonte mais rica em licopeno, poderoso antioxidante que combate os radicais livres, retarda o envelhecimento e pode proteger contra o câncer, inclusive o de próstata. Ainda, o licopeno é mais bem absorvido pelo nosso organismo quando os produtos do tomate, como o tomate seco, por exemplo, são

ingeridos com azeite de oliva. O licopeno de produtos processados é, também, muito melhor absorvido do que o dos produtos *in natura*.

As operações de desidratação ou secagem são importantes nas indústrias químicas e de alimentos. Durante a secagem ocorrem variações nas suas características físicas, químicas e biológicas, que, dependendo da intensidade do efeito, causam sua perda ou inutilidade para uma determinada função (alimentícia ou germinativa). Assim sendo, é importante o conhecimento dos efeitos da secagem sobre as propriedades químicas e biológicas do produto, uma vez que afetam sensivelmente os fenômenos de transferência de massa principalmente para alimentos.

### **Histórico da linha de Pesquisa**

O Laboratório de Operações Unitárias, da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), possui a linha de pesquisa de secagem de alimentos, onde são realizadas pesquisas com produtos de interesse da região. Já foram realizadas secagem de farinha de pescado, quitina, quitosana, arroz, cebola, alho, *Spirulina platensis*, maçã e rejeitos de hortifrutigranjeiros, entre outros. As pesquisas são realizadas em nível de iniciação científica, projeto de graduação no curso de Engenharia de Alimentos e de pós-graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos (Mestrado e Doutorado), onde foram realizadas ao longo desse tempo, várias dissertações de mestrado e duas teses de doutorado, já defendidas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos/FURG. O grupo publica tanto em eventos técnico-científicos regionais, nacionais e internacionais (IDS, CBCTA, COBEQ, SLACA, ENEMP, COBEQ-IC, CRICTE, MPU/FURG, CIC/UFPEL, dentre outros) como também em periódicos de circulação nacional e internacional (Drying Technology, JFE, JFPE, Adolf Lutz, IJFST, LWT, CEP, BJFTM BJChe, Vetor).

Em 2007 teve início o estudo de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em secador de camada delgada, através de um projeto de graduação da Engenharia de Alimentos. Em 2008 começou a presente pesquisa, que apresenta o estudo da secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do ar de secagem, avaliando as características físico-químicas do produto final.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar as condições operacionais de secagem do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, avaliando as características do produto final obtido.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar a secagem em camada delgada do tomate, através de curvas características experimentais;
- Caracterizar a cinética da secagem de tomate em camada delgada;
- Determinar a constante de secagem, difusividade efetiva de umidade e energia de ativação;
- Definir as melhores condições para a secagem em camada delgada de tomate, utilizando planejamento experimental, buscando como resposta o teor de licopeno, cor, através do ângulo de Hue, e capacidade de produção.

**CAPÍTULO II**  
(REVISÃO BIBLIOGRÁFICA)

### **3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

#### **3.1 Tomate**

O tomateiro é uma dicotiledônea, da família *Solanaceae*, espécie *Lycopersicon esculentum* Mill. É uma hortaliça cuja parte comestível é o fruto do tipo baga carnosa e suculenta, com aspecto variável, conforme o cultivar. Em sua maioria, são vermelhos quando maduros, fazendo exceção aos cultivares japoneses do tipo salada, com frutos rosados (FILGUEIRA, 1982).

O tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) tem sua origem provavelmente na Região Andina, parte ocidental da América do Sul, e também da América central (FILGUEIRA, 1982). Ainda, o tomate é a segunda hortaliça em área cultivada no mundo, e a primeira em volume industrializado. Ele é um fruto altamente perecível, com perdas pós-colheita da ordem de 25% a 50%, variando muito de região a região (BARRET, 1990).

No Brasil, o tomate é principalmente industrializado como concentrado e na forma de molhos especializados e a expectativa para o consumo doméstico do tomate processado continua crescente fazendo-se necessária a diversificação dos produtos derivados. As perdas na pós-colheita podem ser causadas por danos mecânicos, armazenamento impróprio, manuseio excessivo, transportes inadequados e grande tempo de exposição no varejo às práticas de manuseio pós-colheita (FERREIRA *et al.*, 2002).

O tomate, por ser um fruto altamente perecível e com ótima compatibilidade ao processo de desidratação, vem sendo apontado como uma das principais alternativas para reduzir as perdas e agregar valor à matéria-prima (LUZ, 2008).

##### **3.1.1 Classificação do Tomate**

Nos últimos anos, graças às novas tecnologias, aumentou o número de cultivares plantados em escala comercial no centro-sul que gerou necessidade de adotar padrão para comercialização. Até meados de 70, as normas para padronização e classificação de tomate destinado ao mercado, que eram realizadas por cooperativas, passaram a ser adotadas pelos mercados do centro-sul e tinham como

base o comprimento, diâmetro dos frutos, coloração, brilho e outros parâmetros (FILGUEIRA, 1982).

Pela legislação vigente (BRASIL, 1995) e pela proposta no Anexo XVII da Portaria SARC nº 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002), o tomate é classificado em grupos, subgrupos, classes ou calibres, tipos ou grau de seleção.

### **3.1.1.1 Classificação em Grupos**

De acordo com o formato do fruto, o tomate é classificado em dois grupos: oblongo, quando o diâmetro longitudinal é maior que o transversal, e redondo, quando o diâmetro longitudinal é menor ou igual ao transversal (BRASIL, 1995; BRASIL, 2002). Na norma da Comissão Econômica Européia (ECE, 2000) e no *Codex alimentarius* proposto o tomate é classificado em quatro grupos: redondo, achatado com sulcos, oblongo ou alongado e tomate cereja, incluindo no último o tomate *cocktail*. Forma bem definida, seja redonda, globosa, globosa planada ou ovalada dependendo da cultivar, juntamente com outros atributos, é um bom índice de qualidade do produto (CASQUET, 1998). A forma do tomate está relacionada ao grupo a que pertence a cultivar. Cultivares do grupo *Santa Cruz* apresentam frutos de formato oblongo ou alongado e predominantemente bilocular, tolerando-se todavia a presença de três lóculos e do grupo *salada* ou *caqui* que possuem formato redondo, globoso ou achatado são tipicamente pluriloculares (FILGUEIRA, 1982; CAMARGO, 1992). As cultivares de tomate cereja, híbridos amarelos, laranja e *cocktail*, que também são da forma arredondada, apresentam frutos biloculares (SAKATA, 1998; EMBRAPA, 1993; SAKAMA, 2001).

### **3.1.1.2 Classificação em subgrupos**

Outro fator de qualidade do tomate é o estado fisiológico, que está relacionado com o estágio de maturação do fruto, pois é ele que define o momento da colheita. A cor sugere as mudanças de sabor, textura e aroma, decorrentes do processo de maturação (ZAMBON, 1984; SILVA & GIORDANO, 2000). A modificação da coloração do tomate é devida à clorofila e aos carotenóides. A cor verde dos frutos imaturos é atribuída à clorofila. Ao máximo tamanho segue imediata mudança de cor, início da



maturação, refletindo a degradação da clorofila, que permanece em pequena quantidade nos tecidos do fruto (MEDINA & MEDINA, 1981; ZAMBON, 1984; ZAMBRANO *et al.*, 1995). Os principais componentes dos carotenóides em tomate são o caroteno (amarelo) e o licopeno (vermelho), cuja síntese e decomposição são acentuadas na fase de transição entre a maturação e senescência do fruto (ZAMBON, 1984; ZAMBRANO *et al.*, 1995). Em tomates, há intensa degradação de clorofila durante o amadurecimento, com síntese gradual de licopeno (CHITARRA & CHITARRA, 1990). A cor vermelha dos frutos é considerada como sendo o acúmulo de licopeno. O estágio verde maduro (início de mudança de cor) é considerado o primeiro sintoma visual para o índice de maturação (ZAMBON, 1984).

A mudança de cor do tomate é considerada como índice de colheita (ZAMBRANO *et al.*, 1995). Desde que o fruto tenha completado seu desenvolvimento fisiológico, poderá ser colhido, mesmo que se apresente com a coloração verde clara. O fruto fisiologicamente desenvolvido, verde maduro, ideal para a colheita, é identificado pela sua estrutura interna. As sementes devem estar completamente desenvolvidas e são cortadas pela lâmina ao se realizar um corte transversal do fruto. A placenta deve exibir um material gelatinoso em, pelo menos, um lóculo enquanto, nos demais, está em formação. O ponto de colheita determina maior ou menor resistência do fruto ao manuseio, sua capacidade de completar a maturação, sua aparência e qualidade (EMBRAPA, 1993; CASQUET, 1998).

De acordo com a Portaria nº 553/95 do MAPA (BRASIL, 1995) e Anexo XVII da Portaria SARC nº 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002), o estágio de maturação, classifica o tomate de coloração vermelha, em cinco subgrupos: verde maduro, pintado, rosado, vermelho e vermelho maduro. Verde maduro: quando se evidencia o início do amarelecimento na região apical do fruto; pintado: quando as cores amarelo, rosa ou vermelho encontram-se entre 10% a 30 % da superfície do fruto; rosado: quando 30% a 60% do fruto encontra-se vermelho; vermelho: quando o fruto apresenta entre 60% e 90% da sua superfície vermelha; e vermelho maduro: quando mais de 90% da superfície do fruto encontra-se vermelha.

A avaliação da cor é realizada na maioria dos produtores e/ou cooperativas por processo visual. Porém, há uma tendência para processo mecanizado através de câmaras cujas células fotoelétricas classificam cada tomate de acordo com quatro tamanhos e quatro cores diferentes, inclusive os totalmente verdes (SILVA, 2001).

### 3.1.1.3 Definição da classe ou calibre

Os frutos são avaliados pelo tamanho que, por sua vez, é medido através da circunferência ou diâmetro transversal (AMARAL JÚNIOR, 1997; FONTES *et al.*, 2000), largura (AMARAL JÚNIOR, 1997), peso e volume (CHITARRA & CHITARRA, 1990; FERREIRA *et al.*, 2002). A classe ou calibres do tomate de mesa na legislação brasileira (BRASIL, 1995; BRASIL, 2002) é definida em função do diâmetro transversal do fruto, em *mm*, de acordo com o grupo a que pertença. O tomate oblongo é classificado em três classes: grande, médio e pequeno, conforme pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 4: Classes do tomate em função do diâmetro transversal, em mm.

Classes ou calibres	Oblongo	Redondo
Gigante	-	
Grande	Maior que 60	Maior que 80 até 100
Médio	Maior que 50 até 60	Maior que 65 até 80
Pequeno	Maior que 40 até 50	Maior que 50 até 65

Fonte: Padrão de Identidade e Qualidade do tomate de mesa (FERREIRA *et al.*, 2002)

O tomate redondo, com exceção do *Lycopersicon esculentum*, variedades *cerasiforme*, cereja (BRASIL, 1995; BRASIL, 2002), híbrido amarelo, alaranjado e cocktail, é classificado em quatro classes: gigante, grande, médio e pequeno (Tabela 1).

Os atributos largura e altura dos frutos do tomateiro variam em função da cultivar (FLORI, 1993).

O tamanho do fruto está relacionado entre outros fatores à quantidade de água utilizada na rega que determinará a maior ou menor concentração de componentes solúveis (CASQUET, 1998). Alto índice pluviométrico desencadeia uma produção de tomates de grande tamanho, porém com menor conteúdo de nutrientes e de sabor menos acentuado (CASQUET, 1998; SILVA & GIORDANO, 2000).

O peso é outro atributo importante sob o ponto de vista comercial. Apesar de estar relacionado à cultivar, não é considerado pela legislação vigente. Tomate oblongo do grupo *Santa Cruz* apresenta peso médio de 60 g a 250 g (PADOVANI, 1987; FILGUEIRA, 1982; CAMARGO, 1992; SAKATA, 1998; FERREIRA *et al.*, 2002), dependendo da cultivar e da região do plantio. Tomate redondo representado pelo grupo *salada* ou *caqui* apresenta peso médio de 140g a 250g (CAMARGO, 1992; FILGUEIRA, 1982; PADOVANI, 1987; CAMARGO, 1992; SAKATA, 1998; FERREIRA *et al.*, 2000). Tomates cereja pesam em média de 15 a 25g, frutos do híbrido *cocktail* pesam 50g, enquanto que os híbridos amarelo e alaranjado produzem tomates pesando em média 75g (SAKAMA, 2001).

#### **3.1.1.4 Classificação em tipo**

A presença de defeitos ou danos reduz o potencial de comercialização, embora, em alguns casos, não haja redução do valor nutritivo e da qualidade comestível do produto. Os defeitos encontrados no tomate podem ser de origem fisiológica, entomológica, patológica e mecânica. Defeitos fisiológicos ocorrem devido a anomalias hereditárias ou podem ser atribuídos a condições externas desfavoráveis durante a fase de crescimento e maturação. Defeitos entomológicos são causados pela ação de insetos que provoquem danos diretos ou indiretos. Defeitos patológicos são atribuídos à ação de bactérias, fungos, leveduras ou vírus, que reduzem a qualidade do produto causando lesão, descoloração e podridão. Defeitos mecânicos são de natureza física em decorrência de manuseio inadequado provocando amassamento, corte ou machucadura (CHITARRA & CHITARRA, 1990; CASTRO *et al.*, 2001).

O tomate de mesa é classificado em tipo ou grau de seleção ou categoria em função dos defeitos graves e leves presentes nos frutos, conforme determina a Portaria nº 553/95 do MAPA (BRASIL, 1995) e Anexo XVII da Portaria SARC no 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002). É classificado em tipo extra, categoria I ou especial ou selecionado e categoria II.

### 3.1.2 Caracterização do Tomate

O fruto do tomateiro possui, em sua composição, aproximadamente 93 a 95% de água. Nos 5 a 7% restantes, encontram-se compostos inorgânicos, ácidos orgânicos, açúcares, sólidos insolúveis em álcool e outros compostos (EMBRAPA, 2003).

Segundo Carvalho *et al.*, (2005), o tomate ocupa o primeiro lugar como contribuinte de vitaminas e minerais na dieta humana e o seu valor nutritivo é devido, principalmente, ao seu teor em ácido ascórbico.

O consumo do tomate é recomendado pelos nutricionistas por se constituir em um alimento rico em licopeno, vitaminas do complexo A e complexo B e minerais importantes, como o fósforo e o potássio, além de ácido fólico, cálcio e frutose. Quanto mais maduro, maior a concentração desses nutrientes (LUZ, 2008).

O tomate é composto principalmente de água, possuindo aproximadamente 14 calorias em cem gramas, somente. Alguns estudos comprovam sua influência positiva no tratamento de câncer, pois o licopeno, pigmento que dá cor ao tomate, é considerado eficiente na prevenção do câncer de próstata e no fortalecimento do sistema imunológico (LUZ, 2008).

Os carotenóides, além de serem responsáveis pela cor vermelha dos frutos maduros, atraem a atenção dos pesquisadores por serem conhecidos como precursores da vitamina A. Estudos demonstraram sua capacidade de seqüestrar oxigênio e sua ação inibidora contra alguns tipos de câncer (CARVALHO *et al.*, 2005).

As Tabelas 2 e 3 mostram a composição química dos frutos de tomate.

Tabela 5: Composição dos frutos maduros de tomate.

Açúcares	(% na matéria seca)
Glucose	22
Frutose	25
Sucrose	1
Sólidos insolúveis em álcool	
Proteínas	8
Substancias pécticas	7
Hemicelulose	4
Celulose	6
Ácidos orgânicos	
Ácido cítrico	9
Ácido málico	4
Minerais	
Principalmente: K, Ca, Mg e P	8
Outros	
Lipídios	2
Aminoácidos dicarboxílicos	2
Pigmentos	0,4
Ácido ascórbico	0,5
Voláteis	0,1
Outros aminoácidos, vitaminas e polifenóis	1

Fonte: CARVALHO *et al.*, 2005

Tabela 6: Teores de vitaminas nos frutos maduros de tomate

Vitamina	Valores médios por 100g de fruto fresco
Vitamina A ( $\beta$ -caroteno)	900 – 1271 i.u.*
Vitamina B <sub>1</sub> (tiamina)	50 – 60 mg
Vitamina B <sub>2</sub> (riboflavina)	20 – 50 mg
Vitamina B <sub>3</sub> (ácido pantotênico)	50 – 750 mg
Vitamina do complexo B <sub>6</sub>	80 – 110 mg
Ácido nicotínico (niacina)	500 – 700 mg
Ácido fólico	6,4 – 20 mg
Biotina	1,2 – 4,0 mg
Vitamina C	15000 – 23000 mg
Vitamina E (a -tocoferol)	40 – 1200 mg

\* 1 i.u. (unidade internacional) = 0,6 mg de  $\beta$  -caroteno

Fonte: CARVALHO *et al.*, 2005

Os tomates podem ser divididos em diversos grupos, de acordo com seu formato e sua finalidade de uso:

- Santa Cruz: tradicional na culinária, utilizado em saladas e molhos e de formato oblongo;
- Caqui: utilizado em saladas e lanches, de formato redondo;
- Saladete: utilizado em saladas, de formato redondo;
- Italiano: utilizado principalmente para molhos, podendo ainda fazer parte de saladas. Seu formato é oblongo, tipicamente alongado;
- Cereja: utilizado como aperitivo, ou ainda em saladas. É um "mini-tomate", com tamanho pequeno, redondo ou oblongo.

A cor é um parâmetro essencial para classificar o produto industrializado. O fruto deve apresentar cor vermelho-intensa e uniforme, externa e internamente. Tomates com boa coloração apresentam teores de licopeno (pigmento responsável pela coloração vermelha) na faixa de 5 a 8 mg/100 gramas de polpa. Algumas cultivares apresentam "ombro verde" devido à maturação tardia da região superior do fruto. Os tecidos nessa região podem ficar endurecidos e amarelados (CARVALHO *et al.*, 2005).

### 3.1.3 Licopeno

Os carotenóides são pigmentos naturais, com coloração variando do amarelo ao vermelho, que têm sido largamente utilizados como corantes em alimentos, bebidas, cosméticos e rações animais (MORITZ *et al.*, 2005)

O pigmento vermelho licopeno (C<sub>40</sub>H<sub>56</sub>) é um carotenóide que acumula em frutos, flores e raízes de algumas espécies vegetais, incluindo, hortaliças e fruteiras. A principal fonte de licopeno na dieta humana é o fruto do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) e seus derivados. A estrutura química singular do licopeno confere marcante ação antioxidante, contribuindo na prevenção de doenças degenerativas, cardiovasculares e de certos tipos de câncer. Além do fator nutricional, a concentração do licopeno no tomate está relacionada com uma melhor percepção visual dos produtos, existindo, portanto, uma forte demanda para aumentar os teores deste pigmento em frutos das cultivares tanto para consumo *in natura* quanto para processamento industrial. O desenvolvimento de cultivares com teores mais elevados de fatores nutricionais, incluindo licopeno, depende da disponibilidade de métodos de seleção simples e precisos (CARVALHO *et al.*, 2005).

Na agroindústria, existe uma demanda por itens processados de maior valor agregado que combinem aroma, sabor e elevada pigmentação vermelha de polpa (conferida pela presença de licopeno). A combinação destes fatores é essencial para alavancar os produtos derivados de tomate aos níveis de qualidade necessários para atingir nichos de elevado padrão de exigência, tanto no mercado doméstico quanto no exterior (CARVALHO *et al.*, 2005).

Segundo Giovannucci (1999), as cores das espécies de tomate diferem do amarelo para o vermelho alaranjado, dependendo da razão licopeno/beta-caroteno da fruta, que também está associada à presença da enzima  $\beta$ -ciclase, a qual participa da transformação do licopeno em  $\beta$ -caroteno.

Neste contexto, existe uma demanda da parte de consumidores, varejistas e das agroindústrias processadoras de polpa de tomate no sentido de melhorar o teor de licopeno dos frutos das cultivares atualmente comercializadas, tanto para consumo *in natura* quanto para processamento (CARVALHO *et al.*, 2005).

Em tomate, estudos têm demonstrado uma boa correlação entre cor de fruto e teor de licopeno (GIOVANNUCCI, 1999). O licopeno aparece como microcristais

sólidos e quando a luz é refletida por eles, confere ao tomate a sua cor típica, vermelha brilhante (YAMASHITA *et al.*, 1999).

O pigmento licopeno ( $C_{40}H_{56}$ ) pertence ao subgrupo dos carotenóides não oxigenados, sendo caracterizado por uma estrutura acíclica e simétrica contendo 11 ligações duplas conjugadas (RAO, 2002). Devido a sua estrutura química, o licopeno figura como um dos melhores supressores biológicos de radicais livres, especialmente aqueles derivados do oxigênio. Entre uma série de carotenóides avaliados, o licopeno mostrou-se como um dos mais eficientes antioxidantes, podendo doar elétrons para neutralizar as moléculas de oxigênio singleto e outras moléculas oxidantes antes que elas prejudiquem as células (RAO & AGAWAL, 2000).

Estudos clínicos e epidemiológicos têm confirmado que dietas ricas em licopeno estão associadas com a redução do risco de desenvolvimento de câncer de próstata e ovário bem como a uma menor incidência de doenças degenerativas crônicas e cardiovasculares (NGUYEN & SCHWARTZ, 1999; CRAMER *et al.*, 2001; RAO, 2002).

O organismo humano não é capaz de sintetizar carotenóides, dessa forma eles são obtidos exclusivamente por meio da dieta alimentar. O licopeno pode ser encontrado em um número limitado de alimentos; o tomate e seus derivados são as melhores contribuições dietéticas, mas são boas fontes desse elemento também o mamão, a goiaba vermelha, a pitanga e a melancia. (CARVALHO *et al.*, 2005).

A principal fonte de licopeno na dieta humana é o fruto do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) e seus derivados tais como sucos, sopas, molhos e "catchups". É interessante salientar que alguns trabalhos indicam que a ingestão de licopeno presente no fruto do tomate é mais eficiente na prevenção de certos tipos de câncer do que a administração do licopeno purificado via cápsulas (BOILEAU *et al.*, 2003).

A quantidade de licopeno nas frutas e vegetais varia de acordo com a estação do ano, estágio de maturação, variedade, efeito climático e geográfico, local de plantio, manejo pós-colheita e do armazenamento; em geral, quanto mais avermelhado for o alimento, maior será sua concentração de licopeno. As maiores concentrações de licopeno estão, em geral, nas cascas dos alimentos fontes, quando comparadas à polpa dos mesmos frutos, sendo sua maior concentração em alimentos produzidos em regiões de climas quentes. (MORITZ, *et al.*, 2005)



O processamento de alimentos tem demonstrado aumentar a biodisponibilidade de licopeno, devido à liberação da matriz do alimento (MORITZ, *et al.*, 2005)

#### **3.1.4 Produção de tomate**

O tomate é a segunda hortaliça em área cultivada no mundo, e a primeira em volume industrializado. No Brasil, o tomate é principalmente industrializado como concentrado e na forma de molhos especializados e a expectativa para o consumo doméstico do tomate processado continua crescente fazendo-se necessária a diversificação dos produtos derivados.

De acordo com o IBGE (2010), a produção de tomate no Brasil é de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas/ano sendo 65% destinado ao consumo *in natura* e 35% para processamento industrial. Os principais estados brasileiros, responsáveis por esta produção são Goiás, São Paulo e Minas Gerais. O Brasil ocupa a oitava colocação de produtor mundial de tomate, correspondendo a uma área colhida de 61.025 ha (IBGE, 2010; FAGUNDES, *et al.*, 2005).

A capacidade das indústrias de processamento instaladas no Brasil é de aproximadamente 15.185 ton/dia de pasta de tomate e de 1.495 ton/dia de tomate em cubos. Na agroindústria, existe uma demanda por itens processados de maior valor agregado que combinem aroma, sabor e elevada pigmentação vermelha de polpa. A combinação destes fatores é essencial para alavancar os produtos derivados de tomate aos níveis de qualidade necessários para atingir nichos de elevado padrão de exigência, tanto no mercado doméstico quanto no exterior (GIORDANO, *et al.*, 2005).

O processamento do tomate, incluindo a secagem, representa uma alternativa de redução das perdas para o produtor, principalmente nas regiões onde a cultura do tomate constitui a principal atividade econômica. Frequentemente ocorre diminuição na demanda do comércio *in natura* e, por conseguinte, as perdas de tomates são aumentadas. Assim, o tomate seco, além de apresentar maior período de conservação, torna-se uma alternativa para minimizar essas perdas, bem como permite o aproveitamento dos produtos que não dão classificação para o mercado do tomate *in natura*. Portanto, o estudo do processo de secagem de tomate vem contribuir à agregação de valor ao tomate, transformando-o, de um produto muitas vezes desvalorizado em função do excesso de oferta, em um produto diferenciado que

visa um novo mercado de franca expansão, no Brasil, conquistando consumidores principalmente pelas suas propriedades nutracêuticas (FAGUNDES, *et al.*, 2005)

### 3.1.5 Tomates Secos

A conservação pós-colheita do alimento é, portanto, um importante fator de contribuição para aumentar o suprimento de alimentos, assim como evitar desperdício, no caso de excesso de produção, além de agregar valor aos produtos agrícolas. A secagem de produtos perecíveis, com altos teores de umidade inicial, apresenta diversas vantagens, tais como: manutenção dos constituintes minerais; inibição da ação de microrganismos; redução dos custos de transporte, manuseio e estocagem e alternativa para solução dos problemas de desperdício, descarte e poluição. Além disso, os produtos secos utilizam forma de embalagem mais econômica e disponível e oferecem opção para refeições leves e rápidas (WOODROOF & LUH, 1975).

O tomate pode, através de processamento adequado, dar origem a inúmeros produtos, alguns deles de elevado consumo no Brasil. Assim, pode-se obter, do tomate inteiro, o tomate despelado; do quebrado, diversos graus de intensidade, o tomate seco, suco de tomate, purê, polpa concentrada, extrato, catchup, molhos culinários diversos, inclusive tomate em pó. Com a abertura para importação nas décadas de 80 e 90, o tomate seco destacou-se com grande aceitação do consumidor brasileiro (CAMARGO & QUEIROZ, 2003).

Além do tomate seco apresentar-se como uma alternativa para o aproveitamento do excedente de produção, disponibiliza ao consumidor um produto sensorialmente diferenciado e que, por ser menos perecível, pode ser comercializado em qualquer período do ano (FAGUNDES *et al.*, 2005)

O processo de produção de tomate seco (*pomodori secchi*) é originário dos vilarejos do sul da Itália e vem mostrando significativa expansão na gastronomia de todo o mundo, incluindo a brasileira. Na Califórnia (EUA) ainda é comum hoje em dia a produção do verdadeiro tomate seco ao sol (*sundried tomatoes*), que é disponibilizado no mercado temperado com ingredientes variados e conservado no azeite de oliva (MELO, 2006).

O tomate seco tem apresentado crescente aplicação na culinária brasileira, principalmente, como ingrediente de massas, pizzas e também no consumo imediato.

Para essas finalidades, a secagem do fruto se processa até níveis de umidade intermediários, que variam numa faixa de 25 a 35%. (CAMARGO & QUEIROZ 2003)

Silva & Giordano (2000) afirmam que, para conseguir uma estocagem de tomates secos sem alteração de qualidade e sem a aplicação de conservantes, é essencial reduzir a umidade do produto para a faixa que varia de 11 a 14%, o que evitaria o desenvolvimento de microrganismos e manteria a estabilidade do produto.

A preocupação com a qualidade dos produtos secos tem crescido devido ao mercado consumidor estar cada vez mais exigente. Do ponto de vista dos consumidores, a qualidade dos produtos secos essencialmente depende dos aspectos sensoriais (cor, sabor e textura), microbiológicos e nutricionais, sendo a cor o critério mais importante numa apreciação global do produto. A qualidade dos produtos secos é resultado da integração de: material *in natura*, pré-tratamentos, secagem, estocagem e consumo final. (CAMARGO & QUEIROZ, 2003).

Os nutrientes minerais, proteínas, lipídeos, carboidratos solúveis e constituintes da fibra alimentar, que no tomate fresco representam no máximo de 5 a 7% de seu peso (SILVA & GIORDANO, 2000), no produto desidratado, como os da pesquisa atual, tomate seco em óleo ou tomate seco refrigerado, as concentrações desses nutrientes são aumentadas em função do abaixamento da umidade residual do tomate seco. O licopeno e a vitamina C, a despeito de possíveis perdas que podem ocorrer durante a secagem, aparentemente também são concentrados no produto tomate seco.

### **3.2 UMIDADE DE EQUILÍBRIO**

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura, é definida como o teor de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Esta variável vai determinar o teor mínimo de umidade que o material pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais, sendo seu valor de fundamental importância na modelagem do processo de secagem (BARROZO *et al.*, 1998).

As isotermas de equilíbrio revelam informações sobre mecanismos de sorção e interações do sólido com o vapor d'água na atmosfera, durante o armazenamento e após a embalagem. Elas são muito úteis no projeto e otimização de operações

unitárias como preservação, secagem, armazenamento e empacotamento (ALHANDAM & HASSAN, 1999).

A determinação das isotermas de sorção de um material pode ser efetuada pela medida da variação de umidade do material ou do meio em que este se encontra, através dos métodos gravimétrico (variação da massa do material) e higrométrico (variação da umidade do ar circundante). O ar pode ser circulado (método dinâmico) ou estar estagnado (método estático). O uso de soluções salinas saturadas e soluções ácidas a diferentes concentrações apresentam desempenhos similares, quando utilizado o método gravimétrico (MORTOLA *et al.*, 2003).

Um grande número de equações teóricas, semi-empíricas e empíricas têm sido propostas para a estimativa da umidade de equilíbrio de materiais biológicos. As equações teóricas são baseadas nas conhecidas teorias cinéticas de adsorção de Kelvin, Langmuir e BET (Brunauer, Emmett e Teller). Os modelos teóricos não conseguem prever com precisão a umidade de equilíbrio em uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Este fato motivou o aparecimento de vários modelos empíricos e semi-empíricos na tentativa de aumentar a precisão na estimativa desta variável (BARROZO *et al.*, 1998).

As principais equações utilizadas na literatura para a previsão da umidade de equilíbrio de encontram-se agrupadas na Tabela 4.

Tabela 4: Equações de isotermas para a determinação da umidade de equilíbrio.

Nome	Equação
Henderson-Thompson (1968)	$X_E = \left[ \frac{-1}{k} \ln(1 - a_w) \right]^{1/a} \quad (1)$
Oswin (1946)	$X_E = k \left( \frac{a_w}{1-a_w} \right)^a \quad (2)$
Halsey (1976)	$X_E = \exp k [-\ln(a_w)]^{1/a} \quad (3)$

Fonte: BASUNIA & ABE, 2001.

onde  $X_E$  é a umidade de equilíbrio do material (base seca),  $a_w$  é a atividade de água e  $a$  e  $k$  são parâmetros de ajuste.

A equação de Guggenheim, Anderson e Boer (GAB) (Equação 4), mostra-se muito eficiente na previsão da atividade de água de diversos materiais alimentícios, ela pode ser considerada uma versão melhorada do modelo de BET, através da introdução de um terceiro parâmetro (MULET *et al.*, 2002). Esta equação também pode descrever a variação do conteúdo de umidade de equilíbrio com a temperatura, desde que os parâmetros C e K sejam funções exponenciais do inverso da temperatura absoluta.

$$X_E = \frac{X_m \cdot B \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w)(1 - k \cdot a_w + B \cdot k \cdot a_w)} \quad (4)$$

onde  $X_E$  é a umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco),  $X_m$  a umidade da monocamada (kg água/kg de sólido seco),  $a_w$  é a atividade de água e B e k são as constantes de GAB associadas as entalpias de sorção da monocamada e multicamada, respectivamente.

### 3.3 Secagem

#### 3.3.1 Definições

A operação unitária de secagem é definida, geralmente, como a remoção de líquido de um sólido por evaporação. Nas operações de secagem, o material está em contato com o ar insaturado resultando na redução do conteúdo de umidade do material e a umidificação do ar. Durante a operação de secagem, ocorrem dois processos simultâneos do material, a transferência de calor do meio circundante, resultando na evaporação do líquido contido no material e ainda a transferência de massa na forma de líquido ou vapor do interior do material para a superfície, e desta para a corrente do fluido de secagem (TEMPLE & VAN BOXTEL, 1999; AKPINAR, *et al.*, 2003).

Em termos gerais, segundo BROOKER *et al.* (1974), pode-se afirmar que quanto maior a temperatura e vazão e menor a umidade relativa do ar de secagem,

menor será o tempo necessário para secar o produto. Quanto maior a umidade inicial e mais baixa a umidade final do produto, maior será o tempo de secagem.

O produto a secar pode ser submetido a um tratamento rude e em ambiente muito quente ou pode requerer um tratamento suave e a temperaturas mais baixas ou moderadas (KING, 1968).

Segundo Tobinaga & Pinto (1992), a transferência de calor e massa para o material pode ser por condução, convecção e radiação. Estes autores citam que fatores que governam a transferência de calor e massa são de natureza externa (meio de secagem) e interna (características físicas constitutivas do material).

Quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido ao material, ocorrem transferências simultâneas de calor e de massa, conforme está esquematizado na Figura 1.

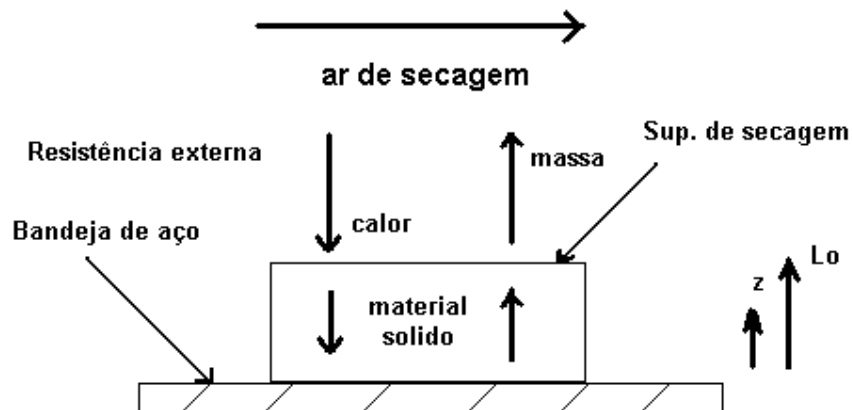


Figura 3: Esquema do processo de secagem convectiva de um material sólido (TOBINAGA & PINTO, 1992).

O conhecimento dos mecanismos de transferência de água, do interior do material para a sua superfície, é de fundamental importância para a descrição do fenômeno da secagem (BRUIN & LUYBEN, 1980). Entre os mecanismos pelos quais pode ocorrer a migração de umidade através do sólido, podemos citar a difusão em termos de gradiente de concentração, para o transporte de vapor de água, e a difusão

em termos de gradiente de umidade e escoamento capilar, para o transporte de água líquida. Estes três mecanismos são os mais importantes na secagem de alimentos.

### 3.3.2 Características de secagem

Através de estudos de Lewis, Sherwood e outros pesquisadores, o processo de secagem ficou dividido em um período de taxa constante e um ou dois períodos de taxa decrescente (FORTES & OKOS, 1980; CHIRIFE, 1983).

A Figura 2 apresenta uma ilustração da curva de taxa de secagem e seus respectivos períodos.

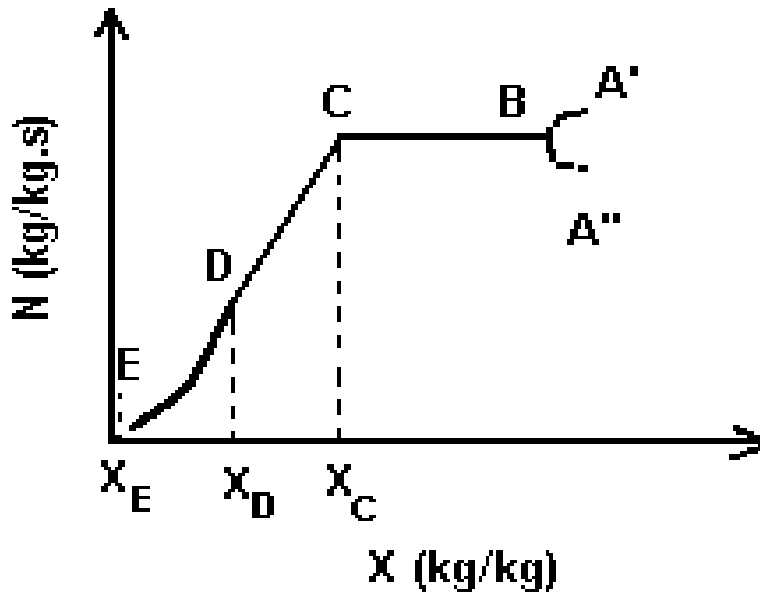


Figura 4: Curva típica de secagem (FOUST *et al.*, 1983).

### 3.3.3 Período de taxa constante

No período de secagem a taxa constante de migração de umidade a superfície do sólido apresenta-se encoberta por uma película de umidade e a água evapora do material a mesma temperatura de bulbo úmido do ar. O calor para a transferência de massa do material é transferido para a superfície do sólido somente por convecção, ou seja, todo o calor cedido pelo ar de secagem é utilizado para a evaporação da

umidade livre, permanecendo constante a temperatura do sólido e a taxa de secagem apresenta-se como uma linha horizontal, representado na Figura 2 pelo segmento B-C (FORTES & OKOS, 1983; MOYERS, 1999).

Em sólidos não porosos, a água removida neste período é principalmente água superficial, no caso de sólidos porosos, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (GEANKOPLIS, 1983).

Tobinaga & Pinto (1992), relatam que no período de taxa constante, a superfície do material é mantida em um nível de umidade tal que a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando.

Na secagem de alimentos, o período de taxa constante só tem relativa importância quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando o potencial de secagem do ar é muito baixo (CHIRIFE, 1983).

O término do período de taxa constante é alcançado quando a migração interna de água para a superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre da superfície. O valor da umidade deste estado é denominado de umidade crítica, representada no ponto C da Figura 2. Este valor é específico de cada material alimentício, além de serem função de outros valores que controlam a migração de umidade (interna/externa), tais como: condições do ar (velocidade, temperatura de bulbo seco e umidade absoluta) e espessura do sólido (FORTES & OKOS, 1980).

### **3.3.4 Período de taxa decrescente**

O período de taxa decrescente caracteriza-se pela descontinuidade do fluxo de água na superfície de vaporização (BROOKER *et al.*, 1974). Este período, representado pelo trecho C-E da Figura 2, apresenta duas fases distintas num determinado tempo. Na primeira etapa, trecho C-D da Figura 2, a superfície do material apresenta diversas áreas secas que se amplia à medida que a secagem prossegue. A evaporação continua a se processar na superfície do sólido e a resistência a difusão interna do líquido é pequena comparada com a resistência para remover o vapor da superfície. A temperatura do sólido sobe, pois recebe a mesma quantidade de ar de secagem, porém sua área de superfície de evaporação processa cada vez menos a evaporação de água. O calor transferido ao sólido excede ao da vaporização da água, e assim é absorvido por este (CHIRIFE, 1983).



No segundo período de taxa decrescente, representado pelo segmento D-E da Figura 2, a superfície encontra-se seca e o fluxo interno irá controlar a taxa secagem. Os mecanismos que influenciam diretamente na remoção de água nesta fase são a difusão interna de água líquida e o efeito capilar. Desta forma, o mecanismo de difusão é considerado como principal responsável na secagem de materiais fibrosos, amorfos ou géis, enquanto que o efeito capilar é mecanismo controlador da secagem de materiais granulares e cristalinos (TOBINAGA & PINTO 1992).

No fim da secagem, a pressão de vapor iguala-se à pressão parcial de vapor do ar seco, não ocorrendo mais secagem. O teor de umidade deste estágio é conhecido como umidade de equilíbrio ( $X_E$ ), representado pelo ponto E da Figura 2 (CHIRIFE, 1983).

### 3.3.5 Cinética da Secagem

#### 3.2.5.1 Correlações Empíricas

Uma importante correlação na área de secagem de alimentos é a lei exponencial. Essa lei assume que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício, baseado na analogia com a lei de resfriamento de Newton, tem-se a Equação 5, (CHIRIFE, 1983):

$$\frac{dX}{dt} = -K_s(\bar{X} - X_e) \quad (5)$$

A Equação 1 considera toda a resistência ao transporte de umidade concentre-se no interior do material, desconsiderando os efeitos na camada limite, e por isso chamada de modelo semi-empírico. A Equação 6, normalmente utilizada na forma integrada, denominada equação (BARROZO *et al.*, 1998).

$$\left( \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \right) = \exp(-K_s t) \quad (6)$$

As equações de Page (Equação 7) e Overhullts (Equação 8) foram obtidas a partir de modificações empíricas da equação de Lewis (BARROZO *et al.*, 1998).

$$\left( \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \right) = \exp(-K_S t^n) \quad (7)$$

$$\left( \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \right) = \exp[-(K_S t)^n] \quad (8)$$

As equações de Brooker (Equação 9) e Henderson & Henderson (Equação 10) podem ser vistas como simplificações da solução analítica do modelo difusivo, onde na primeira equação somente o primeiro termo, e na segunda apenas os dois primeiros termos da série são considerados (BARROZO *et al.*, 1998).

$$\left( \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \right) = C \exp(-K_S t) \quad (9)$$

$$\left( \frac{X - X_E}{X_0 - X_E} \right) = C \left[ \exp(-K_S t) + \frac{1}{9} \exp(-9K_S t) \right] \quad (10)$$

Nas equações citadas acima  $[(X - X_E)/(X_0 - X_E)]$  é o adimensional de água livre do material, o parâmetro  $K_S$  é conhecido como constante de secagem,  $t$  é o tempo e  $C$  e  $n$  são parâmetros de ajuste.

### 3.2.5.2 Modelo Difusivo

Os modelos e equações simplificadas utilizados para representar a variação da umidade do material em função do tempo e espaço são obtidos a partir da equação do balanço geral para a transferência de massa, conforme indica a Equação 11:

$$\left( \frac{\partial X}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla X \right) = -\nabla \cdot (-D_{EF} \nabla X) + \left( \frac{1}{\rho_s} \right) r_A \quad (11)$$

O coeficiente  $D_{EF}$  denominado de difusividade efetiva envolve todos os possíveis efeitos internos, sendo, em geral, dependente da umidade do material e da

temperatura do ar de secagem (CHIRIFE, 1983). Tomando-se a difusividade efetiva de massa como constante e tomando como desprezível os efeitos de resistência externa, impondo uma velocidade do ar superior a 1,0 m/s sobre a superfície do material, a equação do balanço de massa do modelo difusivo pode ser escrita conforme a Equação 12:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t}\right) = D_{EF} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial z^2}\right) \quad (12)$$

Sendo:  $0 \leq z \leq L_0/2, t > 0$  ;

com as seguintes condições:

$$\text{inicial:} \quad t = 0; \quad 0 \leq z \leq L_0/2 \quad \rightarrow \quad X = X_0$$

$$\text{contorno:} \quad z = L_0/2; \quad t > 0 \quad \rightarrow \quad X = X_E$$

$$z = 0; \quad t \geq 0 \quad \rightarrow \quad \left(\frac{\partial X}{\partial t}\right) = 0$$

Assim, o valor médio espacial da solução da Equação 12 (CRANCK, 1975) é:

$$Y = \left(\frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E}\right) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{EF} t}{L_0^2}\right) \quad (13)$$

No caso da secagem apresentar um longo período de operação ( $F_0 > 0,2$ ), a Equação 13 é simplificada para a seguinte forma:

$$\left(\frac{\bar{X} - X_E}{X - X_E}\right) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{EF} t}{L_0^2}\right) \quad (14)$$

A Equação 14 apresenta a mesma forma da correlação semi-empírica estimada para o cálculo da constante de secagem (Equação 2), assim por analogia de ambas as equações, determina-se a seguinte relação:

$$D_{ef} = \frac{K L^2}{\pi^2} \quad (15)$$

Onde K é a constante de secagem e L a espessura do material

A teoria de migração de água por difusão representada pela Lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade, teve preferência no estudo da secagem de diferentes produtos alimentícios por vários pesquisadores, por apresentar uma concordância entre as distribuições de umidade experimental e a estimada pelo modelo (CHIRIFE, 1983).

As análises feitas com a utilização da Lei da Fick enfocam principalmente o estudo dos efeitos globais do fenômeno interno, conseqüentemente não apresentando condições para uma descrição dos possíveis mecanismos internos de migração de umidade ou outro fenômeno físico, onde o coeficiente global denominado de difusividade efetiva engloba todos os efeitos internos (TOBINAGA & PINTO, 1992).

### **3.3.6 Secagem em Camada Delgada**

Na secagem em camada delgada a variação da temperatura ao longo do leito dos sólidos é bastante reduzida, considerando-se assim um processo no qual a temperatura varia somente no tempo, e não na posição (CHIRIFE, 1983).

Os modelos obtidos a partir da secagem em camada delgada contribuem efetivamente para o conhecimento das características da secagem dos materiais. Os modelos de secagem em camada delgada, podem ser distribuídos em três categorias principais, modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos (LAHSASNI *et al.*, 2004).

A literatura tem mostrado vários estudos relacionado a secagem em camada delgada em produtos como cebola, frutas, quitosana, alho, pimenta, vegetais entre outros ( MARTINS *et al.*, 2004; BATISTA, 2004, WESKA & PINTO, 2006, ALVES *et al.*, 2009, PONTES *et al.*, 2009).

### 3.2.8 Secagem de Tomate em Camada Delgada

Romero-Peña & Kieckbusch (2003) estudaram a influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate, utilizando um secador de bandejas, com escoamento ascendente do ar de secagem, e com controle de vazão e temperatura. Foram feitos ensaios de secagem específicos com velocidade do ar de secagem de 3m/s, temperaturas de 60, 80 e 100°C, usando fatias de tomate sem pele, sem sementes e com a massa locular removida. A padronização dos tamanhos das amostras foi feita considerando as medidas de comprimento nos sentidos axial ( $66,9 \pm 3,4$  mm) e radial ( $66,2 \pm 3,7$  mm) com espessura média do pericarpo de  $8,3 \pm 0,7$  mm). Notou-se que inicialmente o vermelho intensifica-se durante a secagem nas três temperaturas do ar (60, 80 e 100°C), decorrência da concentração em licopeno devido à evaporação da água, no período inicial de secagem, quando a qualidade geral do tomate se mantém. Observou-se que o máximo da intensidade do vermelho ocorreu em tempos diferentes, de acordo com a temperatura do ar de secagem. O comportamento da secagem com ar a 60°C diferenciou-se do de 80°C e 100°C, e os índices da cor obtidos realmente indicaram que, em termos de manutenção de qualidade, esse seria o processo isotérmico recomendável.

Camargo e Queiroz (2003) estudaram parâmetros que influenciam a qualidade final de tomates secos. As cinéticas de secagem foram construídas para os seguintes tratamentos: com semente e sem semente; tipo de corte: quatro partes e ao meio; temperatura de secagem: 60 e 70°C. O comportamento e períodos de secagem dos tratamentos: corte pela metade sem semente e corte em quatro partes com semente possuíram maior semelhança. Ainda foi observado um período de secagem inferior a todos os demais tratamentos para o corte em quatro partes sem semente, que apresentou um tempo de secagem abaixo da metade do tempo do tratamento pela metade com semente. Nesse estudo, a presença de semente aumentou até 50% do tempo de secagem.

Olorunda *et al.* (1990) estudaram a secagem de tomate em pedaços em secador com fluxos concorrente e contracorrente e avaliaram o efeito da temperatura de secagem (60, 70 e 80 °C) sob velocidade do ar de 1,75 m/s. Os autores constataram que a taxa de secagem aumentou com a elevação da temperatura e a remoção de umidade foi maior no fluxo concorrente porém nada comentaram em relação aos efeitos dos parâmetros do processo na qualidade do produto final.

Romero-Peña e Kieckbusch (2003) constataram que a secagem do tomate deve ser realizada a temperaturas inferiores a 65 °C, visando à preservação da cor e sabor característicos, ainda que exija maior tempo de processo. Camargo e Queiroz (2003) também observaram os efeitos negativos da temperatura de 80 °C na secagem de tomate, comparativamente à temperatura de 60 °C, ressaltando, como primeira causa, a queima superficial do produto.

**CAPÍTULO III**  
(DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO)

#### 4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Os artigos elaborados estão apresentados neste capítulo, na seguinte ordenação e propósito:

**ARTIGO 1:** CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PARALELO DO AR .

Este trabalho teve como objetivo a caracterização da cinética de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, com circulação paralela do ar, avaliando a reidratação do produto final, e determinar o valor da difusividade efetiva de umidade e energia de ativação.

**ARTIGO 2:** AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO DE LICOPENO, COR E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) SECO EM CAMADA DELGADA COM ESCOAMENTO PARALELO DO AR

O objetivo deste trabalho foi determinar o teor de licopeno, cor e capacidade de produção do tomate seco em camada delgada, analisando através do uso da metodologia de superfície de resposta, a região de operação de secagem de tomate mais adequada para as respostas consideradas.



#### **4.1 ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EM CAMADA DELGADA UTILIZANDO ESCOAMENTO PARALELO DO AR**

##### **RESUMO**

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização da cinética de secagem do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada bem como o cálculo da difusividade efetiva de umidade e energia de ativação e foi também determinado a reidratação do produto final desidratado. O estudo foi realizado em um secador com escoamento paralelo do ar de secagem. As variáveis estudadas foram temperatura do ar de secagem (60, 70 e 80 °C) e espessura das fatias de tomate (3, 5 e 7 mm). As isotermas de equilíbrio foram determinadas pelo método gravimétrico em soluções ácidas e foram utilizadas quatro correlações diferentes. Através da análise de regressão dos dados experimentais das isotermas verificou-se que a equação que melhor se ajustou foi a de GAB (Guggenheim, Anderson e Boes), nas temperaturas estudadas. Para obtenção da constante de secagem (K), foram utilizadas cinco correlações e todas apresentaram bom ajuste, sendo a escolhida a equação de Henderson e Pabis, devido ao seu significado físico. Os menores valores da difusividade efetiva de umidade foram obtidos para o segundo período de taxa decrescente. Para a reidratação, verificou-se que com menores temperaturas obteve-se uma maior reidratação do produto num menor tempo. Para energia de ativação, observou-se que os maiores valores foram obtidos para o segundo período de taxa decrescente.

**Palavras-chave:** difusividade efetiva de umidade, energia de ativação, isoterma, secagem, tomate

#### **1. INTRODUÇÃO**

Entre as hortaliças mundialmente cultivadas para consumo *in natura* e, sobretudo, industrializado, o tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) se sobressai, razão porque é considerado de produção e utilização universal. Este fruto climatérico é

altamente perecível e as técnicas de conservação na pós-colheita podem contribuir para minimizar suas perdas e agregar valor. (CAMARGO *et al.*, 2007).

A umidade de equilíbrio determina o conteúdo de umidade que um material pode ter em relação à umidade relativa do meio em que se encontra. As isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade em função da umidade relativa do meio em que se encontra a atividade de água deste, a uma certa temperatura (PEZZUTI & CRAPISTE, 1996; FENNEMA, 1993). As isotermas apresentam várias formas. A maioria dos alimentos apresenta a forma sigmoideal (RIBEIRO & SERAVALLI, 2007).

A secagem envolve o transporte simultâneo de calor e massa entre o material úmido e o agente de secagem, e pode ser controlada por condições internas (difusão) e/ou externas (mecanismos convectivos). Quando as condições externas predominam, o que significa que a resistência de transporte de massa da camada limite do ar é maior que a resistência da migração de umidade interna, a intensidade da secagem dependerá principalmente das condições do agente de secagem e é aproximadamente independente dos parâmetros do material (região de controle da camada limite). O processo de secagem neste caso pode ser representado por um balanço de calor e massa na superfície do sólido. Quando a resistência à transferência de massa no interior do material é maior que a resistência difusional da camada limite do ar, os parâmetros do material úmido influenciam e predominam sobre a taxa de secagem (controle interno). As condições internas e externas serão ambas importantes no controle da secagem quando as resistências de transferências de massa no agente de secagem do material úmido são de mesma ordem, devendo ser considerados simultaneamente parâmetros do material úmido e do agente de secagem (região de controle da camada limite e difusão interna) (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

O estudo da secagem de alimentos em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação, obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também, um maior conhecimento dos fundamentos dos mecanismos envolvidos (BALA & WOODS, 1992; PINTO & TOBINAGA, 1992). Na secagem em camada delgada a variação da temperatura ao longo do leito de sólidos é bastante reduzida, considerando-se assim um processo no qual a temperatura varia somente no tempo, e não na posição (CHIRIFE, 1983).

A reidratação pode ser considerada como uma medida dos danos causados ao material pela secagem e por tratamentos posteriores à desidratação. A reidratação de

tecidos vegetais secos é composta por três processos simultâneos: o embeбimento em água pelo material seco, o inchamento e a lixiviação dos compostos solúveis. Durante a secagem, Jayaraman *et al.*, (1990), observaram deslocamento e ruptura celular irreversíveis, resultando na perda da integridade, formando uma estrutura densa, com intenso encolhimento dos capilares, de propriedades hidrofílicas reduzidas refletidas pela incapacidade de embeбimento de água suficiente para uma reidratação completa (KROKIDA & MARINOS-KOURIS, 2003).

Os objetivos deste trabalho foram a caracterização da cinética de secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, avaliando a reidratação do produto final e determinar o valor da difusividade efetiva de umidade e energia de ativação.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Matéria-prima**

A matéria-prima utilizada foi tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) *in natura*, redondo, do tipo Longa-vida, adquirido no comércio local da cidade do Rio Grande/RS, com um conteúdo de umidade em torno de 95% (b.u.), determinado segundo as normas analíticas da AOAC (1995).

### **2.2 Equipamento de Secagem**

Os ensaios de secagem de tomate em camada delgada, com escoamento paralelo do ar, foram realizados em um secador, cuja bandeja era de aço inox, perfurada, de forma retangular (20 cm de largura e 25 cm de comprimento) de tela perfurada (*mesh* 10).

### **2.3 Procedimento Experimental da Umidade de Equilíbrio**

A umidade de equilíbrio das amostras foi determinada por isotermas, nas temperaturas de 60 e 70 °C. Foi utilizado o método gravimétrico estático, com o uso de soluções ácidas em diferentes concentrações, garantindo uma variação de umidade

relativa de 5,5 a 89 (MORAES *et al.*, 2008). As amostras permaneceram em ambiente hermético, com temperatura controlada, por 14 dias até atingir peso constante, cujas pesagens ocorreram no primeiro, sétimo e décimo quarto dias.

Para a temperatura de 80 °C, a umidade de equilíbrio foi determinada a partir de ensaio de umidade até que se atingisse a massa constante da amostra.

#### **2.4 Procedimento Experimental de Secagem**

A secagem de tomate foi realizada com amostras lavadas com água corrente clorada, fatiadas, com auxílio de uma faca de aço inox, em diferentes espessuras, com sementes e com pele, para que o produto pudesse se parecer com o tomate *in natura*. A massa das amostras foi determinada com uma balança eletrônica (Kem modelo 430-21, Alemanha) com precisão de 0,01 g. A temperatura do ar de secagem foi de 60, 70 e 80 °C e a espessura da fatia de tomate de 3, 5 e 7mm, para que se possa garantir a condição de camada delgada, medidas com um paquímetro digital (Guo gen, Digital Caliper, China). A umidade relativa do ar ambiente e dentro do secador foi determinada com um termohigrômetro (Cole Parmer, modelo 3310-00, USA) com precisão de 0,1%. Foram anotados os valores de massa e temperatura a cada 3 min, durante os primeiros 45 min e posteriormente a cada 5 min até que se atingisse umidade em torno de 13% (b.u), pois, segundo Silva & Giordano (2000), para conseguir uma estocagem de tomates secos sem alteração de qualidade e sem a aplicação de conservantes, é essencial reduzir a umidade do produto para a faixa que varia de 11 a 14%, o que evitaria o desenvolvimento de micro-organismo e matéria a estabilidade do produto. Os experimentos foram realizados conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Ensaios realizados para a secagem de tomate

Experimento	Temperatura (°C)	Espessura (mm)
1	60	3
2	70	3
3	80	3
4	60	5
5	70	5
6	80	5
7	60	7
8	70	7
9	80	7

## 2.5 Procedimento Experimental de Reidratação

A reidratação das amostras de tomate desidratado foram determinada usando uma modificação do aparelho de Baumann efetuada por Torgensen & Toledo (1977), adaptado e mostrado por Weska *et al.*, (2006). O aparelho consiste de um funil conectado a um capilar horizontal (pipeta graduada) e está apresentado na Figura 1. A amostra (1 g) foi espalhada em um papel de filtro umedecido, colocado no topo de um funil de Buchner com água ao nível da placa perfurada, tomando-se o cuidado de retirar o excedente de água, com papel absorvente. Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente. A absorção de água pela amostra, ao longo do tempo, foi lida na pipeta, até a saturação da amostra.

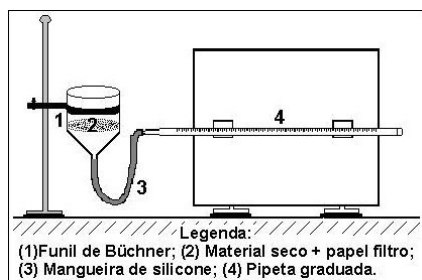


Figura 1: Equipamento utilizado para determinar a taxa de reidratação, segundo Weska (2006)

## 2.6 Procedimento de Cálculo

As equações de isotermas mais utilizadas para alimentos são as apresentadas na Tabela 2. Estas equações foram utilizadas para ajustar os dados experimentais obtidos das isotermas de equilíbrio.

Tabela 2: Equações de isotermas para a determinação da umidade de equilíbrio

Nome	Equação
Henderson-Thompson	$X_E = \left[ \frac{-1}{k} \ln(1 - a_w) \right]^{1/a} \quad (1)$
Oswin	$X_E = k \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^a \quad (2)$
Halsey	$X_E = \exp k [-\ln(a_w)]^{1/a} \quad (3)$
GAB	$X_E = \frac{X_m \cdot B \cdot k \cdot a_w}{(1 - a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + B \cdot k \cdot a_w)} \quad (4)$

Fonte: Basunia & Abe, 2001

onde  $X_E$  é a umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco),  $X_m$  a umidade da monocamada (kg água/kg de sólido seco),  $a_w$  é a atividade de água e  $a$ ,  $B$  e  $k$  são parâmetros de ajuste

A partir dos dados experimentais obtidos dos ensaios de secagem, foram determinadas as curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem ( $X/X_0$  vs.  $T$ ) em escala linear e log-linear e adimensional de água livre em função do tempo de secagem ( $[(X - X_E)/(X_c - X_E)]$  vs.  $t$ ).

Uma importante correlação na secagem de alimentos é a lei exponencial (BALA e WOODS, 1992), esta lei estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma apresentada na Equação 5:

$$\frac{dX}{dt} = -K(\bar{X} - X_E) \quad (5)$$

As equações empíricas são utilizadas na análise da secagem, buscando uma forma de representar a cinética de secagem de alimentos que melhor se ajuste aos dados experimentais. A Tabela 3 apresenta as Equações 6 a 10 de secagem empíricas mais utilizadas para alimentos na literatura.

Tabela 3: Equações empíricas para secagem de alimentos.

Nome	Equação	
Lewis (1921)	$X_R = \exp(-Kt)$	(6)
Henderson & Pabis (1961)	$X_R = C \exp(-Kt)$	(7)
Henderson & Henderson (1968)	$X_R = C \left[ \exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$	(8)
Page (1949)	$X_R = \exp(-Kt^n)$	(9)
Overhults (1973)	$X_R = \exp[-(Kt)^n]$	(10)

Fonte: Barrozo *et al.*, 1998.

onde  $X_R$  o adimensional de umidade  $[(X-X_E)/(X_0-X_E)]$ ,  $K$  a constante de secagem,  $t$  é o tempo e  $C$  e  $n$  são parâmetros de ajuste.

O cálculo da difusividade efetiva de umidade (Equação 11) foi realizado segundo uma analogia da segunda Lei de Fick com a Equação 7 para longos tempos de secagem ( $F_0 > 0,2$ ) (CHIRIFE, 1983).

$$D_{EF} = \frac{K L^2}{\pi^2} \quad (11)$$

onde  $K$  é a constante de secagem e  $L$  é a espessura da amostra.

O efeito da temperatura na difusividade efetiva é geralmente descrita utilizando a relação de Arrhenius (Equação 12) a fim de obter uma melhor concordância entre a curva predita e os dados experimentais (KEEY, 1972). A energia de ativação foi calculada a partir da equação de Arrhenius, baseada na declividade da linha reta da difusividade efetiva de umidade com a respectiva temperatura absoluta.

$$D_{EF} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{R.T}\right) \quad (12)$$

onde  $D_o$  é o fator pré operacional da equação de Arrhenius ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de

ativação (kJ/mol), R é a constante universal dos gases (kJ/mol.K) e T é a temperatura absoluta (K).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Umidade de Equilíbrio

Através dos valores obtidos experimentalmente da atividade de água ( $a_w$ ) e umidade de equilíbrio ( $X_E$ ) do tomate, nas temperaturas estudadas, foram plotadas as curvas apresentadas na Figura 2.

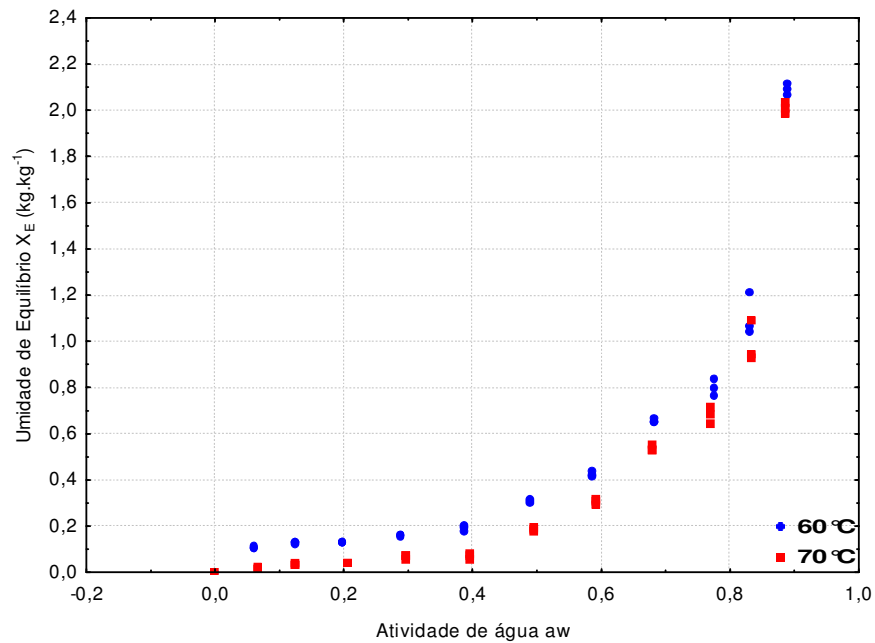


Figura 2: Isotermas de equilíbrio para o tomate nas temperaturas de estudo.

Pode-se perceber na Figura 2 a forma sigmoide das curvas, comportamento típico para isotermas de alimentos (MORAES *et al.*, 2008). Verifica-se na figura que as isotermas se cruzam em uma umidade relativa em torno de 80%. Este fenômeno ocorre em alimentos ricos em açúcares. Labuza (1984) observou que a inversão das isotermas ocorre devido à concentração de açúcar no material (quanto maior a temperatura, mais dissolvido estão os açúcares e mais alta é a umidade de equilíbrio contida no material).



Com os dados de isotermas obtidos experimentalmente, realizou-se uma regressão não-linear dos dados, através do método dos mínimos quadrados, utilizando as equações de Henderson-Thompson, Oswin, Halsey e GAB. Os resultados dos ajustes para cada temperatura estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros das equações de isoterma em estudo e coeficientes de determinação.

T (°C)	Modelos	$X_m$ (kg.kb <sup>-1</sup> )	k	a	R <sup>2</sup>
60	Henderson-Thompson	---	1,54±0,03	0,54±0,03	0,957
	Oswin	---	0,28±0,02	0,93±0,04	0,980
	Halsey	---	0,22±0,01	0,92±0,03	0,987
	GAB	0,166±0,006	1,03±0,01	11,02±4,95	0,992
70	Henderson-Thompson	---	1,67±0,02	0,41±0,03	0,972
	Oswin	---	0,16±0,02	1,21±0,05	0,983
	Halsey	---	0,19±0,01	0,73±0,03	0,985
	GAB	0,138±0,008	1,05±0,01	2,01±0,69	0,989

O modelo de GAB apresenta parâmetros que descrevem adequadamente os dados experimentais em uma ampla faixa de umidade relativa (10% a 90%), o que é interessante para alimentos. Nos modelos de Henderson-Thompson, Oswin e Halsey os parâmetros são apenas de ajuste, não apresentando significado físico (MULET *et al.*, 2002).

Para o modelo de GAB, pôde-se verificar que a umidade da monocamada diminui com o aumento da temperatura, sendo que este valor representa o conteúdo de umidade do material quando a superfície interna do material é coberta por uma camada de umidade unimolecular e o conteúdo de umidade ótimo para a máxima estabilidade pode ser determinada (ARIAHU *et al.*, 2006).

O bom ajuste da equação de GAB com os dados experimentais da isoterma de tomate pode ser visualizado para as temperaturas de 60°C e 70°C na Figura 3. Unadi *et al.* (1998), também observaram que GAB foi a equação mais satisfatória para prever as isotermas de equilíbrio de tomate.

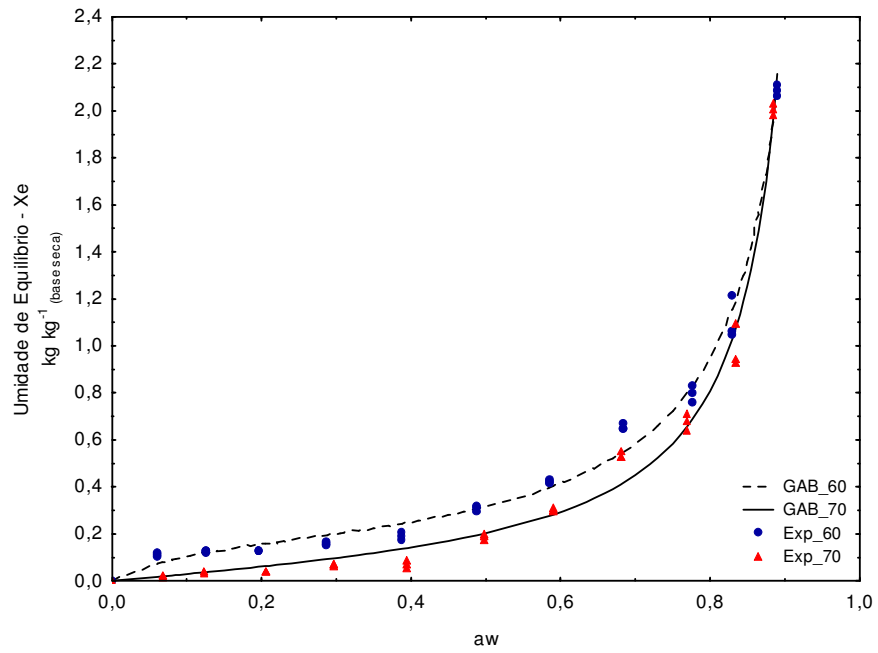


Figura 3: Ajuste da equação de GAB para a isoterma de tomate a 60 e 70 °C.

### 3.2 Caracterização da Secagem

As curvas que descrevem o comportamento da secagem de tomate diferentes temperatura de secagem e espessuras estão expressas na Figuras 4 e 5.

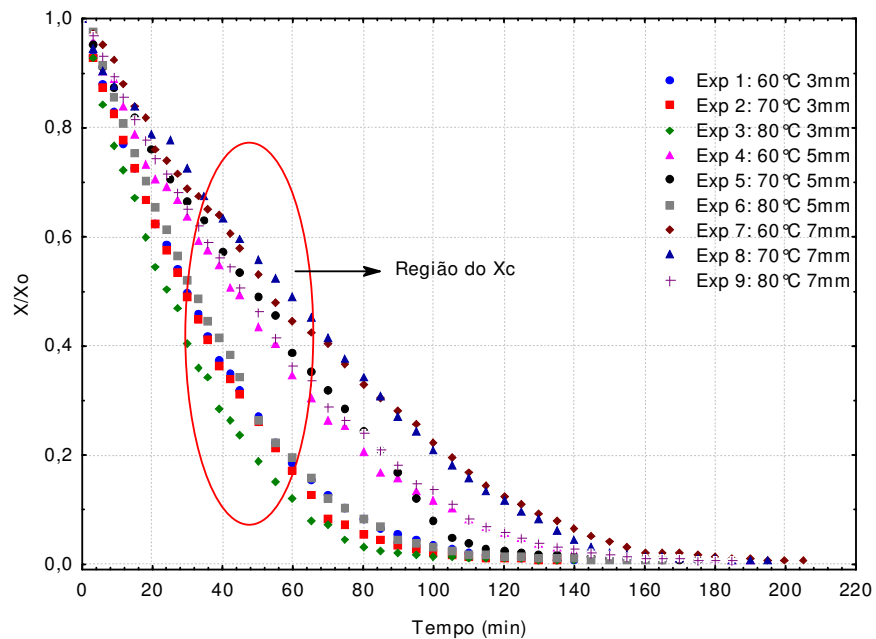


Figura 4: Curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem do tomate em escala linear

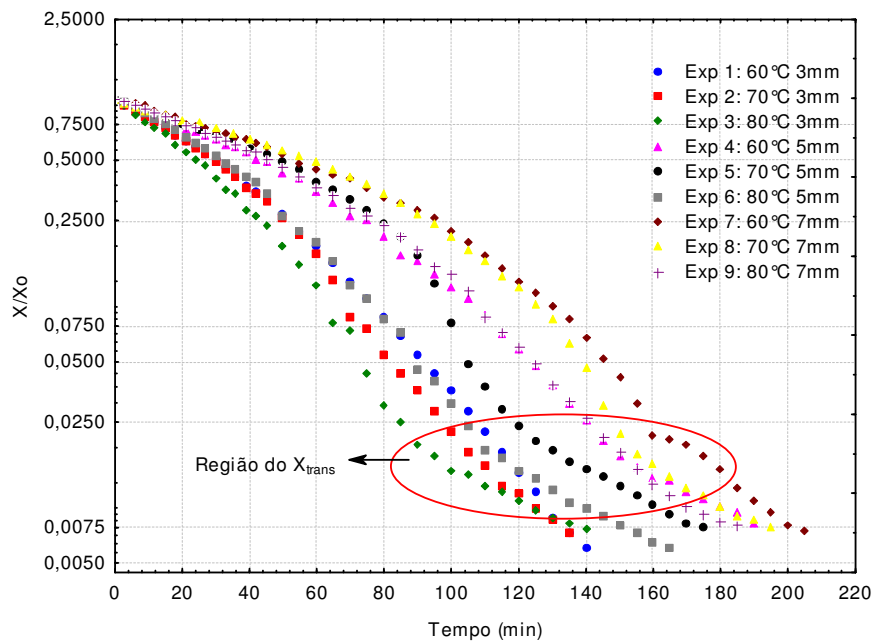


Figura 5: Curvas do adimensional de umidade em função do tempo de secagem de tomate em escala log-linear

Analisando-se as curvas do adimensional de umidade em base seca em função do tempo de secagem, em escala linear e log-linear (Figuras 4 e 5), verifica-se a

existência de período de taxa constante, o que é característico de alimentos com alto teor de umidade, como é o caso do tomate, que apresenta uma umidade de 95%. Ainda pode-se verificar a existência dos primeiro período de taxa decrescente, que se inicia após a umidade crítica ( $X_c$ ), onde ocorre uma acentuada variação da umidade da amostra em função do tempo, sendo o mecanismo de difusão líquida responsável pela migração interna de umidade, e segundo período da taxa decrescente, que se inicia após a transição ( $X_{trans}$ ), e a variação de umidade se torna menos pronunciada, pois o mecanismo de difusão de vapor deve ser o controlador desta etapa (CHIRIFE, 1983). Camargo (2000), verificou este mesmo comportamento em seu estudo de secagem de tomate.

Os parâmetros que caracterizam a secagem de tomate estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização da secagem de tomate em camada delgada

Experimento	$X_c$ (b.s) (g/g)	$X_{trans}$ (b.s) (g/g)	$t_{taxa\ cte}$ (min)	$t_{1\ período}$ (min)	$t_{2\ período}$ (min)	$t_{total}$ (min)
1	6,658	0,216	42	88	10	140
2	7,834	0,227	36	79	20	135
3	8,940	0,274	27	68	35	130
4	6,571	0,248	60	95	25	192
5	7,340	0,278	55	85	35	175
6	8,489	0,271	36	94	35	165
7	6,224	0,281	75	105	25	205
8	7,181	0,294	70	90	35	195
9	8,379	0,278	50	105	30	185

Através da Tabela 5, pode-se observar que todos os ensaios de secagem apresentaram períodos longos de taxa constante, o que é comum em alimentos que apresentam alto teor de umidade.

A umidade de transição apresentou valores ao redor de 25% em base úmida. Entretanto, em temperaturas do ar de secagem maiores e iguais espessuras, apresentaram maiores valores. Esse comportamento ocorreu devido ao tempo de secagem ser mais curto.

Os valores da umidade crítica aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem, ficando, porém, semelhantes para iguais espessuras das amostras.

A umidade de equilíbrio ( $X_E$ ) do tomate, nas temperaturas de secagem de 60 e 70°C, foi calculada através da Equação 4 (Tabela 2), utilizando os parâmetros determinados para o modelo de GAB, conforme a Tabela 4, cujos valores foram de 0,101 e 0,017 kg.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Para a temperatura de 80°C, o valor da umidade de equilíbrio foi estabelecido em ensaio de secagem até atingir a massa constante da amostra, que apresentou o valor de 0,012 kg.kg<sup>-1</sup>.

A Figura 6 apresenta as curvas do adimensional de água livre em função do tempo para a secagem de tomate, durante o período de taxa decrescente. Por meio de regressão não linear dos dados experimentais, utilizando as equações empíricas da Tabela 3, foram calculados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), conforme está apresentado na Tabela 6.

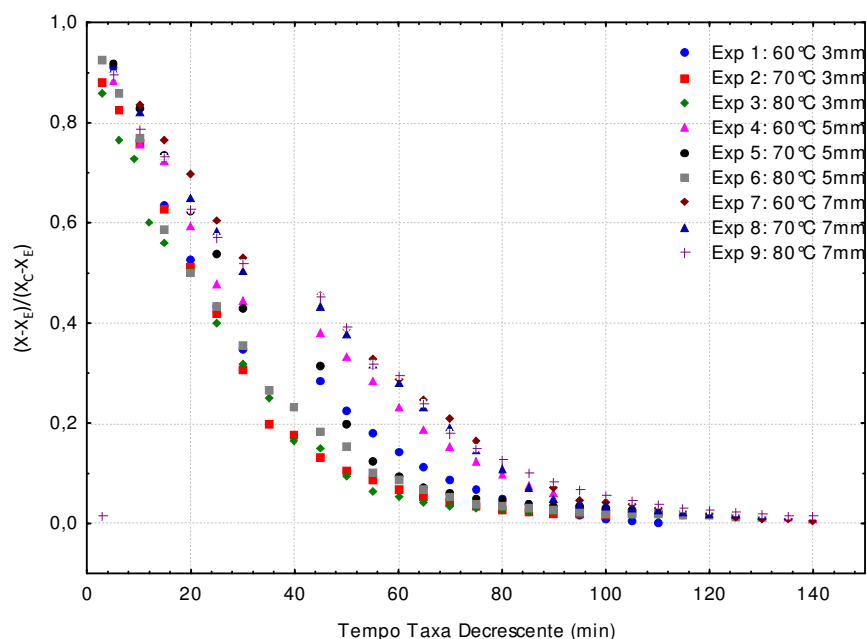


Figura 6: Curvas do adimensional de água livre, a partir da umidade crítica em função do tempo para a secagem de tomate, para 60, 70 e 80°C, 3, 5 e 7mm.

Tabela 6: Resultados das correlações (R) para os ajustes dos modelos utilizados para a estimativa dos valores da constante de secagem.

Experimento	Modelos				
	Lewis	Henderson e Pabis	Henderson e Henderson	Page	Overhults
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
1	0,989	0,991	0,984	0,995	0,995
2	0,983	0,989	0,978	0,997	0,997
3	0,991	0,993	0,988	0,998	0,998
4	0,993	0,997	0,980	0,998	0,998
5	0,971	0,987	0,968	0,990	0,990
6	0,987	0,994	0,981	0,999	0,999
7	0,980	0,989	0,976	0,995	0,995
8	0,983	0,993	0,969	0,991	0,991
9	0,979	0,993	0,978	0,997	0,997

Na Tabela 6 observa-se que utilizando os dados experimentais para todas as equações citadas encontrou-se boas correlações ( $R^2 > 0,97$ ) para os modelos testados.

Porém o modelo de Henderson e Pabis foi escolhido por ter significado físico na sua interpretação, já que pode ser visto como uma simplificação da solução analítica do modelo difusivo para tempos longos de secagem. Dessa forma, a constante de secagem K pode ser utilizada para determinação do parâmetro físico difusividade efetiva de umidade ( $D_{EF}$ ).

A difusividade efetiva média de umidade ( $D_{EF}$ ), para cada ensaio de secagem, foi determinada através da Equação 11, para a caracterização do primeiro e segundo períodos de secagem.

Para o primeiro período de taxa decrescente de secagem utilizou-se a espessura média das fatias de tomate entre a umidade crítica ( $X_c$ ) e umidade de transição ( $X_m$ ) de cada amostra. Já para o segundo período de taxa decrescente, utilizou-se a espessura final das fatias, pois, segundo Kilpatrick *et al.*, (1955), o encolhimento de materiais fibrosos ocorre linearmente durante o período de taxa

constante e o primeiro período de taxa decrescente, passando, a partir do segundo período de taxa decrescente, a não variar mais a espessura, visto que o encolhimento se dá até atingir umidade em torno de 25%. No caso da secagem de tomate, foi verificado que a umidade de transição ( $X_{trans}$ ) apresentou valores nessa faixa, proporcionando, então, que a partir do segundo período de taxa decrescente não houve mais encolhimento do material.

A Tabela 7 apresenta os valores estimados da constante de secagem (K) utilizando o modelo de Henderson e Pabis (Equação 7), e da difusividade efetiva média de umidade (Equação 11).

Tabela 7: Valores estimados para a constante de secagem ( $K_{S1}$  e  $K_{S2}$ ) pelo modelo de Henderson e Pabis, e da difusividade efetiva ( $D_{EF1}$  e  $D_{EF2}$ ).

Experimento	$K_{S1}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$D_{EF1}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\times 10^{10}$	$K_{S2}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$D_{EF2}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) $\times 10^{11}$
1	0,029	1,56	0,021	4,21
2	0,038	1,93	0,022	5,01
3	0,046	2,21	0,025	8,03
4	0,025	1,69	0,019	4,32
5	0,033	2,12	0,020	5,11
6	0,039	2,43	0,022	8,21
7	0,019	1,92	0,018	4,57
8	0,025	2,34	0,020	5,26
9	0,031	2,67	0,022	8,35

O parâmetro K representa a velocidade de difusão de água no material quando a resistência externa a transferência de massa do ar é desprezível, e quanto mais alto seu valor maior será a variação da umidade e menor o tempo de operação (MANDALA *et al.*, 2005). Na Tabela 7 pode ser observado esse comportamento, onde maiores valores da constante de secagem foram encontrados para as maiores temperaturas utilizadas, conforme apresenta-se os experimentos na Tabela 1.

Ainda, na Tabela 7, pode ser observado que os valores das difusividades efetivas médias de umidade do primeiro período de secagem foram maiores que do segundo período (entre 2,7 e 4,4) e isso pode ser explicado pela maior facilidade de migração interna de umidade no primeiro período, onde o mecanismo que controla a transferência de massa é a difusão líquida. E, segundo Chirife (1983),  $D_{EF1}$  deve ser de

3 a 8 vezes maior de  $D_{EF2}$  na secagem de alimentos. Também, a difusividade efetiva 1 ( $D_{EF1}$ ) apresentou-se semelhante para iguais temperaturas do ar de secagem e diferentes espessuras da fatia de tomate. Esse comportamento se deve ao fato de que a difusividade efetiva de umidade não varia com espessura do material, sendo função apenas da umidade e temperatura do ar de secagem.

O valor da energia de ativação ( $E_a$ ) foi calculado utilizando o logaritmo dos valores das difusividades efetivas de umidade e o inverso da temperatura absoluta do ar de secagem, para o primeiro e segundo períodos de taxa decrescente, como mostrado na Figura 7.

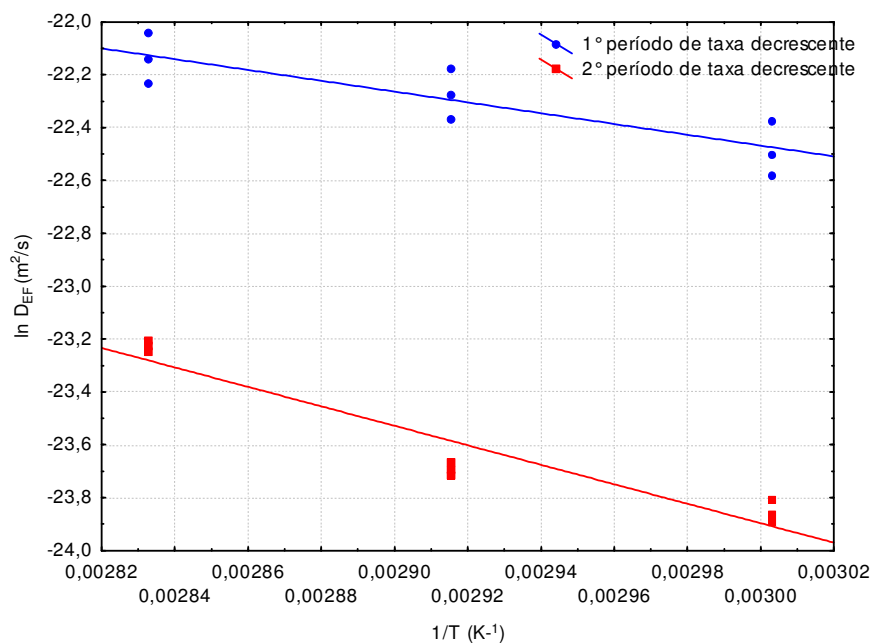


Figura 7: Curvas dos valores de  $\ln(D_{EF})$  em função do inverso da temperatura do ar de secagem, para o primeiro e segundo período de taxa decrescente da secagem de tomate em camada delgada

Através da Figura 8, pode-se observar que os resultados mostraram uma relação linear derivada da equação de Arrhenius (Equação 12). Os valores das energias de ativação ( $E_a$ ) foram determinados a partir da declividade das retas para o primeiro e segundo períodos de taxa decrescente, sendo encontrados os valores médios de  $16,99 \pm 0,81 \text{ kJ.mol}^{-1}$  e  $30,64 \pm 1,14 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , respectivamente.

Ainda, a partir da Figura 7, observa-se que a energia de ativação foi maior no segundo período da taxa decrescente, pois a água de mais fácil evaporação foi



retirada no primeiro período, sendo, então, necessário mais calor, no segundo período, para evaporar a água remanescente no material (WANG *et al.*, 2007). Ainda, segundo Camargo (2005), quanto maior a transferência de calor, menor será a energia de ativação. Como no primeiro período de taxa de crescente a transferência de calor é bem mais acentuada que no segundo período, conseqüentemente, a energia de ativação do segundo período de taxa decrescente foi maior que do primeiro período.

Também, segundo Chirife (1983), a energia de ativação para produtos alimentícios deve estar entre 14,2 e 39,7 kJ.mol<sup>-1</sup>. Portanto, é possível observar que todos os valores obtidos estão dentro da faixa mostrada por esse autor.

### 3.3 Reidratação

A Figura 8 apresenta as curvas da umidade em função do tempo dos ensaios de reidratação dos experimentos 1 e 3 (conforme Tabela 1, espessura de 3 mm) de tomate desidratado, visto que foi verificado que os experimentos com maiores espessuras apresentaram tempo de secagem superior, ocasionando assim uma maior alteração na estrutura do produto.

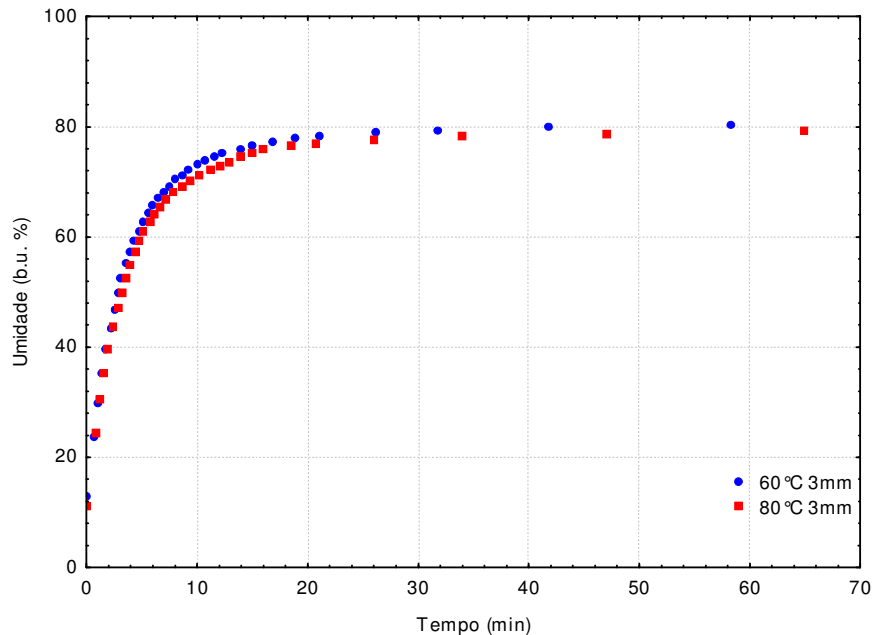


Figura 8: Curvas da umidade em função do tempo dos experimentos 1 e 3 de reidratação das amostras de tomate desidratada

A partir da Figura 8, pode-se observar que para menor temperatura, houve uma maior reidratação (cerca de 80,4%, o que corresponde a 84,6% da umidade inicial) num menor tempo. Isso se deve ao fato de que quanto maior a temperatura, maior é o dano ocorrido na estrutura do tomate, ocasionando assim, uma menor reidratação e um maior tempo para reidratar. Ainda é possível observar que a reidratação ocorreu praticamente nos primeiros 10 min, passando após esse período a ser realizada numa velocidade mais inferior.

#### 4. CONCLUSÃO

Os experimentos de secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, com escoamento paralelo do ar, tendo como variáveis de estudo a temperatura (60, 70 e 80 °C) e a espessura da fatia de tomate (3, 5 e 7mm), ocorreram ambos períodos de taxa decrescente, apresentando, ainda, o período de taxa constante, comum para alimentos com alto teor de umidade.

Dos quatro modelos testados para determinação das isotermas de equilíbrio, a equação de GAB mostrou-se mais adequada para o ajuste experimental dos dados, por apresentar maior significado físico para estimar a umidade de equilíbrio para o tomate. Os valores de umidade de equilíbrio fora de 0,101 e 0,017 kg.kg<sup>-1</sup> para as temperaturas de 60 e 70 °C, respectivamente.

Para determinação da constante de secagem, as cinco equações empíricas testadas apresentaram bom ajuste dos dados experimentais com coeficientes de determinação maiores que 0,97. O modelo de Henderson e Pabis foi o utilizado para a determinação da difusividade efetiva de umidade ( $D_{EF}$ ), devido este apresentar maior significado físico na estimativa deste parâmetro. Os valores de  $D_{EF}$  apresentaram-se entre  $1,56 \cdot 10^{-10}$  e  $2,67 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para o primeiro período de taxa decrescente e entre  $4,21 \cdot 10^{-11}$  e  $8,35 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s para o segundo período de taxa decrescente.

A energia de ativação foi de 16,99 e 30,64 kJ.mol<sup>-1</sup> para o primeiro e segundo período de taxa decrescente, respectivamente, apresentando-se maior (cerca de 2 vezes) no segundo período de taxa decrescente.

A reidratação do tomate seco, mostrou-se mais eficiente para menores temperaturas, pois apresentou uma maior reidratação (84,6% da umidade inicial) num período de tempo menor.

## 5. NOMENCLATURA

a	Constante equações 1 e 2	Adimensional
$a_w$	Atividade de água	Adimensional
B	Constante equação 3	Adimensional
C	Constante equações 7 e 8	Adimensional
$D_{EF}$	Difusividade efetiva de umidade	$m^2.s^{-1}$
$D_0$	Fator pré-exponencial da equação de Arrhenius	$m^2/s$
$\frac{dX}{dt}$	Taxa de secagem	Adimensional
$E_A$	Energia de ativação	$kJ.mol^{-1}$
$F_0$	Número de Fourier	Adimensional
k	Constante equações 1, 2, 3 e 4	Adimensional
K	Constante de secagem	$Min^{-1}$
L	Espessura	m
N	Taxa de secagem por unidade de massa	$kg.kg^{-1}$
R	Constante universal dos gases	$(8,314)J.mol^{-1}.K^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t	Tempo	s
X	Umidade (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_C$	Umidade crítica (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_E$	Umidade de equilíbrio (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_m$	Umidade da monocamada	$kg.kg^{-1}$
$X_0$	Umidade inicial (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$X_{Trans}$	Umidade de transição (base seca)	$kg.kg^{-1}$
$\frac{X - X_E}{X_0 - X_E}$	Adimensional de água livre	Adimensional

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC – **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists**, 16<sup>th</sup> ed, v.1. Published by AOAC International, Arlington/USA, 1995.

ARIAHU, C.C.; KAZE, S.A.; ACHEM, C.D. **Moisture sorption characteristics of tropical fresh water crayfish (*Procambarus clarkii*)**. Journal of Food Engineering,

n.75, p. 355-363, 2006.

BALA, B.K. & WOODS, J.L. **Thin layer drying models for malts**. Journal Food Engineering, v.16, p. 239-149, 1992.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. **Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamento cruzados**. Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados, São Carlos, ed. UFSCar, 1998

CAMARGO, G. A. **Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) para Conserva: Estudo de Parâmetros com Base na Qualidade Final**. Campinas, UNICAMP (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola), 2000.

CAMARGO, G. A. **Novas Tecnologias e pré-tratamento: Tomate seco embalado à vácuo**. Campinas, UNICAMP (Dissertação de Doutorado em Engenharia de Alimentos), 2005.

CAMARGO, G. A.; NIURK, H.; QUEIROZ, M. R. **Avaliação da Qualidade de Tomate Seco em Conserva**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.5, p. 521-526, 2007.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the Drying Mechanism During Air Dehydration of Foods**. In: MUJUNDAR, A. Advances in drying. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

FENNEMA, O.R. **Química de los alimentos**, 2ª ed. Editora Acribia, p. 549, 1993.

JAYARAMAN, K. S.; DAS GUPTA, D. K.; BABU RAO, N. **Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower**. International Journal of Food Science and Technology, v. 25, p. 47-60, 1990.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. New York, USA, Pergamon Press, p. 358, 1972.

KILPATRICK, P.W.; LOWE, E.; VAN ARSDEL, W.B. **Tunnel dehydration for fruits and vegetables**. In: Van Arsdel, W. B. *Advances in Food Research*. Academic Press. New York. v. 4. p.313-371, 1955.

KROKIDA, M. K. & MARINOS-KOURIS, D. **Rehydration kinetics of dehydrated products**. *Journal of Food Engineering*, v. 57, p. 1-7, 2003.

LABUZA, T. P. **Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use**. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota. *Practical Applications*, Braseq, p.74,1984.

MANDALA, I. G.; ANAGNOSTARAS, E. F.; OIKONOMOU, C. K. **Influence of osmotic dehydration conditions on Apple air-drying kinetics and their quality characteristics**. *Journal Food Engineering*, n. 69, p. 307-316, 2005.

MORAES, M. A.; ROSA, G. S.; PINTO, L. A. A. **Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of apple fuji and garlic**. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 43, p. 1824–1831, 2008.

MULET, A. **Equilibrium isotherms and isosteric heat of morel (*Morchella esculenta*)**. *Journal of Food Engineering*. New York, v.53, n.1, p.74-81, 2002.

OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. **Characterization of thin layer drying of *Sperulina platensis***. *Bioresource Technology*, n.100, p. 1297-1303, 2009.

PEZZUTI, A.; CRAPISTE, G.H. **Sorptional equilibrium and drying characteristic of garlic**. *Journal of Food Engineering*, V. 29, p. 75-79, 1996.

PINTO, L.A.A.; TOBINAGA, S e PENEIREIRO, J.B. **Difusão líquida na secagem de músculos de peixe**. In: **Encontro sobre escoamento em meios porosos**. Anais do XX ENEMP. São Carlos, SP, 1992b.

RIBEIRO, E.P; SERAVALLI, E. A. G. **Química de Alimentos**. 2ª edição. Ed Edgard Blücher LTDA, p. 184, 2007.

SILVA, J.B.C.; GIORDANO, L.B. **Tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia – Embrapa Hortaliças, 2000.

TOBINAGA, S.; PINTO, L. A. A. **Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixe**. In: Freire, J. T. e Sartori, D. M. J. Tópicos especiais em secagem. São Carlos, v. 1, ed. UFSCar, p. 211-251, 1992.

UNADI, A.; FULLER, R. J.; MACMILLAN, R. H. **Prediction of the equilibrium moisture content of tomatoes**. Food Australia. V.50, n.4, p. 200-203, 1998.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. **Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace**. Food Research International, n. 40, p. 39-46, 2007.

WESKA, R, F; BRIZIO, A, P; PINTO, L, A, A. **Avaliação Das Características Do Produto Obtido Na Secagem De Maçã Fuji (*Mallus Percicae*) Em Camada Delgada**, Anais do XVI Cobeq (Congresso Brasileiro de Engenharia Química), 2006.

## 4.2 ARTIGO 2: AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO DE LICOPENO, COR E CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) SECO EM CAMADA DELGADA COM ESCOAMENTO PARALELO

### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a determinação da cor (através do ângulo de Hue), teor de licopeno e capacidade de produção de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) seco em camada delgada, utilizando um secador com escoamento paralelo do ar de secagem. O estudo se deu através da utilização da metodologia da superfície de resposta, onde foi realizado um planejamento experimental 3<sup>2</sup> completo, sendo as variáveis estudadas foram temperatura do ar de secagem (60, 70 e 80 °C) e espessura da fatia de tomate (3, 5 e 7mm), e as respostas consideradas cor, teor de licopeno e capacidade de produção. Todos os modelos teóricos foram gerados superfície de resposta, pois se apresentaram preditivos. A condição ótima de operação para a secagem de tomate, em camada delgada, com escoamento paralelo do ar, foi temperatura do ar de secagem de 60 °C e espessura da fatia de tomate de 3 mm, com cor (ângulo de Hue) 47,70°, teor de licopeno de 301,69 µg/g e capacidade de produção de 1,65 kg/m<sup>2</sup>.h.

**Palavras-chave:** capacidade de produção, cor, licopeno, secagem, tomate.

### 1. INTRODUÇÃO

Os carotenóides compõem um grupo de compostos responsáveis pela cor amarela, laranja e vermelha de muitos alimentos de origem vegetal e alguns de origem animal. São também citados como responsáveis pela diminuição do risco de doenças como câncer e doenças cardiovasculares (WONG, 1995).

O pigmento vermelho licopeno (C<sub>40</sub>H<sub>56</sub>) é um carotenóide que acumula em frutos, flores e raízes de algumas espécies vegetais, incluindo, hortaliças e fruteiras. A principal fonte de licopeno na dieta humana é o fruto do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) e seus derivados. A estrutura química singular do licopeno confere marcante ação antioxidante, contribuindo na prevenção de doenças degenerativas, cardiovasculares e de certos tipos de câncer. Além do fator nutricional, a concentração

do licopeno no tomate está relacionada com uma melhor percepção visual dos produtos, existindo, portanto, uma forte demanda para aumentar os teores deste pigmento em frutos das cultivares tanto para consumo *in natura* quanto para processamento industrial (CARVALHO *et al.*, 2005).

A operação de secagem é uma importante etapa nas indústrias química e de alimentos. O objetivo básico da secagem de alimentos é remover água de um sólido até certo nível que minimize o ataque microbiano e reações químicas de deterioração (KROKIDA *et al.*, 2003); após a secagem há uma redução substancial de massa e volume do material, minimizando gastos com embalagem, estocagem e transporte (OKOS *et al.*, 1992). Muitos fatores podem ser influenciados na secagem de alimentos, como por exemplo: velocidade e temperatura do ar, difusão de água através do alimento, carga de sólido, espessura e geometria do material seco. Entretanto, a remoção rápida de água diminui o valor nutricional e sensorial do alimento e permite a presença de fenômenos como o endurecimento e encolhimento (VEGA *et al.*, 2007)

O tomate seco foi introduzido no mercado brasileiro por imigrantes de países como Espanha e Itália e de algumas recentes produções domésticas nacionais. Em termos de pesquisa, vem-se observando nos últimos anos, interesse crescente pela qualidade deste produto. Estudos são desenvolvidos visando à investigação dos parâmetros de secagem e aplicação de novas tecnologias que minimizem os danos causados pelo calor à cor, textura, ao sabor e perda de nutrientes (VEJA *et al.*, 2001; PEREIRA *et al.*, 2006).

O objetivo do presente trabalho foi determinar o teor de licopeno, cor e capacidade de produção de tomate seco em camada delgada, analisando através do uso da metodologia da superfície de resposta, qual a melhor região de operação de secagem de tomate, para as respostas consideradas.

## **2. MATERIAL E METODOS**

### **2.1 Matéria-prima**

A matéria-prima utilizada foi tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) *in natura*, redondo, do tipo Longa-vida, adquirido no comércio local da cidade do Rio Grande/RS,



com um conteúdo de umidade em torno de 95% (b.u.), determinado segundo as normas analíticas da AOAC (1995).

## **2.2 Equipamento de Secagem**

Os ensaios de secagem de tomate em camada delgada, com escoamento paralelo do ar, foram realizados em um secador, cuja bandeja era de aço inox, perfurada, de forma retangular (20 cm de largura e 25 cm de comprimento) de tela perfurada (*mesh* 10).

## **2.3 Procedimento Experimental da Secagem**

A secagem de tomate foi realizada com amostras lavadas com água corrente clorada, fatiadas, com auxílio de uma faca de aço inox, em diferentes espessuras, com sementes e com pele, para que o produto pudesse se parecer com o tomate *in natura*. A massa das amostras foi determinada com uma balança eletrônica (Kem modelo 430-21, Alemanha) com precisão de 0,01 g. A temperatura do ar de secagem foi de 60, 70 e 80 °C e a espessura da fatia de tomate de 3, 5 e 7mm, correspondentes as massas iniciais de 192, 231 e 293 g, respectivamente, para que se possa garantir a condição de camada delgada, medidas com um paquímetro digital (Guo gen, Digital Caliper, China). A umidade relativa do ar ambiente e dentro do secador foi determinada com um termohigrômetro (Cole Parmer, modelo 3310-00, USA) com precisão de 0,1%. Foram anotados os valores de massa e temperatura a cada 3 min, durante os primeiros 45 min e posteriormente a cada 5 min até que se atingisse umidade em torno de 13% (b.u), pois, segundo Silva & Giordano (2000), para conseguir uma estocagem de tomates secos sem alteração de qualidade e sem a aplicação de conservantes, é essencial reduzir a umidade do produto para a faixa que varia de 11 a 14%, o que evitaria o desenvolvimento de micro-organismo e matéria a estabilidade do produto. Os experimentos foram realizados conforme a matriz do planejamento experimental 3<sup>2</sup> completo, mostrado na Tabela 1.

## 2.4 Metodologia Analítica

### 2.4.1 Determinação da cor

A cor da tomate foi avaliada instrumentalmente utilizando-se um sistema MINOLTA (CR-300, MINOLTA Corporation, Ramsey, NJ, USA). A cor foi mensurada a partir de um diagrama tridimensional de cores (L-a\*-b\*) (Figura 6), onde L indica luminosidade, a\* indica cromaticidade tendendo do verde (-) até vermelho (+) e b\* indica a cromaticidade que varia do azul (-) até amarelo (+). Os valores numéricos de a\* e b\* foram convertidos no ângulo Hue, conforme Equação 1.

$$H_{ab} = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

O ângulo Hue é o valor em graus correspondente ao diagrama tridimensional de cores: 0° (vermelho), 90° (amarelo), 180° (verde) e 270° (azul).

### 2.4.2 Determinação do Teor de Licopeno

Para o caso de frutos maduros de cultivares tradicionais de tomateiro, as análises espectrofotométricas empregando carotenóides totais têm sido utilizadas como uma estimativa dos teores de licopeno uma vez que este é o carotenóide predominante. (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001). No procedimento utilizando espectrofotômetro, os carotenóides totais são inicialmente extraídos dos frutos utilizando-se o solvente orgânico acetona e transferidos para éter de petróleo com posterior leitura no comprimento de onda de 470nm.

Para o tomate seco, foram tomadas amostras de 1,0 g. Em cada amostra adicionou-se 40 mL de acetona procedendo-se, em seguida, uma agitação da mistura por 1 h utilizando-se um agitador a 200 rpm. Em seguida, procedeu-se a filtração a vácuo com o auxílio de um Kitassato envolto em papel alumínio para evitar a foto-oxidação dos pigmentos. Cada amostra foi lavada com acetona por mais três vezes para total extração dos pigmentos. Ao funil de separação foram adicionados 45 mL de éter de petróleo. Os pigmentos foram, então, transferidos, em pequenas frações,

seguidas de água destilada, para o funil de separação, descartando-se a fase inferior. As amostras foram lavadas por mais quatro vezes para remoção total da acetona. A solução dos pigmentos em éter de petróleo foi transferida para um balão volumétrico completando-se o volume para 100 mL com éter de petróleo. A leitura no espectrofotômetro (Micronal B495) foi feita no comprimento de onda de 470 nm. As análises foram realizadas em triplicatas, para uma maior confiabilidade dos dados. O teor de licopeno foi obtido pela Equação 2:

$$\mu\text{g/g} = \frac{(A * V * 1.000.000)}{(A^{1\%} * M * 100)} \quad (2)$$

onde A é absorvância da solução no comprimento de onda de 470 nm, V o volume final a solução,  $A^{1\%}$  é o coeficiente de extinção ou coeficiente de absorvidade molar de um pigmento em um determinado solvente específico e M a massa da amostra tomada para a análise. Para o licopeno em éter de petróleo o valor do coeficiente de extinção é 3450.

### 2.4.3 Determinação da Capacidade de Produção

A capacidade de produção foi determinada através da massa inicial da amostra colocadas na bandeja, dividido pelo tempo total de secagem de cada experimento para atingir a umidade final do produto (em torno de 13% em base úmida).

## 2.5 Metodologia Estatística

Para a definição das condições operacionais necessárias para a obtenção de um produto desidratado de boa qualidade, no secador em paralelo foram analisados os efeitos da temperatura do ar de secagem ( $X_{Temp}$ ) e da espessura da fatia de tomate ( $X_{espes}$ ). Foi utilizada a metodologia de superfície de resposta, obtendo como respostas modelos teóricos estatístico para as respostas consideradas (Myer, 1976), sendo estas cor (através do ângulo de Hue), teor de licopeno e capacidade de produção.

A Tabela 1 apresenta a matriz do planejamento experimental fatorial completo  $3^2$  utilizado na secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do

ar de secagem, com os fatores de estudo na forma codificada e não codificada. Os experimentos foram realizados em replica para uma melhor confiabilidade.

Tabela 1: Matriz do planejamento experimental fatorial completo 3<sup>2</sup> da secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do ar

Experimento	Temperatura codificada	Temperatura (°C)	Espessura codificada	Espessura (mm)
1	-1	60	-1	3
2	0	70	-1	3
3	+1	80	-1	3
4	-1	60	0	5
5	0	70	0	5
6	+1	80	0	5
7	-1	60	+1	7
8	0	70	+1	7
9	+1	80	+1	7

As equações das funções resposta procuradas, cor ( $Y_{cor}$ ), teor de licopeno ( $Y_{lico}$ ) e capacidade de produção ( $Y_{cap.prod}$ ), foram da forma polinomial (Equação 3), onde os termos estão constituídos pelas variáveis estudadas, na forma codificada, pela combinação entre elas, pelos coeficientes de cada termo, mais uma constante que corresponde à média dos valores.

Os dados foram analisados através do software Statistica 7.0 for *Windows*.

$$Y = A + (B * X_{temp}) + (C * X^2_{temp}) + (D * X_{espes}) + (E * X^2_{espes}) + (F * X_{temp} * X_{espes}) \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Secagem

A Figura 2 apresenta as curvas de umidade ( $X$ ) em base úmida em função do tempo de secagem de tomate em camada delgada.

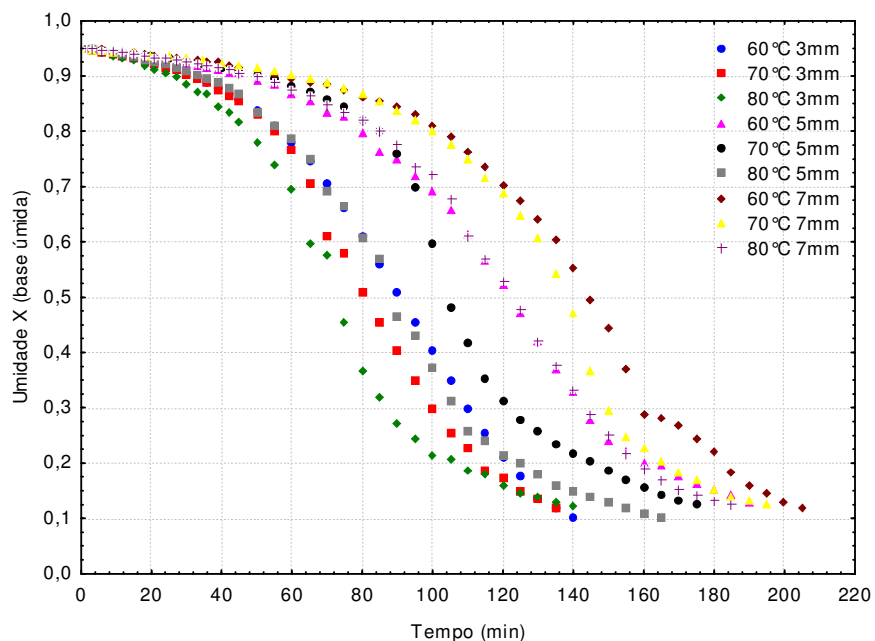


Figura 1: Curvas umidade em base úmida em função do tempo de secagem de tomate em camada delgada

A partir da Figura 1 é possível observar que todos os experimentos de secagem obtiveram uma umidade final abaixo dos 13% (base úmida). Silva & Giordano (2000) afirmam que, para conseguir uma estocagem de tomates secos sem alteração de qualidade e sem a aplicação de conservantes, é essencial reduzir a umidade do produto para a faixa que varia de 11 a 14%, o que evitaria o desenvolvimento de micro-organismos e manteria a estabilidade do produto.

#### 3.2 Cor

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para o ângulo de Hue para a determinação da cor, utilizando a equação 1.

Tabela 2: Parâmetros obtidos na determinação da cor

Experimento	Parâmetros de cor			
	L*	a*	b*	Ângulo de Hue*
1	50,97±0,13	29,69±0,14	32,63±0,12	47,70°±0,23
2	46,71±0,14	26,64±0,14	32,6±0,27	50,74°±0,14
3	42,31±0,10	20,13±0,11	30,07±0,17	56,20°±0,15
4	49,88±0,26	22,17±0,19	28,21±0,18	51,84°±0,19
5	45,01±0,17	21,99±0,24	29,3±0,17	53,11°±0,21
6	41,03±0,21	24,40±0,31	39,35±0,22	58,20°±0,26
7	47,32±0,12	25,35±0,17	39,57±0,10	57,35°±0,14
8	43,37±0,24	22,55±0,23	38,82±0,19	59,85°±0,26
9	39,21±0,18	23,01±0,13	44,06±0,21	62,42°±0,17

\* valor médio ± erro padrão (duas repetições)

O tomate *in natura* apresentou uma luminosidade (L\*) de 53,68 e, através da Tabela 2, pode-se observar que em todos os experimentos houve uma redução da luminosidade. Segundo Arias *et al.* (2000) a luminosidade pode ser definida como a capacidade de o objeto refletir ou transmitir luz. A redução foi mais significativa para maiores temperaturas e maiores espessuras, pois em maiores temperaturas ocorre uma maior degradação do tomate seco, proporcionando, assim, uma menor luminosidade do mesmo.

Com relação a cor, o tomate *in natura* apresentou um ângulo de Hue de 45,34°, e em todos os experimentos também houve um aumento deste, indicando, assim, que houve uma redução da cor vermelha. E esta redução da cor vermelha foi maior em maiores temperaturas e maiores espessuras. Segundo Shewfelt *et al.* (1988), a perda de cor na secagem de tomate, deve-se ao fato de perda de licopeno na operação, pois o mesmo é o carotenóide responsável pela cor avermelhada do tomate, e em temperaturas mais elevadas por mais tempo ocorre uma maior degradação de licopeno.

### 3.3 Teor de Licopeno

A Tabela 3 apresenta os dados para o teor de licopeno, obtidos através da Equação 2.

Tabela 3: Teor de Licopeno em tomate seco

Experimento	Teor de Licopeno* ( $\mu\text{g/g}$ )
1	301,69 $\pm$ 0,13
2	247,23 $\pm$ 0,22
3	203,31 $\pm$ 0,14
4	279,34 $\pm$ 0,16
5	230,17 $\pm$ 0,31
6	199,27 $\pm$ 0,13
7	221,14 $\pm$ 0,17
8	191,14 $\pm$ 0,29
9	174,98 $\pm$ 0,13

\* valor médio  $\pm$  erro padrão (duas repetições)

Segundo Zaroni *et al.* (1999) e Camargo (2005), a perda de licopeno ocorre principalmente por oxidação, e em maiores temperaturas este efeito é mais acentuado. Isto pode ser constatado no dados da Tabela 3, onde observa-se que quanto menor a temperatura e menor a espessura, maior é o teor de licopeno apresentado.

### 3.4 Capacidade de Produção

A Tabela 4 mostra a capacidade de produção para o tomate seco em camada delgada com escoamento paralelo do ar de secagem.

Tabela 4: Capacidade de produção de tomate seco

Experimento	Capacidade de Produção (kg/m <sup>2</sup> .h)
1	1,65
2	1,72
3	1,78
4	1,44
5	1,58
6	1,68
7	1,71
8	1,81
9	1,90

Através da Tabela 4 pode-se observar que a maior capacidade de produção ocorreu a temperatura de 80 °C e 7mm de espessura da fatia de tomate, enquanto que a menor capacidade de produção foi a temperatura de 60 °C e 5mm de espessura da fatia de tomate.

### 3.5 Análise Estatística dos Resultados

A partir dos dados das Tabelas 2, 3 e 4, com auxílio do software Statistica 7.0 for *Windows*, foi desenvolvido o estudo estatístico do Planejamento Experimental 3<sup>2</sup> em replica, para um significância de 95% ( $p \leq 0,05$ ), no qual foi verificado o grau de influência das variáveis individuais temperatura (T) e espessura da fatia de tomate (Q) e suas interações (TxQ).

As Figuras 3, 4 e 5 mostram o gráfico de paretos para as respostas cor, teor de licopeno e capacidade de produção, respectivamente, sendo que as linhas verticais representam um nível de significância de 95% ( $p \leq 0,05$ ).



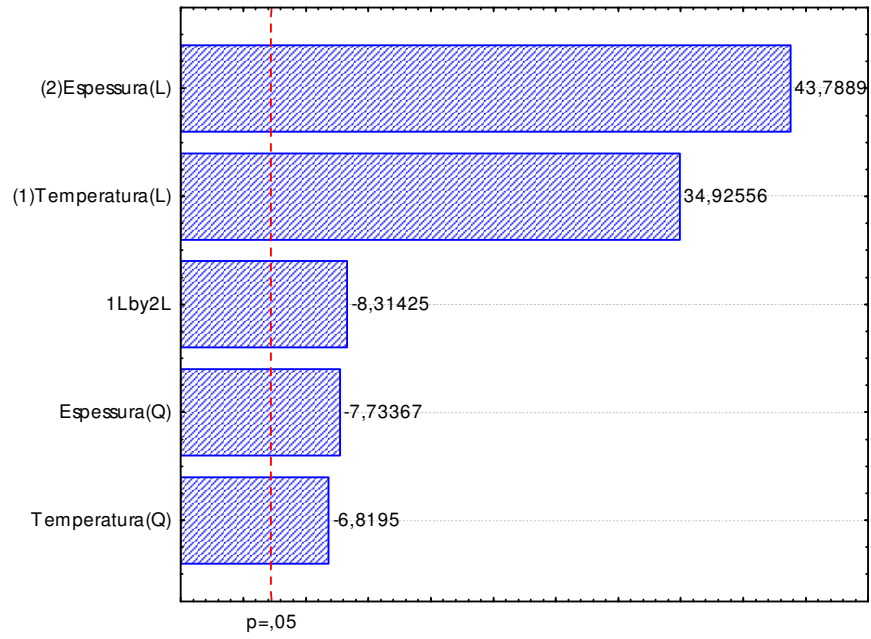


Figura 3: Gráfico de Pareto para a resposta cor das amostras secas de tomate.

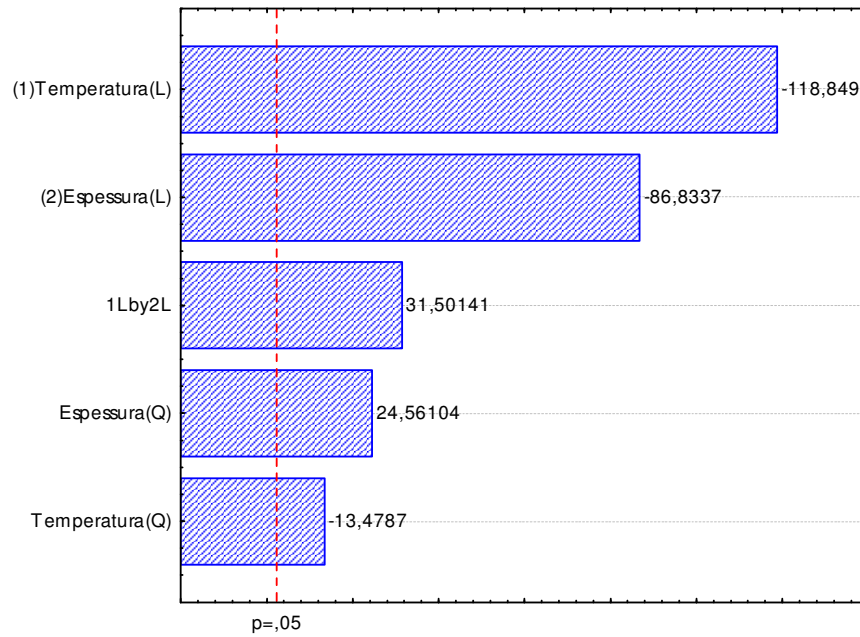


Figura 4: Gráfico de Pareto para a resposta teor de licopeno das amostras secas de tomate.

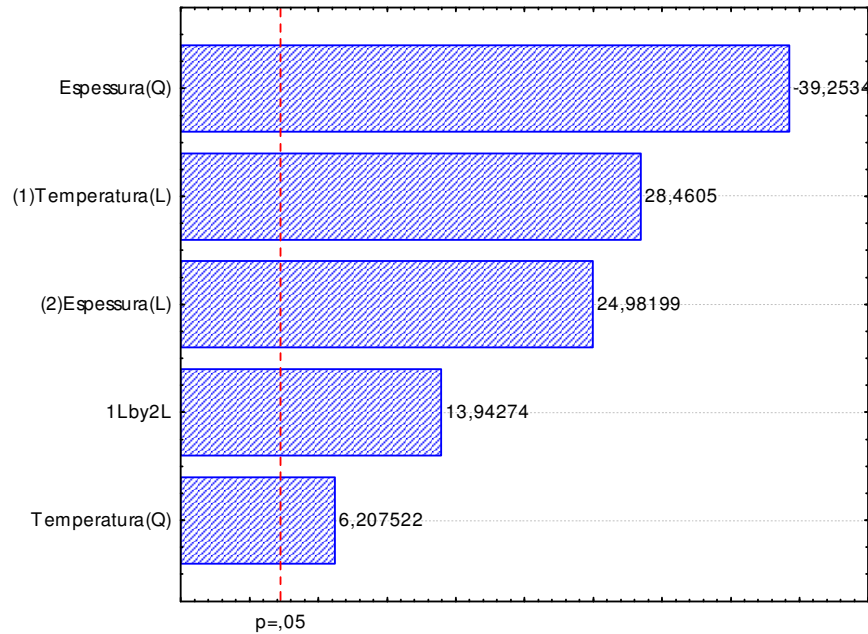


Figura 5: Gráfico de Pareto para a resposta capacidade de produção das amostras secas de tomate.

A partir das Figuras 3, 4 e 5 é possível observar que todos os efeitos foram significativos para todas as respostas consideradas. Para a resposta cor, o que mais significou foi o efeito espessura linear da fatia de tomate. Para a resposta teor de licopeno, o que mais influenciou foi o efeito temperatura linear do ar de secagem. Já para a capacidade de produção, o efeito quadrático da espessura foi o que mais influenciou esta resposta.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam o quadro de ANOVA para as respostas cor, teor de licopeno e capacidade de produção, respectivamente, para verificar se os modelos gerados são preditivos.

Tabela 5: ANOVA para a resposta cor das amostras secas de tomate

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{cal}$	$F_{tab}$
Regressão	333,37	5	66,67	202,081	3,106
Resíduo	3,959	12	0,329		
Falta de Ajuste	3,053	3	1,01776		
Erro Puro	0,9057	9	0,10063		
Total	337,3275	17			

Tabela 6: ANOVA para a resposta teor de licopeno das amostras secas de tomate

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{cal}$	$F_{tab}$
Regressão	28238,36	5	5647,67	881,874	3,106
Resíduo	76,85	12	6,404		
Falta de Ajuste	66,01	3	22,004		
Erro Puro	10,84	9	1,205		
Total	28315,21	17			

Tabela 7: ANOVA para a resposta capacidade de produção das amostras secas de tomate

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{cal}$	$F_{tab}$
Regressão	0,2673	5	0,0534	30,21	3,106
Resíduo	0,02124	12	1,77E-3		
Falta de Ajuste	0,0205	3	0,0068		
Erro Puro	0,00075	9	0,00083		
Total	0,2886	17			

A partir das Tabelas 5, 6 e 7, pode-se observar que para todas as respostas os modelos gerados foram preditivos, pois os valores de  $F_{cal}$  foram mais maiores que os de  $F_{tab}$ , podendo, então, gerar superfície de resposta. As Equações 4, 5 e 6 representam os modelos teóricos para as respostas cor, teor de licopeno e capacidade de produção, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 98,82, 99,73 e 92,64% respectivamente.

$$Y_{cor} = 55,21 + 6,397 * X_{temp} - 1,082 * X_{temp}^2 + 8,02 * X_{espes} - 1,223 * X_{espes}^2 - 1,86 * X_{tem} * X_{espes} \quad (4)$$

$$Y_{Licop} = 227,53 - 75,31 * X_{temp} - 7,397 * X_{temp}^2 - 55,02 * X_{espes} + 13,48 * X_{espes}^2 + 24,44 * X_{tem} * X_{espes} \quad (5)$$

$$Y_{Cap.prod.} = 1,6831 + 0,15 * X_{temp} - 0,028 * X_{temp}^2 + 0,131 * X_{espes} - 0,179 * X_{espes}^2 + 0,09 * X_{tem} * X_{espes} \quad (6)$$

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as superfícies de resposta para a cor, teor de licopeno e capacidade de produção, respectivamente, obtidos a partir das equações dos modelos teóricos gerados.

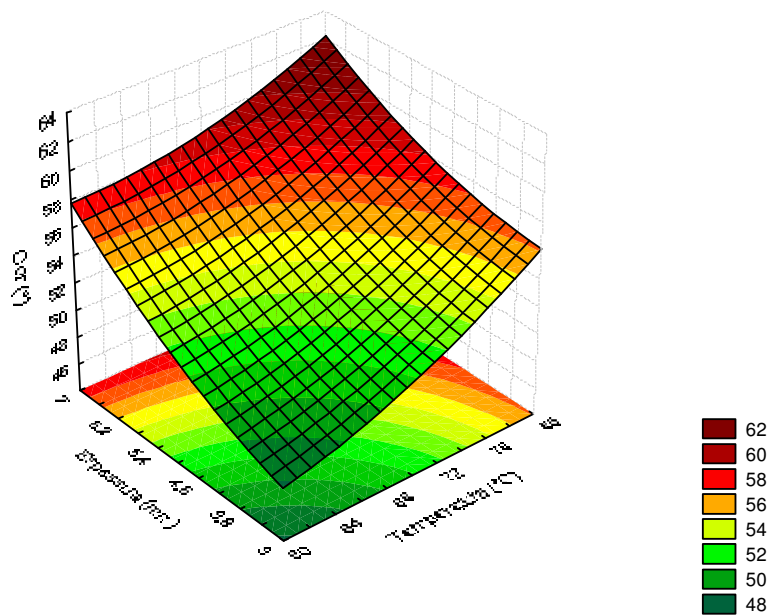


Figura 6: Superfície de resposta para cor das amostras de tomate secos

A partir da Figura 6, é possível observar que com menores temperaturas e menores espessuras, obtém-se um menor ângulo de Hue, indicando, assim, um vermelho mais intenso na coloração do tomate seco, conforme pode ser indicado na região verde mais escuro da superfície de resposta.

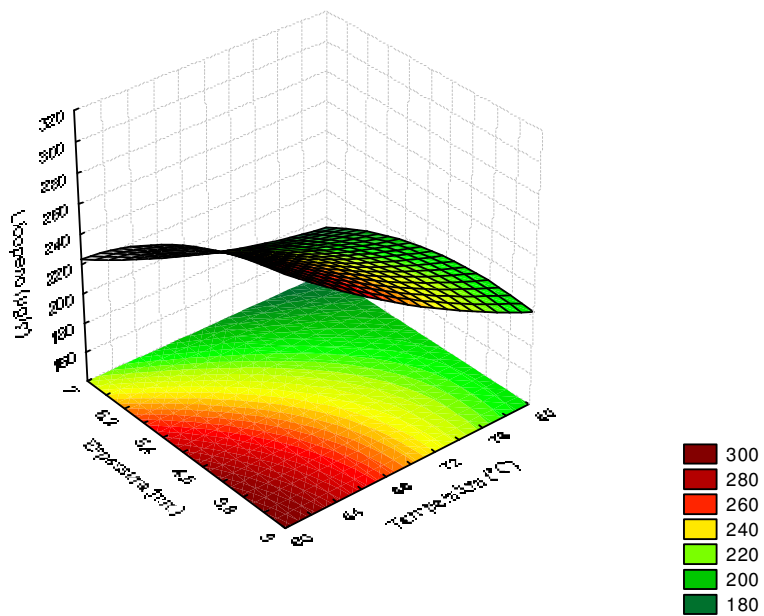


Figura 7: Superfície de Resposta para teor de licopeno para as amostras secas de tomate

Observa-se, a partir da Figura 7, que para se ter um maior teor de licopeno no tomate seco, o mais adequado é operar em menores espessuras e menores temperaturas, como indica a região vermelho mais escuro da superfície de resposta; Isso já era de se esperar, pois um menor ângulo de Hue, mais vermelho estará o tomate seco e, conseqüentemente, terá um maior teor de licopeno, visto que a cor vermelha do tomate está associada ao licopeno presente no mesmo.

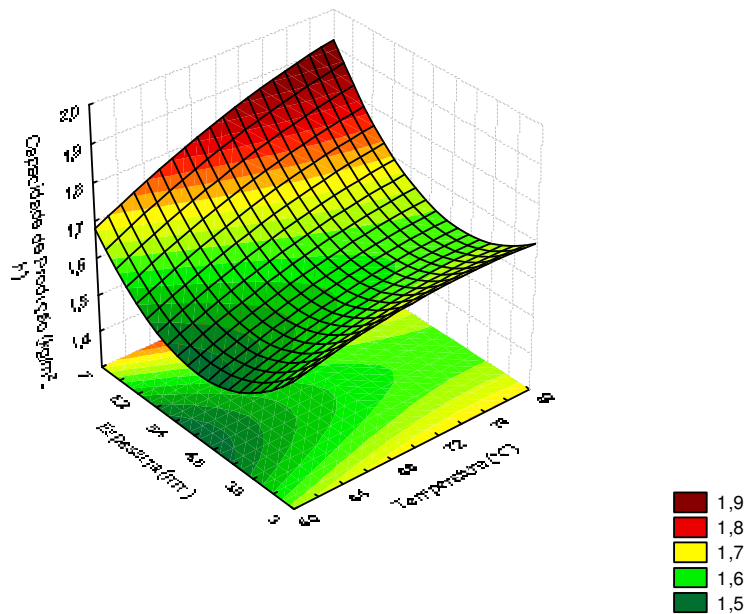


Figura 8: Superfície de Resposta para capacidade de produção para as amostras secas de tomate

Na Figura 8, é possível observar que para uma maior capacidade de produção de tomate seco, o melhor é operar em maiores temperaturas e maiores espessuras, conforme está indicado na região vermelha mais escura da superfície de resposta.

Portanto observa-se que a melhor condição de operação, para obtenção de um tomate seco em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, com boa qualidade de cor, teor de licopeno e capacidade de produção, é temperatura de 60 °C e espessura de 3mm.

Romero (1999), verificou que para a obtenção de tomates desidratados, em fatias médias de 8 mm de espessura, apresentaram melhor qualidade visual utilizando

temperatura de 60°C, quando comparado a temperatura de 70 e 80°C. Ainda, Camargo (2000), diz que temperatura acima de 65°C provoca maior escurecimento e maior perda de licopeno no tomate seco. Também, Romero-Peña e Kieckbuch (2003), constataram que temperatura inferior a 65°C, visando maior preservação de cor e sabor, deve ser utilizada para obtenção de tomates secos. E, Camargo e Queiroz (2003), verificaram que tomates secos a temperatura de 60°C, comparativamente a temperatura de 70 e 80°C, apresentaram um melhor resultado, ressaltando como primeira causa, a queima superficial do produto, utilizando maiores temperaturas.

Foi realizado na mesma condição ótima (temperatura de 60°C e espessura da fatia de tomate de 3 mm), a secagem em camada delgada com escoamento perpendicular do ar de secagem, conforme pode ser visualizado no Apêndice 2, que mostrou não haver diferença entre a secagem realizada com escoamento paralelo e perpendicular.

#### **4. CONCLUSÃO**

A secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, com as variáveis de estudo temperatura (60, 70 e 80°C) e espessura (3, 5 e 7mm), realizado através da metodologia de superfície de resposta, apresentou todos os modelos teóricos preditivos, podendo ser, então, gerados, para as respostas cor, teor de licopeno e capacidade de produção.

Todos as amostras de tomate seco apresentaram umidade final abaixo dos 13% em base úmida.

A condição mais adequada de operação para a secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do ar foi temperatura de 60°C e espessura de 3 mm, que apresentou cor (ângulo de Hue) de 47,70°, teor de licopeno de 301,69 µg/g e capacidade de produção de 1,65 kg/m<sup>2</sup>.h.

## 5. NOMENCLATURA

$H_{ab}$	Ângulo de Hue	Graus
X	Úmidade em base Úmida	[adimensional]
$X_{\text{espes}}$	Espessura da fatia de tomate	mm
$X_{\text{temp}}$	Temperatura do ar de secagem	°C
$Y_{\text{cap.prod}}$	Capacidade de Produção	kg/m <sup>2</sup> .h
$Y_{\text{cor}}$	Cor (ângulo de Hue)	Graus
$Y_{\text{Licop}}$	Teor de Licopeno	µg/g

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIAS, R.; LEE, T.C.; LOGENDRA, L.; JANES, H. **Correlation of lycopene measured by HPLC with the L\*, a\*, b\* color readings of a hydroponic tomato and the relationship of maturity with color and lycopene content.** Journal Agriculture Food Chemistry, v.49, p.1676-1697, 2000.

CAMARGO, G. A. **Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) para Conserva: Estudo de Parâmetros com Base na Qualidade Final.** Campinas, UNICAMP (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola), 2000.

CAMARGO, G.A. **Novas Tecnologias e pré-tratamento: Tomate seco embalado à vácuo.** Campinas, UNICAMP (Dissertação de Doutorado em Engenharia de Alimentos), 2005.

CAMARGO, G.A.; QUEIROZ, M.R. **Secagem de Tomate para Conserva: Parâmetros que influenciam a Qualidade Final.** Escrito para apresentação no WORKSHOP TOMATE NA UNICAMP: PESQUISAS E PERSPECTIVAS Campinas, 28 de maio de 2003

CARVALHO, W.; FONSECA, M.E.N.; SILVA, H.R.; BOITEUX, L.S.; GIORDANO, L.B. **Estimativa Indireta de Teores de Licopeno em Frutos de Genótipos de Tomateiro**



**via Análise Colorimétrica..** Horticultura Brasileira, Brasília, v.232 n.3, p.819-825, jul-set 2005

HUNTERLAB. **User's manual with universal software versions 3.5.** Reston: HunterLab 1998. Paginação irregular.

KROKIDA, M. K., KARATHANOS, V. T., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. **Drying kinetics of some vegetables.** Journal Food Engineering, n. 59, p. 391-403, 2003.

MYER, R. H. **Response surface methodology.** Library of Congress, U.S.A. (1976).

OKOS, M. R., NARASIMHAN, G., SINGH, R. K., WITNAUER, A. C. **Food dehydration.** In D. R. Hedman & D. B. Lund (Eds), Handbook of food engineering. New York, 1992.

PEREIRA, I. E., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F. **Características físico-químicas do tomate em pó durante armazenamento.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, n. 1, v. 6, 2006.

RODRIGUEZ-AMAYA, D.A. **Guide to Carotenoids Analyus in Food.** Washington: International Life Sciences Institute Press, p.64, 2001

ROMERO, L. M. **Estudo de pré-tratamentos para a obtenção de tomate desidratado em fatias.** Campinas, UNICAMP (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química), 1999.

ROMERO-PEÑA, L.M.; KIECKBUSCH, T.G. **Influência de condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate.** Braz. J. Food Technol., v.6, n.1, p.69-76, jan./jun., 2003

SHEWFELT, R. L.; THAI, C. N.; DAVIS, J. W. Prediction oh chances in color of tomatoes during ripening at different constant temperatures. Journal of Food Science, n. 53, p.1433-1437, 1988

SILVA, J.B.C.; GIORDANO, L.B. **Tomate para processamento industrial.** Brasília:

Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia – Embrapa Hortaliças, 2000.

VEJA, A., FITO, P., ANDRÉS, A., LEMUS, R. **Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper.** Journal of Food Engineering, n. 79, p. 1460-1466, 2007.

VEJA, M.; GÓNGORA, N.; BARBOSA, C. **Advances in dehydration of foods.** Journal of Food Engineering, Amsterdam, v.49, p.271-289, 2001

WONG, D. W. S. **Química de los Alimentos: mecanismo y teoría.** Editora Acribia S.A., p.165-215., Zaragoza, 1995.

ZANONI, B., PERI, C., NANI, R., e LAVELLI, V. Oxidative **Heat Damage o Tomato Halves as Affected by Drying.** Food Research International, v. 31, n.5, p. 395-401, 1999.

## **CAPÍTULO IV**

(CONCLUSÃO GERAL, SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS)

## 5. CONCLUSÃO GERAL

A secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, tendo como fatores de estudo a temperatura do ar e espessura da fatia de tomate, apresentou o período de taxa constante e os primeiro e segundo períodos de taxa decrescente.

Para a determinação das isotermas de equilíbrio, a equação de GAB apresentou-se mais adequada para o ajuste experimental dos dados. Para a determinação da constante de secagem (K) o modelo de Henderson e Pabis foi o utilizado, por apresentar maior significado físico.

A difusividade efetiva de umidade variou entre  $1,56 \cdot 10^{-10}$  e  $2,67 \cdot 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) para o primeiro período de taxa decrescente e entre  $4,21 \cdot 10^{-11}$  e  $8,35 \cdot 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s) para o segundo período de taxa decrescente. A energia de ativação apresentou-se cerca de duas vezes maior para o segundo período de taxa decrescente. A reidratação do tomate seco foi mais eficiente para menores temperaturas.

De acordo com a metodologia da superfície de resposta realizado, a condição ótima de operação para a secagem de tomate em camada delgada, com escoamento paralelo do ar de secagem, tendo como resposta cor (através do Ângulo de Hue), teor de licopeno e capacidade de produção, é temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da fatia de tomate de 3 mm, que apresentou cerca de 76,4% melhor para a cor e 58% para o teor de licopeno.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento desse trabalho são feitas as seguintes sugestões:

- Estudar o efeito de outras técnicas de secagem, como por exemplo, spray dryer, leite de jorro e leite fluidizado;
- Avaliar a hipótese de adotar a técnica de desidratação osmótica antes de realização da secagem.

- Realizar a modelagem físico-matemática do tomate com os resultados obtidos experimentalmente na secagem em camada delgada, considerando o encolhimento do material durante a operação.
- Avaliar a cinética do licopeno durante o processo de secagem.

**CAPÍTULO V**  
(REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS)

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHANDAM, A. & HASSAN, B. **Water sorption isotherms of date pastes as influenced by date cultivar and storage temperature.** Journal of Food Engineering, v. 39, p. 287-292, 1999.

ALVES, A. P.; SILVA, F. S, PORTO, A. G, SILVA, R. B. **Caracterização da secagem de alho (*Allium sativum L.*) em camada delgada.** 2ª Jornada Científica da UREMAT. Barra do Bugres – MT, 2009

AMARAL JÚNIOR, A.T. **Melhoramento do tomateiro: Procedimento de Gardner e Eberhart na análise heterótica de caracteísticas morfológicas e da qualidade dos frutos.** Campinas, v.56, n.1, p.33-46, 1997.

BARRET, R. L. **Conservação pós-colheita de tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) do cultivar gigante Kada submetido a choque a frio e armazenamento com filme de PVC.** Minas Gerais: Escola Superior de Agricultura de Lavras. (Tese, Mestrado), 1990.

BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. **Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamento cruzados.** Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados, São Carlos, ed. UFSCar, 1998

BASUNIA, M. A.; ABE, T. **Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice.** Journal of Stored Products Research, v. 37, p.205-219, 2001.

BATISTA, L. M.; SOARES, N. M.; ROSA, C. A.; PINTO, L. A. A. **Secagem em camada delgada de quitosana purificada: estudo da operação através do uso da metodologia da superfície de resposta.** Revista Vetor, v. 14 (1/2), p. 39-56, 2004.

BOILEAU, T.W.; LIAO, Z.M.; KIM, S.; LEMESHOW, S.; ERDMAN, J.W.; CLINTON S.K. **Prostate carcinogenesis in N-methyl-N nitrosourea (NMU)–testosterone-treated rats fed with tomato powder, lycopene, or energy restricted diets.** Journal of the National Cancer Institute, v. 95, n. 21, p.1578-1586, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária. **Norma de Identidade, Qualidade, Acondicionamento e Embalagem do Tomate in natura.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil , Brasília, set, 1995.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regulamento técnico de identidade e qualidade para classificação do tomate.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, mar, 2002.

BROOKER, D. V., BAKKER-ARKEMA. F. W., HALL, C. W. **Drying Cereal Grains**, The Avi Publishing Company, Inc., Westpor.1974.

BRUIN, S. & LUBYEN, K. C. A. M. **Drying of food materials: a review of recent developments.** In: MUJUMDAR, A. Advances in Drying. Washington, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v. 3, 1980.

CAMARGO, G. A.; NIURK, H.; QUEIROZ, M. R. **Avaliação da Qualidade de Tomate Seco em Conserva.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.5, p. 521-526, 2007.

CAMARGO, G.A.; QUEIROZ, M.R. **Secagem de Tomate para Conserva: Parâmetros que influenciam a Qualidade Final.** Escrito para apresentação no WORKSHOP TOMATE NA UNICAMP: PESQUISAS E PERSPECTIVAS Campinas, 28 de maio de 2003.

CAMARGO, L.S. **As hortaliças e seu cultivo.** 3.ed. Campinas : Fundação Cargill. p. 253, 1992.

CARVALHO, W.; FONSECA, M.E.N.; SILVA, H.R.; BOITEUX, L.S.; GIORDANO, L.B. **Estimativa Indireta de Teores de Licopeno em Frutos de Genótipos de Tomateiro via Análise Colorimétrica..** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.232 n.3, p.819-825, jul-set 2005.

CASQUET, E. **Principios de economía agraria.** Zaragoza: Acribia, 1998

CASTRO, L.R.; CORTEZ, L.A.B.; JORGE, J.T. **Influência da embalagem no desenvolvimento de injúrias mecânicas em tomates.** Ciências e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.21, n.1, p.26-33, jan./abr, 2001.



CHITARRA, M.I.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras : ESAL/FAEPE, 1990.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the Drying Mechanism During Air Dehydration of Foods**. In: MUJUNDAR, A. *Advances in drying*. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

CRAMER, D.W.; KUPER, H.; HARLOW, B.L.; TITUS-ERNSTOFF, L. **Carotenoids, antioxidants and ovarian cancer risk in pre- and postmenopausal women**. *International Journal of Cancer*, v.94, n.1, p.128-134, 2001.

EMBRAPA. *A cultura do tomateiro (para a mesa)*. Brasília: Embrapa – SPI, p.92, 1993

FAGUNDES, A. F.; ONUKI, N. S.; GARDINGO, D. J. R., BORSATO, A. V. **Influência do Grau de Umidade na Textura de Tomate Seco Refrigerado ou Envasado em Óleo**. Publ. UEPG Ci. Exatas Terra, Ci. Agr. Eng., Ponta Grossa, p 35- 42, abr. 2005

FERREIRA, S.M.R.; FREITAS, R.J.S. de; LAZZARI, E. **Padrão de Identidade e Qualidade do Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) de Mesa**. *SciELO*, 2002

FILGUEIRA, F.A.R. **Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças**. 2.ed. São Paulo : Agronômica Ceres, V.2, p.358, 1982

FLORI, J. E. **Obtenção e avaliação de híbridos F<sub>1</sub> de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) no grupo multilocular**. Escola Superior de Agricultura de Lavras. Dissertação de mestrado em Agronomia, área de concentração de fitotecnia, 1993.

FLORO, L.M.S. **Obtenção de sopa a partir de rejeitos de hortifrutigranjeiros: Avaliação da secagem em leito de jorro**. Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande. 2004

FONTES, P.C.R.; SAMPAIO, R.A.; FINGER, F.L. **Fruit size, mineral composition and quality of trickle-irrigated tomatoes as affected by potassium rates**. v.35, n.1, p.21-25, 2000.

FORTES, M. & OKOS, M. R. **Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grain.** In: MUJUMDAR Arum (ed) *Advances in Drying*. Washington. Hemisphere Publishing Corporation, v. 1, p. 119-154, 1980.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípios das Operações Unitárias.** Rio de Janeiro LTC. 2ª Ed. 1993.

GEANKOPLIS, C. **Transport Processes and Unit Operations** (3rd edition), New Jersey. Ed. Prentice-Hall International, 1993.

GIORDANO, L. B.; BOITEUX, L. S.; SILVA, J. B. C.; CARRIJO, O. A. **Seleção de linhagens com tolerância ao calor em germoplasma de tomateiro coletado na Região Norte do Brasil.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 23, n. 1, p. 105-107, 2005.

GIOVANNUCCI, E. **Tomatoes: tomato-based products, lycopene and cancer: review of the epidemiologic literature.** *J Nat Cancer Inst* **91**: 317–331, 1999

JAYARAMAN, K. S.; DAS GUPTA, D.K. **Dehydration of Fruits and Vegetables – Recent Developments in Principles and Techniques.** *Drying Technology*, p. 1-50, 1992

KING, C.J. **Rates of moisture sorption and desorption in porous dried foodstuffs.** *Food Technology*. V.2, n.4, 1968.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. **Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*).** *Journal of Food Engineering*, v.61, p. 173-179, 2004.

LUZ, L.M. **Tomates Contra o Câncer.** *Química e Saúde*. Disponível em <http://arrozdoce.wordpress.com/2008/01/24/tomates-contra-o-cancer/>, 2008

MARTINS, P.C.; PORTO, P.S.S; PINTO, L.A.A. **Estudo das propriedades físicas e de transporte na secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.24(3), p. 319-326, 2004.

MEDINA, P.V.L.; MEDINA, R.M.T. **Descrição bioquímica e fisiológica da maturação dos frutos do tomateiro.** *Revista Ceres*, v.155, n.28, p.1-7, 1981.

MELO, P.C.T. - Associação Brasileira de Horticultura, 2006

MORITZ, B; TRAMONTE, V.L.C. – **Biodisponibilidade do Licopeno**. Revista de Nutrição, Scielo Brazil. Campinas -SP, 2005.

MORTOLA, V. B.; MEILI, L.; PINTO, L. A. A. **Determinação das isotermas de equilíbrio para cebola, gelatina e farinha de pescado: análise dos modelos de GAB, BET e Henderson**. Revista. Vetor, v. 13, n. 2, p. 79-91, 2003.

MOYERES, C.G. **Psychrometry evaporate, evaporative cooling and solids drying**. Mc-graw Hill, Copyrighth, 1999.

MULET, A. **Equilibrium isotherms and isosteric heat of morel (Morchella esculenta)**. Journal of Food Engineering. New York, v.53, n.1, p.74-81, 2002.

NGUYEN, M.L.; SCHWARTZ, S.J. **Lycopene: chemical and biological properties**. Food Technology, v.53, n.2, p.38-45. 1999.

OLORUNDA, A. O.; AWORTH, O.C.; ONUOHA, C. N. **Upgradind Quality of Dried Tomato: effects of drying methods, condition and pre-drying treatments**. Journal Science Food Agric, v. 52, p. 447-454, 1990.

PADOVANI, M.I. **Tomate**. São Paulo : Ícone, p.23-43, 1987

PONTES, L.V.; FONTAN, R. C. I. **Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*Capsicum chinese*) a diferentes temperaturas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.2, p.143-148, 2009.

RAO, A.V. **Lycopene, tomatoes, and the prevention of coronary heart disease**. Experimental Biology and Medicine, v.227, p.908-913, 2002.

RAO, A.V.; AGAWAL, S. **Role of antioxidant lycopene in cancer and heart disease**. Journal of the American College of Nutrition, v.19, n.5, p.563-569, 2000.

ROMERO-PEÑA, L.M.; KIECKBUSCH, T.G. **Influência de condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate**. Braz. J. Food Technol., v.6, n.1, p.69-76, jan./jun., 2003.

SAKAMA. **Sementes sakama. Fornecendo produtos de qualidade: catálogo**. São Paulo, p.5. 2001

SAKATA. **Sementes agroflora: catálogo 97/98**. São Paulo, p.9-10. 1998

SILVA, G. **Seleção apurada**. Revista Globo Rural, Jaguaré, v.16, n.191 p.59-61, set, 2001.

SILVA, J.B.C.; GIORDANO, L.B. **Tomate para processamento industrial**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia – Embrapa Hortaliças, 2000.

TEMPLES, S., VAN BOXTEL, B. **Thin layer drying of black tea**. Journal of Agricultural Engineering. n.76, p.167-176, 1999.

TOBINAGA, S.; PINTO, L. A. A. **Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixe**. In: Freire, J. T. e Sartori, D. M. J. Tópicos especiais em secagem. São Carlos, v. 1, ed. UFSCar, p. 211-251, 1992.

VEJA, M.; GÓNGORA, N.; BARBOSA, C. **Advances in dehydration of foods**. Journal of Food Engineering, Amsterdam, v.49, p.271-289, 2001

WESKA, R. F.; PINTO, L. A. A. **Análise da temperatura do ar e da carga de sólidos na secagem de alho (*Allium sativum* L.) em camada delgada: avaliação da pungência e da reidratação**. Anais de XXXII ENEMP, UEM, Maringá-PR, 2006.

WOODROOF, G. J. & LUH, B. S. **Commercial Fruit Processing**. The AVI. Publishing Co. Inc. Westport. Connecticut. 710p, p. 375-507, 1975.

YAMASHITA, F.; BENASSI, M.T.; KIECKBUSCH, T.G. **Effect of modified atmosphere packaging on kinetics of vitamin C degradation in mangos**. Brazilian Journal of Food Technology, v.2, n.1, p.127-130, 1999.

ZAMBON, F.R.A. **ComparaçãO dos processos de maturaçãO de tomate (*Lycopersicon esculatum*, Mill.), Rada, Mutantes Nor e Rin e seus Híbridos F<sub>1</sub>**. DissertaçãO (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, 1984.

ZAMBRANO, J; MOYEJA, J.; PACHECO, L. **Efecto Del estado de madurez en la composici3n y calidad de frutos de tomate.** Agronomia Tropical, Venezuela, v.46, n.1, p.61-72, 1995.

## **APÉNDICES**

## Apêndice 1: Figuras



Figura 1 : Secador descontínuo de bandejas, com escoamento paralelo do ar de secagem, em escala piloto – Artigos 1 e 2

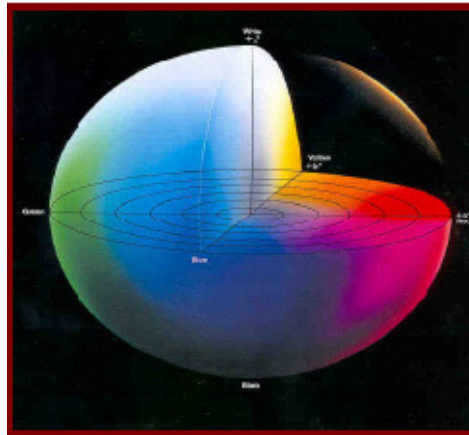


Figura 2 : Diagrama tridimensional de cores (Hunterlab, 1998)

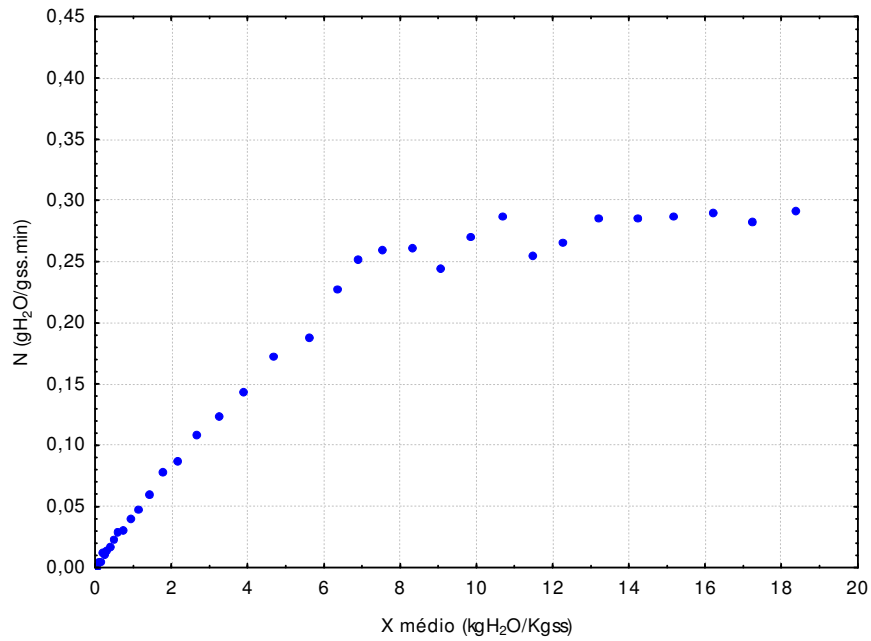


Figura 3: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60°C e espessura de 3 mm – Artigo 1

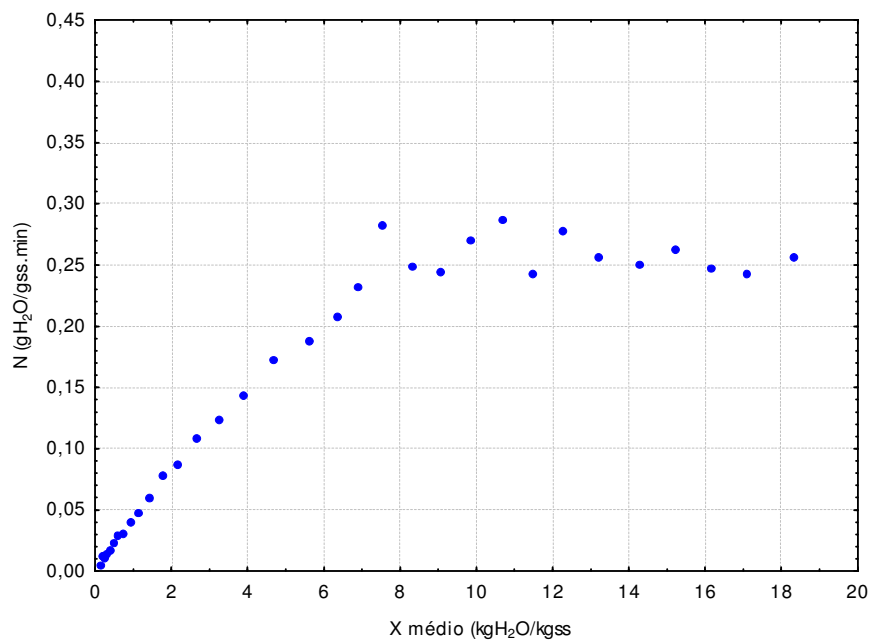


Figura 4: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70°C e espessura de 3 mm – Artigo 1



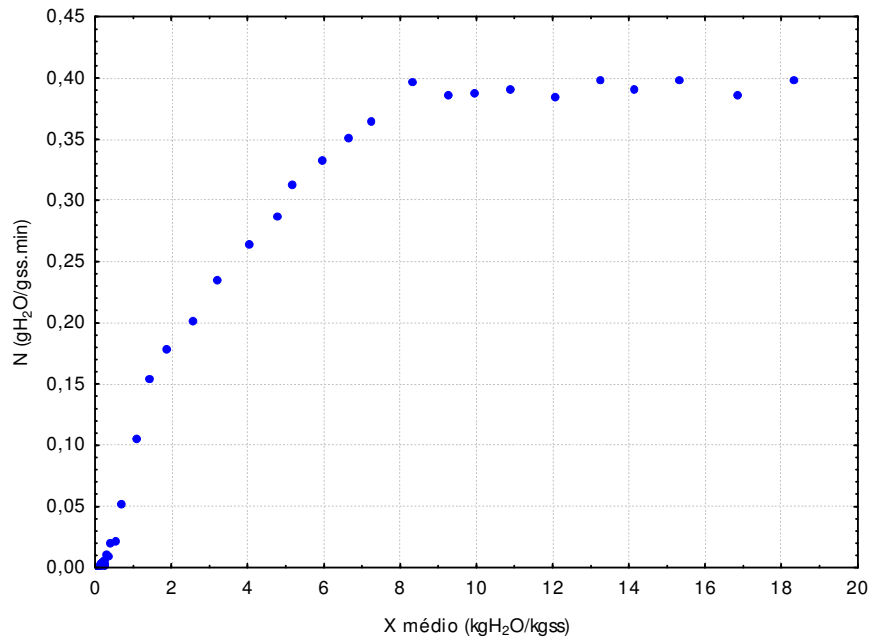


Figura 5: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80 °C e espessura de 3 mm – Artigo 1

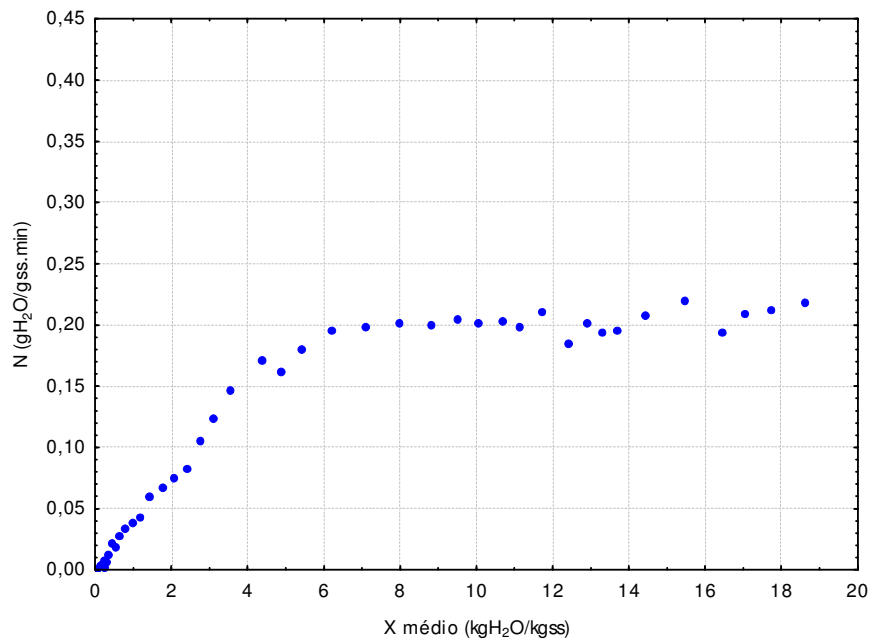


Figura 6: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60 °C e espessura de 5 mm – Artigo 1

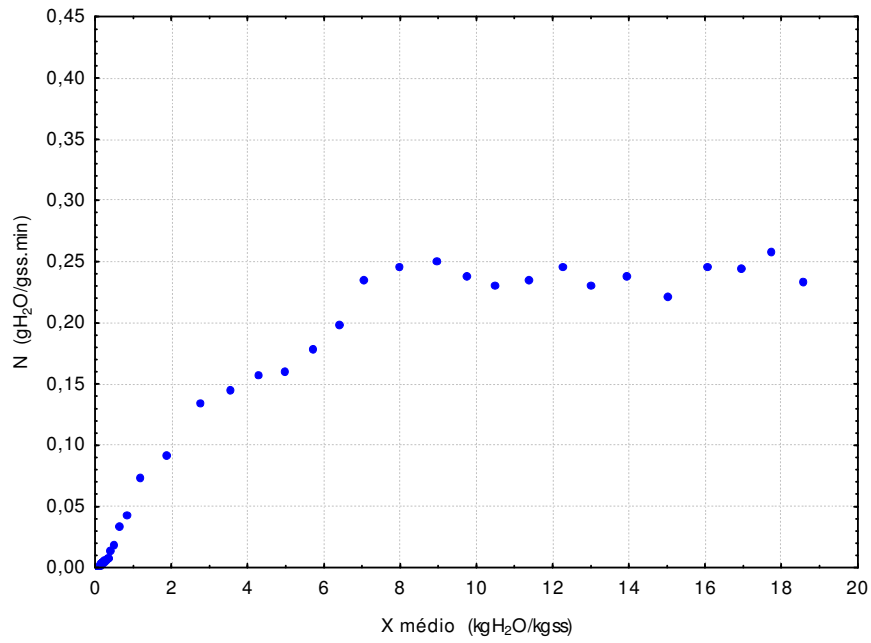


Figura 7: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70°C e espessura de 5 mm – Artigo 1

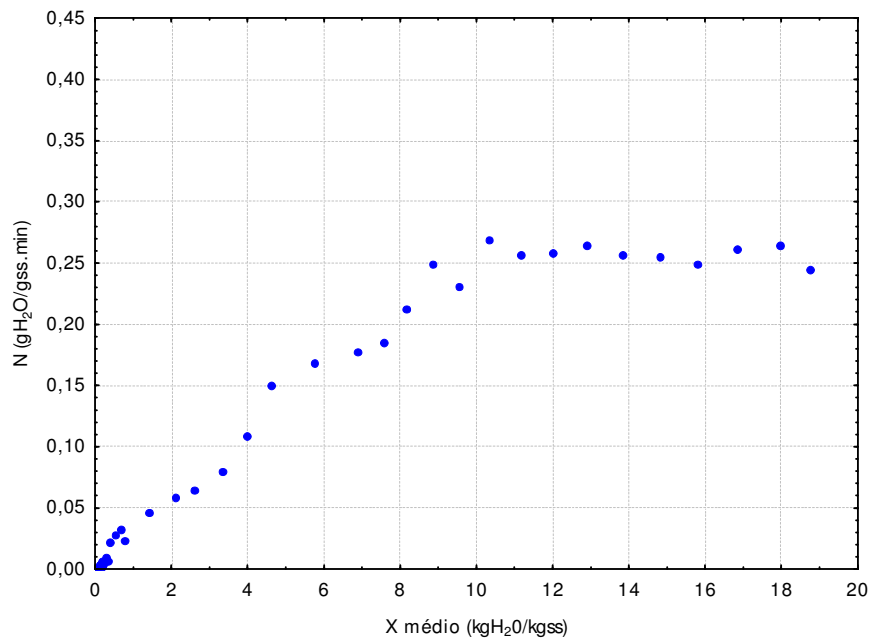


Figura 8: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80°C e espessura de 5 mm – Artigo 1

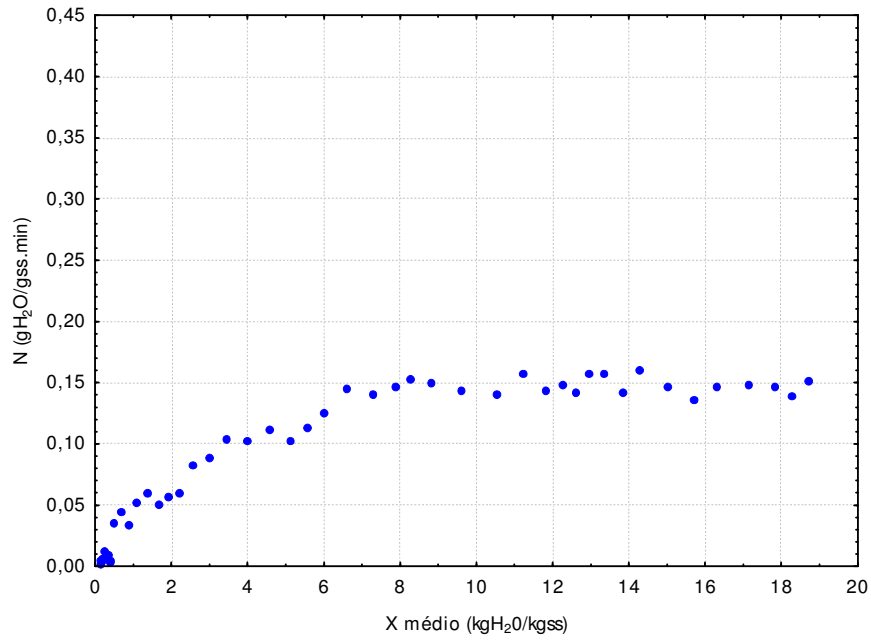


Figura 9: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 60 °C e espessura de 7 mm – Artigo 1

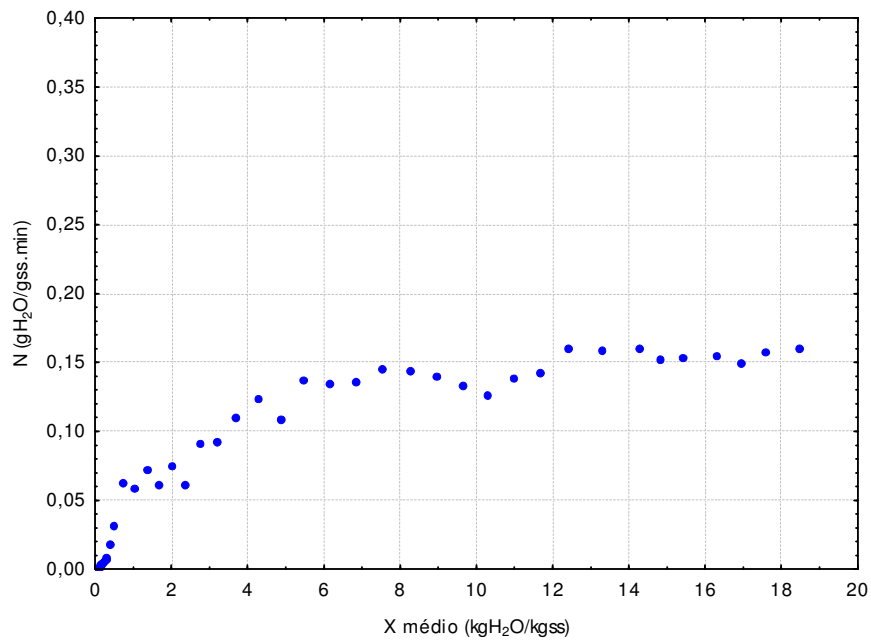


Figura 10: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 70 °C e espessura de 7 mm – Artigo 1

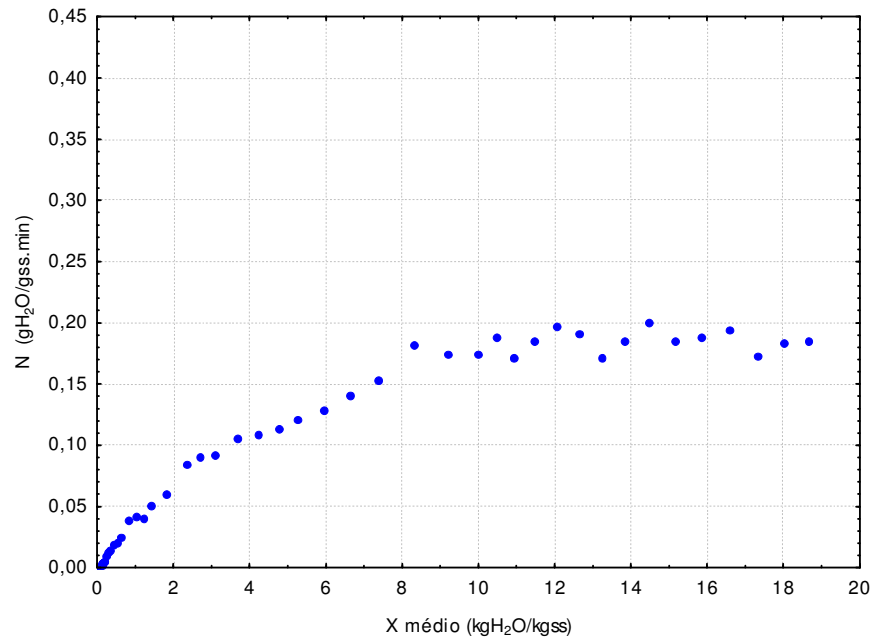


Figura 11: Curva da Taxa de secagem em função da umidade média para temperatura de 80°C e espessura de 7 mm – Artigo 1

## Apêndice 2: Escoamento Perpendicular

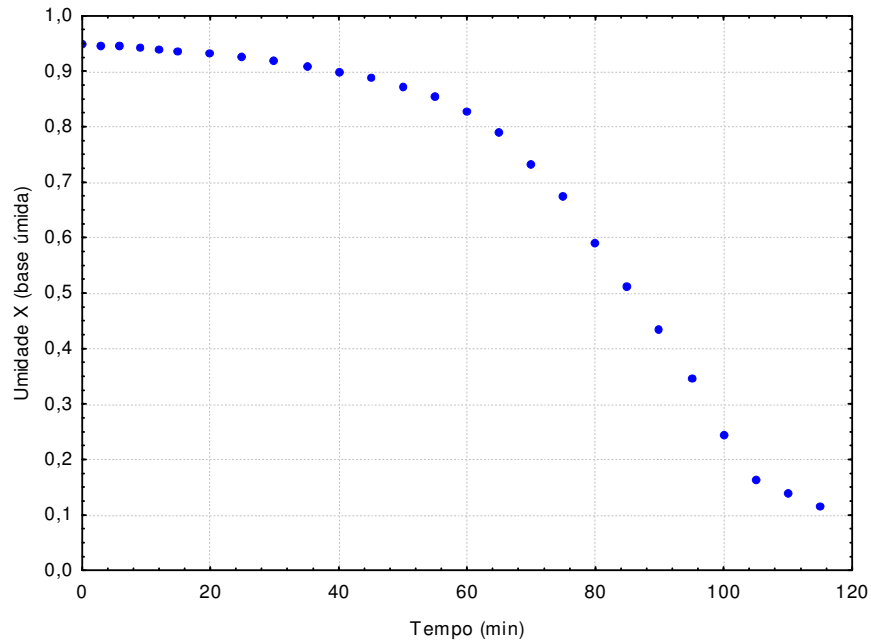


Figura 12: Curva de Umidade em base úmida em função do tempo de secagem de tomate em camada delgada com escoamento perpendicular do ar de secagem – Artigo

2

A partir da Figura 12 pode-se observar que a umidade da secagem de tomate em camada delgada com escoamento perpendicular do ar de secagem, apresentou valor de 11,5% em base úmida.

Para a cor (através do ângulo de Hue), apresentou valor de 46,92 e o teor de licopeno de 297,34  $\mu\text{g/g}$ , ficando próximo dos valores determinados na secagem com escoamento paralelo do ar de secagem.

### Apêndice 3: Tabelas

Tabela 1: Estimativa dos Efeitos para a resposta Cor (ângulo de Hue) – Artigo 2

Fator	Efeitos Estimados	Erro Puro	T	p-level
Média	55,20778	0,074871	738,3556	0,000000
Temperatura (L)	6,39667	0,183151	34,9256	0,000000
Temperatura (Q)	-1,08167	0,158614	-6,8195	0,000077
Espessura (L)	8,02000	0,183151	43,7889	0,000000
Espessura (Q)	-1,22667	0,158614	-7,7337	0,000029
Temp(L) x Espes (L)	-1,86500	0,224314	-8,3142	0,000016

Tabela 2: Estimativa dos Efeitos para a resposta Teor de Licopeno – Artigo 2

Fator	Efeitos Estimados	Erro Puro	t	p-level
Média	227,5311	0,258692	879,544	0,000000
Temperatura (L)	-75,3100	0,633664	-118,849	0,000000
Temperatura (Q)	-7,3967	0,548769	-13,479	0,000000
Espessura (L)	-55,0233	0,633664	-86,834	0,000000
Espessura (Q)	13,4783	0,548769	24,561	0,000000
Temp(L) x Espes (L)	24,4475	0,776076	31,501	0,000000

Tabela 3: Estimativa dos Efeitos para a resposta Capacidade de Produção – Artigo 2

Fator	Efeitos Estimados	Erro Puro	t	p-level
Média	1,682778	0,002152	782,0844	0,000000
Temperatura (L)	0,15000	0,005270	28,4605	0,000000
Temperatura (Q)	0,028333	0,004564	6,2075	0,000157
Espessura (L)	0,131667	0,005270	24,9820	0,000000
Espessura (Q)	-0,179167	0,004564	-39,2534	0,000000
Temp(L) x Espes (L)	0,090000	0,006455	13,9427	0,000000