



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**DESIDRATAÇÃO PARCIAL DE TOMATE CEREJA EM SECADOR DE
BANDEJAS VIBRADAS COM RECICLO**

GIOVANI AUD LOURENÇO

Uberlândia – MG

2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DESIDRATAÇÃO PARCIAL DE TOMATE CEREJA EM SECADOR DE BANDEJAS VIBRADAS COM RECICLO

Autor: Giovani Aud Lourenço

Orientador: José Roberto DelaliberaFinzer

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2011

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 25 DE FEVEREIRO DE
2011

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
Orientador (PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro
(PPGEQ/UFU)

Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes
(PPGEQ/UFU)

Prof. Dra. Daniela Peres Miguel
(FAZU/Uberaba)

Dedico a toda minha família, em especial aos meus pais, Benedito e Iara, aos meus tios José Joaquim e Ângela, a meus irmãos, Rafael e Marcelo, minhas primas Adele e Laura pelo incentivo e por todo o amor doado e ao meu avô Alfredo, cujos valiosos ensinamentos continuam a se fazer presentes em todos os momentos de minha vida, mesmo após a sua partida, proporcionando assim os recursos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ofereço a minha noiva, Bárbara, amor da minha vida, que me incentiva todos os dias e me apoia nas horas necessárias, confortando-me durante a minha caminhada.

Agradecimentos

Todos que passam em nossas vidas, de alguma forma, nos ensinam. Ensinos que, às vezes aparentemente simples, ajudam na nossa formação. Na busca constante pelo aperfeiçoamento como ser humano, cada um contribui e vem contribuindo. A estes, meu reconhecimento como forma de agradecimento por tudo que me acrescentaram e que ainda me acrescentam.

- Agradeço primeiramente a Deus, certamente a única presença em todos os momentos, pela oportunidade de trabalhar e crescer frente às dificuldades e desafios da vida.
- Em especial, aos meus pais e irmãos, que mesmo de longe se fizeram presentes no meu dia-a-dia, e foram os maiores motivos da minha dedicação.
- Ao meu avô (*in memoriam*) que pela vontade de Deus não teve a oportunidade de compartilhar comigo essa realização.
- Aos meus tios, Ângela e José Joaquim, que me acolheram como filho, agradeço todo o amor e carinho compartilhado.
- Às minhas primas, Adele, Laura demonstro toda a minha admiração e agradeço-as pelos incentivos ao longo dessa jornada.
- A minha noiva, “Mocinha”, que sempre acreditou no meu potencial, muitas vezes até mais que eu mesmo. Agradeço pelo amor, carinho, companheirismo, incentivo e paciência durante todos esses anos. Suas palavras de apoio sempre foram fundamentais para que pudesse prosseguir.
- A todos os meus familiares, pelo carinho, alegrias proporcionadas e principalmente por acreditarem e me apoiarem incondicionalmente durante todo o mestrado.
- A toda família Nascimento que se tornou minha segunda família.

- Ao meu magnífico orientador Professor José Roberto Delalibera Finzer, pela oportunidade, orientação segura, amizade, estímulo e incentivo à conclusão deste trabalho. Obrigado por respeitar meus limites e me incentivar a superá-los.
- Aos professores Luis Cláudio Oliveira Lopes e Eloízio Júlio Ribeiro pela ajuda na compreensão dos resultados e pelas valiosas contribuições a este trabalho no exame de qualificação.
- Ao sensacional Rodrigo Cesar Martins, pelo convívio, pela amizade e por toda genialidade na ajuda técnica prestada.
- À Maria Aparecida Gomes, pela incansável ajuda de higienização do secador.
- Aos “Guerreiros”, amigos de faculdade, André, Vinícius “Preto”, Fraga, Goiano, Saulo, Andrey, Leandro, Betão, Alisson, Zé Modesto, Tizzo, Guilherme “Porcão”, Alex, César que até hoje fazem parte da minha vida, mesmo que distantes. Em especial ao Ricardo e Otávio, que me ajudaram muito no desenvolvimento do trabalho.
- Aos amigos de Cravinhos e do IFET por terem sempre me apoiado e torcido por mim ao longo da realização deste trabalho.
- Aos professores da FEQ pela contribuição à minha formação, em especial aos professores Cláudio Roberto Duarte, Ubirajara Coutinho, Carlos Henrique Ataíde e Luis Gustavo Martins Vieira pelas contribuições durante a realização deste trabalho.
- Ao Silvino e José Henrique por todo o apoio, por toda a ajuda fornecida, por todo o auxílio prestado.
- A FAPEMIG pela bolsa de mestrado.
- A Faculdade de Engenharia Química da UFU pelo uso de sua estrutura.

Muito Obrigado!

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABELAS.....	iv
ABREVIATURAS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1

CAPÍTULO 2.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. A OFERTA NACIONAL DE TOMATE.....	3
2.2. TOMATE SECO.....	11
2.3. TOMATE CEREJA PARCIALMENTE DESIDRATADO.....	14
2.4. PROCESSAMENTO PARA SECAGEM DE TOMATE.....	16
2.4.1 LAVAGEM.....	16
2.4.2 CORTE E RETIRADA DAS SEMENTES.....	17
2.4.3 PRÉ-TRATAMENTO: DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....	17
2.4.4 PRÉ-TRATAMENTO: APLICAÇÃO DE ANTIOXIDANTES.....	17
2.4.5 SECAGEM.....	18
2.4.6 PREPARO DO TEMPERO.....	18
2.5 FUNDAMENTOS DA SECAGEM.....	18
2.6 VIBRAÇÃO APLICADA À SECAGEM.....	23
2.7 FAIXA DE TEMPERATURA DE SECAGEM PARA PRODUTOS PERECÍVEIS.....	25
2.8 PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL.....	25

CAPÍTULO 3.....	30
MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. MATÉRIAS PRIMA.....	31
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TOMATES.....	32
3.2.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	32
3.2.2. DENSIDADE MÉDIA DOS TOMATES.....	32
3.2.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA SECA E DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO TOMATE.....	33
3.3. SECADOR.....	34
3.4. EXPERIMENTAÇÃO PRELIMINAR PARA FAIXA DE TRABALHO DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS.....	40
3.5. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL.....	40
3.6. PREPARO DO TOMATE PARA SECAGEM.....	42
3.7. AMOSTRAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS CINÉTICOS.....	43
3.8. PROCEDIMENTO OPERACIONAL DO SECADOR.....	44
3.9. EFEITO DA VIBRAÇÃO NO TEMPO DE SECAGEM.....	46
 CAPÍTULO 4.....	 48
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	48
4.2. DENSIDADE MÉDIA DOS TOMATES.....	51
4.3. MASSA SECA.....	52
4.4. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL.....	52
4.5. ANÁLISE DAS CURVAS DE SECAGEM.....	61
4.5.1 CINÉTICA NO PONTO ÓTIMO.....	61
4.5.2 EFEITO DA VARIÁVEL Q (QUANTIDADE DE TOMATE ALIMENTADO) NA CINÉTICA DE SECAGEM.....	64
4.5.3 EFEITO DA VAZÃO DE AR NA CINÉTICA DE SECAGEM.....	66
4.5.4 EFEITO DA TEMPERATURA NA CINÉTICA DE SECAGEM.....	68

4.5.5	EFEITO DA VIBRAÇÃO NA CINÉTICA DE SECAGEM.....	70
4.5.6	TOMATE CEREJA PARCIALMENTE DESIDRATADOS EM SECADOR DE BANDEJAS VIBRADAS COM RECICLO.....	73
CAPITULO 5		75
	CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	75
CAPITULO 6		78
	BIBLIOGRAFIAS.....	78
APÊNDICE A		84
A.1.	PROCEDIMENTO DE CALCULO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM.....	84
A.2.	SECADOR.....	88
A3.	DADOS CINÉTICOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principais produtores de tomate de 2003 a 2005 (milhões de ton.) (CAMARGO E PALIUCA, 2007).....	5
Figura 2: Principais produtores de tomate de 2003 a 2005 (milhões de ton.) (CAMARGO E PALIUCA, 2007).....	6
Figura 3: Os 10 maiores países em produtividade de tomate (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).....	7
Figura 4: Dados da distribuição nacional da produção de tomate (Fonte: IBGE).....	9
Figura 5: Variação da umidade com o tempo que representa a curva de secagem (SFREDO, 2006).....	19
Figura 6: Variação da taxa de secagem com a umidade do sólido (SFREDO, 2006).....	21
Figura 7: Princípio de operação de um vibrador eletromagnético (SFREDO, 2006).....	24
Figura 8: Esquema do vibrador eletromagnético (SFREDO, 2006).....	24
Figura 9: Vibrador com excitação inclinada (SFREDO, 2006).....	25
Figura 10: Planejamento composto central para três fatores. As esferas cinza são a parte cúbica. As esferas pretas representam a parte axial. A esfera branca representa os pontos centrais. (LOPES, 2008).....	27
Figura 11: Vista dos tomates utilizados nos experimentos.....	31
Figura 12: Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal).....	35
Figura 13: Secador de bandeja vibrada e com reciclo.....	36
Figura 14: Esquema do sistema de aquecimento do ar de secagem (SFREDO, 2006).....	39
Figura 15: Corte radial do tomate.....	42
Figura 16: Cesta de amostragem.....	44
Figura 17: Cesta de amostragem com a disposição dos tomates.....	44

Figura 18: Esferas cerâmicas.....	46
Figura 19: Distribuição de Frequência dos tomates amostrados.....	49
Figura 20: Distribuição Cumulativa dos tomates amostrados.....	49
Figura 21: Distribuição de Resíduos.....	50
Figura 22: Comparação dos valores do modelo com os valores experimentais.....	51
Figura 23: Valores previstos pelo modelo e valores observados experimentalmente.....	55
Figura 24: Distribuição dos resíduos.....	56
Figura 25: Superfície de resposta para análise da temperatura e quantidade de tomate alimentado (TxQ).....	57
Figura 26: Curva de nível para análise da temperatura e quantidade de tomate alimentado (TxQ).....	57
Figura 27: Superfície de resposta para análise da vazão de ar e quantidade de tomate alimentado (VxQ).....	58
Figura 28: Curva de nível para análise da vazão de ar e quantidade de tomate alimentado (VxQ).....	58
Figura 29: Curva de nível para análise da vazão de ar e temperatura (VxT).....	59
Figura 30: Curva de nível para análise da vazão de ar e temperatura (VxT).....	59
Figura 31: Curva de secagem para as condições de operação otimizadas.....	62
Figura 32: Curva da taxa de secagem para as condições de operação otimizada.....	64
Figura 33: Curvas de secagem operando em Q=5 kg e Q=3,5 kgde tomate por batelada.....	65
Figura 34: Comparação da taxa de secagem entre os experimentos 5 e 6.....	66
Figura 35: Comparação das curvas de secagem entre experimento 11,12 e 18.....	67
Figura 36: Comparação da taxa de secagem entre os experimentos 11,12 e 18.....	68
Figura 37: Comparação da cinética de secagem entre experimento 9 e 10.....	69

Figura 38: Comparação da cinética de secagem entre experimento 9 e 10.....	70
Figura 39: Comparação das curvas de secagem entre leito fixo e leito vibrado.....	71
Figura 40: Comparação das curvas de taxa de secagem entre leito fixo e leito vibrado.....	71
Figura 41: Curva de secagem da desidratação de tomate cereja à temperatura de 40, 60 e 80 °C em estufa de ar forçado G-Therm 075(Galli, Milão, Itália) com as seguintes características:poder calorífico,1330W, volume, 75 L; velocidade do ar forçado, 2000rpm.....	73
Figura 42: Tomate cereja ovalado seco com umidade de 70,18% em base úmida.....	74
Figura 43: Proposta de secador com correia transportadora vibrada.....	75
Figura 44: Curva de secagem demonstrativa do Experimento 20	86
Figura 45: Esteira transportadora.....	88
Figura 46: Soprador.....	88
Figura 47: Tubulação de ar.....	89
Figura 48: Medidor de vazão.....	89
Figura 49: Bandeja.....	90
Figura 50: Sistema de aquecimento de ar.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Divisão dos tomates de acordo com utilidade e formato.....	3
Tabela 2: Área dedicada ao tomate em 2005 (ha).....	6
Tabela 3: Distribuição regional do tomate segundo Oliveira et al., 2003).....	10
Tabela 4: Análise sensorial para atributo aparência.....	15
Tabela 5: Análise sensorial para atributo aroma.....	15
Tabela 6: Análise sensorial para atributo textura.....	15
Tabela 7: Análise sensorial para atributo sabor.....	16
Tabela 8: Análise sensorial para atributo qualidade total.....	16
Tabela 9: Planejamento Composto Central.....	42
Tabela 10: Parâmetros do modelo RRB.....	50
Tabela 11: PCC com a resposta experimental (P) que representa a quantidade processada diariamente e as variáveis independentes T (temperatura do ar), Q (quantidade de tomate alimentado ao secador) e V (vazão de ar).....	53
Tabela 12: Parâmetros do modelo calculados a partir do <i>software</i> STATISTICA 7.0.....	54
Tabela 13: Parâmetros significativos do modelo.....	54
Tabela 14: Ponto de máximo processamento diário de tomates.....	61
Tabela 15: Dados usados para construção da curva de secagem, em que t é o tempo que se amostrou, $m_{(t+cesta)}$ a massa do tomate e da cesta juntos e X a umidade em base seca.....	84

ABREVIATURAS

PCC	Planejamento Composto Central.	
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization of the United Nations	
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	
RRB	Rosin-Rameler Bennet	
X	Conteúdo de Umidade	[kg de água/kg de sólido seco]
W_d	Taxa de Secagem	[kg de água/min]
m_s	Massa de Sólido Seco	[kg]
t	Tempo	[min]
X_{cr}	Umidade Critica	[kg de água/kg de sólido seco]
U	Umidade relativa do ar	[%]
k	Numero de variáveis	
D_v	Diâmetro da esfera de igual volume do tomate	[cm]
ρ_n	Densidade de um tomate cereja qualquer	[kg/m ³]
ρ_m	Densidade média dos tomates cereja	[kg/m ³]
m_a	Massa de água no material	[kg]
m_u	Massa de material úmido	[kg]
T	Temperatura	[°C]
$\dot{V}$	Vazão de ar	[kg/min]
Q	Quantidade de tomate alimentado	[kg]
V_{eq}	Volume equivalente	[cm ³]
m_{eq}	Equivalente em massa	[kg]
$\overline{D}$	Diâmetro médio de Sauter	[cm]

P	Quantidade de tomate processada diariamente	[kg]
ε	Resíduo do modelo	

RESUMO

Para o presente estudo, foi analisada a desidratação parcial do tomate cereja ovalado, *Lycopersicum* sp. Mill., e utilizou-se de um secador de bandejas vibradas com reciclo até que o tomate atingisse 15% do conteúdo de água inicial, o que representa 70,19 % de umidade em base úmida ou 2,35 kg de água/kg de massa seca em base seca. O secador estudado consiste basicamente de um túnel vertical de secagem com quatro bandejas perfuradas por onde escoam de maneira cruzada o tomate e o ar aquecido. Todas as bandejas estão conectadas a um sistema de vibração que auxilia no escoamento dos tomates, para que durante o processamento os frutos sejam conduzidos à uma esteira que auxilia na recirculação dos frutos. Um PCC foi desenvolvido para quantificar a influência das variáveis significativas do processo: vazão de ar, temperatura e massa de tomate alimentada. A resposta analisada foi a quantidade de tomate in natura processada em um dia. A condição ótima de operação foi reproduzida experimentalmente, validando os resultados obtidos no PCC, em que obteve-se 18,747 kg de tomate processados/dia, com a temperatura ótima de 67,6°C, vazão de ar 6 kg/min e quantidade de tomate alimentado de 4,025 kg. Na condição ótima do secador estudou-se a curva de secagem e a cinética de secagem. O processo de secagem iniciou-se com o secador operando em batelada sem recirculação dos frutos, até que se atingiu o teor de umidade de aproximadamente 85%, seguindo-se a adição de esferas de porcelana com 0,0235 m de diâmetro, as quais forçaram o escoamento das partículas de tomate e o processo passou a ocorrer com recirculação. Na cinética de secagem, três períodos foram identificados: dois períodos em que os tomates secaram em taxas constantes, intercalados por um período com taxa variável. Para as taxas de secagem constantes, quantificaram-se os valores do coeficiente de correlação superiores a 0,99, ao ajustar uma reta aos pontos experimentais. Comparando-se o comportamento do leito fixo com o vibrado, observou-se que a aplicação da vibração atuou diminuindo em 30% o tempo de secagem. Os resultados indicaram que a influência simultânea da vibração e das esferas de porcelana intensificam o processo de secagem, resultando em uma cinética de secagem peculiar.

Palavras-chave: secagem, tomate cereja, vibração, cinética de secagem, planejamento composto central.

ABSTRACT

In this essay, it has been analyzed the partial dehydration of oval cherry tomato *Lycopersicum sp. Mill.*, by using a vibrated tray dryer with recycle until the tomatoes reached 15% of its initial water content what represents 70,19% of humidity in wet basis or 2,35 kg of water/kg of dry mass in dry basis. The dryer used consists basically of a vertical dryer tunnel with four perforated trays by whose perforations tomatoes and air flow were drained in a crossed way, being the latter injected at the bottom of a pipe connected to a blower, allowing the adjustment of output and also to go through a series of four resistors that set the temperature. All trays are connected to a vibration system that helps the tomatoes flow, which are recirculated with the aid of a conveyor belt. CCD was used to verify the influence of significant variables of the process: air flow, temperature and tomatoes mass. The analyzed response was the amount of *in natura* tomatoes processed in a day. The optimum operating condition was experimentally reproduced, validating the results obtained in the CCD, where there was obtained 18,747 kg of tomatoes processed per day, with an optimum temperature of 67.6 °C, airflow rate 6 kg / min and amount of processed tomatoes of 4.025 kg. In the optimum condition of the dryer it has been studied the drying curve and drying kinetics. The drying process started with the dryer working in batch without tomatoes recycle, until achieve the moisture content of 85% approximately, followed by the addition of porcelain spheres with a diameter of 0.0235 m, that forced the tomatoes particles flow and the process began to occur with recirculation. In the drying kinetics, three periods were identified: two periods that the dried tomatoes in steady state rates, interspersed with a variable rate period. For the drying rates constants, quantified values of the correlation coefficient above 0.99, linear fitting a straight line with the experimental points. Comparing the behavior of the fixed bed with the vibrated bed, it was observed that the application of vibration acted in decreasing by 30% the drying time. The results indicated that the simultaneous influence of vibration and porcelain balls intensify the drying process, resulting in a peculiar air drying.

Key-words: drying, cherry tomatoes, vibration, drying kinetics, central composite design

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente cresce a procura de alimentos desidratados e aliado a este crescimento existe um grande número de trabalhos que visa pesquisar técnicas para obter este produto de forma sustentável e com qualidade.

O mercado mostra aumento do interesse em produtos com umidade intermediária, que combinam maior estabilidade, devido à menor atividade da água, com boas características nutricionais e sensoriais. O tomate cereja parcialmente desidratado pode ser utilizado como tempero ou para substituir os tomates frescos como o principal ingrediente de entradas e outras receitas.

Dependendo do sistema de secagem o gasto energético do processo é muito elevado, portanto é de extrema importância o estudo de secadores que reduzam o custo de produção e diminuam o gasto de energia.

Há muitos séculos, os tomates eram secos expostos ao sol, e com o passar dos anos, novas tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de aumentar a produção e consequentemente o comércio de tomate seco. Portanto, na pesquisa de uma nova tecnologia, foi possível estudar o secador de bandejas vibradas com reciclo, preocupado em reduzir o tempo de secagem e otimizar as condições de máximo processamento de tomate cereja para este equipamento.

A vibração é um dos recursos do processo estudado, que diferencia o sistema de secagem do método tradicional, que utiliza fornos com prateleiras fixas e perfuradas, com recirculação de ar a baixas vazões.

Portanto, é importante o conhecimento das peculiaridades que o equipamento impõe perante o material estudado, uma vez que a estrutura física tanto do equipamento quanto do fruto, afeta sensivelmente os fenômenos de transferência de calor e massa.

O objetivo geral do trabalho foi estudar o comportamento do tomate e do secador de bandejas vibradas com reciclo na operação de secagem, visando a obtenção de tomate parcialmente desidratado.

Os objetivos específicos foram:

- Analisar os aspectos fluidodinâmicos durante o processo de secagem;
- Desenvolver uma metodologia de amostragem para obtenção de dados cinéticos e de secagem;
- Comparar o efeito individual das variáveis em curvas de secagem e de cinética de secagem do tomate cereja em sistemas vibrados;
- Comparar os efeitos da vibração na operação em leito fixo e vibrado;
- Otimizar as condições de operação, tendo como variáveis estudadas a temperatura do ar, a quantidade de tomate alimentada e a vazão de ar;

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A OFERTA NACIONAL DE TOMATE

O tomateiro é uma hortaliça que vem sendo cultivada no Brasil com uma numerosa variedade de frutos e destinos, desde a venda *in natura* como na forma industrializada. Dentre os encontrados no mercado, o tomate cereja vem ganhando espaço o que motiva o estudo de novas tecnologias de plantio e de processamento. Desde a sua domesticação no México, até sua aceitação e cultivo na Europa e Estados Unidos em meados do século XIX, o tomateiro vem sofrendo seleções, com consequente melhoria na qualidade dos frutos. Após sua introdução no Brasil, supostamente pela imigração europeia, iniciaram-se também as atividades de melhoramento. O surgimento do tomate ‘Santa Cruz’ no Rio de Janeiro, por volta de 1940, assinala um importante marco na trajetória dessa espécie no Brasil (AZEVEDO, 2006).

Os frutos de tomate podem ser identificados, primeiramente, pelo formato, o qual pode estar relacionado à sua finalidade de uso. Nos últimos anos tem aumentado em muito a diversidade dos produtos oferecidos, sendo ainda mais comuns os formatos oblongo e redondo. Para o tomate de cultura rasteira (industrial), a classificação mais usada é quanto à forma dos frutos, visto na Tabela 1 (MINAMI; HAAG, 1989): periforme (tipo Pera), longo, oval e globoso.

Tabela 1 –Divisão dos tomates de acordo com utilidade e formato (<http://www.feagri.unicamp.br/tomates/consumidordicas1.htm>).

Grupo	Utilizado para	Formato
 Santa Cruz	Tradicional na culinária para uso em saladas e molho	Oblongo

 Caqui	Saladas e lanches	Redondo
 Saladete	Saladas	Redondo
 Italiano	Além de poder ser consumido em molhos, também utilizado para saladas.	Oblongo, tipicamente alongado.
 Cereja	Utilizados juntamente com aperitivos, saladas, etc.	Redondo, ovalado ou periforme com tamanho reduzido.

Dentre os vários tipos de tomate, o tomate tipo cereja pertence a um novo grupo de cultivares para mesa, tendo recentemente crescido em importância nos mercados das grandes cidades (final da década de 90). Talvez a melhor denominação para esse grupo fosse mini tomate, pois existe uma gama de materiais que fogem ao padrão do chamado tomate cereja, seja pela forma, que pode ser redonda, periforme ou ovalada, seja pela coloração, que vai do amarelo até o vermelho, passando pelo laranja, seja pelo tamanho, por apresentar frutos de 3 a 30 g de peso e na maioria das vezes, apresentam frutos biloculares e suas pencas podem apresentar de 6 a 18 ou mais frutos (ALESSI, 2010).

O tomate do tipo cereja é considerado como uma hortaliça exótica, incorporada em cardápios de restaurantes por serem pequenos e delicados, trazendo novos sabores e enfeites aos pratos e aperitivos, com vantagem de ter tamanho reduzido evitando desperdício (MACHADO; OLIVEIRA; PORTAS, 2003).

Os consumidores consideram o tomate cereja um produto de alta qualidade e com sabor reconhecidamente superior ao tomate de mesa tradicional. Por isso, geralmente, aceitam o preço mais elevado desse produto, que se deve, principalmente, ao superior custo de colheita e à inferior produção por área, quando comparado ao tomate de mesa tradicional (FERNANDES, 2005).

De acordo com os valores estimados pelo Ceasa Minas na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, que corresponde à unidade de Uberlândia, a produção de tomate cereja de janeiro a julho de 2009 corresponde a 108124 mil kg a um custo médio de 1,22 reais o quilo, que na safra 2010 custou 2 reais em média.

Nos últimos 20 anos, o mundo praticamente dobrou a produção de tomate, e o continente sul-americano acompanha este crescimento como pode ser vistos nos dados da Figura 1.

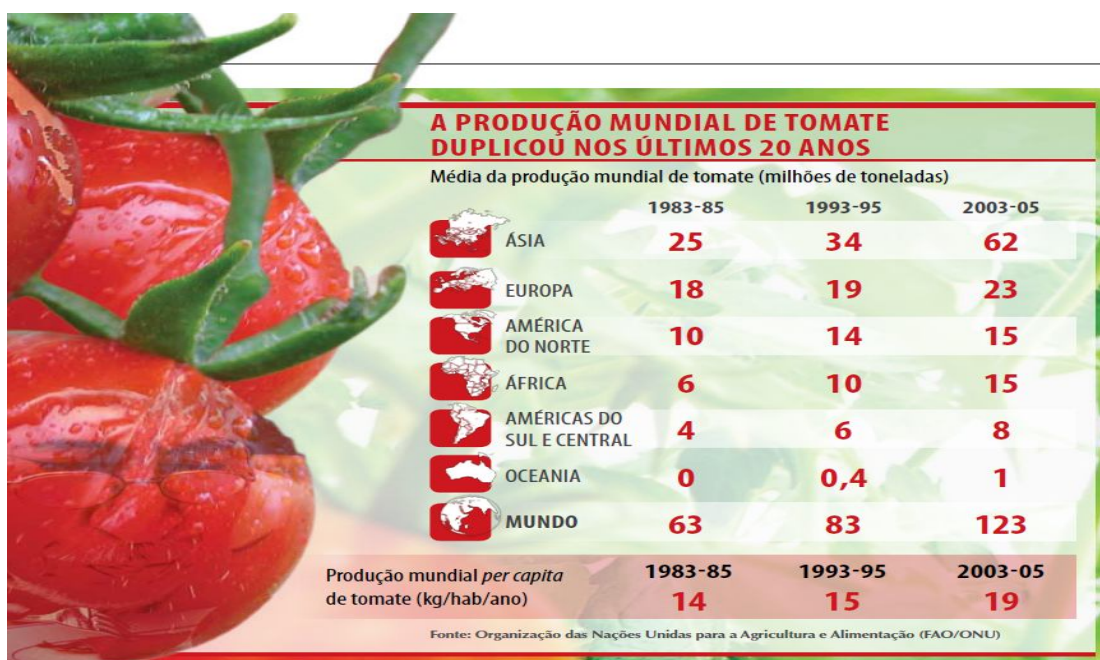


Figura 1 - Principais produtores de tomate de 2003 a 2005 (milhões de ton.) (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).

Considerando o panorama da América do Sul, o Brasil ocupa posição de destaque na produção de tomate, sendo o maior produtor, responsável por 52,6% do volume produzido na safra 2006 (SEBRAE, 2010).

No Brasil o tomate é a hortaliça mais produzida no país e nos últimos 25 anos cresceu cerca de 300%, com incremento na área plantada de 50% e ganhos de produtividade da ordem de 150%. Isto coloca o Brasil como o nono maior produtor mundial sendo o ranking liderado

pela China, como pode ser visto na Figura 2. Em 2005, a China já era responsável por aproximadamente 25% de todo o tomate produzido no mundo (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).



Figura 2- Principais produtores de tomate de 2003 a 2005 (milhões de ton.) (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).

O Brasil é apenas o 11º colocado em relação à área dedicada ao cultivo de tomate e não figura na Tabela 2, em que se observa o domínio da China, no entanto, como foi visto anteriormente, é o nono maior produtor e isto pode ser explicado devido ao clima favorável, e ao domínio das técnicas de cultivo que aumentam a produtividade, ou seja, quantidade de tomate produzida por área (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).

Tabela 2 - Área dedicada ao tomate em 2005 (ha).

1º 	China	1.305.053
2º 	Índia	540.000
3º 	Turquia	260.000
4º 	Egito	195.000
5º 	Estados Unidos	172.810
6º 	Rússia	146.000
7º 	Itália	141.258
8º 	Irã	130.000
9º 	Nigéria	127.000
10º 	Ucrânia	100.000
Total mundial		4.550.719

Fonte: FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

A produtividade do tomate brasileiro é a terceira maior do mundo, como pode ser visto na Figura 3. A difusão de técnicas de irrigação, o uso intensivo de insumos e a introdução de híbridos mais produtivos e com menores perdas no pós-colheita foram alguns dos principais fatores que contribuíram para o aumento da produtividade do tomate nacional. O rendimento médio do tomate no Brasil é de aproximadamente 58 t/ha. Contudo produtores que utilizam mais as técnicas de cultivos adequadas, chegam a alcançar mais de 100 t/ha. Quando se trata do tomate destinado à indústria, percebe-se que os ganhos atuais em produtividade estão relacionados à concentração dos plantios no cerrado brasileiro (GO e MG). Essa região apresenta clima e topografia muito favoráveis para o cultivo do tomate rasteiro (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).



Figura 3 – Os 10 maiores países em produtividade de tomate (CARVALHO; PAGLIUCA, 2007).

Como foi apresentado anteriormente, os tomates são destinados ao consumo *in natura* e ao abastecimento industrial, constituindo-se em duas cadeias produtivas distintas desde as variedades utilizadas, formas de cultivo até o consumo final. Nos últimos 30 anos as atividades da cadeia produtiva de tomate industrial consolidaram notáveis investimentos, com grande incremento na produção, adoção de novas variedades e híbridos, além de técnicas modernas de cultivo (BRITO; CASTRO, 2010).

A pesquisa e a disseminação do uso desses híbridos e o emprego de outras tecnologias de produção foram lideradas pela indústria a partir de uma crescente integração desta com a produção agrícola (BRITO; CASTRO, 2010).

Esse processo de transformação se inicia em São Paulo, que já vinha produzindo tomate industrial desde os anos 50. A instalação da empresa Cica, em 1974, em Presidente Prudente foi um dos marcos iniciais desse movimento. A existência de agricultores com experiência em lavouras e no arrendamento de terras, associadas às vantagens aglomerativas do parque industrial paulista, foram fatores importantes para essa expansão. Contudo, em meados dos anos 80 verifica-se uma queda na produção da região em função, principalmente, das dificuldades no arrendamento em decorrência da valorização da terra, estimulando parte da produção e do parque de processamento a migrarem para os estados da Bahia e Pernambuco. Na segunda metade dos anos 90 a produção nessa região sofre um forte ataque de pragas. Surgem as condições para o cerrado de Goiás e Minas Gerais, com suas terras produtivas, planas e baratas, emergirem como nova fronteira de expansão do cultivo e do processamento do tomate. Assim, enquanto entre 1990 a 1996, a produção de tomate rasteiro nessa região (MG e GO) correspondia, em média, a 34% da produção anual nacional, em 2002 esse índice aumentou para 77%. É de grande interesse verificar como essa situação se desenrola desde então (BRITO; CASTRO, 2010).

A produção mundial de tomate teve expansão acentuada nos últimos anos, com destaque para o tomate industrial. Esse crescimento é atribuído à industrialização em larga escala, ao aumento da demanda de alimentos preparados nas diversas formas, às refeições fora do domicílio e a necessidade das donas de casa gastarem menor tempo no preparo dos alimentos. O avanço da urbanização e a maior inserção da mulher no mercado de trabalho foram fundamentais para a ampliação deste mercado (BRITO; CASTRO, 2010).

Na produção de tomate industrial os EUA ocupa, de longe, o primeiro lugar com 11,2 milhões de toneladas em 2008 (30,4% do total mundial), seguidos pela China com 6,4 milhões (17,4%). Os cinco principais produtores europeus, entre os quais se destacam a Itália e a Espanha, produzem, em conjunto, 9,0 milhões de toneladas (24,5%). Existe ainda uma produção importante na Turquia e no Irã, respectivamente com 2,7 e 2,0 milhões de toneladas em 2008. O Brasil ocupa o sétimo lugar no ranking mundial com uma produção de 1,2 milhão de toneladas, 3,3% do total mundial (BRITO; CASTRO, 2010).

A produção agrícola de tomate no Brasil é bastante desenvolvida, tendo maior importância na economia do Sudeste e Centro-Oeste. Nesta região estão localizadas as maiores empresas de processamento do fruto (KARNOPP, 2003).

Desde 1995 a produção industrial de tomate aumentou 29%, com o desenvolvimento de novos derivados como sopas, sucos, tomates dos mais diversos tipos, molhos e o

desenvolvimento das redes de *fastfood*, com crescimento baseado na busca de maior qualidade, o que trouxe boas oportunidades ao setor (MELO, 2001).

Um fato marcante, no início dos anos 90, foi a expansão da agroindústria de tomate em novas regiões, em especial no Cerrado, abrangendo áreas dos estados de Goiás e de Minas Gerais (MELO, 1993). No Cerrado, a rápida expansão da lavoura deveu-se às boas condições climáticas, aliadas à disponibilidade de terra de baixo custo e ao suprimento adequado de água para irrigação. Outro fator favorável foi a proximidade dos grandes centros de consumo do Sudeste e do Sul. Em 2000, o Cerrado transformou-se na mais importante zona de produção de tomate industrial do país, com 77 % da área plantada, seguido de São Paulo, com 14 % e do Nordeste, com apenas 9 % (MELO, 2001).

Dados de 2004 mostram a distribuição nacional da produção de tomate segundo dados do IBGE, visto na Figura 4.

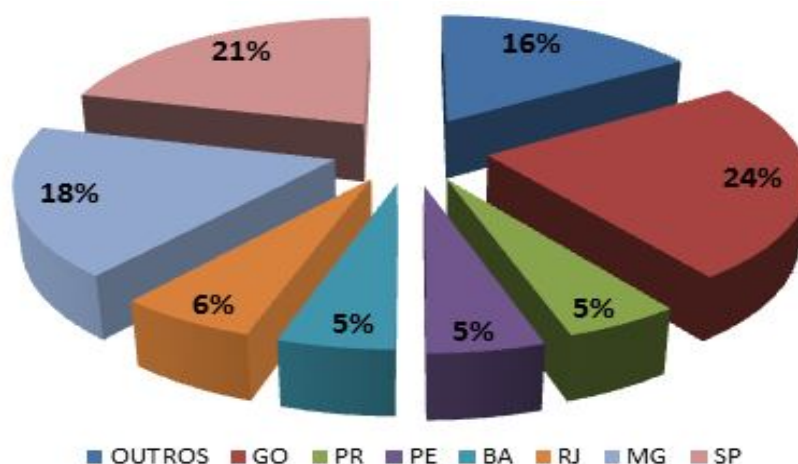


Figura 4 – Dados da distribuição nacional da produção de tomate (Fonte: IBGE).

Os principais estados brasileiros, responsáveis por esta produção de tomate são Goiás, São Paulo e Minas Gerais. A distribuição estadual da produção pode ser visto na Tabela 3 (OLIVEIRA; BERGAMASCO, 2003).

Tabela 3 - Distribuição regional do tomate segundo Oliveira e Bergamasco, 2003.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Área plantada (ha)	Área colhida (ha)	Quantidade produzida(t)	Rendimento médio (kg/ha)	Valor (1 000R\$)
Brasil	59 027	58 893	3 362 655	57 097	1 735 675
Norte	1 943	1 897	31 656	16 687	27 134
Rondônia	362	362	8 757	24 190	4 270
Acre	4	4	109	27 250	196
Amazonas	593	567	2 845	5 017	502
Roraima	449	439	5 268	12 000	6 585
Pará	527	517	14 465	27 978	15 348
Tocantins	8	8	212	26 500	233
Nordeste	14 395	14 345	577 401	40 251	325 625
Maranhão	231	231	4 727	20 463	4 034
Piauí	127	127	2 626	20 677	2 308
Ceará	2 038	2 038	103 291	50 682	88 422
Rio Grande do Norte	513	513	16 674	32 502	10 061
Paraíba	730	730	23 325	31 952	13 454
Pernambuco	4 208	4 158	168 501	40 524	76 819
Alagoas	40	40	2 400	60 000	372
Sergipe	296	296	4 871	16 456	3 602
Bahia	6 212	6 212	250 986	40 403	126 553
Sudeste	24 281	24 253	1 569 765	64 724	837 222
Minas Gerais	8 130	8 102	552 677	68 214	299 384
Espírito Santo	1 982	1 982	132 127	66 663	102 998
Rio de Janeiro	2 829	2 829	212 631	75 161	133 502
São Paulo	11 340	11 340	672 330	59 288	301 337
Sul	8 016	8 006	399 700	49 925	224 366
Paraná	3 479	3 479	180 014	51 743	92 227
Santa Catarina	2 158	2 158	119 992	55 603	48 910
Rio Grande do Sul	2 379	2 369	99 694	42 082	83 230
Centro-Oeste	10 392	10 392	784 133	75 455	321 327
Mato Grosso do Sul	71	71	3 644	51 323	2 223
Mato Grosso	143	143	2 403	16 804	2 738
Goiás	9 900	9 900	759 620	76 729	301 594
Distrito Federal	278	278	18 466	66 424	14 773
Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção Agrícola Municipal 2006.					

O tomate para indústria é produzido em Goiás (62%), em São Paulo (20%), em Minas Gerais (16%) e no Nordeste (2%). O tomate para mesa é produzido nas regiões Sudeste (56%), Sul (19%) e os 24% restantes em outros estados. A produção de tomate para mesa correspondeu a 60% da produção total no Brasil no biênio 2005-2006, que atingiu 2,4 milhões de toneladas por ano (CAMARGO; FILHO, 2008).

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, purê, polpa concentrada, extrato, catchup (ou ketchup, ou catsup), 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, 2003).

O fruto fresco do tomate apresenta baixo poder calórico, baixo teor de matéria seca e é muito rico em cálcio e vitamina C. Os açúcares, sacarose e frutose, constituem cerca de 65% dos sólidos solúveis totais e se acumulam na fase final da maturação. Com o início da maturação, ocorrem a degradação da clorofila e a síntese de pigmentos amarelos, principalmente xantofilas e caroteno, atingindo, posteriormente, a cor avermelhada em razão do acúmulo de licopeno (FERNANDES, 2005).

2.2. TOMATE SECO

Popular na Itália, o hábito de consumo do tomate seco tem aumentado no Brasil. A tendência é o mercado tornar-se ainda mais promissor, pois aumenta a procura pela iguaria nos supermercados, nas casas de pizza e redes de *fastfood* (MESQUITA, 2001). No entanto, por conta do custo de produção considerado alto, seu preço nos supermercados não é nada acessível: 1 quilograma vale em média 33 reais.

Os tomates secos são utilizados há alguns séculos, tendo sido inicialmente desidratados pelo sol quente do Sul da Itália. Embora só nos últimos anos o resto do mundo tenha optado por essa forma de consumo, o tomate seco se transformou rapidamente em destaque da culinária internacional o que serve de motivo para o presente trabalho (CAMARGO, 2003).

Segundo Murari (2001) o tomate seco é um produto diferenciado, tanto no aspecto do processamento como na comercialização. Trata-se de tomates não inteiros desidratados até umidade intermediária, mantendo sua textura macia. O tomate seco é comercializado imerso

em óleo vegetal e temperado com sal, alho, orégano e outros condimentos. No Brasil, por tratar-se de um produto relativamente novo, o processamento é feito por pequenas e microempresas, em geral próximas às regiões produtoras. Os métodos utilizados ainda são bastante artesanais, com a preparação do tomate manual e a secagem realizada ao sol, em fornos convencionais e variados tipos de processos industriais que não são padronizados (SANTOS, 2008).

O mercado para o tomate seco cresce consideravelmente, mas os produtos disponíveis não possuem padronização de qualidade visual, sensorial e nutricional. Ainda não se encontram disponíveis, de forma organizada, dados ou recomendações sobre os parâmetros mais adequados ao processo, tais como variedade ideal, temperatura adequada de secagem, tipo de corte indicado para o fruto e teor de umidade final. Entretanto, o número de pesquisas sobre o assunto tem aumentado e é possível encontrar informações importantes sobre o processo (SANTOS, 2008).

As características químicas que têm sido reportadas como importantes indicadores da aptidão do tomate à secagem compreendem o conteúdo de sólidos totais, a acidez total e o conteúdo de sólidos insolúveis. Dentre estes parâmetros, o conteúdo de sólidos totais é o mais importante, pois está relacionado ao rendimento do processo. Por outro lado, os parâmetros de acidez e conteúdo de açúcares podem estar relacionados com a preferência do consumidor. Hawladeret *al.* (1991) determinaram a influência de diferentes temperaturas (40 a 80°C) e velocidades do ar (0,4 a 1,8 m/s) na cinética de secagem de fatias de tomate, concluindo que as taxas de secagem aumentaram com o aumento da temperatura e da velocidade do ar (SANTOS, 2008).

Um dos primeiros trabalhos sobre parâmetros de secagem de tomate foi publicado por Olorunda, Aworh e Onuoha (1990), que observaram maiores taxas de secagem com o aumento da temperatura no intervalo de 60 a 80°C, para a velocidade do ar fixada em 1,75 m/s. Também verificaram que a secagem com fluxo de ar cruzado foi mais eficiente que com fluxo paralelo, o que foi atribuído à maior eficiência de contato da massa total de ar com o produto (SANTOS, 2008).

Uma série de outros trabalhos publicados aborda a qualidade do tomate desidratado que, quando seco em condições inadequadas, sofre escurecimento e tem baixa capacidade de reidratação. Mais recentemente, cresce o interesse na preservação das qualidades nutricionais do produto, uma vez que o tomate apresenta significativos teores de licopeno e ácido ascórbico, substâncias associadas à prevenção de algumas patologias. Nesse sentido, várias

modalidades de pré-tratamentos ou processos de secagem têm sido estudados. Zanoniet *al.* (1999) verificaram que durante a secagem convectiva do tomate em metades, ocorreu uma severa oxidação do ácido ascórbico. Por outro lado, os teores de licopeno apresentaram boa estabilidade, mesmo quando a secagem foi conduzida a 110°C (SANTOS, 2008).

Segundo Singh e Heldman (1993), a preservação de frutas e hortaliças por desidratação, no entanto, apresenta um desafio: devido à configuração estrutural destes produtos, a remoção de umidade deve ser realizada de maneira a preservar ao máximo sua qualidade. Isto requer um processo que forneça um produto seco que possa retornar aproximadamente às suas condições originais após a reidratação. Para se conseguir a remoção de água de um produto alimentício da maneira mais eficiente, o sistema de desidratação deve levar em conta os vários processos e mecanismos de transformação que ocorrem no produto, que são de particular importância para frutas e vegetais, onde a própria estrutura influencia o movimento da água no interior do produto (SANTOS, 2008).

A técnica mais utilizada na produção de frutas e hortaliças desidratadas é a secagem por ar quente – em que uma batelada do material a ser seco, usualmente em forma de pequenos pedaços ou fatias, é submetida a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular ao leito de sólidos. Apesar de sua simplicidade, a secagem por ar quente reduz consideravelmente a qualidade do produto. Os defeitos mais comuns dos alimentos desidratados dessa maneira são: a dureza excessiva, a dificuldade de reidratação e a alteração da cor e sabor (SANTOS, 2008).

A liofilização também pode ser utilizada para a obtenção de produtos desidratados de excelente qualidade, mas a grande quantidade de energia envolvida no processo o torna extremamente caro e, na maioria das vezes, inviável. Os fatores que levam à seleção de um determinado secador ou método de secagem incluem a forma da matéria-prima e suas propriedades, o custo de operação e as características físicas desejadas para o produto final (SANTOS, 2008).

Para a produção de tomate seco em conserva, a pré-secagem osmótica permite o uso de temperaturas mais baixas para o ar de secagem, uma vez que o teor de umidade inicial do produto que entra no secador é consideravelmente mais baixo que o correspondente ao produto fresco. Também em decorrência do uso da pré-desidratação osmótica, existe a possibilidade de que o teor de umidade do produto obtido após a secagem convectiva seja mantido em torno de 20 a 30%, teor um pouco mais elevado que o convencional, resultando em produto de textura mais macia. Isso é possível devido aos solutos incorporados durante o

tratamento osmótico, os quais contribuem para o abaixamento da atividade de água, mesmo em umidades mais elevadas (SANTOS, 2008).

2.2. TOMATE CEREJA PARCIALMENTE DESIDRATADO

Uma parte significativa da produção de tomate cereja está concentrada em um breve período, durante o qual o seu valor de venda diminui para abaixo do custo de produção. Portanto, os produtores visam alternativas para comercializarem o excesso produzido, na esperança de algum lucro. Isto pode ser conseguido através da criação de um novo produto, que é estável e comercial durante todo o ano (MURATORE *et al*, 2008). Assim, a desidratação parcial do tomate faz com que o processo de secagem agregue valor ao produto com um gasto energético menor já que o tempo de secagem é diminuído devido a menor quantidade de água a removida. Além desta vantagem, o tomate parcialmente desidratado tem agradado o gosto do consumidor, comprovados a partir de estudos sensoriais que analisavam a aparência, textura, aroma, sabor e qualidade total.

A comercialização dos tomates parcialmente desidratados encontra-se na forma de conservas e também tomate seco triturado. A forma em conserva tem apresentado maior preferência pelo consumidor, sendo utilizado como aperitivo, cobertura de pizzas, agregado a massas diversas etc. A aparência de tais produtos, entretanto, é sofrível, geralmente de cor castanho-escuro ou preto, em função principalmente do processo de desidratação a altas temperaturas e/ou longo tempo de processo de secagem, uma vez que o tomate *in natura* é um produto com alto teor de umidade, em torno de 95% (SILVA FILHO; COELHO, SANTANA, 2007).

A secagem não é uma forma mais popular de processamento de tomates devido ao seu efeito negativo sobre a qualidade do produto final, tais como escurecimento dos tecidos e mudanças no perfil do sabor. Muitas diferenças na composição foram destaque entre as variedades tradicionais (tomates grandes) e as novas variedades de pequeno porte (cereja), este último caracterizado pela maior produção de matéria seca e fração sólida solúvel, essencialmente devido aos níveis mais elevados de açúcares e ácidos orgânicos (MURATORE *et al*, 2008).

Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de correlacionar os benefícios do tomate e seus derivados, com a capacidade de prevenção de alguns tipos de cânceros e doenças cardiovasculares. Estes estudos têm demonstrado que o tratamento térmico de tomate (em

cada produto comercial) correlaciona-se diretamente com baixo risco para cânceres do aparelho digestivo e da próstata. Outros trabalhos confirmaram que o consumo de substâncias naturais oxidantes capazes de reduzir, pode proteger contra cânceres de pele e outras doenças (MURATORE *et al*, 2008).

O valor biológico do tomate esta relacionado à sua alta concentração de antioxidantes, tais como carotenoides, ácido ascórbico (vitamina C) e compostosfenólicos, em especiallicopeno, que atua como um limpador contra os radicais livres reduzindo o risco de câncer em humanos. O licopeno, segundo as conclusões do Gartner, Stahl e Sies (1997) e Stahl e Sies (1992), é estável durante o aquecimento e tratamento industrial, e os tratamentos são capazes de melhorar a biodisponibilidade do licopeno. No entanto, pesquisas realizadas por Shiet *al* (1999) mostraram uma perda significativa do teor de licopeno durante a desidratação de produtos de tomate (MURATORE *et al*, 2008).

O processo mais estudado para produção de tomate parcialmente desidratado inicia-se com a desidratação osmótica e termina com a secagem com ar quente ate atingir-se umidade intermediária, como por exemplo, 80, 70 e 60% em base úmida.

Silva Filho, Coelho e Santana (2007) realizaram testes sensoriais para tomates desidratado em diversas umidades, os resultados obtidos através da avaliação sensorial do produto avaliaram sua aparência, aroma, textura, sabor e qualidade total como podem ser analisados nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 4 – Analise sensorial para atributo aparência

TEMPO DE SECAGEM(h)	10	15	20	25	30
UMIDADE FINAL%	73,7	42,7	37,7	23,4	20,7
APARENCIA	6,8	6,1	4,9	4,6	3,4

Tabela 5 – Analise sensorial para atributo aroma

TEMPO DE SECAGEM(h)	10	15	20	25	30
UMIDADE FINAL%	73,7	42,7	37,7	23,4	20,7
AROMA	6,3	6,1	5,8	5,5	4,9

Tabela 6 – Analise sensorial para atributo textura

TEMPO DE SECAGEM(h)	10	15	20	25	30
UMIDADE FINAL%	73,7	42,7	37,7	23,4	20,7
TEXTURA	7,8	6,3	2,7	1,8	1,4

Tabela 7 – Análise sensorial para atributo sabor

TEMPO DE SECAGEM(h)	10	15	20	25	30
UMIDADE FINAL%	73,7	42,7	37,7	23,4	20,7
SABOR	5,5	5,2	4,5	4,1	3,6

Tabela 8 – Análise sensorial para atributo qualidade total.

TEMPO DE SECAGEM(h)	10	15	20	25	30
UMIDADE FINAL%	73,7	42,7	37,7	23,4	20,7
QUALIDADE TOTAL	6,4	6,1	3,9	3,8	3,1

Portanto, segundo Silva Filho, Coelho e Santana (2007), os tomates pré-desidratados osmoticamente e secados com ar quente até umidade de 73,7% em base úmida, foram os melhores avaliados em todos os aspectos sensoriais analisados.

2.3. PROCESSAMENTO PARA SECAGEM DE TOMATE

Existem no ramo industrial diversas tecnologias para produção de tomate, baseado em trabalhos recentes, que visam padronizar a qualidade do tomate seco e diminuir o gasto energético, Camargo (2003) descreve o processo produtivo de tomate seco em conserva que se segue as seguintes etapas:

2.3.1. LAVAGEM

Para pequenas e médias escalas de produção, a lavagem pode ser realizada em lavadores de imersão de três estágios. Para tomates, na primeira lavagem, a concentração de cloro ideal é de 80 mg/L e o tempo de imersão de 20 minutos. Depois do primeiro banho por imersão, os tomates são colocados no segundo tanque onde é feita a remoção das impurezas remanescentes. Este banho também deve ser feito com água tratada numa concentração de cloro de 50 mg/L durante 10 minutos. No terceiro estágio, a lavagem é feita sem a adição de cloro. Após a lavagem os tomates, são conduzidos para um ambiente separado através de uma esteira dotada de bancadas laterais para trabalho. Dependendo da escala de produção podem ser transportados em caixas plásticas previamente higienizadas, evitando a recontaminação do produto. Durante a seleção devem ser retirados os tomates que não estejam perfeitamente maduros, ou seja, aqueles que apresentem partes amarelas ou verdes devem retornar para o armazenamento para que sejam processados em outro lote.

2.3.2. CORTE E RETIRADA DAS SEMENTES

Os tomates destinados ao preparo de conserva devem ser cortados ao meio no sentido longitudinal com o auxílio de facas de aço inoxidável, manualmente. As sementes devem ser retiradas com os dedos (com luvas) e aqueles que apresentarem defeitos na pele devem ser trabalhados de tal forma que estas partes sejam retiradas, caso contrário à qualidade do produto final será comprometida.

2.3.3. PRÉ-TRATAMENTO: DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

O teor residual de sal nos tomates deve ser definido em função dos produtos já existentes no mercado ou de acordo com as exigências de um cliente específico. A salmoura sugerida poderá ser de 5%, ou seja, para cada litro de água, serão adicionados 50 gramas de sal. Depois de misturada a solução coloca-se os tomates e aguarda-se por 30 minutos. Outra forma de fazer um pré-tratamento é a utilização de açúcar, juntamente com o sal. Este tratamento apresenta um produto com características organolépticas superior ao somente desidratado com sal, ou seja, o sabor e a aparência são melhores. Poderá ser utilizado um xarope de 65 °Brix com 1 parte de sal para cada 10 partes de açúcar, em temperatura de 45 °C para o sistema. Após o tratamento lavar os tomates com água potável rapidamente e escorrer por 2 minutos, para retirada do excesso de xarope.

2.3.4. PRÉ-TRATAMENTO: APLICAÇÃO DE ANTIOXIDANTES

Após a desidratação osmótica realiza-se um banho de imersão com ácido ascórbico e metabissulfito, durante 1 minuto, com 1500mg/L e 100mg/L respectivamente. Deve ressaltar que há uma tendência mundial para diminuir e até mesmo finalizar o uso de metabissulfitos, no entanto em pequenas quantidades juntamente com o ácido ascórbico, há um efeito sinérgico, havendo maior eficiência do que os mesmos usados separadamente e em doses maiores.

2.3.5. SECAGEM

Depois de retirados da desidratação osmótica, os tomates são distribuídos sobre as bandejas de secagem a uma razão de aproximadamente 8 kg/m^2 . A bandeja de controle deve apresentar a mesma densidade de carregamento uma vez que ela será utilizada para acompanhar o processo e determinar o ponto final da desidratação. A temperatura do ar de secagem deve ser ajustada para 60 a 65°C e as bandejas devem ser giradas em 180° a cada uma hora para que se reduza o tempo de secagem e se obtenha um teor de umidade final uniforme.

2.3.6. PREPARO DO TEMPERO

O tipo do tempero a ser utilizado depende do custo final e das exigências do mercado, portanto uma pesquisa de mercado pode ser interessante na tomada da decisão. Sugere-se a seguinte formulação:

- 60% de óleo de girassol
- 40% de azeite de oliva
- Sal, orégano, especiarias a gosto.

Misturam-se os produtos numa panela, aquecendo-os até atingir a temperatura de 90°C deve-se mexer o tempero para que sua mistura fique bem homogênea.

2.4. FUNDAMENTOS DA SECAGEM

A secagem é uma operação unitária que envolve a transferência simultânea de calor e massa. Para secagem de alimentos é extremamente importante ajustar-se as variáveis do processo como, por exemplo, temperatura e vazão, de forma que o alimento não perca suas principais qualidades bioquímicas, nutricionais e sensoriais. Na secagem do tomate, a película externa tem uma resistência natural à transferência de massa. Esta característica afeta de forma importante o tempo de secagem e atrai estudos relevantes para alternativas que possam diminuir a resistência e consequentemente o tempo de secagem. O processo de secagem de alimentos é uma operação complexa que envolve transferência simultânea de calor e massa acompanhada da absorção de água (alimento higroscópico) e do encolhimento. O calor penetra no produto e a umidade é removida na forma de vapor de água (CARDOSO, 1998).

A secagem de tomates é realizada usando escoamento de ar a uma determinada temperatura e umidade relativa, como objetivo de evaporar a água superficial do alimento incorporando à umidade do ar. Para que isto ocorra o ar deve estar abaixo de sua umidade de saturação, o que está relacionada com a capacidade de retirada de umidade do material. Portanto, é importante que o ar tenha uma baixa umidade relativa.

Na secagem de um material sólido com gás a uma dada umidade e temperatura, normalmente tem-se um comportamento que pode ser tomado como padrão. Traçando-se um gráfico do conteúdo de umidade em função do tempo, como pode ser visto na Figura 5, durante o processo de secagem, obtém-se para a maioria dos materiais, uma curva de secagem que apresenta geralmente duas fases: um período de taxa de secagem constante e outro decrescente (CAMARGO, 2005).

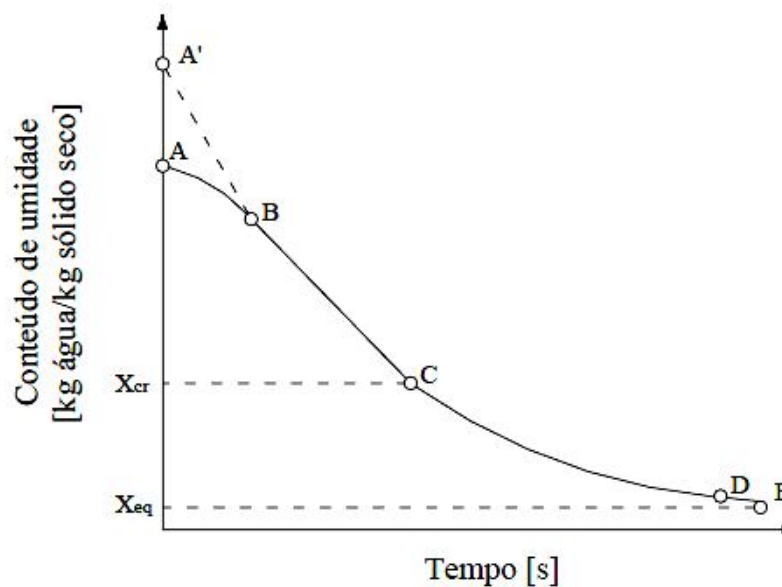


Figura 5 – Variação da umidade com o tempo que representa a curva de secagem (SFREDO, 2006).

A variação no conteúdo de umidade (X) em função do tempo, para o período inicial de secagem, é ilustrada na curva A–B (ou curva A'–B), durante o qual o material se adapta às condições de secagem e sua temperatura atinge o valor do estado estacionário. Com o transcorrer do tempo a relação $X = f(t)$ torna-se linear (segmento BC) e a taxa de secagem, que é proporcional ao coeficiente angular da reta BC, torna-se constante. A variação linear do conteúdo de umidade em função do tempo ocorre até o ponto crítico C. A partir deste ponto a

linha reta torna-se uma curva, que se aproxima, assintoticamente, do conteúdo de umidade de equilíbrio, X_{eq} (SFREDO, 2006).

O trecho de curva CD é considerado o primeiro período de velocidade decrescente, onde a umidade do material diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições utilizadas. Strumillo (1986) considera que pode haver mais do que um período decrescente (CAMARGO, 2005).

Durante o período de taxa constante, a água está prontamente disponível na superfície dos alimentos. Daí em diante, a velocidade de secagem é determinada pelos mecanismos internos de transferência de umidade (CAMARGO, 2005).

Os mecanismos internos para transferência de umidade em um material sólido sob secagem pode ocorrer tanto no estado líquido quanto no estado gás (vapor). De maneira geral, podem-se distinguir diversos modos de transferência de umidade no interior de sólidos, os quais são discutidos a seguir.

Transferência por difusão de líquido: A umidade se difunde no meio sólido, em fase líquida devido a um gradiente de concentração de umidade do interior do sólido e a superfície externa (SFREDO, 2006).

Transferência por difusão de vapor: Este é o principal mecanismo de transferência de umidade na forma de vapor no interior de sólidos. Em geral, ocorre em materiais para os quais o diâmetro característico dos espaços vazios (preenchidos com ar) é maior que 10^{-7} m (SFREDO, 2006).

Transferência por efusão (ou difusão tipo Knudsen): Este tipo de transferência ocorre quando a dimensão característica dos espaços vazios em um material poroso capilar é menor que 10^{-7} m, e são da mesma ordem de grandeza que as moléculas de vapores. Importante para secagem com alto vácuo, por criogenia (CAMARGO, 2003; SFREDO, 2006).

Transferência por termodifusão: A umidade se difunde no meio sólido por movimento de vapor devido a um gradiente de temperatura no interior do material (SFREDO, 2006).

Transferência por forças capilares: Para materiais em que há uma distribuição interna de capilares com diferentes raios e que estão interconectados, pode ocorrer uma diferença significativa nas pressões capilares, de forma a causar uma redistribuição contínua de umidade dos grandes capilares para os pequenos por sucção capilar (SFREDO, 2006).

Transferência por pressão osmótica: neste tipo de transferência o alimento é colocado em contato com uma solução concentrada de sólidos solúveis que possuem maior pressão osmótica e menor atividade de água. A complexa estrutura celular dos alimentos pode ser considerada uma membrana semipermeável, e a diferença no potencial químico da água entre o alimento e o meio osmótico é a força motriz para a transferência de água para a superfície e assim para solução osmótica (MERCALI, 2009).

Transferência devido a gradiente de pressão: Este tipo de transferência resulta da diferença de pressão interna devido à evaporação local, deformação do sólido ou condensação local de vapor (CAMARGO, 2003; SFREDO, 2006).

A curva da Figura 5, denominada curva de secagem, permite que sejam determinados a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem e o consumo de energia. A partir da curva de secagem é possível determinar-se a taxa de secagem, que nada mais é que a tangente em cada ponto da curva multiplicado pela massa de sólido seco, em que se representa matematicamente na Equação (1).

Um método apropriado para representar o comportamento fenomenológico da secagem considera a variação da taxa de secagem, expressa por (W_d), em função do conteúdo de umidade. Para materiais biológicos, a secagem apresenta dois períodos distintos e a Figura 6 mostra o diagrama da curva de taxa de secagem, que é representado pela taxa de secagem em função da umidade ($W_d=f(X)$), onde X é a umidade (SFREDO, 2006).

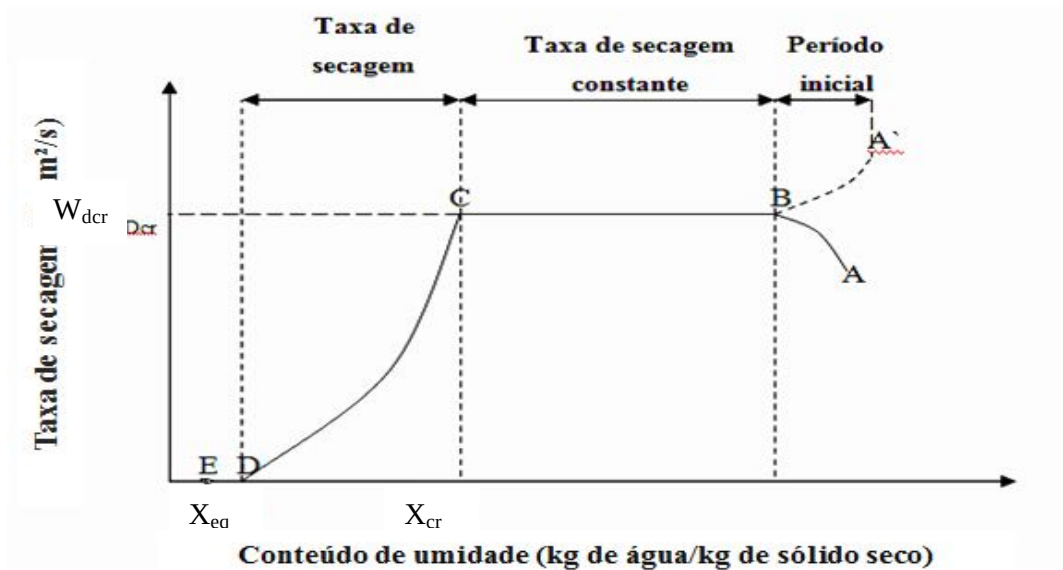


Figura 6 – Variação da taxa de secagem com a umidade do sólido (SFREDO, 2006).

A taxa de secagem é a quantidade de umidade removida do material por unidade de tempo quantificada na Equação 1:

$$W_d = - \frac{m_s dX}{dt} \quad (1)$$

Em que: W_d : taxa de secagem
 m_s : massa de sólido seco
 X : umidade do sólido
 t : tempo

No início da secagem de um alimento, por exemplo, a água da superfície esta a uma temperatura menor que a do ar, portanto a taxa de secagem tende a aumentar até se atingir a temperatura constante na superfície, isto esta representado no segmento AB da Figura 6, e é conhecido como indução. Após alcance da temperatura constante na superfície, a secagem ocorre à taxa constante, representada pelo segmento BC, correspondente a remoção de água da superfície do solido plenamente umedecida. Neste período a transferência de calor e massa pode ser descrito fortemente pelo mecanismo de transporte na camada limite. Raramente é utilizado alimentar-se o secador a uma temperatura maior que a de equilíbrio como esta representado no segmento A'B, este período de indução é curto e pode ser negligenciado.

A secagem à taxa constante esta associada à remoção da água não ligada no produto. Neste período, a água comporta-se como se o sólido não estivesse presente. Para materiais porosos, a remoção da água na superfície é compensada pelo suprimento da água do interior do sólido. O período de secagem à taxa constante permanece enquanto a água evaporada na superfície for compensada pela água interna (SFREDO, 2006).

O período final de secagem se relaciona com a remoção de água da parte interior ao solido, ou seja, água das células e capilares a serem secado. Neste caso observa-se uma diminuição da taxa de secagem com a umidade do sólido e o ponto onde se inicia este decrescimento relaciona-se a umidade como conteúdo de umidade critica (X_{cr}) (SFREDO, 2006).

O meio de secagem frequentemente utilizado na secagem de alimentos é o ar úmido, que é uma mistura de ar seco e vapor de água. O ar seco é constituído por um determinado número de gases, principalmente oxigênio e nitrogênio mais alguns componentes em menor concentração, tais como o argônio, neônio e o dióxido de carbono. O ar seco consiste em uma

mistura gasosa com peso molecular médio de 28,966 g/mol sendo, a fração molar do oxigênio 0,2095; do nitrogênio 0,7809; do argônio 0,0093 e do dióxido de carbono 0,0003. Estas proporções podem variar ligeiramente de acordo com a localidade, entretanto os valores citados acima são bastante precisos para os cálculos de engenharia (SFREDO, 2006).

Vários parâmetros são empregados para caracterizar as condições psicrométricas do ar úmido e estão descritos a seguir por:

Temperatura de bulbo seco: é a temperatura da mistura vapor-gás, determinada por um termômetro de bulbo seco (SFREDO, 2006).

Temperatura de bulbo úmido: é a temperatura de equilíbrio alcançada por uma pequena quantidade de líquido evaporado em uma grande quantidade de uma mistura de ar e vapor não saturada, a uma dada temperatura e umidade do ar. Nesta condição, a transferência de massa do líquido, por evaporação, é estabelecida, exatamente, pelo fornecimento de calor proveniente do ar (SFREDO, 2006).

Umidade absoluta do ar (H): é a razão entre a massa de vapor de água contida no ar e a massa de ar seco. O ar seco é utilizado como base porque sua massa não varia durante a secagem (SFREDO, 2006).

Umidade relativa do ar (UR): é a relação entre a pressão de vapor do ar e a pressão de vapor do ar obtida em condições de equilíbrio ou saturação sobre uma superfície de água líquida ou gelo. O valor da UR varia entre 0 e 1 para condições até a saturação (e acima de 1 para condições supersaturadas) de acordo com a temperatura. Convencionalmente também é denotada em porcentagem. Em outras palavras pode se dizer que umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura (ponto de saturação) (COSTA, 2003).

2.5. VIBRAÇÃO APLICADA À SECAGEM

A aplicação de vibração mecânica para aperfeiçoar o escoamento de materiais possui extensas aplicações industriais. Algumas vantagens do uso da vibração são: o controle mais fácil do tempo de residência das partículas pela manipulação dos parâmetros vibracionais, diminuição da quantidade de ar para fluidização, redução das dimensões dos equipamentos, secagem mais uniforme e eficiente de materiais aglomerantes, eliminação das zonas mortas dentro do equipamento; aperfeiçoamento na transferência de calor e massa.

Um dos sistemas de vibração utilizado é o eletromagnético, que foi o aplicado a este trabalho. É um dos melhores sistemas para geração de vibração, e são muito utilizados em alimentadores vibratórios, esteiras vibratórias e dosadores. A Figura 7 ilustra o princípio de operação de um tipo de vibrador eletromagnético formado por um indutor, pelo induzido e por um sistema elástico. O indutor é alimentado pela rede elétrica e ao se aumentar o fluxo magnético o induzido é atraído pelo indutor. Quando o fluxo diminui o induzido retrocede pela ação do sistema elástico (SFREDO, 2006).

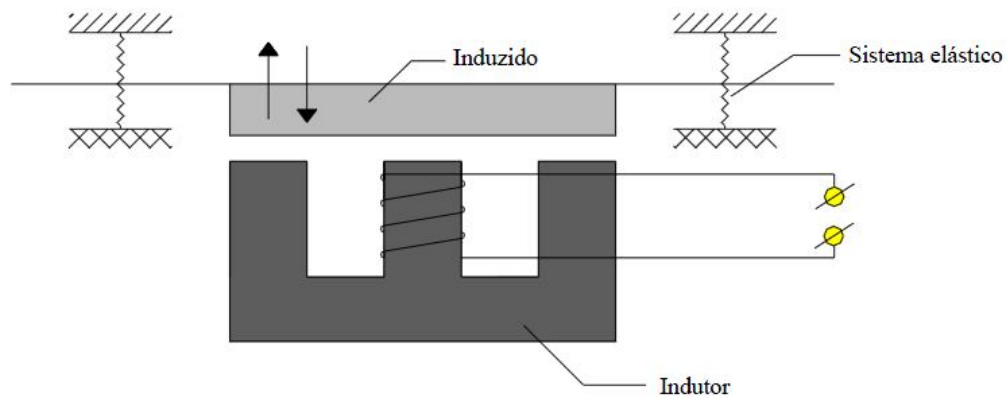


Figura 7 – Princípio de operação de um vibrador eletromagnético (SFREDO, 2006).

O esquema do vibrador eletromagnético utilizado em transportadores vibratórios pode ser visto na Figura 8.

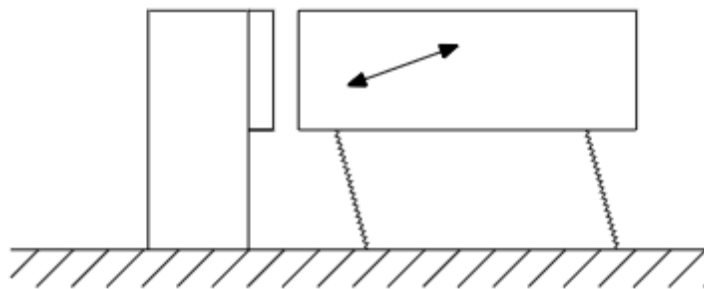


Figura 8 – Esquema do vibrador eletromagnético (SFREDO, 2006).

Neste sistema a excitação ocorre em função do campo eletromagnético gerado pelo excitador. Este campo provoca uma força variável com forma de onda senoidal, triangular, ou outra. Quando a excitação é aplicada formando um ângulo com a horizontal, como neste trabalho, a peça pode mover-se através de pequenos saltos sobre o suporte, ver Figura 9 (SFREDO, 2006).

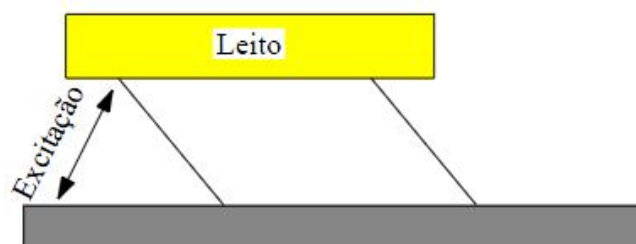


Figura 9 – Vibrador com excitação inclinada (SFREDO, 2006).

2.6. FAIXA DE TEMPERATURA DE SECAGEM PARA PRODUTOS PERECÍVEIS

É extremamente importante analisar a faixa de temperatura utilizada em outros trabalhos para o embasamento e aplicação crítica no projeto a ser desenvolvido, para isto algumas referências foram citadas abaixo.

Miranda (1991) produziu uva passa e analisou a influência da temperatura de secagem sobre a velocidade de remoção de água e qualidade do produto. Foi observado que níveis de 60 e 65 °C proporcionaram uma redução considerável do tempo de secagem comparativamente às temperaturas de 50 e 55 °C.

Romero (1997) evidencia a influência da temperatura do ar nas taxas de secagem do tomate e a na qualidade do produto final. Para temperatura de 80 °C, as fatias começaram a apresentar escurecimento após aproximadamente 70 min de secagem. Com o aumento para 120 °C, o tempo para o escurecimento foi de 20 minutos. Os melhores resultados em relação à qualidade visual (cor) foram as fatias secas a 60 °C.

2.7. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Para a realização de experimentos que permitam obter dados significativos e confiáveis, deve-se utilizar um método científico de planejamento. Além disso, quando o problema envolve dados que podem conter erros experimentais, um modo adequado de análise é por métodos estatísticos. Em qualquer análise experimental devem-se seguir duas etapas: o planejamento experimental e a análise estatística dos dados, esta última dependente do tipo de planejamento realizado (ROCHA, 2006).

As vantagens do uso do planejamento experimental são (ROCHA, 2006):

- Redução do tempo de experimentação, pois permite a otimização do número de experimentos;

- Redução dos custos relativos à execução dos ensaios, fato que está relacionado à redução da quantidade de experimentos;
- Possibilidade de avaliação e minimização do erro experimental;
- Possibilidade de uma otimização multivariada, e não requer conhecimentos elevados em estatística.

Buscando, basicamente alcançar dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo, um dos objetivos do planejamento experimental é a otimização do número de ensaios a ser realizado (LOPES, 2008).

O processo de produção de tomate seco envolve diversas variáveis, assim a análise e planejamento dos experimentos são mais confiáveis utilizando técnicas estatísticas para esse fim. A técnica de superfície de resposta, que tem como base o planejamento fatorial dos experimentos, é de fundamental importância neste trabalho, pois permite verificar os efeitos individuais e as interações entre as variáveis, a avaliação dos erros experimentais e de regressão e o equacionamento empírico dos resultados em função das variáveis escolhidas (ROCHA, 2006).

O objetivo da aplicação da superfície de resposta na análise estatística é conhecer a influência das variáveis na resposta do processo estudado. É interessante usar-se um planejamento composto central ortogonal, pois a classe de delineamento ortogonal para ajuste de modelo de segunda ordem é o que possui a configuração de cubo + estrela, Figura 10, e consiste de um experimento fatorial clássico em dois níveis (2^k) mais $2k$ pontos axiais (estrelas) a uma distância $\pm \alpha$ do ponto central e n_0 pontos centrais (LOPES, 2008). Os $2k$ pontos axiais são localizados em $(\pm \alpha, 0, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm \alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, 0, \pm \alpha, \dots, 0)$, ..., $(0, 0, 0, \dots, \pm \alpha)$ e n_0 pontos centrais $(0, 0, 0, \dots, 0)$, onde α foi calculado para o PCC ortogonal, isto é, um planejamento em que a matriz de variância e covariância são diagonais e os parâmetros estimados não são correlacionados entre si (LOPES, 2008).

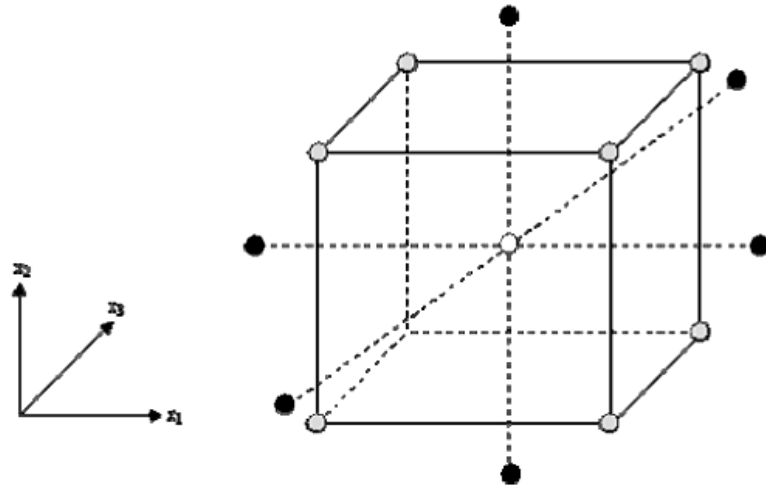


Figura 10 – Planejamento composto central para três fatores. As esferas cinza são a parte cúbica. As esferas pretas representam a parte axial. A esfera branca representa os pontos centrais. (LOPES, 2008).

Neste delineamento é comum codificar os níveis das variáveis. Geralmente, assumem-se três valores igualmente espaçados, de forma que se têm: -1 , 0 e 1 , respectivamente para os valores inferior, intermediário e superior.

O uso de valores codificados, ao invés dos valores naturais, facilita a construção da matriz de planejamento. A codificação remove as unidades de medida dos fatores do experimento e as distâncias ao longo dos eixos. Os fatores codificados no espaço k -dimensional são padronizados ou definidos na mesma métrica (LOPES, 2008).

O planejamento composto central é responsável pela análise das variáveis em 5 níveis, e assim é possível calcular além dos três valores igualmente espaçados mais dois níveis, que são codificados como $+\alpha$ e $-\alpha$.

O valor de α , é calculado usando a Equação (2):

$$\alpha = \left(\frac{KG}{4} \right)^{1/4} \quad (2)$$

$$\text{Em que: } K = \left[(G + T)^{1/2} - G^{1/2} \right]^2$$

G = número de pontos fatoriais ($G = 2^k$, se completo);

T = número de pontos adicionais no PCC; $T = 2k + n_0$ (número de réplicas centrais).

k = número de fatores (variáveis) e os pontos axiais no planejamento

O modelo utilizado para ajustar a superfície de resposta desejada é apresentado pela Equação (3):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3)$$

Sendo que:

$\beta_0, \beta_i, \beta_j, \dots, \beta_k$ representam os parâmetros do modelo;

$X_i, X_j, \dots, X_k$ são os fatores experimentais ou variáveis do modelo;

ε é o erro experimental, sendo $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

A Equação (3) pode ser escrita na forma matricial apresentada a seguir na Equação (4):

$$\underline{Y} = \underline{\beta}X + \underline{\varepsilon} \quad (4)$$

Em que: Y = vetor das respostas de dimensão n ;

β = vetor dos parâmetros de dimensão $k+1$;

X = matriz do modelo de ordem $[n \times (k+1)]$;

ε = vetor dos erros de dimensão n .

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \underline{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

O objetivo da técnica do PCC é a obtenção do vetor β a partir da matriz X (variáveis codificadas) e do vetor Y (quantidade de tomate processada). Para tal, a matriz X deve ser adequadamente planejada e executando-se o planejamento obtém-se o vetor de respostas Y .

Para facilitar os cálculos e para que não haja covariância entre os coeficientes estimados é preciso fazer com que o planejamento composto central seja ortogonal, para isso matriz $X^T X$ tem que ser uma matriz ortogonal, ou seja, $(X^T X) = I$.

Como a matriz X tem a forma descrita na Equação (4), a matriz $X^T X$ possui q elementos não nulos fora da diagonal principal de forma que se pode analisar pela Equação (5):

$$q = \frac{GT - 4G\alpha^2 - 4\alpha^4}{G + T} \quad (5)$$

Para que a matriz $X^T X$ se torne diagonal, condição necessária para aplicação de Mínimos Quadrados Ordinários, é necessário considerar q igual a zero, isto é, os elementos fora da diagonal da matriz $X^T X$ são iguais a zero, então:

$$\frac{GT - 4G\alpha^2 - 4\alpha^4}{G + T} = 0 \quad (6)$$

Substituindo G e T na Equação (6) tendo já conhecido os valores de k e n_0 , encontra-se o valor de α ortogonal.

Em resumo, o planejamento experimental envolve as seguintes fases (LOPES, 2008):

- escolha dos k fatores;
- escolha dos l níveis igualmente espaçados para cada fator (codificados em $-1, 0$ e 1 se $l = 3$);
- montagem da matriz do planejamento (X) e determinação de α ortogonal;
- codificação das variáveis;
- com os fatores selecionados para os valores fixados na matriz de planejamento (X), obtém-se o vetor de respostas (Y) dos resultados experimentais;
- com a matriz X e o vetor Y estima-se o vetor β .

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental desta dissertação de mestrado foi desenvolvida no Laboratório de Sistemas Particulados e Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, e foram realizadas as seguintes etapas:

Etapa 1 - Seleção do tomate a ser secado.

Etapa 2 - Caracterização das partículas (tomate cereja) a partir do diâmetro da esfera de igual volume.

Etapa 3 - Experimentação preliminar para obtenção da faixa experimental do planejamento composto central, avaliando a quantidade mássica de tomate alimentada, vazão de ar e temperatura do ar de secagem.

Etapa 5 – Execução do planejamento composto central para maximização da quantidade de tomate processada em um dia (resposta), em função da temperatura do ar, quantidade de tomate alimentada e vazão de ar.

Etapa 6 – Desenvolvimento da metodologia de amostragem dos tomates para acompanhamento da umidade e obtenção das curvas de secagem.

Etapa 7 - Comparação entre os tempos de secagem, das curvas de secagem e da cinética de secagem para sistemas vibrados e em leito fixo, nas condições ótimas de operação.

3.2. MATÉRIA PRIMA

A matéria prima utilizada para estudo foi o tomate cereja ovalado (*Lycopersicum* sp. *Mill.*) como visto na Figura 11 (CARVALHO, 2005). O fornecedor foi o CEASA/Uberlândia devido à facilidade de transporte e disponibilidade. As caixas foram colhidas nas safras de 2009/2010, cada uma contendo 23 kg.



Figura 11 – Qualidade dos tomates utilizados nos experimentos.

Os tomates selecionados estavam todos maduros, o que representava cor vermelha intensa e uniforme, sem presença de impurezas, danos mecânicos. A opção para secagem do tomate cereja é justificada, pois as dimensões do equipamento não permitem o escoamento dos tomates de maiores dimensões. Como o interesse era estudar a desidratação parcial do fruto inteiro, para que o escoamento fosse facilitado, a opção foi o tomate cereja. No entanto, mesmo inteiro, experimentos preliminares mostravam que conforme o processo ocorria, a maioria dos frutos eram deformados até rompimento da película protetora. Até o momento do rompimento da película externa do tomate, se perdia umidade com a taxa baixa, uma alternativa de processamento seria seccionar os frutos em duas metades. Contudo o escoamento dessas partículas deveria ser prejudicado pela supressão da forma esférica (diminuição da esfericidade das partículas). Isto poderia ser resolvido com a atuação de partículas rígidas e esféricas, realizando ação de arrasto mecânico nas partículas. Planejou-se então, utilizar esferas de porcelana (NKG) que são usadas em moinhos de bolas no

processamento de materiais alimentícios, estudando a dinâmica do leito. Os ensaios preliminares mostraram que a casca do tomate exercia uma resistência considerável à transferência de massa, fazendo com que o tempo de secagem do tomate fosse grande, mas é ela que garante a forma final do fruto seco.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS TOMATES

3.3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para distribuição granulométrica utilizou-se como dimensão característica da partícula (tomate cereja) o diâmetro da esfera de igual volume do tomate (D_v).

As determinações do diâmetro médio iniciaram-se com a amostragem de uma caixa de tomate cereja. Os frutos foram dispostos sobre uma superfície plana e com quarteamentos sucessivos reduziram-se a 70 tomates, os quais tiveram seu volume mensurado, um a um, através do deslocamento volumétrico da água de uma proveta graduada de 100 mL.

O diâmetro característico (D_v) do tomate foi determinado a partir da equação (7), em que para o volume da partícula medida experimentalmente é possível obter o diâmetro que representa o da esfera de mesmo volume da partícula (D_v).

$$V = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_v}{2}\right)^3 = \frac{\pi}{6}D_v^3 \quad \Rightarrow \quad D_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (7)$$

Os dados foram ajustados por um modelo que representa a dispersão dos diâmetros característicos das partículas em função da frequência em que estes diâmetros aparecem, a fim de determinar-se o diâmetro médio de Sauter, o qual foi empregado para amostragem nos experimentos realizados no secador e que se tratará adiante.

3.3.2. DENSIDADE MÉDIA DOS TOMATES.

Para determinação da densidade média dos fruto foram amostrados 10 tomates aleatoriamente. Cada tomate seguiu o seguinte procedimento:

- Quantificação da massa do tomate

- Medição do volume em proveta graduada de 100 mL, a partir do deslocamento de água. Com a razão da massa pelo volume, obtém-se a densidade de uma partícula (ρ_n).

Como foram amostrados 10 tomates, foi possível calcular a densidade média foi calculada utilizando-se a Equação (8).

$$\rho_m = \frac{\sum_{n=1}^{n=10} \rho_n}{10} \quad (8)$$

Em que: ρ_n = densidade de uma unidade de tomate

ρ_m = densidade média dos tomates

3.3.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA SECA E DO CONTEÚDO DE UMIDADE DO TOMATE

O conteúdo de umidade em um processo de secagem é muito importante para estabelecer a curva de secagem..

O conteúdo de umidade de um material pode ser definido de duas maneiras (MORIS, 2002).

$$\text{Base seca:} \quad X = \frac{m_a}{m_s} \quad (9)$$

$$\text{Base úmida:} \quad W = \frac{m_a}{m_u} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (10)$$

Em que m_a é a massa de água no material (kg), m_s é a massa de material seco em (kg), m_u a massa de material úmido (kg), X o conteúdo de umidade em base seca (kg água/kg material seco) e W o conteúdo de umidade em base úmida (kg de água/ kg de material úmido).

A determinação da umidade em base seca do tomate *in natura* assim como sua massa seca foi realizada da seguinte maneira:

- Amostraram-se cinco tomates no diametro médio de Sauter.
- Foi medida a massa dos cinco tomates.
- Levaram-se os cinco tomates para estufa à 105 °C.
- Foi quantificada a massa dos tomates após 24 horas.

Após 24 horas na estufaa massa do fruto seco é constante, portanto garante-se que toda a água foi evaporada e que resta apenas massa seca (m_s). Portanto, a massa seca média de um tomate foi calculada pela divisão da massa final encontrada após atingir-se massa constante, por cinco.

A subtração da massa inicial pela massa final resulta na massa de água que evaporou (m_a), que dividida pela massa inicial dos cinco tomates (m_u) resulta na umidade em base úmida do tomate *in natura*. Ao dividir a massa de água (m_a) pela massa seca dos cinco tomates (m_s), obtém-se a umidade em base seca.

3.4. SECADOR

O secador utilizado neste trabalho já foi empregado anteriormente em outras pesquisas, na secagem de café por Menezes (1996), Freitas (1998), Banzatto (2000) e Sfredo (2002 e 2006). Entretanto, os outros trabalhos foram realizados com configurações diferentes do equipamento e a matéria prima processada era o café e no trabalho atual o tomate cereja.

Neste trabalho foram efetuadas modificações, principalmente no sistema de reciclo dos tomates, já que o sistema de reciclo contínuo utilizado na secagem de café não tinha vibração suficiente para escoamento dos tomates e por isso adotou-se a recirculação manual dos frutos, após serem descarregados no topo da esteira, como visto na Figura 12, representado por (10).

O secador de bandejas vibradas com reciclo é constituído basicamente de quatro seções: túnel vertical de secagem, sistema de vibração, sistema de injeção de ar aquecido no túnel de secagem e sistema de reciclo manual do tomate, representado na Figuras 12 e 13 com numeração indicativa dos componentes.

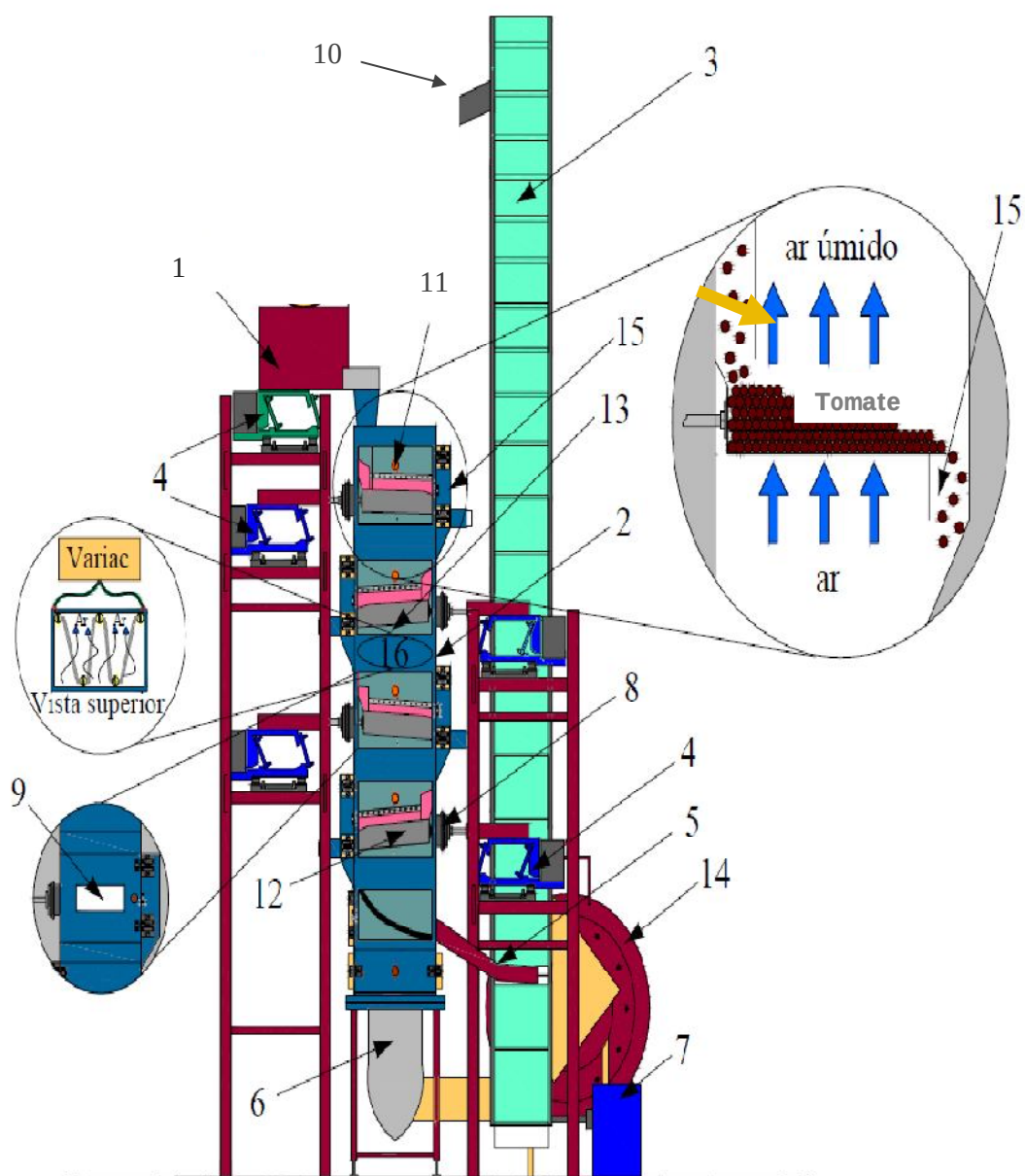


Figura 12 - Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal).

1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4: vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos tomates cereja; 6: tubulação de ar; 7: moto-reductor; 8: dispositivo de vedação; 9: janela de inspeção; 10: Saída da esteira para o reciclo manual; 11: lâmpadas; 12: bandeja; 13: termopar; 14: soprador; 15: vertedouro; 16: sistema de reaquecimento do ar. (adaptado de SFREDO, 2006).

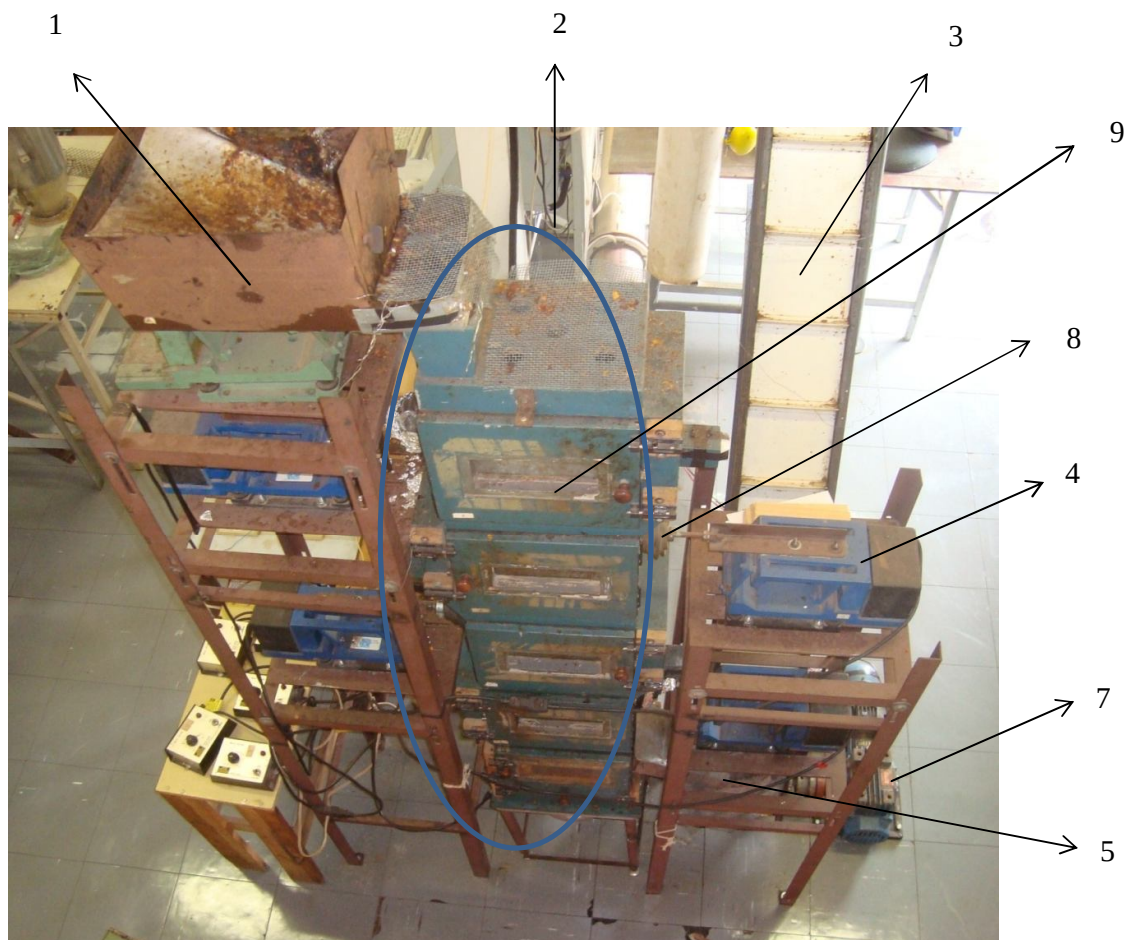


Figura 13 – Secador de bandeja vibrada e com reciclo.

1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4: vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos tomates cereja; 6: moto-reductor; 7: dispositivo de vedação; 8: janela de inspeção.

O túnel de secagem (2) contém quatro bandejas, sendo a primeira a superior e em ordem crescente de cima para baixo numeram-se as outras, sendo a quarta bandeja a inferior, próxima a tubulação de ar (6). Todas as bandejas são perfuradas para passagem de ar quente em escoamento cruzado. As dimensões características destas bandejas são 0,29 m de comprimento por 0,18 m de largura e 0,06 m de altura, dispostas de maneira ligeiramente inclinada, inclinação de 10°, para facilitar o escoamento dos tomates. Para a passagem dos tomates de uma bandeja superior para uma inferior estão dispostos no túnel de secagem (2) quatro vertedouros vedados longitudinalmente com quatro cortinas de borracha com 0,216 m de comprimento e 0,179 m de largura, que impedem que o ar de secagem escoe pelos vertedouros e sim pelo túnel de secagem. Neste dispositivo os tomates são descarregados da bandeja superior para bandeja inferior por uma abertura retangular ao final da cortina de vedação até atingir o ultimo estágio (passagem pela ultima bandeja, ou seja, bandeja 4) e

atingir calha de descarga (5), que direciona os frutos a saída do túnel de secagem. Uma esteira transportadora (3) se dispõe logo na saída do túnel de secagem para transporte dos frutos até a tubulação de descarga (10), onde se captavam os tomates para realimentação no alimentador vibratório (1), assim estava composto o sistema de recirculação.

Para que os tomates escoassem, foi instalado o sistema de vibração, constituído por quatro vibradores eletromagnéticos (4) conectados às quatro bandejas do secador e um vibrador eletromagnético conectado ao alimentador vibratório (1), possibilitando o escoamento dos tomates no túnel de secagem dependendo da umidade das partículas. Os quatro vibradores (CE – Norma Equipamentos Ltda. modelo CV. 3) possuem dial de variação que permite modificar a amplitude vibracional. Os vibradores (exceto o alimentador vibratório) são conectados às bandejas por uma haste metálica, parafusada na parte superior do vibrador e introduzida no interior do secador onde é acoplada, rigidamente, às bandejas. Na parede do secador onde a haste é conectada à bandeja, instalou-se uma membrana flexível de borracha (8) para impedir que o ar escoasse para fora do secador, pelo orifício de passagem.

Com a finalidade de impedir vazamento de ar, fitas de borracha de aproximadamente 0,01 m de espessura foram aderidas nas bordas internas de todas as janelas de inspeção (9) e mais dois dispositivos de fechamento por pressão (trincos) foram instalados para vedar as saídas de ar, já que a pressão interna durante a passagem de ar é maior que a externa caracterizando a importância dos trincos na vedação das borrachas ao corpo do túnel de secagem, impedindo vazamentos e consequentes perdas de energia. A janela de inspeção (9), ilustrada no túnel de secagem sobre cada bandeja, possui um visor de acrílico (dimensão de 0,063 m x 0,182 m) para possibilitar a visão do leito tomate em escoamento no interior do secador, durante a secagem. Este dispositivo é muito importante, pois possibilita a visualização do escoamento dos tomates, necessária para se promover o controle manual da altura do leito (ou quantidade de tomates nas quatro bandejas). O controle manual é realizado pela alteração da amplitude de vibração das bandejas nos diais de variação da intensidade de vibração.

Para aquecimento do ar três resistências elétricas internas (16) foram instaladas dentro do túnel de secagem (2), cada uma de $459,63 \pm 83,11$ W (localizadas abaixo das Bandejas 1, 2 e 3), conectadas à rede elétrica (220 V) e em paralelo com três variadores de tensão para controle da temperatura de reaquecimento do ar, regenerando seu potencial de secagem antes

da alimentação da bandeja superior, já que conforme o ar escoar pelas bandejas ocorre secagem dos tomates e a temperatura diminui.

Durante a secagem dos tomates, a intensidade de vibração (amplitude) das bandejas foram alteradas de acordo com o comportamento do leito de tomate nas bandejas. De forma geral, a intensidade da vibração nas bandejas era aumentada ao longo da secagem. A alteração tornou-se necessária para manter o escoamento uniforme dentro do secador, uma vez que a dinâmica do sistema é alterada com o decorrer da secagem pela mudança no conteúdo de umidade dos frutos, diminuindo sua massa e seu volume devido à diminuição das partículas.

O sistema de reciclo dos tomates é constituído pela correia transportadora (3) que transporta os frutos que abandonam o secador na calha de descarga (5), até uma tubulação ferro (10) onde os frutos são recolhidos manualmente e na sequência descarregados no alimentador vibratório (1) no topo do túnel de secagem. A esteira, com 0,2 m de largura e aproximadamente 4 m de comprimento, contém taliscas de 0,017 m de altura dispostas a uma distância de aproximadamente 0,20 m entre si. A função das taliscas é manter os tomates sobre a esteira da correia transportadora. Tanto a esteira quanto as taliscas são confeccionadas de borracha branca, própria para produtos alimentícios.

Um dispositivo plástico foi fixado sobre a esteira, nas extremidades de cada talisca, para evitar o esmagamento tomates. O acessório plástico tem a função de evitar o esmagamento dos tomates pelo atrito com a parte metálica da correia transportadora. Os tomates úmidos aderem à parede metálica da esteira e a correia taliscada esmaga-os a ponto de perder muita massa, e não apenas água. A inclinação da correia transportadora com a horizontal é de aproximadamente 42°. A velocidade da esteira é modificada pela alteração da rotação do motor (indução-gaiola) WEG (7) de 0,5 HP e 1720 RPM responsável pelo seu movimento, acoplado a um redutor de velocidade, com redução de 1:60. O conjunto é conectado a um inversor de frequência WEG (Série CFW-08), que promove a alteração da rotação no motor redutor e, portanto, altera a velocidade da esteira transportadora. (SFREDO, 2006).

O sistema de injeção de ar no secador foi executado por um soprador (14) de 3,1 HP, operando a 3500 RPM; uma tubulação (6) com 4,50 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro, que conduz o ar de secagem até o túnel do secador; um medidor de orifício conectado a um manômetro para determinar a vazão de ar; e um sistema de aquecimento por transformação de energia elétrica em calor, formado por quatro resistências elétricas, cada uma de 2376 W, estando uma delas conectada a um variador de tensão que permite o controle fino da

temperatura do ar. As outras resistências elétricas, quando necessário operar a maiores temperaturas, foram conectadas diretamente à rede elétrica, ou então tinham a função de sobressalente na eventualidade de uma resistência elétrica necessitar de manutenção.

A Figura 14 apresenta o esquema de construção e montagem das quatro resistências que aquecem o ar de secagem. A seção transversal do tubo, indicada na Figura 13 (a), mostra o esquema da forma do suporte das resistências elétricas confeccionadas com duas seções de telha de cimento amianto, fixadas na parte central por parafusos (quatro), para manutenção da rigidez do conjunto. O conjunto de resistências foi disposto no centro da tubulação de admissão de ar por meio de dois suportes cilíndricos conectados à parede da tubulação. Utilizou-se resistência elétrica de níquel-cromo de 2,1 ohm/m, enrolado em forma de espiral no suporte, com distância ente os fios de 0,004 m. As vistas lateral e superior das resistências elétricas fixadas no suporte são indicadas na Figura 14 pelas letras (b) e (c), respectivamente (SFREDO, 2006).

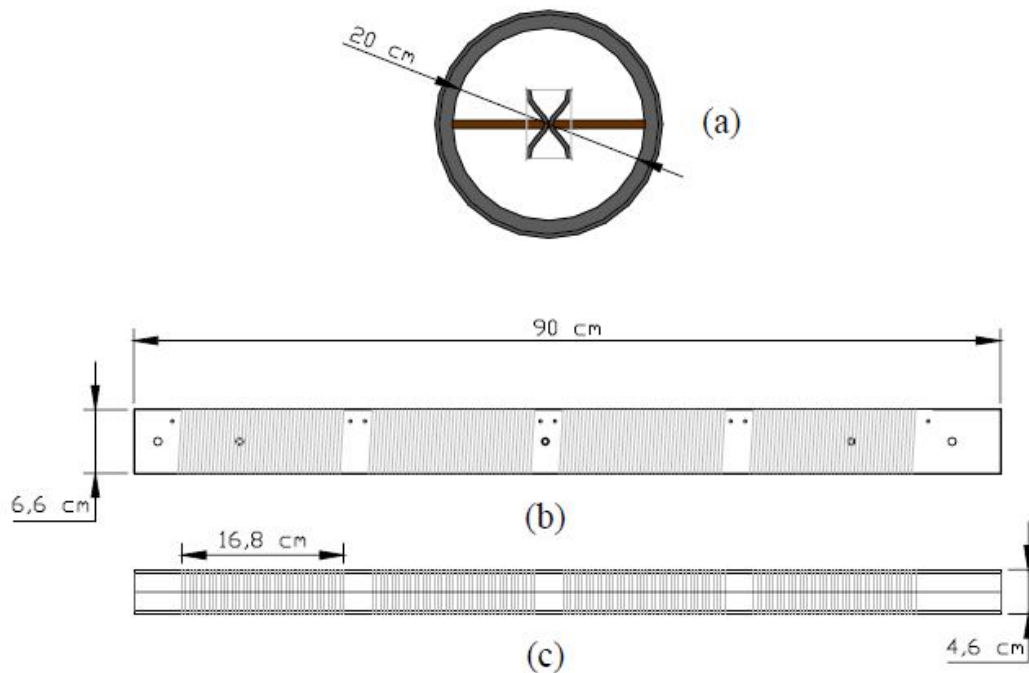


Figura 14 – Esquema do sistema de aquecimento do ar de secagem (SFREDO, 2006).

O estudo das variáveis que afetam o processo de secagem foi feito a partir dos experimentos, buscando maximizar a quantidade de tomate processada diariamente. Portanto, aplicou-se aos experimentos o planejamento composto central, o qual foi possível mensurar as

condições de temperatura, vazão de ar e quantidade de tomate alimentada que maximizam a produtividade do secador.

3.5. EXPERIMENTAÇÃO PRELIMINAR PARA FAIXA DE TRABALHO DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS.

De acordo com os trabalhos desenvolvidos por Miranda (1991) e Romero (1999), apresentados no Capítulo 2, seção 2.7, foi possível concluir que para redução no tempo de secagem mantendo a boa qualidade sensorial do fruto, a temperatura do ar deve estar próxima a 65 °C e não ultrapassar 70 °C. Portanto a faixa de trabalho selecionada e aplicada ao planejamento experimental foi de 52,4 a 67,6°C, garantindo-se a partir de referências anteriores boas características físicas e sensoriais relacionadas à temperatura.

Já para a quantidade de tomate alimentado, iniciou-se o teste para a capacidade máxima do secador, ou seja, que todos os estágios (bandejas) fossem preenchidas sem causar obstrução das vias de comunicação de um estágio para o outro durante o escoamento ou processo de secagem. Obteve-se a média máxima de 4 kg para o processo sem problemas experimentais de obstrução, assim foi feito um planejamento com variação de 0,975 a 4,025 kg.

Para determinação da faixa de trabalho relacionada à vazão de ar de secagem, foi feito um experimento que se observou para vazões de ar acima de 6 kg/min dificuldade dos tomates deixarem o equipamento, principalmente quando tinham menor teor de umidade, pois devido à pequena massa, fluidizavam no último estágio do equipamento. A mínima vazão de ar foi determinada a partir da sensibilidade do manômetro, que dificultava leitura para vazões menores que 2 kg/min. Assim, o planejamento foi feito de modo que a mínima vazão fosse 2 kg/min e a máxima 6 kg/min.

3.6. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Foi efetuado um planejamento experimental em que se realizaram experimentos para verificar a influência de três variáveis no processo de produção de tomate seco. As variáveis mais significativas neste processo são:

- T – Temperatura do ar (°C)
- $\dot{V}$ – Vazão de ar (kg/min)
- Q – Quantidade de tomate alimentado (kg)

Os valores destas variáveis foram obtidos através dos testes preliminares e por dados da literatura que ajudaram a encontrar uma faixa de trabalho, como apresentado na secção 3.4. Assim foi possível elaborar o planejamento composto central e consequentemente localizar o ponto ótimo de operação para o máximo processamento de tomate diário.

A vazão de ar no secador (V) foi determinada com o uso de uma placa de orifíciocalibrada, acoplada a um manômetro, que mede a diferença de pressão (ΔP) a partir da diferença de altura (Δh) de uma coluna de água. A vazão de ar é calculada pela equação ($V=2,65\sqrt{\Delta h}$), em que se calibrou a placa de orifício. A resolução do medidor de vazão de ar é de 1,50 kg ar/min.

O planejamento composto central foi feito para as três variáveis ($k=3$), com seis réplicas no centro para que a certeza do modelo fosse maior, e portanto o resíduo (ϵ) fosse reduzido e $\alpha = \pm 1,52$, a partir do *software* STATISTICA 7.0, que reflete no planejamento experimental da Tabela 9.

Os níveis das variáveis estudadas foram colocados na forma codificada (adimensionalizada), utilizando as seguintes equações de codificação:

$$\text{Equação geral: } X_n = \frac{(X - X_0)}{\frac{X_{+1} - X_{-1}}{2}}; \text{ Sendo para T: } X_1 = \frac{(T - T_0)}{\frac{T_{+1} - T_{-1}}{2}};$$

$$\text{Para } \dot{V}: X_2 = \frac{(\dot{V} - \dot{V}_0)}{\frac{\dot{V}_{+1} - \dot{V}_{-1}}{2}}; \text{ e para Q: } X_3 = \frac{(Q - Q_0)}{\frac{Q_{+1} - Q_{-1}}{2}}$$

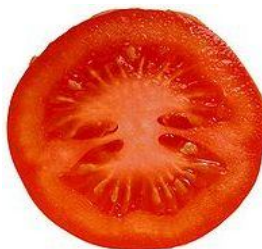
Tabela 9 - Planejamento Composto Central

Experimento	Variáveis		
	T(°C) (X ₁)	Var (kg/min) (X ₂)	Q (kg) (X ₃)
1	55 (-1)	2,7 (-1)	1,5(-1)
2	55 (-1)	2,7 (-1)	3,5 (1)
3	55 (-1)	5,3 (1)	1,5(-1)
4	55 (-1)	5,3 (1)	3,5 (1)
5	65 (1)	2,7 (-1)	1,5 (-1)
6	65 (1)	2,7 (-1)	3,5 (1)
7	65 (1)	5,3 (1)	1,5 (-1)
8	65 (1)	5,3 (1)	3,5 (1)
9	52,4 (-1,52)	4 (0)	2,5 (0)
10	67,6(+1,52)	4 (0)	2,5 (0)
11	60 (0)	2 (-1,52)	2,5 (0)
12	60 (0)	6 (+1,52)	2,5 (0)
13	60 (0)	4 (0)	0,975(-1,52)
14	60 (0)	4 (0)	4,025(+1,52)
15	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)
16	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)
17	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)
18	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)
19	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)
20	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)

A partir do Planejamento Composto Central, foram realizados os experimentos para obtenção da resposta (Y da matriz ortogonal) que neste caso é a quantidade de tomate *in natura* processada diariamente.

3.7. PREPARO DO TOMATE PARA SECAGEM

Os tomates processados tinham coloração vermelha bem nítida e foram seccionados ao meio sem retirada da polpa e sementes, como ilustra a Figura 15, para acelerar a transferência de massa e consequentemente diminuir o tempo de secagem.

**Figura 15** – Corte radial do tomate.

3.8. AMOSTRAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS CINÉTICOS

Como foi realizada a distribuição granulométrica para os tomates, não se efetuou classificação dos tomates por tamanho para alimentar o secador. Na amostragem, cinco tomates foram usados, e correspondiam ao diâmetro médio de Sauter, que pode ser transformado para o equivalente em massa (m_{eq}) da seguinte forma:

- Com a distribuição granulométrica foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter ($\bar{D}$).
- A dimensão característica (D_v) é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, portanto é possível pela equação do volume da esfera, Equação (11), calcular o volume equivalente (V_{eq}) que corresponde ao diâmetro médio de Sauter.

$$V_{eq} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_v}{2} \right)^3 = \frac{\pi}{6} D_v^3 \quad (11)$$

- Multiplicando a densidade média (ρ_m) pelo volume equivalente ao diâmetro médio de Sauter (V_{eq}), encontra-se o equivalente em massa ao diâmetro médio de Sauter (m_{eq}), representado na Equação (12).

$$m_{eq} = \rho_m V_{eq} \quad (12)$$

Com a equivalência em massa que representa o diâmetro médio de Sauter, a amostragem para aquisição de dados cinéticos era facilitada, já que a medição da massa é bem mais rápida que a do diâmetro, que necessita do volume.

Para se marcar os tomates a serem amostrados, foram confeccionadas cinco cestas de polietileno, que podem ser vistos na Figura 16. Cada cesta acomodava um tomate amostrado no diâmetro médio de Sauter e seccionado ao meio. Os tomates seccionados radialmente foram dispostos na cesta com uma metade em que a parte convexa esta virada para bandeja, e a outra metade em que a parte côncava esta virada para bandeja, como pode ser visto na Figura 17, reproduzindo o comportamento dos tomates nas bandejas.



Figura 16 – Cesta de amostragem.



Figura 17 – Cesta de amostragem com a disposição dos tomates.

Durante o processo de secagem a umidade do tomate diminui com o tempo, e para elaboração da curva de secagem e da cinética é necessário a amostragem dos tomates. Conforme o processo ocorria eram acompanhadas as cinco amostras (cesta com o tomate no diâmetro médio de Sauter partido ao meio), em que pela medição da massa dos cinco amostradores em intervalo de tempos sucessivos quantificava-se a quantidade de água que era eliminada (m_a). Assim, sabendo-se a massa seca dos cinco tomates amostrados no diâmetro médio de Sauter e a massa inicial de água em cada tomate, a partir do procedimento descrito na secção 3.2.3, foi possível acompanhar a umidade em função do tempo.

A curva de secagem é construída a partir da disposição em gráfico da umidade em base seca (X) pelo tempo, que possibilita calcular a quantidade de água que é perdida com o tempo.

3.9. PROCEDIMENTO OPERACIONAL DO SECADOR

Os ensaios seguiram o planejamento experimental com vinte experimentos, sendo eles a combinação da temperatura do ar na entrada, a quantidade de tomate alimentada e a vazão de ar. Os tomates foram seccionados ao meio como ilustrado anteriormente e alimentados somente após as condições operacionais estarem em condição de estado estacionário, neste caso, vazão de ar e temperatura.

Os tomates eram alimentados vagarosamente, de maneira a preencher a primeira bandeja, e acionava-se o primeiro vibrador. Quando a maioria dos tomates transferiam-se para segunda bandeja, acionava-se o segundo vibrador e mais tomates eram alimentados da mesma maneira à primeira bandeja, até os tomates escoarem para a segunda bandeja novamente e assim ao final da alimentação se tinha os tomates distribuídos em todas as bandejas e todos os vibradores operando a uma frequência de 60 Hz e amplitude de vibração de 1 mm.

No início, o processo da secagem operava em batelada, aproveitando do excesso de água superficial que garantia uma taxa de secagem constante. À medida que o tempo passava e a água superficial evaporava, atingia-se um ponto em que a taxa de secagem era decrescente, o que aumentava o tempo de secagem.

No secador, o primeiro estágio encontrava-se a uma temperatura menor que o segundo e assim sucessivamente até o quarto, necessitando-se de circulação dos tomates a cada trinta minutos para que a umidade dos tomates após a fase de secagem em batelada fosse homogênea.

Quando os tomates eram descarregados do túnel de secagem (bandeja 4), alimentando a esteira, eram recolhidos em um balde para serem realimentados ao secador (Recirculação).

Na secção 3.2.3 foi possível quantificar a fração de água inicial presente no tomate *in natura* (umidade em base úmida) e a massa seca média dos frutos, ambos amostrados no diâmetro médio de Sauter. Conhecendo, portanto, a massa de água inicial dos tomates amostrados e acompanhando a variação de massa dos tomates durante a secagem, é possível pela Equação (13) calcular a umidade em base seca do fruto para todos os instantes de tempo amostrados.

$$X = \frac{m_a}{m_s} \quad (13)$$

Em que m_a representa a massa de água que contém os cinco frutos no instante que foram amostrado, e m_s a massa seca média para os cinco tomates amostrados, que não varia durante a secagem, e que foi determinado pelo procedimento descrito na secção 3.2.3. Assim medido a massa de água presente nos tomates amostrados, que eram cinco, e dividindo pela massa seca dos cinco tomates, que já foi apresentada na secção 3.2.3, é possível acompanhar a umidade em base seca em função do tempo e construir a curva de secagem.

Quando os frutos amostrados no diâmetro médio de Sauter, atingiam a umidade em base seca de 6 kg de água/kg de massa seca, quarenta esferas de cerâmica de 2,12 a 2,53 cm de diâmetro, que podem ser visualizadas na Figura 18, eram alimentadas ao secador e a amplitude de vibração das bandejas era ajustada em 5 mm para forçar o escoamento. Nesse instante os tomates começam a escoar no secador e à medida que os tomates perdiam mais água e ficavam mais leves, a amplitude de vibração aumentava, necessitando do controle da amplitude em 5mm.



Figura 18 – Esferas de Porcelana.

Foi planejada, portanto, duas etapas no processo de secagem do tomate neste secador. A primeira, regime batelada, em que os tomates secaram até se atingir a umidade de 6 kg de água/kg de massa seca ou 85,71% de umidade em base úmida e, então, adicionaram-se esferas de porcelana que fizeram os tomates escoarem no secador, caracterizando a segunda etapa, em que foi classificado o processo em batelada com recirculação, permanecendo até atingir-se 15 % do conteúdo de água inicial que corresponde a 70,18% de umidade em base úmida ou 2,35 kg de água/kg de massa seca.

3.10. EFEITO DA VIBRAÇÃO NO TEMPO DE SECAGEM

Para quantificar o efeito da vibração no tempo de secagem, foram realizados dois experimento nas condições de operação otimizada, um com vibração (leito vibrado) e outro sem vibração (leito fixo). Somente a 4ª bandeja do secador foi utilizada, assim, a quantidade de tomate utilizada foi a do ponto ótimo dividido por quatro, ou seja, 1 kg de tomate. A temperatura foi de 67,6 °C e a vazão de ar de 6 kg/min.

O processo foi realizado em batelada e a vibração das bandejas iniciava o processo com amplitude de 1 mm e atingiram ao final do processo o máximo de 5 mm . Os tomates foram amostrados da mesma maneira que se descreveu na secção 3.2.3.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os tomates foram caracterizados e assim determinados sua densidade, massa seca, o diâmetro médio de Sauter e o modelo que melhor se ajusta à distribuição das partículas.

Foram analisadas as curvas de secagem, a cinética de secagem e as principais causas que descrevem seus comportamentos.

Os resultados obtidos para todos os ensaios do PCC foram analisados nas superfícies de resposta obtidas para as diferentes condições experimentais, visando maximizar a quantidade de tomate processada em um dia (Processamento). Os dados significativos são correlacionados aos parâmetros escolhidos obtidos por análise do PCC (Planejamento Composto Central).

Para analisar o efeito da vibração no tempo de secagem, foi feita uma análise do desempenho do secador comparando o comportamento cinético em leito fixo e em leito vibrado.

4.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os tomates amostrados foram caracterizados e determinou-se o diâmetro médio de Sauter e o modelo de distribuição granulométrica que melhor se ajusta para a distribuição de partículas.

A distribuição de frequência e cumulativa dos tomates estão representados nas Figuras 19 e 20 respectivamente, sendo D_v a dimensão característica dos frutos, que neste trabalho é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, frequência é o número de vezes que se repete D_v , e X (%) a porcentagem das partículas com diâmetro menor que D_v .

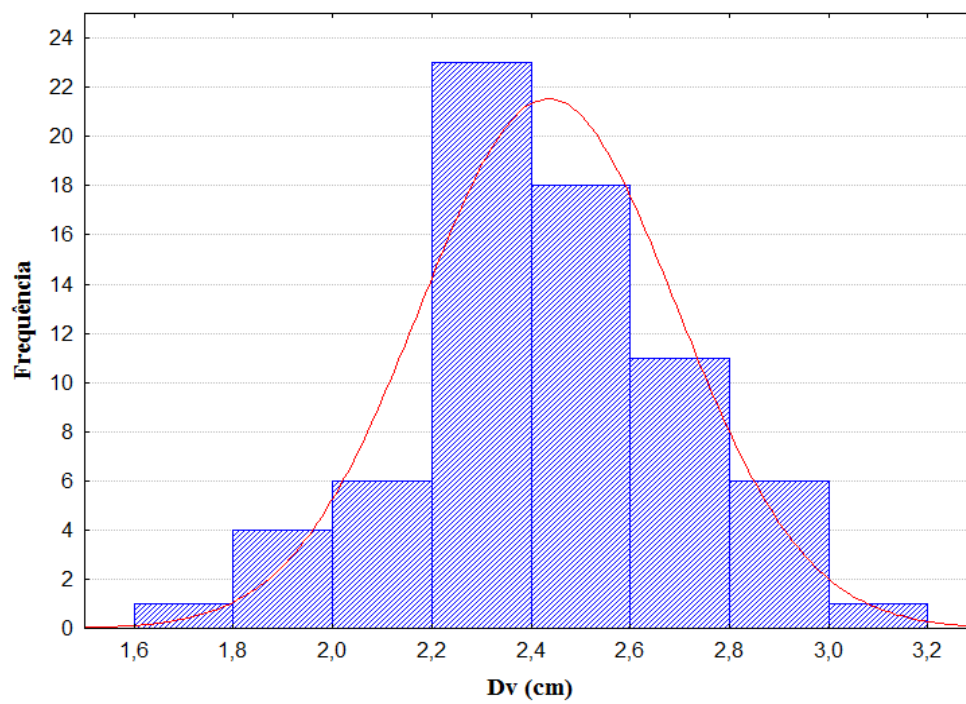


Figura 19 – Distribuição de Frequência dos tomates amostrados.

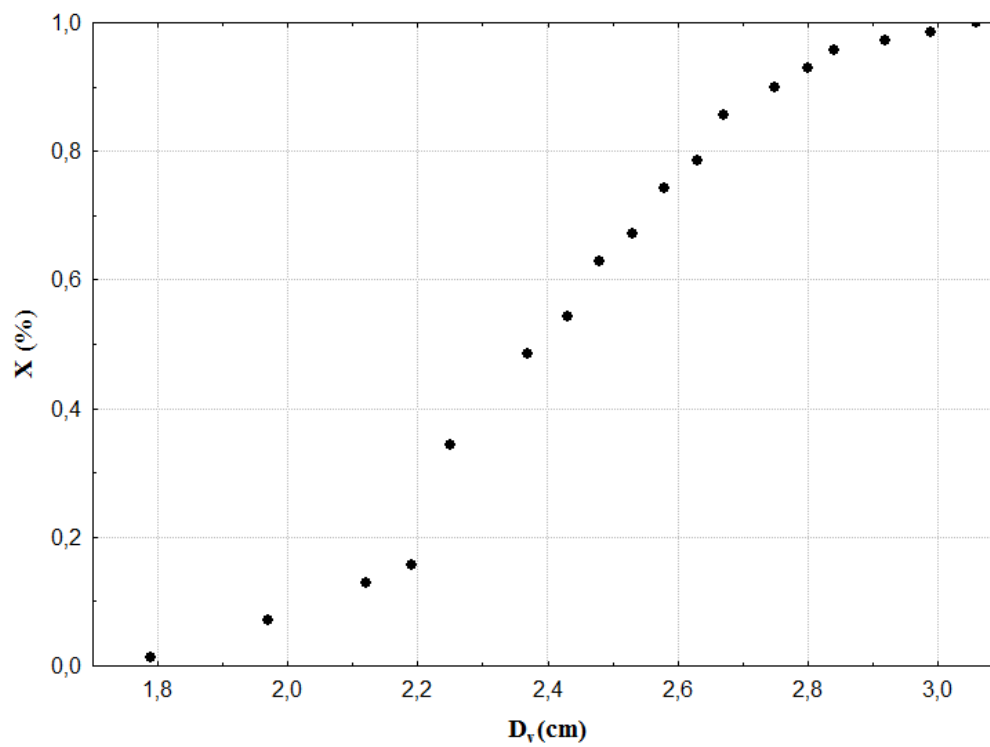


Figura 20 – Distribuição Cumulativa dos tomates amostrados.

O modelo RRB (Rosin-Rameler Bennet) foi o que melhor se ajustou para a distribuição cumulativa das partículas de tomate. A Equação (14) que representa o modelo contém dois parâmetros, d e n e foram determinados pela regressão não linear dos dados que compõem a distribuição cumulativa com o auxílio do *software* STATISTICA 7.0.

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D_v}{d}\right)^n} \quad (14)$$

O coeficiente de correlação do ajuste do modelo foi de 99,31% e os valores dos parâmetros encontrados estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros do modelo RRB.

d (cm)	n
2,50	9,99

A distribuição dos resíduos mostrada na Figura 21 não segue nenhuma tendência, o que garante a ausência de erro sistemático nos experimentos e interferência no ajuste do modelo e, portanto, se tem segurança do resultado apresentado. A boa correlação do modelo pode ser comprovada com a Figura 22 que dispõe os valores preditos pelo modelo e os valores encontrados experimentalmente.

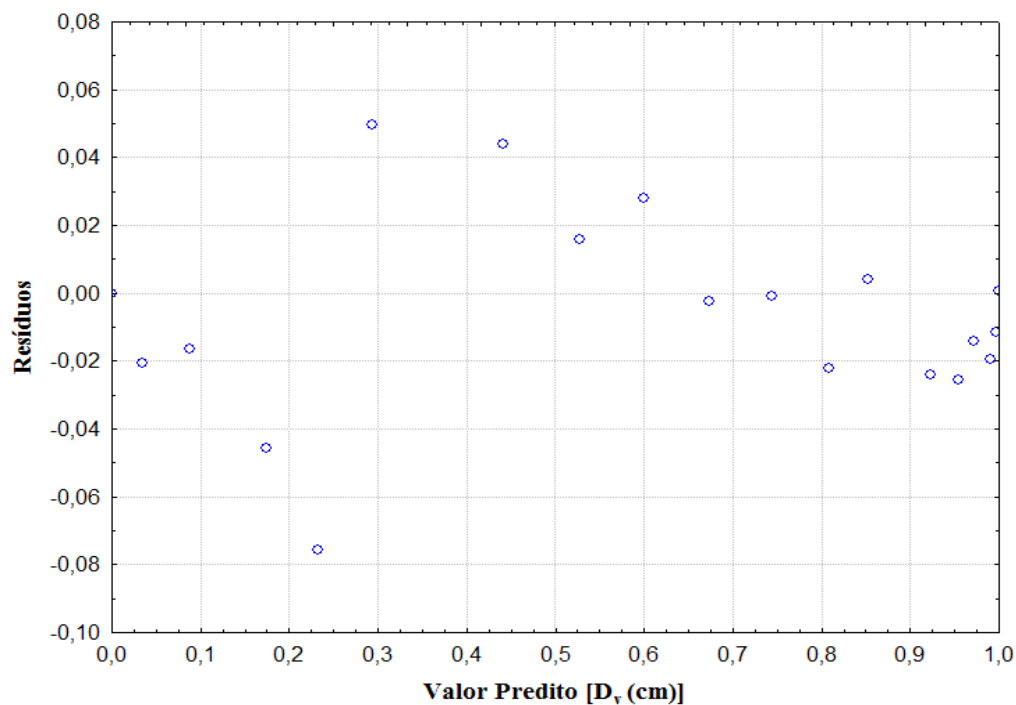


Figura 21 – Distribuição de Resíduos.

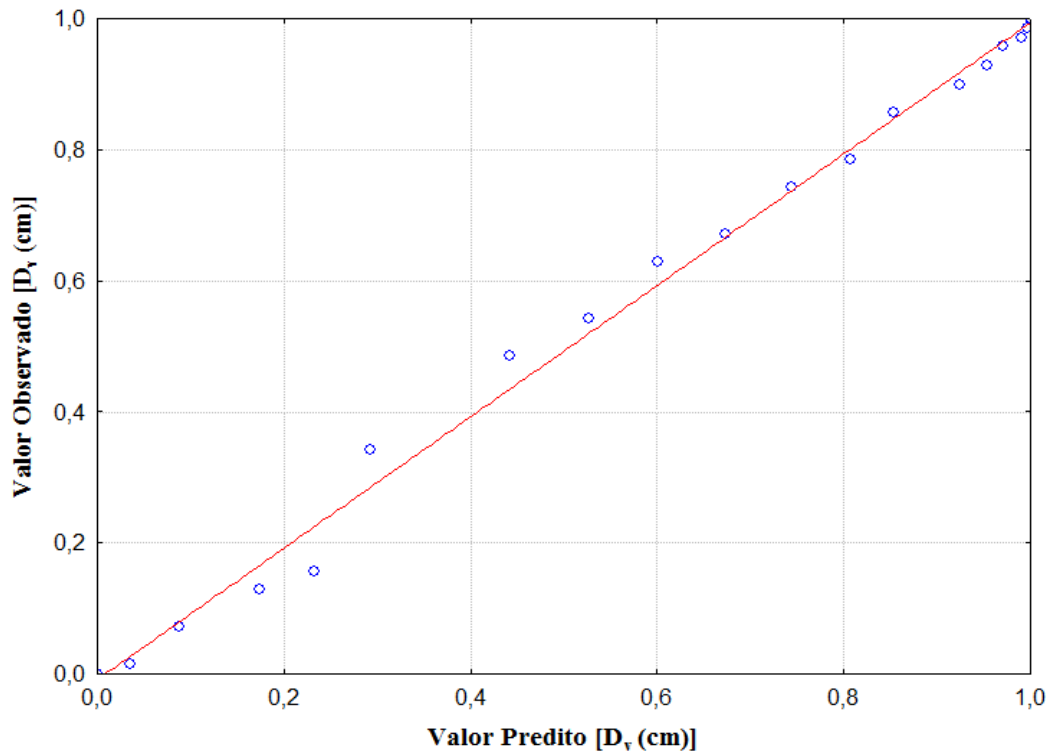


Figura 22 – Comparação dos valores do modelo com os valores experimentais.

Após a obtenção da distribuição cumulativa do diâmetro da esfera de igual volume que a partícula, foi possível quantificar o diâmetro médio de Sauter a partir da Equação 15.

$$\overline{D} = \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{D_i}} \quad (15)$$

Em que $\overline{D}$ representa o diâmetro médio de Sauter, Δx_i a fração da amostra no intervalo estipulado de diâmetros e D_i o diâmetro médio de cada intervalo estipulado de diâmetros. O diâmetro médio das partículas de tomates amostrados foi de 2,32 cm.

4.2. DENSIDADE MÉDIA DOS TOMATES

Usando o procedimento apresentado na secção 3.2.2 foi determinada a densidade média dos tomates que resultou em 1090 kg.m⁻³. Como já foi mencionado no procedimento experimental, para facilitar a amostragem dos experimentos de cinética, usou-se a equivalência em massa do tomate que tem o mesmo valor do diâmetro médio de Sauter,

portanto pela equação da densidade, multiplica-se a densidade média dos frutos pelo volume da esfera no diâmetro médio de Sauter, resultando na massa de 7,13 g.

4.3. MASSA SECA

Para determinação da massa seca, foi seguido o procedimento apresentado na secção 3.2.3, e obteve-se 0,428 g de massa seca em média para cada tomate, que representa 5,99% da massa inicial do fruto in natura, e foi utilizado nos cálculos de umidade em base seca.

4.4. PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Conhecida a densidade e o diâmetro médio de Sauter, foram amostrados os tomates como apresentado na secção 3.7. No monitoramento do peso das cinco amostras foi encontrado o tempo de secagem e conseqüentemente o processamento de tomate diário. As curvas de secagem foram construídas para todos os experimentos previstos no Planejamento Composto Central (PCC).

A resposta do PCC, que é a quantidade de tomate processada em um dia (P), em que pode ser visto na metodologia de calculo do Apêndice A, foi analisada em função da quantidade de tomate alimentado, temperatura do ar e vazão de ar. Assim, um modelo representativo dos experimentos, que tem como variável dependente a quantidade de tomate processada em um dia e como variáveis independentes a temperatura do ar, a quantidade de tomate alimentada e a vazão de ar, foi ajustado e as superfícies de respostas obtidas com o auxilio do *software* STATISTICA 7.0.

Na Tabela 11 podem-se observar as respostas (P) obtidas para o PCC, com as quais se efetuaram a análise estatística que permite obter as respostas, usando o ajuste do modelo que melhor representa a faixa experimental estudada.

Tabela 11 – PCC com a resposta experimental (P) que representa a quantidade processada diariamente e as variáveis independentes T (temperatura do ar), Q (quantidade de tomate alimentado ao secador) e V (vazão de ar).

Experimento	T(°C) (X ₁)	Var (kg/min) (X ₂)	Q (kg) (X ₃)	P (kg/dia)
1	55 (-1)	2,7 (-1)	1,5(-1)	5,5385
2	55 (-1)	2,7 (-1)	3,5 (1)	8,3444
3	55 (-1)	5,3 (1)	1,5(-1)	5,9178
4	55 (-1)	5,3 (1)	3,5 (1)	8,6007
5	65 (1)	2,7 (-1)	1,5 (-1)	6,6462
6	65 (1)	2,7 (-1)	3,5 (1)	12,0000
7	65 (1)	5,3 (1)	1,5 (-1)	6,5500
8	65 (1)	5,3 (1)	3,5 (1)	13,6585
9	52,4 (-1,52)	4 (0)	2,5 (0)	5,9113
10	67,6(+1,52)	4 (0)	2,5 (0)	10,9091
11	60 (0)	2 (-1,52)	2,5 (0)	9,35
12	60 (0)	6 (+1,52)	2,5 (0)	10,033
13	60 (0)	4 (0)	0,975(-1,52)	4,1538
14	60 (0)	4 (0)	4,025(+1,52)	11,1034
15	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	10,2564
16	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	10,0559
17	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	10,1124
18	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	9,7800
19	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	9,8630
20	60 (0)	4 (0)	2,5 (0)	9,8630

A umidade relativa média do ar nos dias do experimento era de 38% a 28 °C. Para o ar alimentado nas condições de temperatura do PCC, tinha-se para temperatura de 52,4 °C uma umidade relativa de 15%, para 55 °C umidade relativa de 12%, para 60 °C umidade relativa de 10%, para 65 °C umidade relativa de 8% e para 67.6 °C umidade relativa de 7%.

Os parâmetros que ajustam o modelo, representados pela letra grega β na Equação 16, foram calculados a partir do *software* STATÍSTICA 7.0, e estão dispostos na Tabela 12.

O modelo que representa os dados experimentais, relacionando às três variáveis estudadas, que estão na forma codificada de temperatura (X₁), vazão de ar (X₂) e quantidade de tomate alimentada (X₃), está exposto Equação 17 com todos os parâmetros envolvidos.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (16)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_2 X_2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_3 X_3 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (17)$$

Tabela 12 – Parâmetros do modelo calculados a partir do *software* STATISTICA 7.0.

Parâmetros	Efeitos	p
β_0	9,96052	0,000000
β_1	2,85762	0,000000
β_{11}	-1,22713	0,000111
β_2	0,51202	0,019852
β_{22}	-0,12447	0,547879
β_3	4,51365	0,000000
β_{33}	-1,89960	0,000003
β_{12}	0,23167	0,342714
β_{13}	1,74337	0,000021
β_{23}	0,40793	0,109999

O efeito de cada variável que afeta a quantidade de tomate processada diariamente, como a temperatura, quantidade de tomate alimentado e vazão de ar, são representados pelos parâmetros β_0 , β_1 , β_{11} , β_2 , β_{22} , β_3 , β_{33} , β_{12} , β_{13} , β_{23} , são eles que contribuem para o quanto a resposta é influenciada por cada variável, de modo que os maiores efeitos são os que mais afetam na resposta do modelo que representam os dados experimentais. O valor de p na Tabela 12, que representa a significância para uma análise, deve ser menor que 0,05, para que a probabilidade do resultado, ou nível de confiança do modelo, seja 95%.

Para a significância de 5%, ou seja, $p < 0,05$, os parâmetros que mais afetaram na quantidade de tomate processada em um dia foram β_0 , β_1 , β_{11} , β_2 , β_3 , β_{33} , β_{13} , portanto, eliminando, um a um, os parâmetros que tem significância maior que 5%, determinam-se os parâmetros significativos do modelo, mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros significativos do modelo.

Parâmetros	Efeitos	p
β_0	9,96052	0,000000
β_1	2,85762	0,000000
β_{11}	-1,22713	0,000111
β_2	0,51202	0,019852
β_3	4,51365	0,000000
β_{33}	-1,89960	0,000003
β_{13}	1,74337	0,000021

O modelo que representa a faixa experimental de estudo foi ajustado e esta representado pela Equação 18.

$$P = 9,96052 + 2,85762X_1 - 1,22713X_1^2 + 0,5120X_2 + 4,51365X_3 - 1,89960X_3^2 + 1,74337X_1 X_3 \quad (18)$$

O modelo encontrado obteve coeficiente de ajuste (R^2) de 98,69% e pode-se analisar com a Figura 23 que os valores preditos são coerentes aos valores observados experimentalmente. O valor do resíduo do modelo (ϵ) foi estimado em 0,1826.

A Figura 24 mostra que não houve erro sistemático no PCC, pois os resíduos estão distribuídos sem nenhuma tendência. Portanto, a partir do coeficiente de correlação, análise de resíduos e comparação dos resultados preditos pelo modelo e os experimentais, é possível concluir que o modelo esta bem posto.

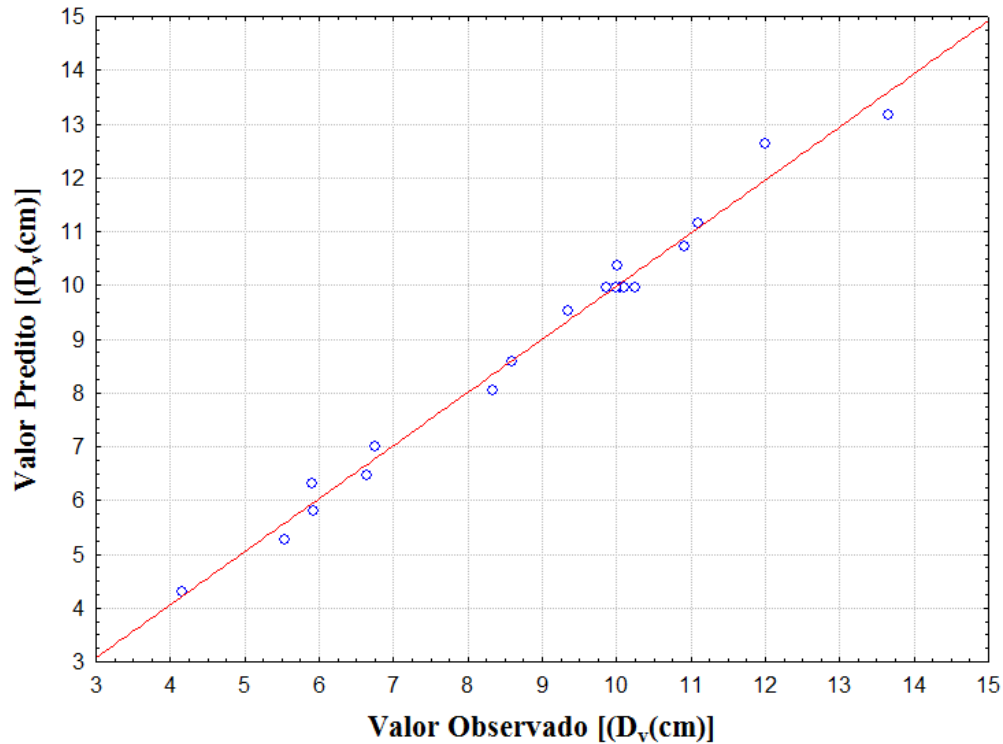


Figura 23 – Valores previstos pelo modelo e valores observados experimentalmente.

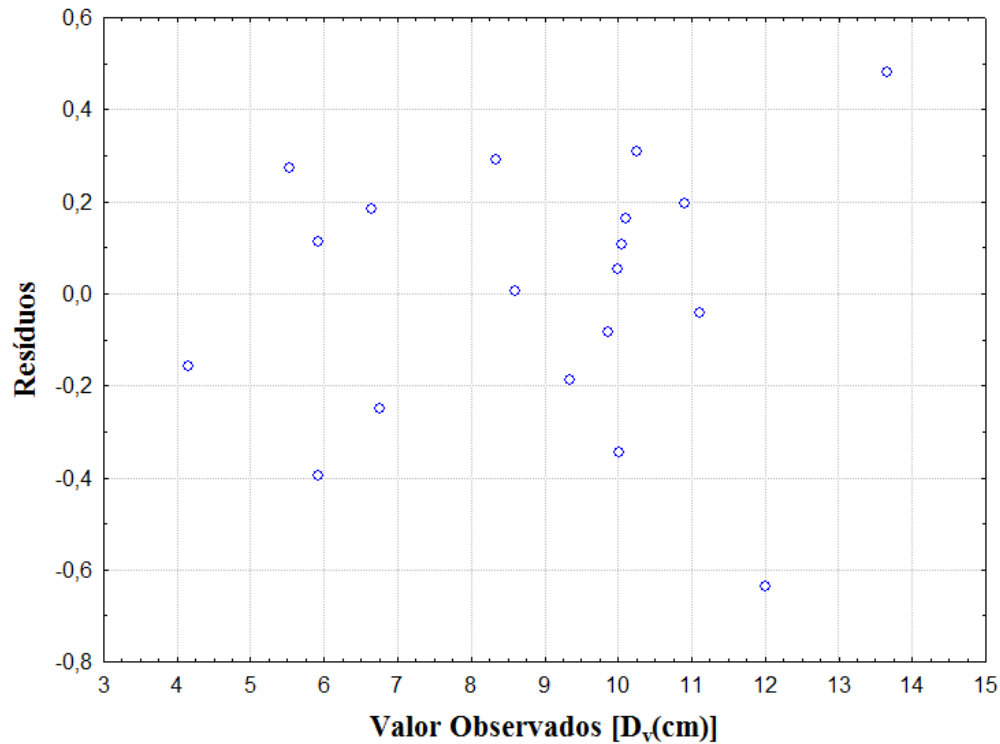


Figura 24 – Distribuição dos resíduos.

Com o modelo que representa a faixa experimental estudada é possível encontrar o ponto máximo de processamento diário e construir as superfícies de resposta.

As superfícies de respostas obtidas para o modelo estão representadas nas Figuras 25, 27, 29 e com elas é possível prever a temperatura (X_1), a quantidade de tomate alimentada (X_3) e a vazão de ar (X_2) que maximizam a resposta, no caso o processamento diário de tomate.

Todas as superfícies de resposta estão relacionadas com suas curvas de níveis respectivas, que são as Figuras 26, 28 e 30 e a partir da análise conjunta da superfície de resposta e da curva de nível, analisando as cores, é possível prever com maior precisão a tendência das variáveis que maximizam o processamento diário de tomate.

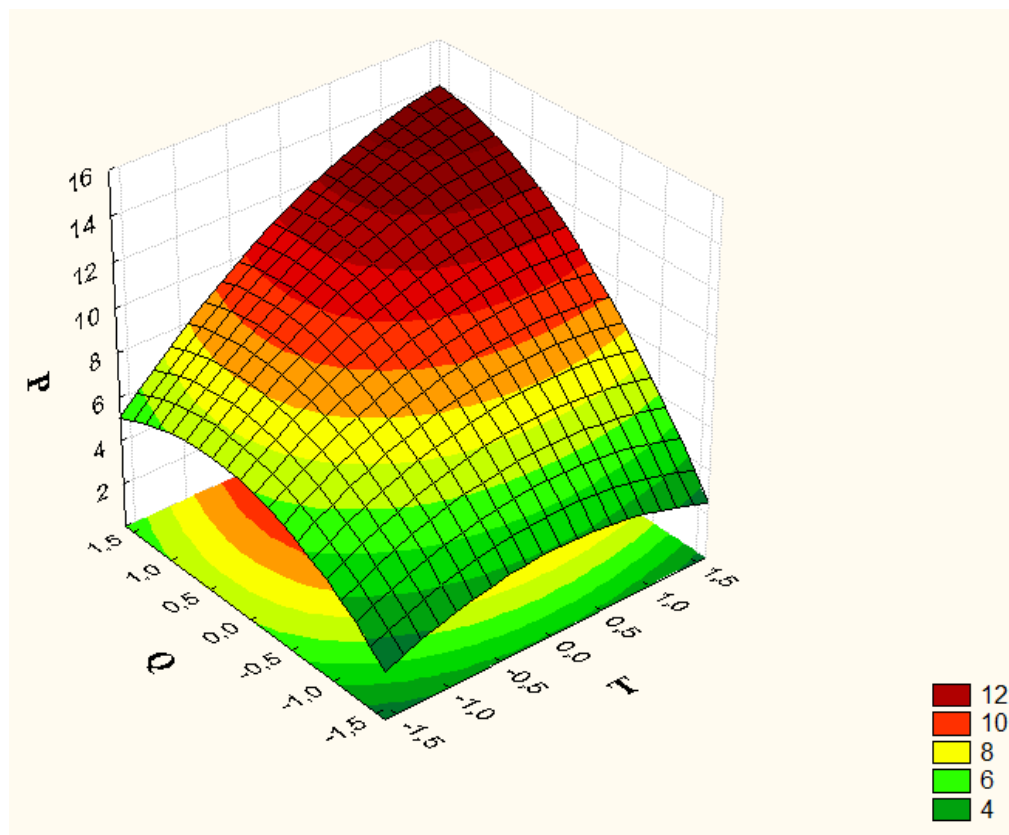


Figura 25 – Superfície de resposta para análise da temperatura e quantidade de tomate alimentado (TxQ).

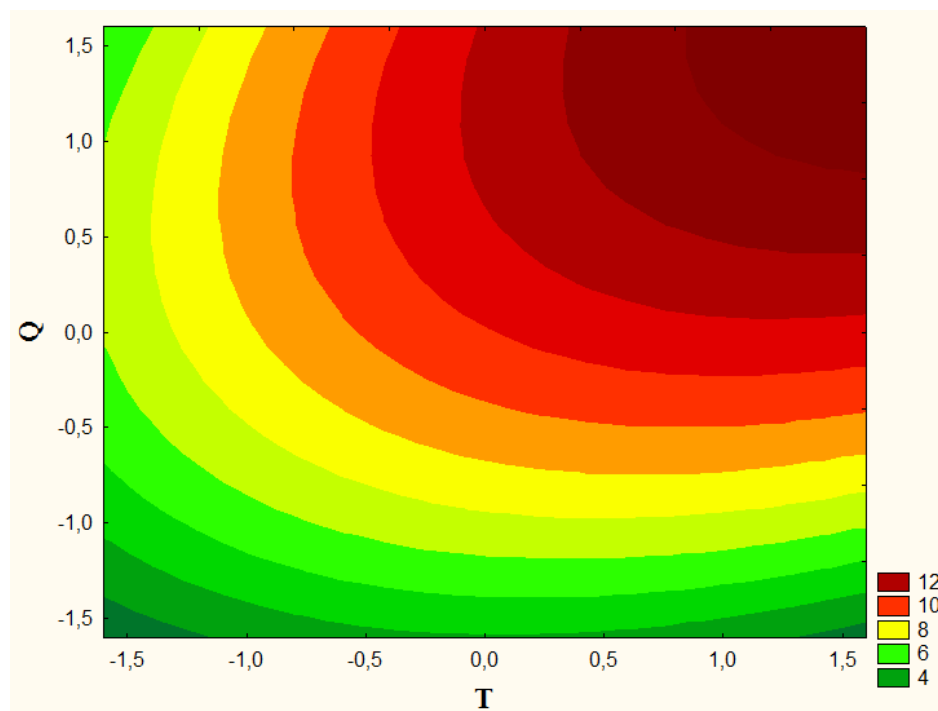


Figura 26 – Curva de nível para análise da temperatura e quantidade de tomate alimentado (TxQ).

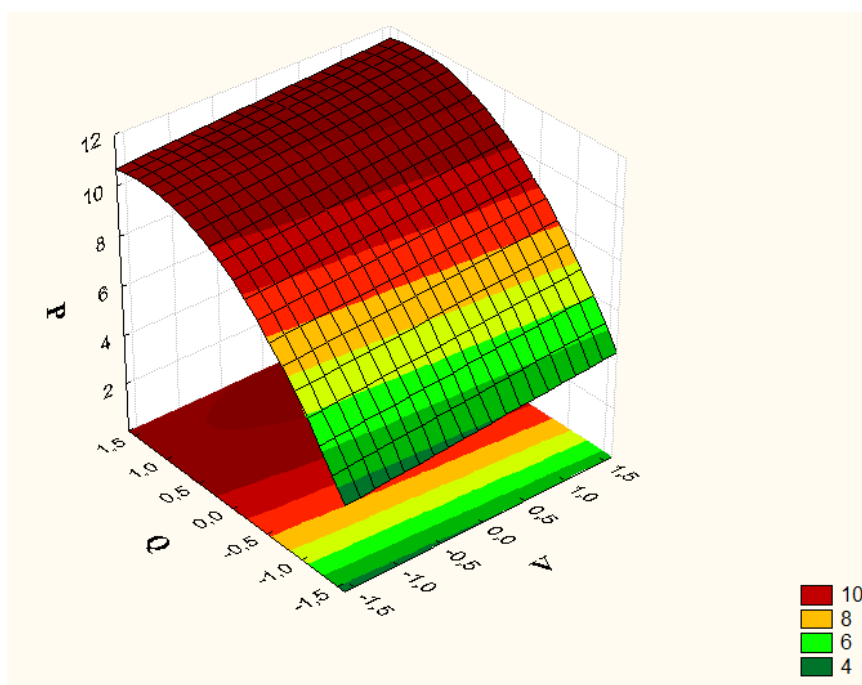


Figura 27 – Superfície de resposta para análise da vazão de ar e quantidade de tomate alimentado ($V \times Q$).

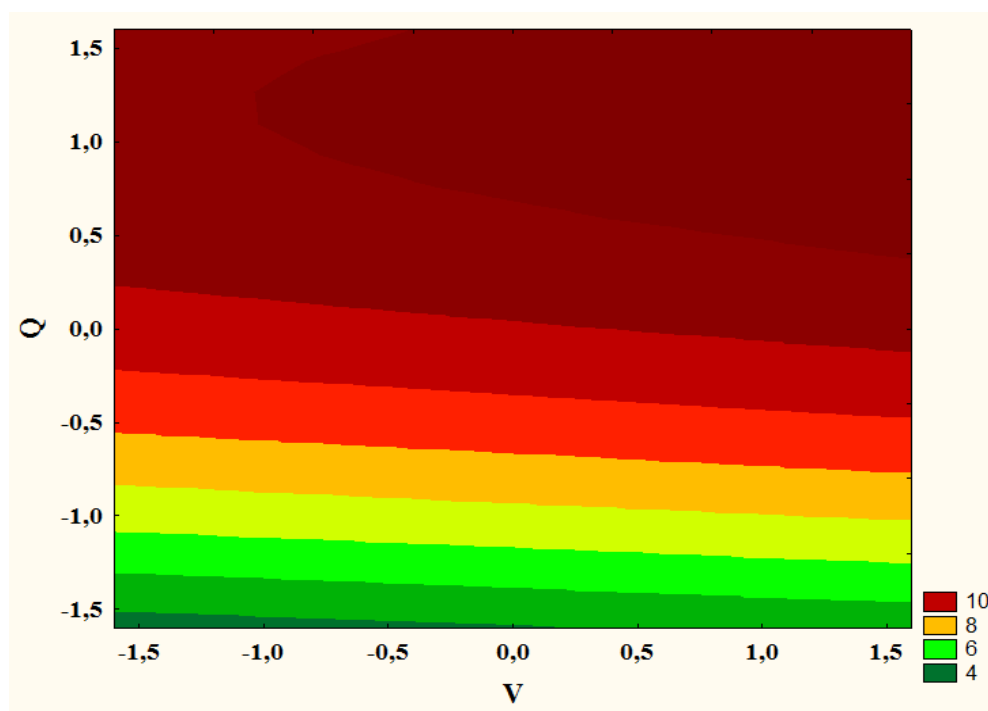


Figura 28 – Curva de nível para análise da vazão de ar e quantidade de tomate alimentado ($V \times Q$).

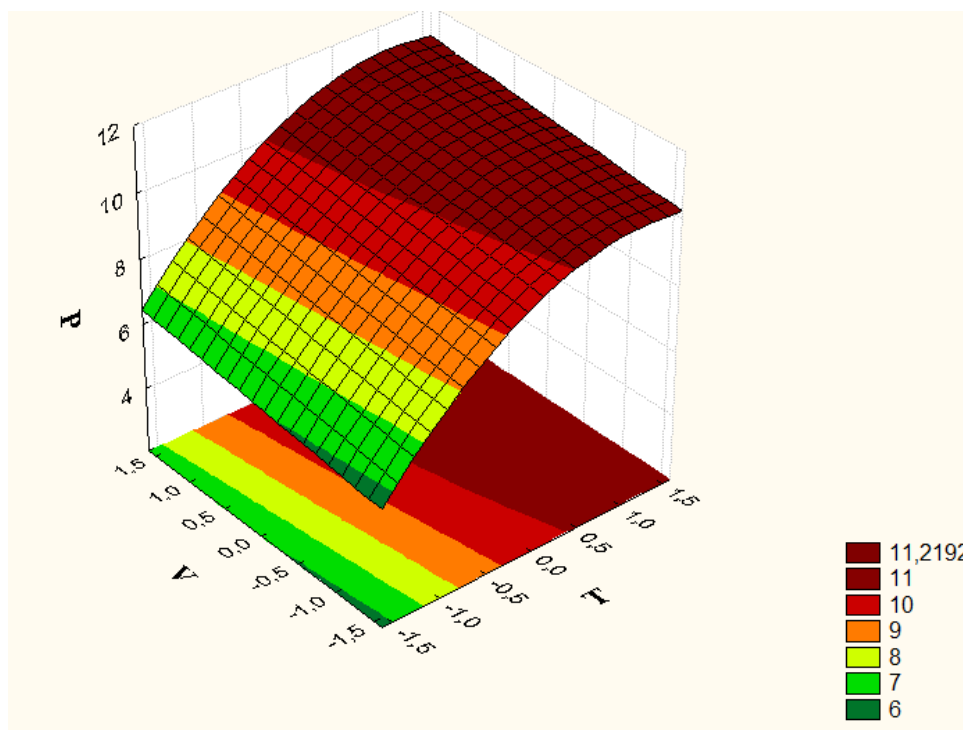


Figura 29 – Curva de nível para análise da vazão de ar e temperatura ($V \times T$).

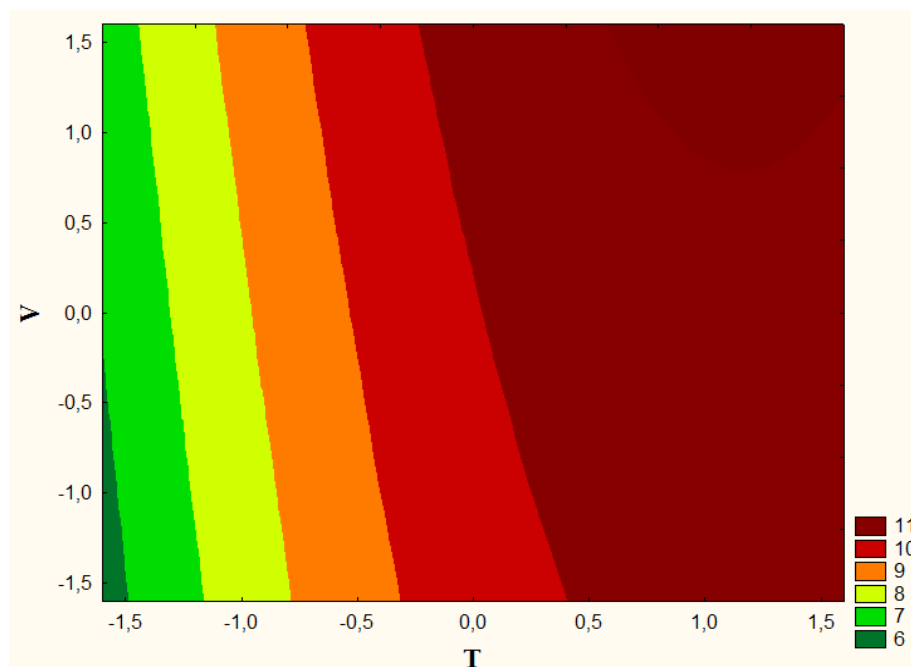


Figura 30 – Curva de nível para análise da vazão de ar e temperatura ($V \times T$).

Nas Figuras 25, 26, 29 e 30 pode-se observar que o aumento da temperatura aumenta a quantidade de tomate processado em um dia e o ponto de máximo se localiza, portanto, às altas temperaturas da faixa estudada.

Nas Figuras 29 e 30, é possível verificar que para variável codificada X_2 maior que 1 que representa a vazão de ar (V) maior que 5,3 kg /min, e a temperatura acima de 65 °C ($X_1 > 1$), a vazão passa a maximizar a quantidade diária de tomate processada. No entanto, para previsão da real região de máximo processamento de tomate diário em função da vazão de ar, é necessário análise das Figuras 27 e 28, que avaliam a quantidade de tomate processado em função da quantidade de tomate alimentado e a vazão de ar. Nestas figuras é possível concluir que para $X_3 > 1$, ou seja, quantidade de tomate alimentado ao secador (Q) maior que 3,5 kg, a vazão de ar que maximiza o processamento de tomate diário deve ser maior que 2,7 kg/min ($X_2 > -1$). Assim com a análise conjunta das Figuras 27, 28, 29 e 30 conclui-se que a faixa de vazão de ar (V) que maximiza o processamento diário de tomate deve ser para vazões acima de 5,3 kg/min de modo que valores maiores que 5,3 influenciam pouco na resposta do planejamento composto central, e seria necessária a análise econômica do processo para avaliar o quanto a vazão influencia no processamento de tomate diário (P), de modo a dar retorno financeiro maior que gasto energético.

Analisando-se as Figuras 25, 26, 27, e 28 em conjunto, verifica-se que o ponto de máximo processamento de tomate se localiza para Q maior que 3,5 kg de tomate alimentado ao secador, ($X_3 > 1$).

A localização do ponto de máximo foi feita com auxílio do *software* MAPLE 9.5, utilizando-se da biblioteca *Optimization*, com a função *Maximize*. O pacote *Optimization* é uma coleção de funções para resolução numérica de problemas de otimização, o qual envolve a maximização e minimização de uma função objetivo, que neste caso é o modelo dos dados experimentais. Uma das funções é a *Maximize* que encontra o ponto de máximo por processo iterativo, e é a que foi utilizada neste trabalho.

A rotina em MAPLE 9.5 é posta da seguinte maneira:

```
> restart;
> with(Optimization):
> Produtividade:=9.96052+2.85762*T-1.22713*T^2+0.51202*V+4.51365*Q-1.89960*Q^2+1.74337*T*Q;
      Produtividade:=9.96052+2.85762 T-1.22713 T^2+0.51202 V+4.51365 Q-1.89960 Q^2+1.74337 T Q
> Maximize(Produtividade, {T<=1.52, V<=1.52,Q<=1.52});
      [18.747005856000, [T=1.52000000000000000000, V=1.52000000000000000000, Q=1.52000000000000000000]]
```

O ponto crítico, ou seja, ponto de maximização do processamento diário de tomate pode ser visto na Tabela 14, com o valor já transformado para variáveis reais.

Tabela 14 – Ponto de máximo processamento diário de tomates.

P (kg/dia)	Q (kg)	V (kg/min)	T (°C)
18,747	4,025	6	67,6

Realizou-se um experimento no ponto crítico, que comprovou estar o modelo bem posto, já que se obteve um processamento diário de 19 kg/dia de tomate, mostrando que a quantidade de tomate produzida não é inferior ao modelo, e se aproxima muito do que o modelo reproduz.

Os tomates processados ocupavam inicialmente 19,28 kg/m² em cada bandeja, e comparado as novas tecnologias de secagem, este valor é bem superior, como pode-se comparar aos 8 kg/m² sugerido por Camargo (2003).

Na sequência foi feito a análise cinética de alguns experimentos do PCC, começando pelo ponto ótimo, e foram discutidas todas as características da curva de secagem e da cinética de secagem.

4.5. ANÁLISE DAS CURVAS DE SECAGEM

As curvas de secagem foram obtidas para todos os experimentos do planejamento composto central, e foi possível, então, fazer algumas comparações entre experimentos que tiveram variação somente para uma variável, o que possibilitou verificar o efeito individual de uma das variáveis na quantidade de tomate processada diariamente.

Para o ponto ótimo, que maximiza a quantidade de tomate processado, também foi estudada a curva de secagem, possibilitando analisar as etapas características do processo nesta região experimental do planejamento.

A curva de secagem dos tomates no secador de bandejas vibradas e com reciclo foi elaborada, como observado na seção 3.7, efetuando amostragem dos tomates no diâmetro médio de Sauter, também apresentado na seção 3.7.

4.5.1. CINÉTICA NO PONTO ÓTIMO

A condição de operação otimizada, em que se verificou o máximo de processamento diário de tomate para a faixa experimental estudada, foram usadas na desidratação parcial de

tomate cereja, até que os frutos atingissem 15% do conteúdo de água inicial, o que corresponde à 70,18% de umidade em base úmida ou 2,35 kg de água/kg de massa seca em base seca. Os resultados foram usados para elaboração da curva de secagem da Figura 31.

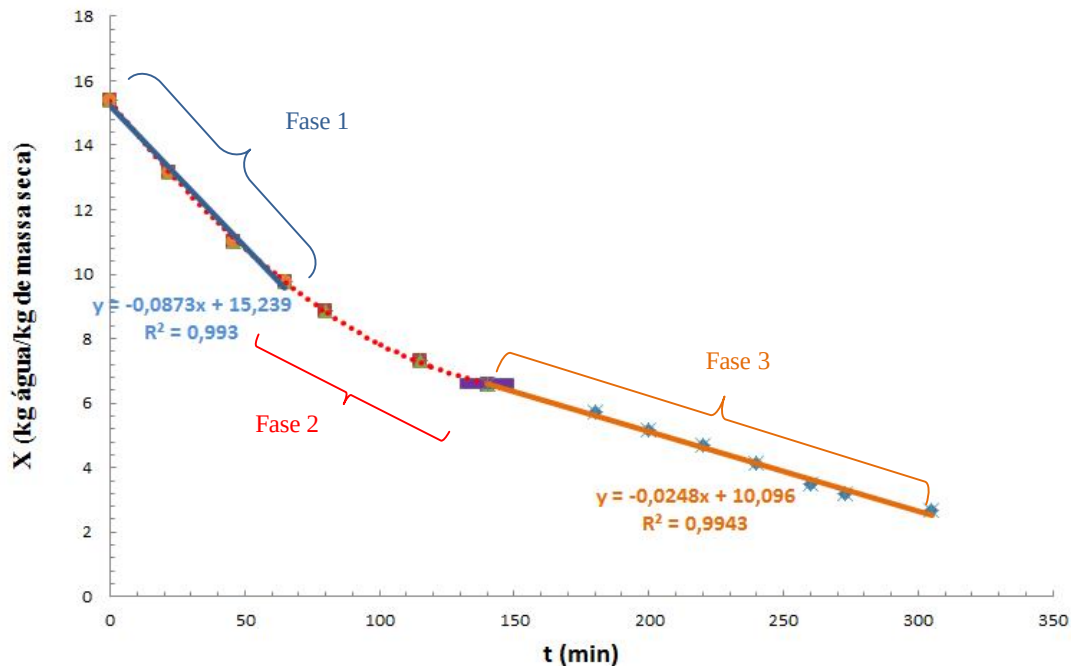


Figura 31 – Curva de secagem para as condições de operação otimizadas.

Percebe-se na análise da Figura 31 que existem três regiões de secagem com comportamento distinto, descritas como Fase 1, Fase 2 e Fase 3. Destas fases a Fase 1 e a Fase 3, mostram a ocorrência de taxa de secagem constante. Esta consideração se deve justamente aos coeficientes angulares das retas laranja e azul, serem constantes.

Como o secador opera inicialmente em batelada, é possível afirmar que durante a fase, denominada Fase 1, em que se tem excesso de água disponível na superfície, a taxa de secagem é constante, e isto pode ser analisado pelo coeficiente angular da reta para esta fase, que é de 0,087 (kg de água)/(massa seca . min). Ao final desta fase do processo, a água superficial começa a ficar escassa, e isto corresponde à condição em que a água contida nos poros se difunde para a superfície externa, por diferença de concentração e de pressão, e não é suficiente para manter a taxa de secagem constante, fazendo com que decresça. Esta diminuição da taxa de secagem é devida a pequena velocidade de difusão da água contida nos poros para superfície, o que diminui a taxa de secagem, proporcionando então uma nova fase para o processo, a qual ocorrerá a taxa variável e decrescente.

Esta fase em que a taxa de secagem se torna variável e decrescente, denominada Fase 2, o secador ainda opera em batelada, já que o tomate tinha muita umidade e isto impedia seu escoamento, pois o excesso de água fizeram que estrutura física do fruto se tornasse frágil e pegajosa. Nesta fase o leito fica compactado, aumentando a densidade bulk e diminuindo a porosidade, o que dificulta o escoamento apenas pela ação da vibração.

Devido às dificuldades de escoamento, foi determinado um estágio em que era possível alimentar ao sistema esferas de porcelana, que proporcionavam o escoamento do leito e consequentemente aumento da superfície de contato na percolação do ar de secagem através do leito. Assim com o uso das esferas de porcelana foi possível promover o escoamento dos tomates, o que garantia a recirculação do material no secador.

Quando as esferas de porcelana eram alimentadas e os frutos continham muita água, esta ação promovia a perda de massa no processo pela pressão resultante da compressão dos tomates. Para minimizar este efeito, foi acompanhada a modificação da estrutura física do fruto para que não fossem esmagados. Assim acompanhando a curva de secagem com os tomates amostrados nas cinco cestas apresentada na seção 3.7, que representavam os tomates no diâmetro médio de Sauter, verificou-se que quando os tomates atingiam a umidade em base seca de aproximadamente 6 kg de água/kg de massa seca, a perda de massa era reduzida consideravelmente e o escoamento acontecia perfeitamente com adição das esferas. Como pode ser visto ainda na Figura 31, existe um ponto roxo na curva cinética, em que representa o momento em que se atinge a umidade em base seca de 6 kg de água/kg de massa seca e se adicionam as esferas de porcelana ao secador.

A adição das esferas, o escoamento dos tomates e sua recirculação caracterizaram, então, a terceira fase de secagem, Fase 3, em que foi possível identificar em análise da curva de secagem, Figura 31, que novamente os tomates são secos a taxa constante. A taxa de secagem na Fase 3 é constante pois enquanto o tomate esta fora do secador, a água dos poros migra para superfície, por diferença de concentração, consequentemente, se tem água superficial evaporando e sendo incorporada ao ar a taxa constante.

Outra suposição para que o tomate seque na Fase 3 a taxa constante, é que nesta fase são adicionadas as esferas de porcelana, e por elas forçarem a deformação dos tomates o fruto fica submetido à pressão e o processo difusivo é acelerado, já que ocorre transferência em quantidade de movimento devido a um gradiente de pressão. Assim com água superficial disponível no fruto seca a taxa constante.

Para a representação da taxa de secagem e seu respectivo perfil, é possível se fazer a derivada em cada ponto da curva de secagem (Figura 31), e assim construir a curva para taxa de secagem. Na Figura 32 foi elaborado o gráfico que representa a taxa de secagem do tomate em função da umidade em base seca.

Analisando o gráfico da Figura 32 é possível confirmar que existem três fases de secagem, e que em duas a secagem ocorre a taxa constante, que são as Fases 1 e 3.

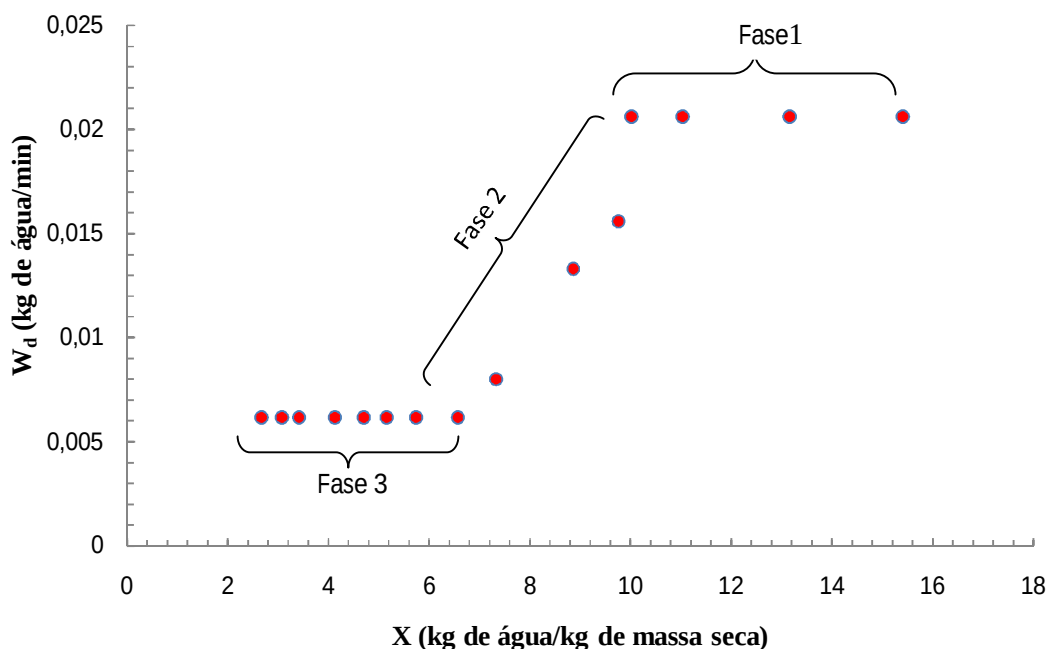


Figura 32 – Curva da taxa de secagem para as condições de operação otimizada.

O tempo total para secagem na condição otimizada foi de 305 min com uma capacidade de processamento diário de 19,00 kg de tomate/dia, confirmando a representatividade do modelo experimental.

4.5.2. EFEITO DA VARIÁVEL Q (QUANTIDADE DE TOMATE ALIMENTADO) NA CINÉTICA DE SECAGEM

Para avaliar o efeito da quantidade de tomate alimentado na secagem, foi comparado os Experimentos 5 e 6 do PCC, que usaram a mesma temperatura de 65 °C, a mesma vazão de ar de 2,7 kg/min e massa de 1,5 kg para o Experimento 5 e 3,5 kg para o Experimento 6, e pode ser analisada pela Figura 33.

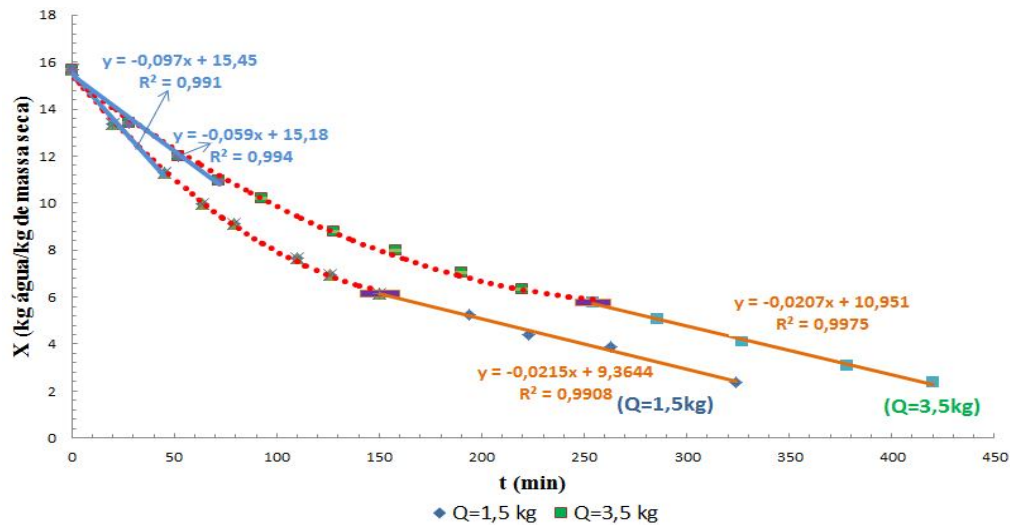


Figura 33 – Curvas de secagem operando em Q=5 kg e Q=3,5 kg de tomate por batelada.

Para uma massa maior de tomate alimentado, o tempo de secagem foi maior. Para que o tomate atingisse 15% do conteúdo de água inicial ou em base seca, 2,35 kg de água/kg de massa seca, como ponto final da secagem, necessitou-se um tempo de 324 min para Experimento 5 e 408 min para o Experimento 6.

Foi possível verificar que para mesma temperatura, mesma vazão de ar e diferente massa de tomate alimentada, a taxa de perda de água é constante no início, Fase 1, e no final do processo, Fase 3 de secagem do tomate cereja, como caracterizado nas condições otimizadas de processo.

Durante a secagem em batelada o leito de partículas tem uma superfície de secagem por unidade de massa diminuída, pois as camadas de partículas diminuem a área de secagem devido ao contato entre as partículas. Assim, o ar não escoia sobre toda superfície do tomate no leito e consequentemente evapora menos água. Para 1,5 kg de tomate alimentado a superfície de contato é maior e consequentemente, maior eliminação água por unidade de massa. No entanto, na Figura 34, pode-se observar que a taxa de secagem será maior para Q igual a 3,5 kg. Isto se deve a maior quantidade de água disponível para a secagem e não pela superfície de contato do leito, já que para 3,5 kg de tomate, os leitos formados têm maior contato entre as partículas.

Com a Figura 34, que representa a taxa de secagem em função da umidade em base seca, é possível verificar a existência das duas taxas constantes. A taxa de secagem para 3,5 kg de tomate foi superior durante todo o processo, visto que a quantidade de água disponível para evaporar é maior.

A taxa de secagem na Fase 1 para 3,5 kg de tomate alimentado foi de 0,013 kg de água/min, e para 1,5 kg foi de 0,09 kg de água/min.

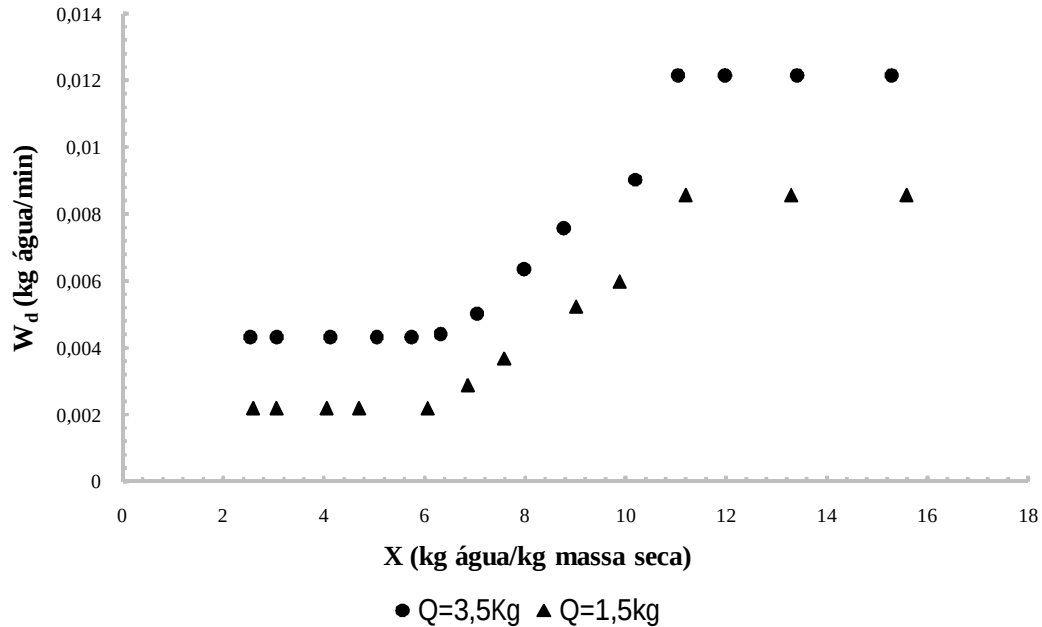


Figura 34 – Comparação da taxa de secagem entre os Experimentos 5 e 6.

A diferença entra a Fase 1 e a Fase 3 é que como existe menos água no tomate na Fase 3 a migração de água do interior para a superfície é menor, fator que influencia a diminuição da taxa.

4.5.3. EFEITO DA VAZÃO DE AR NA CINÉTICA DE SECAGEM

Para avaliar o efeito da vazão de ar (V) na cinética de secagem, foram comparados os experimentos 11,12 e 18 do PCC, que foram efetuadas à mesma temperatura de 60 °C, a mesma massa de tomate alimentada de 2,5 kg e as vazões de ar de 4 kg/min, 2 kg/min e 6 kg/min o que pode ser analisada pela Figura 35.

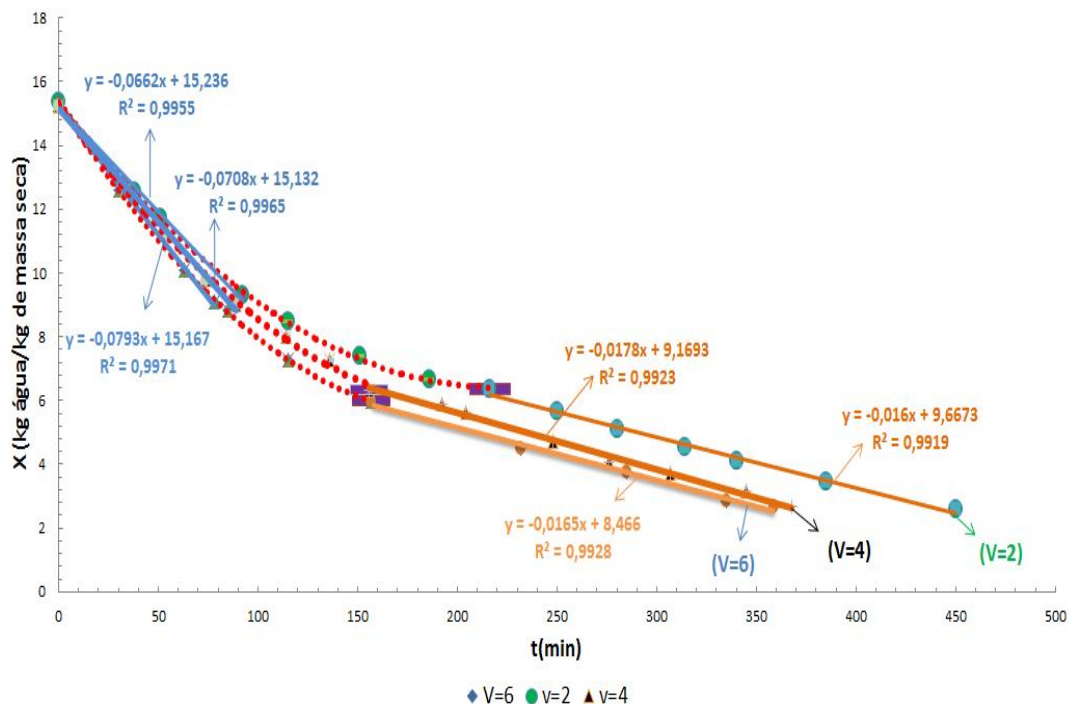


Figura 35 – Comparação das curvas de secagem entre Experimento 11,12 e 18.

Com base nas superfícies de respostas geradas pelo ajuste do modelo empírico, foi possível verificar que para a vazão de ar 6 kg/min, obteve-se a maior quantidade de tomate processada, condição otimizada. Pode-se visualizar no gráfico que o tempo gasto para a secagem a uma vazão de ar de 4 kg/min foi de 368 min, para as vazões de 6 kg/min foi de 359min e 2 kg/min em foi de 450 min.

A comparação destes experimentos reproduziu o ponto de máximo, em que curva de secagem para a vazão de 6 kg/min é a mais rápida.

Analizadas as taxas de secagem na Figura 36, é possível notar que as taxas de secagem na Fase 1, variam muito pouco em função da vazão de ar, com os valores variando entre 0,012 kg de água/min e 0,01 kg de água/min, no entanto elas influenciam e muito no tempo de secagem. Na Fase 3 de secagem, a diferença entre as taxas de secagem é quase imperceptível, isto se deve a grande resistência interna à transferência de massa. A taxa média de secagem é de 0,0025 kg água/min.

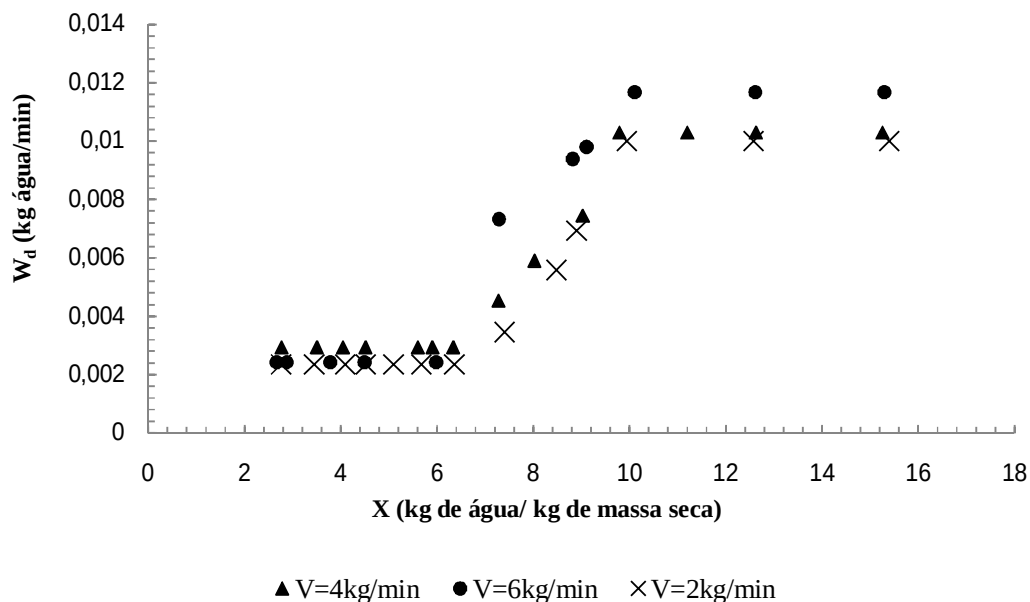


Figura 36 – Comparação da taxa de secagem entre os experimentos 11,12 e18.

4.5.4. EFEITO DA TEMPERATURA NA CINÉTICA DE SECAGEM

Para avaliar o efeito da temperatura na cinética de secagem, foram comparados os Experimentos 9 e 10 do PCC, que possuem a mesma vazão de ar de 4 kg/min, a mesma massa de tomate alimentada de 2,5 kg e as temperaturas de 60 °C e 52,4 °C, que pode ser analisada pela Figura 37.

Pode-se visualizar no gráfico que o tempo gasto para a secagem parcial do fruto a uma temperatura de 60 °C até atingir-se 15% do conteúdo de água inicial ou 2,35 em base seca foi de 350 min, enquanto para a temperatura de 52,4 °C o tempo gasto foi muito superior, em torno de 620 min, mostrando que a temperatura é a variável que mais influencia no tempo de secagem e consequentemente na capacidade de processamento diário de tomate.

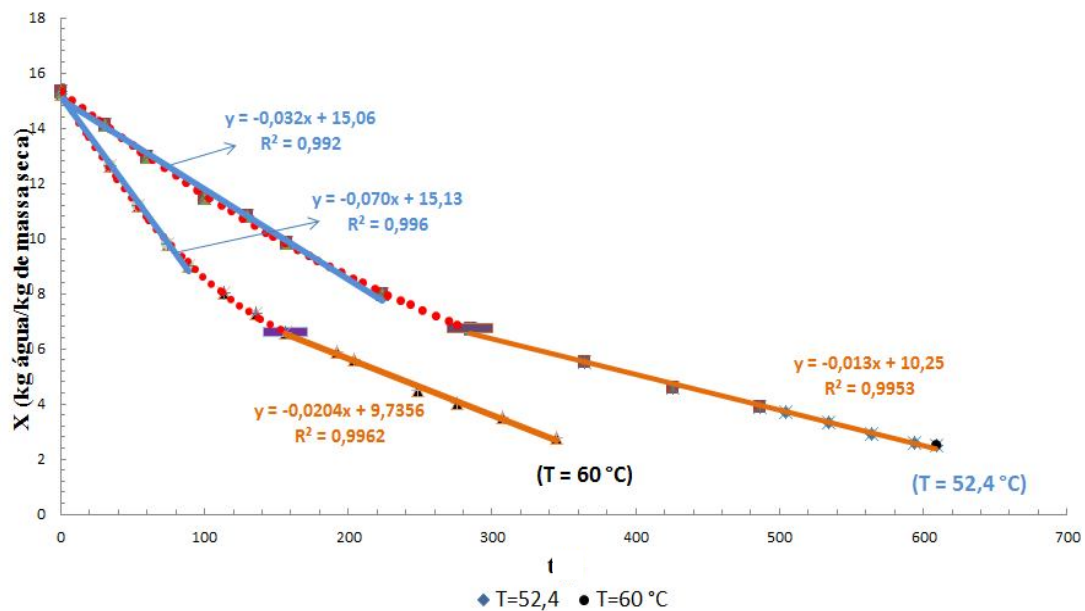


Figura 37 – Comparação da curva de secagem entre o Experimento 9 e 10.

Com o auxílio da Figura 37 foi possível concluir para o efeito da temperatura, que a Fase 2 do processo de secagem é muito rápida para ambas temperaturas. Para temperatura de $52,4^\circ\text{C}$ a Fase 1 é maior que a mesma fase a 60°C , e isto se deve à menor taxa de secagem à temperatura menor, que deixa o tomate com água superficial por um intervalo de tempo maior.

Na Figura 38, foi observado que a Fase 1, em que a taxa é constante, para ambas as temperaturas, de 60°C e $52,4^\circ\text{C}$, a umidade crítica para início da Fase 2 foi aproximadamente $6\text{ kg água/kg de massa seca}$, como descrito na secção 3.8, no entanto o início da Fase 2 ocorre em tempos distintos como pode ser visto na Figura 37, onde o início da Fase 2 se dá em 180 min para $52,4^\circ\text{C}$ e 90 min para 60°C .

Para comparar a taxa de secagem a 60°C e $52,4^\circ\text{C}$ na Fase 1, pode-se analisar a Figura 38, e a taxa de secagem são respectivamente $0,011\text{ kg de água/min}$ e $0,0045\text{ kg de água/min}$. Nesta análise percebe-se o quanto a temperatura influencia na secagem, sendo a variável com a maior variação da taxa de secagem para a Fase 1.

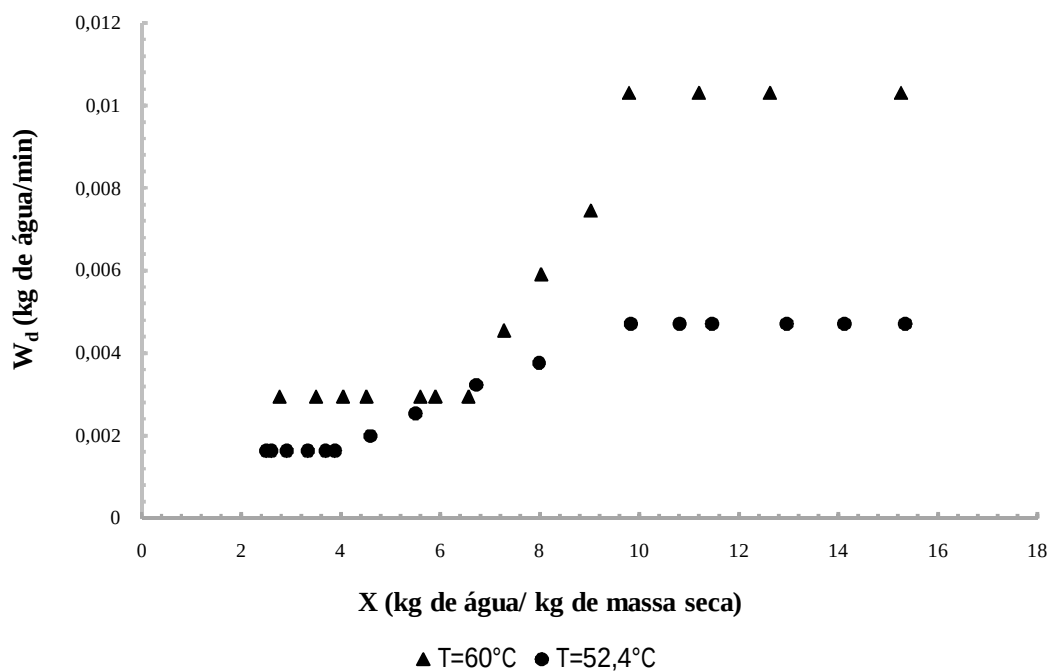


Figura 38 – Comparação da cinética de secagem entre Experimento 9 e 10.

Na Fase 3 de secagem a variação da taxa é menor, no entanto, o efeito da temperatura mostra uma taxa de secagem maior à temperatura de 60°C em relação à 52,4°C, sendo 0,003 kg água/min e 0,002 kg água/min respectivamente.

4.5.5. EFEITO DA VIBRAÇÃO NA CINÉTICA DE SECAGEM

Para quantificar o efeito da vibração no tempo de secagem, foram realizados dois experimento nas condições de operação otimizada, um com vibração (leito vibrado) e outro sem vibração (leito fixo). Somente a 4ª bandeja do secador foi utilizada, assim, a quantidade de tomate utilizada foi a do ponto ótimo dividido por quatro, ou seja, 1 kg aproximadamente. A temperatura foi de 67,6 °C e a vazão de ar de 6 kg/min.

A Figura 39 apresenta como resultado as curvas de secagem para sistema vibrado e sem vibração, e a Figura 40 a taxa de secagem também comparando sistema com vibração e sem vibração.

Na Figura 39, é possível identificar uma redução significativa no tempo de secagem do sistema vibrado, enquanto para o sistema vibrado gastou-se 275 min, sem vibração o tempo gasto foi de 390 min, garantindo uma redução no tempo de secagem de aproximadamente 30%.

Fica nítida a importância da vibração no processo de secagem, pois além de contribuir para o escoamento durante a Fase 3 do processo, também reduz o tempo de secagem e provavelmente o gasto energético do processo.

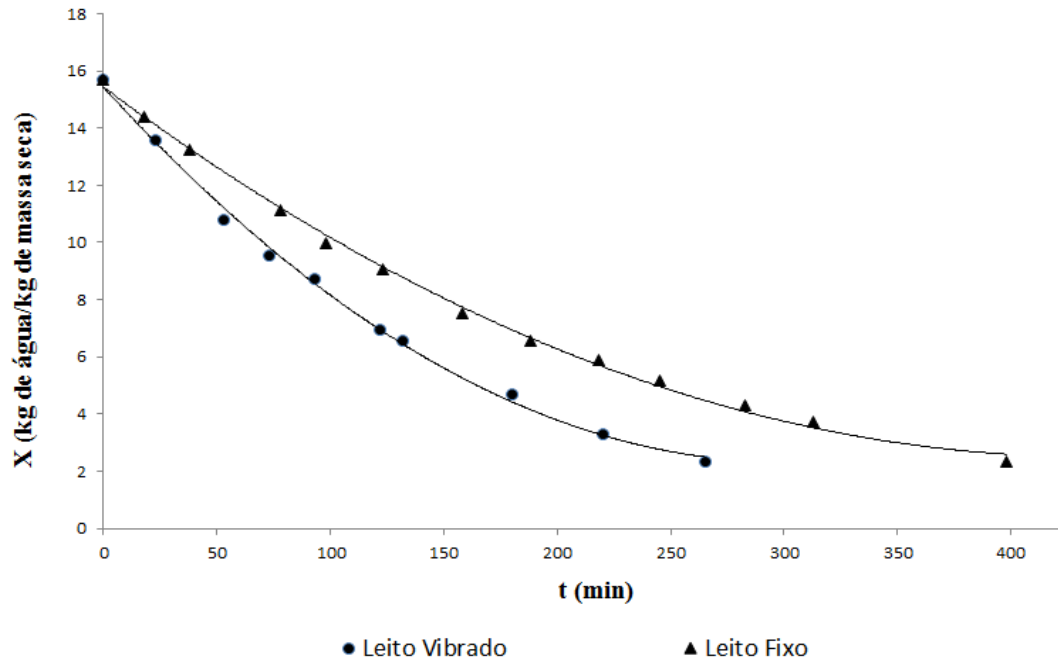


Figura 39 – Comparação das curvas de secagem entre leito fixo e leito vibrado.

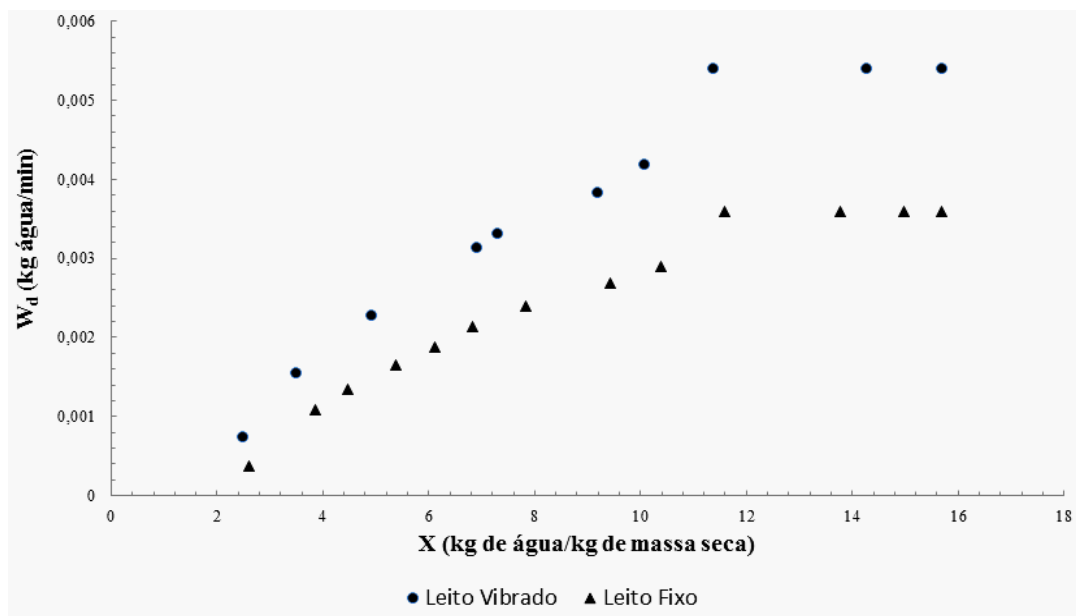


Figura 40 – Comparação das cinéticas de secagem entre leito fixo e leito vibrado.

Diferentemente das cinéticas anteriores não tivemos as três fases bem definidas, já que o processo ocorreu apenas em batelada, o que justifica esta diferença.

A taxa de secagem para o sistema sem vibração foi menor durante todo o processo, como pode ser visto na Figura 40. Foi possível verificar que a taxa de secagem constante também ocorre no início devido a evaporação da água na superfície, como o processo ocorre em batelada, foi possível perceber que não existe a Fase 3, e que o processo poderia ser ainda mais rápido com a recirculação pois a taxa não diminui, sendo constante a partir de certo ponto do processo em que se tem a adição das esferas de cerâmica.

De acordo com a Figura 40, verifica-se que a taxa de secagem inicial, que é constante, foi de 0,0054 kg de água/min para o sistema vibrado e 0,0036 kg de água/min para o sistema sem vibração.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com Muratoreet *al.* (2008), que estuda a desidratação parcial até 25% do conteúdo de água inicial do tomate cereja, para a temperatura de 40, 60 e 80°C em estufa de ar forçado G-Therm 075, o tempo gasto para desidratação parcial do tomate cereja cortado ao meio longitudinalmente, sem nenhum pré-tratamento a 80°C foi de 4 horas, para 60 °C de 9 horas e a 40 °C de 29 horas, enquanto para o presente trabalho a desidratação parcial do tomate cereja durou 4,16 horas com a temperatura de secagem em 67,6 °C, para 60 °C em torno de 4,7 horas e para 52,4 °C próximo de 8,4 horas.

As curvas de secagem como podem ser vistas na Figura 41, não apresentam as duas taxas de secagem constantes, já que este fenômeno é característico do secador de bandejas vibradas com reciclo, e as esferas de porcelana são provavelmente as responsáveis por este efeito.

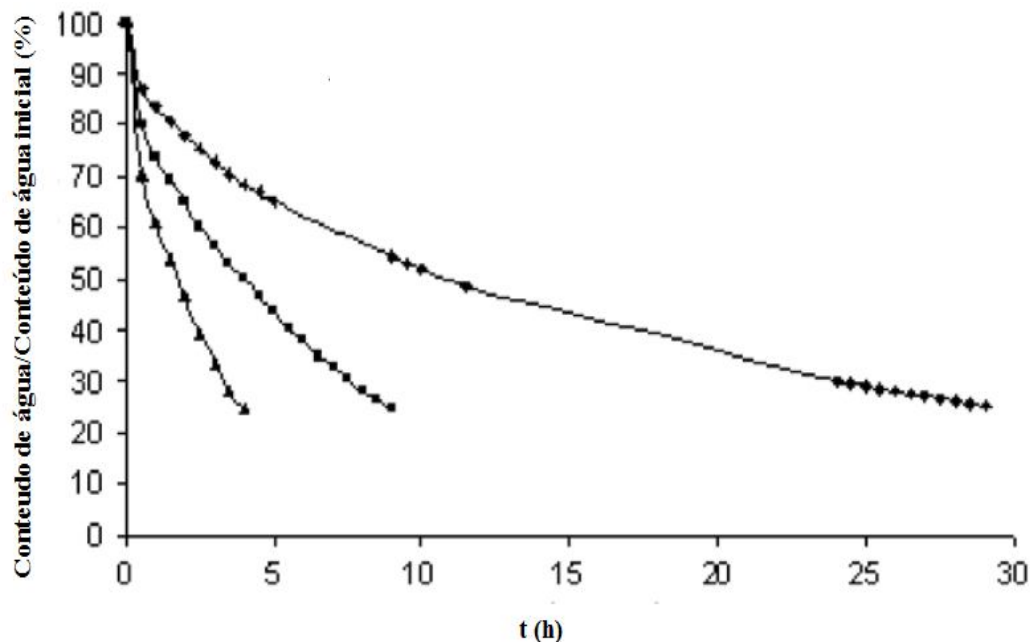


Figura 41 – Curva de secagem da desidratação de tomate cereja à temperatura de 40, 60 e 80 °C em estufa de ar forçado G-Therm 075 (Galli, Milão, Itália) com as seguintes características: poder calorífico, 1330 W, volume, 75 L; velocidade do ar forçado, 2000 rpm.

4.5.6. TOMATE CEREJA PARCIALMENTE DESIDRATADOS EM SECADOR DE BANDEJAS VIBRADAS COM RECICLO.

Os tomates processados no secador de bandejas vibradas com reciclo na condição otimizada de operação, não teve o foco de testes sensoriais, que poderá acrescentar muito aos trabalhos futuros. A Figura 42 ilustra o tomate cereja seco com umidade em base úmida de 70,18% ou em base seca de 2,35 kg água/kg massa seca, o que representa um produto parcialmente desidratado e com 15% do conteúdo de água inicial.



Figura 42 – Tomate cereja ovalado seco com umidade de 70,18% em base úmida.

CAPITULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Na desidratação parcial do tomate cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo foram observadas duas regiões com taxa de secagem constante. A primeira, denominada Fase 1 foi operada em batelada sem recirculação, e a segunda, denominada Fase 3, foi operada em batelada com recirculação.

A viabilidade em se operar o secador em batelada durante o período inicial, é devido a taxa de secagem inicial ser constante e maior comparado ao sistema com recirculação desde o início.

Devido a diminuição da taxa de secagem relacionada à escassez de água superficial no processo batelada, foi desenvolvido uma metodologia que resultou em uma taxa de secagem constante, caracterizada como Fase 3, isto se deve ao processo de recirculação, que é o tempo que o tomate percorre a esteira de fora do secador para posteriormente ser realimentado, e provavelmente possibilita a transferência da água dos poros para superfície por gradiente de concentração. Outro fator que deve influenciar na taxa de secagem constante é a adição de esferas de porcelana nesta Fase 3, que acelera a deformação do fruto favorecendo a difusão da água do interior do fruto para a superfície por diferença de pressão, além disso, existe um aumento da área superficial específica durante o processo de encolhimento, o que também contribui provavelmente para segunda taxa de secagem constante.

Para o planejamento composto central realizado no trabalho, concluiu-se estatisticamente que as condições ótimas de operação para o máximo processamento de tomate diário foi à temperatura de 67,6 °C, vazão de 6 kg/min e alimentação de tomate de 4,025 kg, tendo assim 18,747 kg de tomate processados/dia. Quanto à cinética de secagem, a temperatura e quantidade de tomate alimentada no processo foram as variáveis que mais afetaram individualmente o tempo de secagem, assim como a vibração que deve ser alvo de estudo detalhado em trabalhos futuros, já que a comparação feita neste trabalho mostra que para condição ótima de operação tem-se uma redução no tempo de desidratação parcial de aproximadamente 30%.

Como foi comprovado neste trabalho que o sistema vibrado diminui o tempo de secagem, seria muito interessante se tivéssemos um equipamento que operasse como uma esteira vibrada e perfurada para passagem de ar quente, assim o processo de recirculação seria facilitado, e não seriam necessárias as esferas de porcelana.

O sistema pode ser visto na Figura 43:

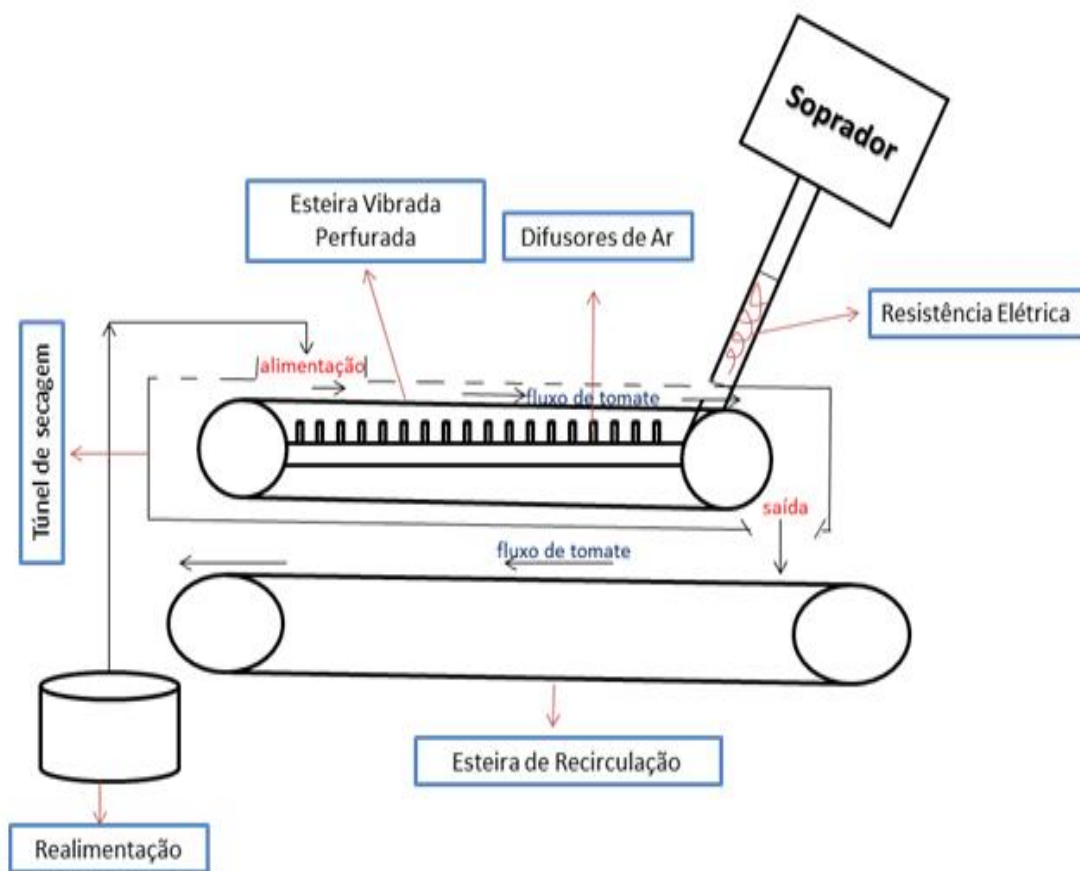


Figura 43 – Proposta de secador com correia transportadora vibrada.

O sistema de secagem proposto na Figura 43 tem o mesmo princípio do estudado no presente trabalho, em que propõe a secagem com descanso, ou recirculação como foi denominado. A vantagem deste novo secador proposto é a eliminação das esferas de porcelana que sobrecarrega as bandejas e são necessárias manutenções frequentes.

O novo secador seria composto de duas esteiras transportadoras vibradas e perfuradas, a primeira que é isolada em um túnel de secagem, que permite a alimentação e saída dos tomates, e tem a parte superior perfurada para saída do ar úmido. Acoplado a este sistema existiria em tubulação com difusores de ar conectada a um soprador.

Para promover a recirculação uma esteira girando em sentido oposto transportaria os tomates até um sistema de realimentação, que colocaria os tomates novamente em contato com o ar quente do túnel de secagem.

Para os próximos trabalhos, poderia ser efetuada a desidratação osmótica antes de efetuar-se a secagem, com posterior realização de análise sensorial para o tomate parcialmente desidratado.

Também seria interessante o estudo do tempo de prateleira do tomate parcialmente desidratado, monitorando-se o desenvolvimento de microrganismos, a cor, a concentração de ácido ascórbico, licopeno, β caroteno e atividade de água para controle das características organolépticas que garantem a qualidade do produto.

CAPITULO 6

BIBLIOGRAFIAS

ALESSI, E. S. Tomate seco obtido por energia solar e convencional a partir de mini-tomates congelados. 2010, 73 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos), Universidade de São Paulo.

AZEVEDO, V. M. Produção orgânica de tomateiro tipo “Cereja”: Comparação entre cultivares, espaçamentos e sistemas de condução da cultura. 2006, 79 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

BRITO, L., CASTRO, S. D. Expansão da produção de tomate industrial no Brasil e em Goiás. Boletim Conjuntural, 10 f., 16 ed., 2010.

CAMARGO, F. P; FILHO, W. P. C. Produção de tomate de mesa no Brasil, 1990-2006: contribuição da área e da produtividade. Horticultura Brasileira, 26, S1018-S1021, 2008.

CAMARGO, G. A. Novas tecnologias e pré-tratamento: Tomate seco embalado a vácuo. 2005, 175 f.. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas.

CAMARGO, G. A. Workshop Tomate na UNICAMP: Pesquisas e Tendências. 2003, Campinas, Brasil. Processo Produtivo de Tomate Seco: Novas Tecnologias Manual Técnico.

CARDOSO, C. S. B. Secagem de fatias de banana em leito vibro-fluidizado a altas temperaturas a curto tempo. 1998, 122 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas.

CARVALHO, H. H. C., CRUZ, F. T., WIEST, J. M. Atividade antibactericida em plantas como indicativo etnográfico condimentar em Porto Alegre, RS/Brasil. REV. BRAS. PL. MED., 7, 3, 25-32, 2005.

CARVALHO, J. L., PAGLIUCA, L. G. Tomate, um mercado que não para de crescer globalmente. Hortifriti Brasil, 6-14, 2007.

COSTA, E. V. Medidas da Umidade Relativa do Ar em um Ambiente Fechado. Revista Brasileira de Ensino de Física, 25, 3, 346-348, 2003.

FAOSTAT. Top production world. Food and agricultural commodities production, 2005.

Feagri- Unicamp, Diferentes grupos de tomate. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/tomates/consumidordicas1.htm>>. Campinas, São Paulo, Brasil. Acessado em 15 de novembro de 2010.

FERNANDES, C. Produtividade e qualidade dos frutos do tomateiro do grupo cereja cultivado em substratos à base de areia. 2005, 95 f.. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista.

FREITAS, A. O. Secagem de café em múltiplas bandejas vibradas com recirculação. 1998. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia.

GARTNER, C., STAHL, W., SIES, H. Lycopene is more bioavailable from tomato paste than from fresh tomatoes. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 66, p. 116–122, 1997.

HAWLADER, M.N.A., UDDIN, M.S., HO, A.B., TENG, A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 14, 259-268, 1991.

KARNOPP, L. M. Identificação de marcadores moleculares em populações de tomateiro resistentes a geminivírus. *Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento*, 30, 91-96, 2003.

LOPES, K. S. Avaliação da etapa de clarificação do óleo de soja através de planejamento composto central e investigação do potencial de melhoria energética no processamento da soja. 2008, 157 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Térmicos e Químicos), Universidade Federal do Paraná.

MACHADO, M. A. R., OLIVEIRA, G. R. M., PORTAS, C. A. M. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation. *Plant and Soil*, v. 255, p. 333-341, 2003.

MELO, P.C.T. A cadeia agro-industrial do tomate no Brasil: retrospectiva da década de 90 e cenários para o futuro. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 19, n. 02, 2001.

MELO, P.C.T. Retrospectiva da agroindústria do tomate no Brasil nos anos 90. *Horticultura Brasileira*, v.11, n.2, p.109-111, 1993.

MENEZES, E. A. Secador de bandejas vibradas aplicado à secagem de grão de café. 1996, 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia.

MERCALI, G. D. Estudo da transferência de massa na desidratação osmótica de banana (*Musa sapientum*, L.). 2009, 163 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MESQUITA, A. Cresce no país o consumo de tomate seco. Folha de São Paulo, 2001.

MINAMI, K., HAAG, H.P. O tomateiro. 2ª edição. Fundação Cargil, Campinas-SP, Brasil, 1989.

MIRANDA, K.E.S. Estudo de Parâmetros que Influenciam na Elaboração de Uva-passa. 1991, 153 f. Universidade Federal da Paraíba.

MORIS, V. A. S. Fluidodinâmica e secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado. 2002, 223 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas.

MURARI, R. C. D. L. Cinética da desidratação osmo-convectiva de tomates. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual Paulista.

MURATORE, G., RIZZO, V., LICCIARDELLO, F., MACCARONE, E. Partial dehydration of cherry tomato at different temperature, and nutritional quality of the products. Food Chemistry, v. 111, p. 887-891, 2008.

OLIVEIRA, J. A., BERGAMASCO, S. M. P. Workshop Tomate na UNICAMP: Perspectivas e Pesquisas. 2003, Campinas, Brasil. Aspectos Sócio-Econômicos da Cultura do Tomate de Mesa.

OLORUNDA, A.O., AWORH, O.C., ONUOHA, C.N. Upgrading quality of dried tomato: effects of drying methods, conditions and pre-drying treatments. Journal of the Science of Food and Agriculture, 52, 447-454, 1990.

Produção Agrícola Municipal (PAM). FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2004.

ROCHA, S. M. S. Avaliação da utilização de nitrato por cultura mista enriquecida com bactérias redutoras de sulfato (BRS) em efluente contendo sulfato. 2006, 89 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia química), Universidade Federal de Uberlândia.

ROMERO, L., MIGUEL, M.H., SPOGIS, N., KIECKBUSCH, T.G. Cinética de secagem de tomates em fatias pré-tratadas: resultados preliminares. XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2, 620-627, 1997.

SANTOS, E. M. Secagem de tomates inteiros submetidos a descascamento químico. 2008, 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

SEBRAE. Fábrica de Tomate seco. Idéias de Negócios, 2010, 42 f.

SFREDO, M. A. Secagem de café para obtenção de bebidas finas. 2002, 197 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia.

SFREDO, M. A. Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas. 2006, 136 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia.

SHI, J., LE MAGUER, M.L., WANG, S.L., LIPTAY, A., NIEKAMP, F. Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. *FoodResearchInternational*, 32, 15-21, 1999.

SILVA FILHO, E. D., COELHO, M. I. S., SANTANA, M. L. Desidratação osmótica do tomate (*Lycopersiconesculentum*) seguida de secagem. II CONNEPI, 2007.

SINGH, R.P., HELDMAN, D.R. Introduction to food engineering. 2ª edição. San Diego, Academic Press, 502, 1993.

STAHL, W., SIES, H.). Uptake of lycopene and its geometrical isomers is greater from heat-processed than from unprocessed tomato juice in humans. *Journal of Nutrition*, v.122, p. 2161–2166, 1992.

STRUMILLO, C.; KUDRAT. Drying kinetics. In: *Drying: principles, applications and design*. New York. Gordon and Breach Sci., v. 3, p. 68-98, 1986.

ZANONI, B., PERI, C., NANI, R., LAVELLI, V. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *FoodResearchInternational*, 31, 395-401, 1999.

APÊNDICE A

A.1. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM.

A elaboração das curvas de secagem e da cinética de secagem foi desenvolvida com os procedimentos de cálculos demonstrados a seguir.

A coleta dos dados cinéticos para as 5 amostras no diâmetro médio de Sauter, como apresentado na secção 3.7, esta representado na Tabela 15. Estes resultados são para exemplificar os cálculos envolvidos na construção da curva de secagem, por meio do Experimento 20 do PCC. Todas as curvas de secagem encontradas neste trabalho seguem esta metodologia de aquisição de dados.

Tabela 15 – Dados usados para construção da curva de secagem, em que t é o tempo que se amostrou, $m_{(t+cesta)}$ a massa do tomate e da cesta juntos e X a umidade em base seca.

$t(\text{min})$	$m_{(t+cesta)} (\text{kg})$	$X(\text{kg água/kg de massa seca})$
0	57,34	15,697
34	51,81	13,111
54	48,65	11,634
74	45,64	10,228
89	43,98	9,452
114	41,5	8,293
136	40,12	7,648
156	39,07	6,718
192	37,23	6,298
204	36,77	6,083
248	34,74	5,134
276	33,74	4,667
307	32,54	4,106
345	30,46	3,134
365	29,45	2,352

Como foram amostrados 5 tomates no diâmetro médio de Sauter e os tomates eram colocados nas cestas amostradoras, a pesagem dos 5 tomates mais as 5 cestas ($m_{(t+cesta)}$) era feita simultaneamente.

A $m_{(t+cesta)}$ é medida nos intervalos de tempos mostrados na primeira coluna da Tabela 15, assim é possível acompanhar quanto de água esta sendo perdida com o tempo, já que a variação da massa da cesta é somente água evaporada durante a secagem. Portanto, na coluna

2 da Tabela 15, a subtração de uma medida por outra é a quantidade de água que evaporou naquele intervalo de tempo.

A massa inicial dos 5 tomates amostrados no diâmetro médio de Sauter foi 35,69, para agilizar a amostragem pesava-se todas as cestas com os tomates, portanto, no início da operação os tomates amostrados com as cestas tinham $(m_{(t+cesta)})_i$ igual a 57,34 g, sendo a massa da cesta 21,65 g.

Como foi determinada experimentalmente a umidade em base úmida média do tomate *in natura*, que é 94,011%, calcula-se a quantidade de água inicial dos tomates amostrados pela Equação (20).

$$W = \frac{m_a}{m_u} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (20)$$

$$0,94011 = \frac{m_a}{35,69} \Rightarrow m_a = 33,552 \text{ g}$$

Com a massa de água inicial calculada, e a massa seca média de um tomate calculada no Capítulo 4, que é 0,428 g, é possível então determinar-se a umidade em base seca inicial (X), que é calculada com a Equação 21.

$$X = \frac{m_a}{m_s} \quad (21)$$

Como foi quantificada a massa de água inicial para 5 tomates, na Equação 21 a massa seca deve ser para os 5 tomates, portanto deve-se substituir na equação m_s igual à 2,14.

$$\text{Assim obtém-se: } X = \frac{33,552}{2,14} = 15,70 \text{ kg de água} / \text{kg de massa seca}$$

Partindo da umidade do tomate de 15,7 kg de água/kg de massa seca, a umidades em base seca do fruto é acompanhada nos intervalos de tempo da Tabela 15.

O calculo da umidade em base seca após um período de secagem foi feito com a quantificação da massa das cinco cestas com tomates, assim subtraindo-se a massa inicial da

massa medida naquele tempo, obtém-se a água que ainda resta no material, que dividida pela massa seca dos 5 frutos, 2,14, resulta na nova umidade.

Aplicando-se para o tempo de 204 min de operação tem-se:

$$(m_{(t+cesta)})_i - (m_{(t+cesta)})_{t=204\text{min}} = 57,34 - 36,77 = 20,57 \text{ g de água evaporada}$$

Como a umidade do material, consiste na água presente nele, subtrai-se da massa de água inicial, a massa de água evaporada, assim tem-se:

$$(m_a)_{t=204} = 33,59 - 20,57 = 13,02 \text{ g.}$$

Substituindo $(m_a)_{t=204}$ e m_s na Equação c, obtém-se a umidade em base seca do tomate naquele instante que é o valor encontrado na Tabela 15.

$$X = \frac{13,02}{2,14} = 6,084 \text{ kg de água / kg de massa seca}$$

Todos os valores apresentados na Tabela 15 são determinados a partir dos cálculos anteriores, em que é quantificando a massa das cestas nos intervalos de tempos determinados para se calcular a quantidade de água evaporada e a umidade em base seca do material.

Assim plotando-se a coluna 1, t (min), em função da coluna 3, X (kg de água/kg de massa seca), obtém-se a curva de secagem apresentada na Figura 44.

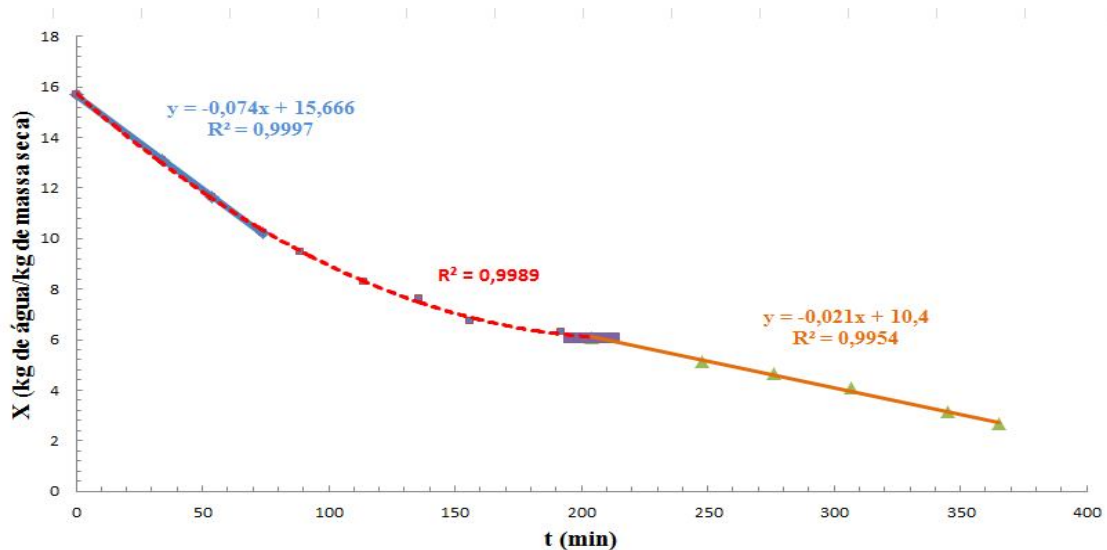


Figura 44 – Curava de secagem demonstrativa do Experimento 20

A quantidade de tomate processada diariamente (P) foi calculada considerando que não houve adição no tempo de higienização e preparo dos tomates para alimentação de uma batelada para outra.

Os cálculos para o exemplo do experimento 20, citado anteriormente, em que se tem aproximadamente 340 min de duração para que se atinja a 15 % do conteúdo de água inicial, pode ser demonstrado a seguir:

Em primeiro lugar converte-se minutos para horas, assim 365 min é igual à 6,08 horas. Na sequência determina-se quantas bateladas são feitas durante um dia sem intervalos de limpeza e preparo para alimentação do secador.

O número de bateladas diárias é calculado, então, dividindo-se 24 horas pelas 6,08 horas de uma batelada.

Assim P é a multiplicação do número de bateladas pela quantidade de tomate in natura processada, que no experimento 20 foi de 2,5kg.

$$\text{bateladas} = \frac{24 \text{ h}}{6,08 \text{ h/batelada}} = 3,94 \text{ bateladas}$$

$$P = 2,5 \times 3,943 = 9,86 \text{ kg/dia}$$

A.2. SECADOR

Algumas figuras que facilitam a vista dos compartimentos do secador são importantes para entendimento do processo.

- Esteira transportadora



Figura 45 – Esteira transportadora

- Soprador

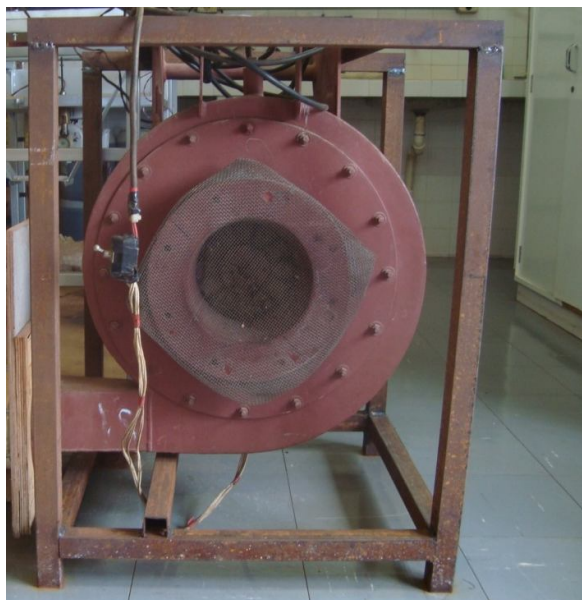


Figura 46– Soprador

- Tubulação de ar



Figura 47 – Tubulação de ar

- Medidor de vazão e placa de orifício



Figura 48 – Medidor de vazão

- Bandeja



Figura 49 – Bandeja

- Sistema de aquecimento de ar

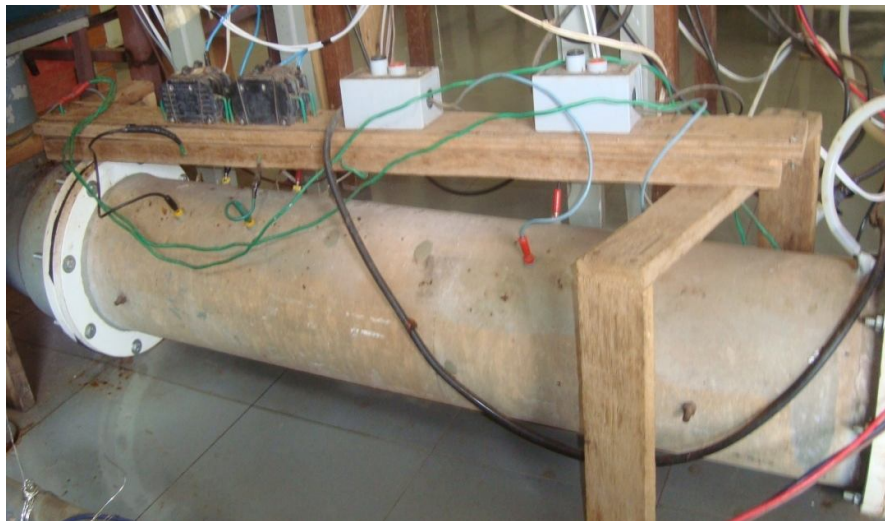


Figura 50 – Sistema de aquecimento de ar

A.3. DADOS CINÉTICOS.

Experimento 1	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
40,00	13,62
118,00	8,17
183,00	6,14
318,00	3,76
390,00	2,35

Experimento 2	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
30,00	13,31
60,00	11,39
89,00	10,12
110,00	9,22
140,00	7,99
187,00	6,63
205,00	6,20
250,00	5,95
302,00	5,18
323,00	4,98
352,00	4,78
392,00	4,20
430,00	3,87
503,00	3,12
540,00	2,95
604,00	2,35

Experimento 3	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
65,00	11,01
115,00	8,14
165,00	6,00
210,00	4,99
258,00	4,05
288,00	3,70
365,00	2,35

Experimento 4	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
90,00	11,77
192,00	8,96
292,00	7,20
412,00	5,51
515,00	3,83
585,00	2,35

Experimento 5	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
20,00	13,38
45,00	11,29
64,00	9,97
79,00	9,10
110,00	7,67
126,00	6,96
150,00	6,15
194,00	5,25
223,00	4,38
263,00	3,89
324,00	2,36

Experimento 6	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,66
28,00	13,61
52,00	11,97
65,00	11,03
93,00	10,19
128,00	8,77
158,00	7,98
190,00	7,04
220,00	6,32
254,00	5,74
286,00	5,06
327,00	4,13
378,00	3,06
420,00	2,35

Experimento 7	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
15,00	14,33
40,00	12,40
55,00	11,15
78,00	9,90
92,00	9,12
106,00	8,62
126,00	8,08
141,00	7,44
175,00	6,71
206,00	6,18
232,00	5,23
253,00	4,88
277,00	4,08
297,00	3,57
309,00	3,26
330,00	2,35

Experimento 8	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
32,00	13,12
60,00	11,29
80,00	10,02
110,00	9,12
158,00	7,59
195,00	6,53
216,00	6,10
246,00	5,43
278,00	4,69
313,00	4,03
332,00	3,41
369,00	2,35

Experimento 9	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
31,00	14,41
60,00	13,25
100,00	12,02
130,00	10,71
157,00	9,82
224,00	7,98
285,00	6,71
364,00	5,49
426,00	4,59
486,00	3,88
504,00	3,68
534,00	3,33
564,00	2,91
594,00	2,60
609,00	2,35

Experimento 10	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
30,00	12,07
55,00	9,79
98,00	7,32
148,00	5,70
200,00	4,65
248,00	4,01
280,00	3,35
300,00	3,01
320,00	2,55
330,00	2,35

Experimento 11	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
38,00	12,57
51,00	11,71
92,00	9,28
115,00	8,48
151,00	7,41
186,00	6,66
216,00	6,10
250,00	5,58
280,00	5,02
314,00	4,07
340,00	3,50
385,00	2,35

Experimento 12	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,66
30,00	12,61
63,00	10,10
78,00	9,10
85,00	8,81
115,00	7,28
157,00	5,98
232,00	4,49
285,00	3,78
335,00	2,87
359,00	2,35

Experimento 13	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
21,00	13,78
35,00	12,39
57,00	10,95
77,00	9,88
97,00	8,98
117,00	8,17
137,00	7,46
157,00	6,88
177,00	6,41
202,00	5,74
227,00	5,19
250,00	4,54
274,00	3,79
294,00	3,37
314,00	2,80
334,00	2,38
338,00	2,35

Experimento 14	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
25,00	14,10
50,00	12,32
70,00	10,42
110,00	8,90
140,00	8,01
190,00	7,01
250,00	6,19
318,00	5,40
366,00	4,95
389,00	4,33
440,00	3,73
477,00	3,01
522,00	2,35

Experimento 15	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,68
25,00	13,72
50,00	11,79
65,00	10,44
90,00	9,34
107,00	8,74
154,00	7,38
220,00	6,09
280,00	4,80
316,00	3,53
351,00	2,35

Experimento 16	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,68
30,00	13,05
50,00	11,62
70,00	10,21
85,00	9,45
110,00	8,45
132,00	7,70
152,00	6,85
188,00	6,32
200,00	6,02
244,00	4,93
272,00	4,46
303,00	3,83
355,00	2,35

Experimento 17	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,67
20,00	13,93
40,00	11,84
60,00	10,14
75,00	9,39
95,00	8,77
147,00	7,43
175,00	6,72
208,00	5,73
228,00	5,44
248,00	4,83
283,00	4,12
303,00	3,77
325,00	3,08
340,00	2,72
355,00	2,35

Experimento 18	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,68
20,00	13,85
45,00	11,82
70,00	10,24
80,00	9,64
100,00	8,74
125,00	7,98
171,00	6,75
206,00	5,85
236,00	5,32
251,00	4,85
368,00	2,35

Experimento 19	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,68
31,00	13,15
49,00	11,62
71,00	10,34
88,00	9,44
110,00	8,54
130,00	7,78
155,00	6,75
192,00	5,85
207,00	5,32
251,00	4,65
279,00	4,00
310,00	3,65
342,00	3,00
365,00	2,35

Experimento 20	
t (min)	X (kg de água/kg de massa seca)
0,00	15,69
34,00	13,11
54,00	11,63
74,00	10,23
89,00	9,43
114,00	8,29
138,00	7,66
158,00	6,72
192,00	6,30
204,00	6,08
248,00	5,13
276,00	4,67
307,00	4,11
345,00	3,13
365,00	2,35