

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS - FEA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS - DEA

SIMULAÇÃO, AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA E DE QUALIDADE DO PRODUTO EM SECADORES DE LEITO DESLIZANTE

Tatumi Kajiya
Mestre em Engenharia de Alimentos
AUTOR

Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegal
ORIENTADORA

Profa. Dra. Miriam Dupas Hubinger
CO-ORIENTADORA

PARECER

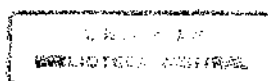
Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por TATUMI KAJIYAMA aprovada pela Comissão Julgadora em 06 de março de 1998.

Campinas, 06 de março de 1998.


Profa. Dra. FLORENCIA CECÍLIA
MENEHALI
Presidente da Banca

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos

CAMPINAS
1998



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

K123s Kajiya, Tatum
Simulação, avaliação e otimização energética e de
qualidade do produto em secadores de leito deslizante /
Tatum Kajiya. – Campinas: SP [s.n.], 1998.

Orientador: Florencia Cecilia Menegali
Co-orientador: Miriam Dupas Hubinger
Tese (doutorado)–Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Secagem. 2.Vitamina C. 3.Alimentos – Degradação.
4.Alimentos – Qualidade. I.Menegali, Florencia Cecilia.
II.Hubinger, Miriam Dupas. III.Universidade Estadual de
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. IV.Título.

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	Unicamp
K123s	
V.	
TELA	33924
PREÇO	395/98
	0 x
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	20/05/98
N.º CPD	

CM-00111254-4

ERRATA

Nas secções de agradecimentos e banca examinadora, o nome "**Domingos Biagi**" deve ser substituído por "**João Domingos Biagi**".

página 3 - Na secção II.A.1, quarta linha, a palavra "**sempre**" deve ser retirada do texto.

página 6 - Na figura II.2, na legenda número 7, a palavra "**concorrente**" deve ser substituída por "**contracorrente**".

página 17 - Nas linhas 12 e 16, a unidade "**Kcal**" deve ser substituída por "**kcal**".

página 45 - Na última coluna da tabela II.1, os valores devem ser invertidos na ordem de linha. Em vez da sequência 90; 60; 30; 15; 10; 7,5 a ordem correta é 7,5; 10; 15; 30; 60 e 90.

página 82 - As unidades das constantes K_a e K_{oa} devem ser substituídas de "**s⁻¹**" para "**min⁻¹**".

página 88 - No primeiro parágrafo, item 1, a expressão " **$R_{rec}=0,55$ e $R_{cc}=R_{ct}=191$** " deve ser substituída por " **$L_{ct}=27\text{cm}$, $R_{ct}=103$** ". No item 2, a expressão " **$R_{cc}=103$** " deve ser retirada do texto. No item 3, a expressão " **$R_{cc}=R_{ct}=144$** " deve ser substituída por " **$R_{ct}=103$** ".

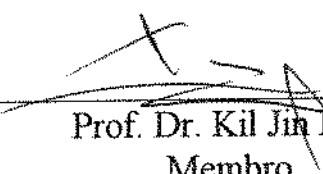
página 129 - Na sétima linha, deve ser acrescentada o trecho "**- comprimento na secção contracorrente (L_{ct}): 14cm a 28cm**".

página 164 - Na conclusão número 10, a última palavra da frase "**concorrente**" deve ser substituída por "**contracorrente**".

BANCA EXAMINADORA



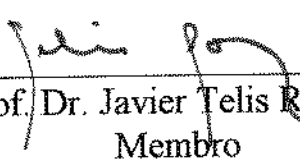
Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli
Orientadora



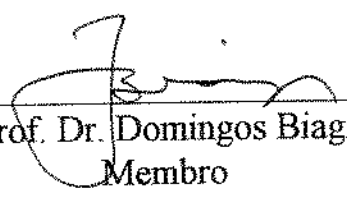
Prof. Dr. Kil Jin Park
Membro



Profa. Dra. Sandra dos Santos Rocha
Membro



Prof. Dr. Javier Telis Romero
Membro



Prof. Dr. Domingos Biagi
Membro

Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori
Membro

Prof. Dr. Luis Antonio Viotto
Membro

Campinas, _____ de _____ 1998.

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Florencia Cecilia Menegalli, pela segura orientação, enorme dedicação e sobretudo pela sua humildade que inspirou grande confiança.

À Profa. Dra. Mirian Dupas Hubinger, pela co-orientação.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos Professores integrantes da banca examinadora, Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, Dr. Kil Jin Park, Dra. Sandra dos Santos Rocha, Dr. Javier Telis Romero, Dr. Domingos Biagi e Dr. Luis Antonio Viotto, pela correção e sugestões apresentadas à versão inicial desta tese.

Ao Professor Dr. Roy Edward Bruns pela aula e esclarecimentos sobre o método de otimização por Superfície de Resposta.

À Creusa, Marli, Claudia, Geraldo, Toninho e Zé pelo apoio na biblioteca da FEA.

À Fátima e todos os funcionários do microcentro da FEA, pelo constante esclarecimento, apoio e uso do computador.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela cessão de instalações físicas, laboratório e funcionários.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Tatumi Kajiyama

NOMENCLATURA

A	área transversal da secção do secador, m^2 ;
$A_{o\text{referência}}$	constante cinética de PTS, K^{-1} ;
a_e	área específica do sólido, m^2/kg ;
a_w	atividade da água;
$a_{w\text{referência}}$	atividade da água de referência;
B	constante cinética de secagem do sólido, s^{-1} ;
B_o	constante cinética, s^{-1} ;
$B_{o\text{referência}}$	constante cinética de PTS, s^{-1} ;
B_n	constante cinética das equações que calculam a cinética de secagem nos i intervalos do secador, s^{-1} ;
B_x	sólidos solúveis, Brix $^{\circ}$;
C	constante de Guggenheim;
Ca	concentração de ácido ascórbico;
C_{p_p}	calor específico do sólido úmido à pressão constante, $kJ/kg.K$;
C_{p_g}	calor específico de gás à pressão constante, $kJ/kg.K$;
d_p	diâmetro da partícula, m ;
E	nível de escurecimento (densidade ótica), D.O a 420 nm;
E_A	energia de ativação, J/mol ;
E_{Aa}	energia de ativação da destruição de ácido ascórbico, J/mol ;
E_{Ab}	energia de ativação de escurecimento não-enzimático, J/mol ;
E_i	fatores ambientais;
$E.T.$	eficiência térmica;
F_i	fatores ambientais;
h	coeficiente convectivo de transferência de calor gás-sólido, $kJ/s.m^2\ ^{\circ}C$;
i	número de intervalos em que se divide o secador;
k	constante de monocamada;
K	constante da taxa na relação de destruição dos nutrientes;
K_o	fator de frequência;
K_{oa}	fator de frequência em destruição de ácido ascórbico;
K_a	constante da taxa de destruição de ácido ascórbico (s^{-1});
K_b	constante de taxa de escurecimento ($\Delta E_{420}/min.$);
Kb_{ref}	constante K_b à temperatura de T_{ref} ($\Delta E_{420}/min.$);
L	comprimento do leito, cm ;
L_{cc}	comprimento do secador concorrente, cm ;
L_{ct}	comprimento do secador contracorrente, cm ;
L_{total}	comprimento total do secador misto, cm ;
m	umidade;

N_u	número de Nusselt;
O_2	concentração de oxigênio;
P	pressão total do sistema e é igual a 94700 Pascal (pressão atmosférica);
P_r	número de Prandtl;
P_{ws}	pressão de saturação à temperatura do gás, P_a ;
PTS	proteína texturizada de soja;
R	constante universal de gases (1987 cal/mol.K);
$\underline{R}$	relação entre volume total do secador e volume do tanque agitado;
R_{cc}	razão entre a vazão de ar na secção concorrente e vazão de sólido;
R_{ct}	razão entre a vazão de ar na secção contracorrente e a vazão de sólido;
Re	número de Reynolds;
R_{rec}	razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador.
S_{cc}	secção concorrente do secador misto;
S_{ct}	secção contracorrente do secador misto;
t	tempo, minutos;
T	temperatura, K;
T_{medio}	temperatura média do sólido no secador, °C;
t_1	tempo em que o sólido sai da secção contracorrente e entra na secção concorrente, minuto;
T_{gabs}	temperatura absoluta do gás, K;
T_{gar}	temperatura de ar ambiente, °C;
T_{ge}	temperatura de entrada de ar no secador, °C;
T_{gfinal}	temperatura de ar na saída da secção concorrente do secador misto, °C;
T_{gm}	temperatura de ar de mistura entre o ar ambiente e de recirculação, °C;
T_{grec}	temperatura de ar do reciclo ou a temperatura de ar na saída da secção concorrente, °C;
t_m	tempo de residência médio;
T_p	temperatura da partícula, °C;
T_{p2}	temperatura do sólido na saída do secador contracorrente, °C;
T_{p3}	temperatura do sólido na saída do secador misto, °C;
T_{ref}	temperatura de referência (338 K);
u	relação entre volume do pistão por volume total do secador;
$VitC$	concentração do ácido ascórbico, mg/100g _{s.s} ;
X	umidade do sólido, kg _{água} /kg _{s.s} ;
X_1	umidade do sólido na entrada do secador, kg _{água} /kg _{s.s} ;

X_2	umidade do sólido na saída da secção contracorrente do secador misto, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$;
X_3	umidade do sólido na saída do secador misto, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$;
X_a	fração de água;
X_e	teor de umidade de equilíbrio, base seca;
X_f	umidade final do sólido na saída do secador, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$;
X_g	fração de gordura;
X_m	umidade de monocamada;
X_s	fração de sólido;
Y	umidade absoluta de ar, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
Y_3	teor de umidade de ar na saída da secção concorrente do secador misto, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
Y_4	teor de umidade de ar no topo do secador misto, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{arseco}}$;
Y_{ar}	teor de umidade de ar ambiente, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
Y_m	teor de umidade de ar de mistura, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
Y_{rec}	teor de umidade de ar de reciclo, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
W_a	vazão mássica de água evaporada da proteína texturizada de soja, kg/s ;
W_{cc}	vazão de ar no secador concorrente, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_{ct}	vazão de ar no secador contracorrente, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_g	vazão de gás, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_{gar}	vazão de ar ambiente, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_{gm}	vazão mássica de ar de mistura do secador (ar ambiente mais o ar de recirculação) $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_{grec}	vazão de ar de reciclo, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
W_s	vazão do sólido, $\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{s}$.

LETRAS GREGAS

ε	porosidade do leito;
λ	calor latente de vaporização, $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{água}}$;
ρ_s	densidade aparente do leito em kg/m^3 ;
ΔE	energia de ativação;
ΔH	entalpia de vaporização da água na temperatura de secagem a T_g .

RESUMO

Este trabalho objetivou simular e avaliar o desempenho de secadores de leito deslizante concorrente, contracorrente e misto. Para tanto, foi melhorado e utilizado o “software” desenvolvido por HUBINGER (1994). As avaliações foram feitas em nível de consumo energético e preservação de qualidade do produto final seco. Estudaram-se como índice de qualidade as perdas de ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático.

As pesquisas foram feitas em 4 etapas e são apresentadas nos capítulos de II a V desta tese.

Em primeiro plano, no capítulo II, estão apresentados o estudo da simulação, desempenho e otimização energética de um secador misto. A secagem foi simulada com proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 da Nutrimental. É uma pesquisa que deu continuidade aos trabalhos de TELIS (1988), TELIS & MENEGALLI (1988), HUBINGER (1994), HUBINGER & MENEGALLI (1989, 1992a, 1992b, 1993, 1994). Dos estudos realizados concluiu-se que a eficiência térmica no secador é máxima quando os valores adotados da temperatura de entrada de ar no secador e a vazão de ar na secção contracorrente são menores e o comprimento na secção contracorrente é máxima dentro das faixas de condições de operação estudadas.

A exposição do capítulo III é o resultado do estudo enfocado na influência da cinética de secagem sobre a eficiência energética. O secador neste item foi misto e o produto, proteína texturizada de soja. Foi estudada também a influência da taxa de secagem sobre o tamanho do secador. O estudo mostrou que a eficiência térmica do processo independe da natureza do sólido, ou seja de sua cinética de secagem mantidos a vazão de sólido e o grau de secagem para condições operacionais fixas desde que varie o comprimento do secador proporcionalmente a esta nova constante cinética.

Nos capítulos IV e V estão apresentados os estudos de 3 tipos de secadores, tendo como produto um “alimento-modelo”. Estudaram-se a destruição de ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático. Comparou-se o desempenho dos secadores em termos de perdas de qualidade e energia térmica. As degradações do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático são menores para as temperaturas de entrada de ar e vazões de ar no secador mais baixas e independem das vazões de ar de reciclo nos três tipos de secadores estudados. O secador concorrente apresentou os melhores índices de retenção de qualidade e o contracorrente a pior performanse nesse sentido. O secador misto apresentou nas condições ótimas de operação, melhor desempenho na eficiência térmica, desempenho próximo ao de secador

concorrente nas perdas de ácido ascórbico, desempenho intermediário no escurecimento não-enzimático entre concorrente e contracorrente. A produtividade do secador misto foi **1,85 vezes** maior que os concorrente e contracorrente. Tem a desvantagem do sistema ser mais complexo na construção que concorrente e contracorrente.

SUMMARY

The subject of the present research is to simulate and evaluate the performance of moving bed dryers with the following flow configurations: counter-current, concurrent and mixed flow. Operation conditions consisted of different inlet air temperatures, air recycle ratio, air flow rate and length of the dryer.

The research is presented in 4 parts, from Chapter II to V of this thesis.

Firstly in Chapter II, simulation, performance and energy optimization of mixed flow dryer are presented. The drying was simulated for texturized soybean protein.

The study of drying kinetic influence over energy efficiency has been presented in Chapter III, as well as the influence over the size of the dryer.

Three kinds of dryers are presented in Chapter IV and V, having as a product a "model" food. Ascorbic acid destruction and browning have been studied and the performance of dryers concerning quality indexes and thermal energy have also been compared.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO..... 1

CAPÍTULO II

II - SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE SECADORES DE LEITO DESLIZANTE MISTO (CONTRA MAIS CONCORRENTE) COM RECICLO DE AR NA SECÇÃO CONCORRENTE.....	3
II.A - Revisão de literatura	3
II.A.1 - Secadores de leitos deslizantes.....	3
II.A.1.1 - Secadores contracorrentes e concorrentes.....	4
II.A.1.2 - Secadores de fluxos cruzados.....	8
II.A.1.3 - Secadores de leito deslizante e recirculação pneumática.....	11
II.A.2 - Otimização de secadores de alimentos.....	12
II.B - Material e métodos.....	14
II.B.1 - Material.....	14
II.B.1.1 - Matéria-prima.....	14
II.B.1.2 - Equipamentos.....	14
II.B.2 - Métodos.....	16
II.B.2.1 - Simulação de secador misto.....	16
II.B.2.2 - Propriedades físicas da proteína texturizada de soja.....	20
II.B.2.3 - Eficiência térmica (E.T.).....	24
II.B.2.4 - Métodos numéricos.....	25
II.B.2.5 - Otimização energética.....	25
II.C - Resultados, análise e discussão.....	28
II.C.1 - Análise do desempenho de um secador de leito deslizante misto.....	28
II.C.2 - Otimização energética de um secador de leito deslizante misto.....	35
II.D - Conclusões.....	41

CAPÍTULO III

III – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINÉTICA DE SECAGEM NO TEMPO DE RESIDÊNCIA E NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM SECADOR DE LEITO DESLIZANTE MISTO (CONTRACORRENTE MAIS CONCORRENTE).....	42
III.A - Introdução	42
III.B - Material e métodos	42
III.B.1 - Material.....	42
III.B.1.1 - Equipamentos.....	42
III.B.2 - Métodos.....	43
III.B.3 - Valores adotados de constante cinética B.....	43
III.C - Resultados, análises e discussões	46
III.C.1 - Influências das constantes cinéticas sobre o tempo de residência do sólido.....	46
III.C.2 - Influência da constante cinética sobre a eficiência térmica.....	49
III.D - Conclusões	54

CAPÍTULO IV

IV – ESTUDO DA CINÉTICA DA DEGRADAÇÃO DE QUALIDADE DURANTE A SECAGEM EM SECADORES DE LEITO DESLIZANTE CONCORRENTE, CONTRACORRENTE E MISTO....	55
IV.A - Revisão bibliográfica	56
IV.A.1 - Qualidade de alimentos na secagem.....	56
IV.A.2 - Classificação da degradação na qualidade do produto durante o processo de secagem.....	57
IV.A.3 - Ácido ascórbico (vitamina C).....	60
IV.A.4 - Escurecimento não-enzimático.....	62
IV.A.5 - Fundamentos da modelagem na determinação de qualidade de alimentos durante o processamento e estocagem.....	63
IV.A.5.1 - Modelos relacionando os efeitos de temperatura.....	64
IV.A.5.2 - Modelos relacionando os efeitos da	

concentração.....	66
IV.A.5.3 - Modelos relacionando os efeitos da umidade e atividade da água.....	67
IV.A.5.4 - Modelos relacionados aos efeitos da concentração de oxigênio.....	68
IV.A.5.5 - Modelos relacionados a vários efeitos simultaneamente (modelos mistos)....	69
IV.A.6 - Modelagem cinética da degradação do ácido ascórbico..	70
IV.A.7 - Modelagem cinética de escurecimento não-enzimático..	72
IV.A.8 - Limite de aceitação de qualidade ("constraint").....	78
IV.B.- Modelagem	80
IV.B.1 - "Alimento-modelo".....	80
IV.B.1.1 - Cinética de secagem do "alimento-modelo"..	80
IV.B.1.2 - Cinética de destruição de ácido ascórbico de "alimento-modelo".....	81
IV.B.1.3 - Cinética de escurecimento não-enzimático do "alimento-modelo".....	83
IV.B.2 - Material e métodos.....	85
IV.B.2.1 - Métodos numéricos.....	89
IV.C - Resultados, análise e discussão	90
IV.C.1 - Secador concorrente.....	90
IV.C.1.1 - Influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}).....	90
IV.C.1.2 - Influência do reciclo (R_{rec}).....	94
IV.C.1.3 - Influência da vazão de ar (R_{cc}).....	97
IV.C.2 - Secador contracorrente.....	101
IV.C.2.1 - Influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}).....	101
IV.C.2.2 - Influência do reciclo (R_{rec}).....	104
IV.C.2.3 - Influência da vazão de ar (R_{ct}).....	107
IV.C.3 - Secador misto.....	110
IV.C.3.1 - Influência de temperatura de entrada de ar (T_{ge}).....	110
IV.C.3.2 - Influência da vazão de ar na secção contracorrente do secador misto (R_{ct}).....	113
IV.C.3.3 - Influência do comprimento da secção contracorrente do secador misto (L_{ct}).....	117
IV.C.4 - Comparação da degradação de ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático entre os secadores de leite deslizante concorrente, contracorrente e misto.	121
IV.D - Conclusões	126

CAPÍTULO V

V - OTIMIZAÇÃO DOS SECADORES EM RELAÇÃO À QUALIDADE E A EFICIÊNCIA TÉRMICA.....	128
V.A - Material e métodos	128
V.A.1 - Material.....	128
V.A.2 - Métodos.....	129
V.B - Resultados, análise e discussão	129
V.B.1 - Secador concorrente.....	129
V.B.1.1 - Estudo da degradação de vitamina C (vitC).....	129
V.B.1.2 - Estudo do aumento de escurecimento não-enzimático (E).....	132
V.B.1.3 - Estudo da eficiência térmica (E.T.).....	135
V.B.1.4 - Comparação das condições de operações ótimas do secador concorrente entre as perdas de qualidades e a eficiência térmica.....	138
V.B.2 - Secador contracorrente.....	140
V.B.2.1 - Estudo da degradação de vitamina C (vit.C).....	140
V.B.2.2 - Estudo de aumento de escurecimento não-enzimático (E).....	143
V.B.2.3 - Estudo da eficiência térmica (E.T.).....	145
V.B.2.4 - Comparação das condições de operações ótimas entre a eficiência térmica e perdas de qualidade.....	148
V.B.3 - Secador misto.....	150
V.B.3.1 - Estudo da degradação de vitamina C (vitC).....	151
V.B.3.2 - Estudo de aumento de escurecimento não-enzimático (E).....	154
V.B.3.3 - Estudo da eficiência térmica (E.T.).....	156
V.B.3.4 - Comparação das condições de operação ótimas entre a eficiência térmica e perdas de qualidade.....	158
V.B.4 - Comparação dos secadores de leito deslizante entre concorrente, contracorrente e misto.....	159
V.C - Conclusões	163
VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
Anexo A.....	177
Anexo B.....	178
Anexo C.....	179

Capítulo I

INTRODUÇÃO

A secagem é uma etapa importante no processamento de um alimento. É responsável por uma boa parcela do consumo energético do setor alimentar e do industrial em geral, por ser altamente intensiva no uso de energia térmica. Aliados a este último fato, em geral, os secadores industriais trabalham com eficiências térmicas baixas. Assim, o consumo de energia pode ser reduzido já que na maioria dos processos trabalha-se fora das condições ótimas de operação.

Um segundo aspecto a considerar, além do consumo energético, e que tem importância maior, é a qualidade final do alimento seco. O nível de umidade final necessário para conservação do alimento é geralmente baixo. É objetivo da secagem reduzir o conteúdo de água preservando a qualidade nutricional e em geral as características físicas e organolépticas do produto fresco. Para que o tempo de residência do sólido e/ou comprimento do secador não sejam muito longos, é aconselhável trabalhar a temperaturas altas. Entretanto, a maioria das reações de degradação ocorrem quando o alimento está na etapa final da secagem e estas reações dependem fortemente da temperatura, sendo muito aceleradas na medida em que o produto se aquece.

Pode-se considerar conseqüentemente duas funções objetivas em relação à otimização de um processo de secagem: uma redução de custo operacional, basicamente consumo de energia e a maximização da qualidade final do produto. Estas duas respostas do sistema são funções de diversas variáveis operacionais como: tipo de secador, tipo de contato sólido-gás, esquema de distribuição do ar dentro do secador, temperatura do gás e perfil de temperatura dentro do secador, conseqüentemente temperatura do sólido, vazão de gás e sólido, etc.

Dando continuidade à tese desenvolvida por HUBINGER (1994), é objetivo desta tese analisar e otimizar secadores de leite deslizante, considerando a eficiência energética e a degradação de qualidade.

Para uma melhor compreensão do tema, o presente trabalho foi dividido em capítulos com a seguinte temática: no capítulo II, se apresentam a simulação e a otimização energética de secadores de leite deslizante. HUBINGER (1994) discutiu a otimização energética e a exergética de secadores de leite deslizante concorrente, contracorrente e misto para proteína texturizada de soja (PTS).

Neste trabalho analisou-se com mais detalhe, através do método de superfície de resposta, a eficiência térmica de um secador deslizante contracorrente associado em série com um leite concorrente com reciclo de ar, também trabalhando com proteína texturizada de soja. No capítulo III, foi avaliado o efeito da mudança do produto sobre a eficiência térmica. Ou seja,

como se modificam as condições operacionais ótimas em relação à eficiência térmica, quando se muda a cinética de secagem em consequência de troca do tipo de produto, ou diâmetro de partícula ou qualquer outra mudança que implique em alteração da taxa de secagem.

No capítulo IV, estudou-se a degradação de qualidade de um “alimento-modelo” de alto conteúdo de água em função das variáveis operacionais para secadores de leito deslizante contracorrente, concorrente e de leito misto. A degradação foi acompanhada através da quantificação da perda de vitamina C e escurecimento não-enzimático, simulados através de alguns modelos disponíveis na literatura.

Por último, no capítulo V são analisados, por meio de superfície de resposta, a eficiência térmica, o conteúdo final de vitamina C e o escurecimento não-enzimático do produto, para os diversos secadores. Procuram-se as condições operacionais ótimas maximizando a eficiência térmica e minimizando a degradação para cada tipo de configuração de escoamento. Para finalizar, os três tipos de secadores são comparados em relação às funções objetivas fixadas.

Capítulo II

II - SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE SECADORES DE LEITO DESLIZANTE MISTO (CONTRA MAIS CONCORRENTE) COM RECICLO DE AR NA SECÇÃO CONCORRENTE

O trabalho anterior desenvolvido por HUBINGER (1994) tratou da análise energética e exergética de secadores de leito deslizante em concorrente, contracorrente e secador misto. Neste último caso, a análise não foi completa. HUBINGER (1994) estudou apenas o caso onde o reciclo de ar sempre permanecia de 50%, e o valor da vazão de ar de entrada no secador era sempre repartida igualmente para secção contracorrente e concorrente. Além disso o programa não simulava o sistema acoplado e a simulação era feita separadamente. Também não foi feita a otimização da eficiência térmica. É objetivo deste capítulo a análise e a otimização energética em função das condições operacionais não avaliadas de um secador misto, ou seja, em leito contracorrente em série com um leito concorrente, ainda com reciclo de ar.

II.A - REVISÃO DE LITERATURA

II.A.1 - SECADORES DE LEITOS DESLIZANTES

Os secadores convectivos podem ser divididos em duas categorias segundo o escoamento do sólido, em batelada e contínuo. Os secadores em batelada se caracterizam pelo fato de que o material é seco, tanto em camadas finas como em leito de vários metros de profundidade, sempre em estado não estacionário. Entre os secadores contínuos, ou seja, com alimentação de sólido permanente, temos aqueles em que o sólido se movimenta no secador por gravidade. São denominados, em geral, secadores de leito deslizante. Os secadores de leito deslizante são classificados de acordo com as direções relativas de fluxo de ar e material. Existem três tipos clássicos de secadores de leito deslizante: contracorrente, concorrente e fluxos cruzados.

Os secadores de leito deslizante ou móvel começaram a aparecer com maior ênfase na última década, desenvolvidos para alimentos e resíduos da indústria de alimentos (HUBINGER, 1994).

Na indústria de alimentos é comum o uso de secadores de bandeja para materiais picados e secadores de esteira. Estes secadores são de alto custo e os leitos deslizantes aparecem como uma alternativa muito boa. Os secadores deslizantes parecem ser de operação mais simples e atingem alta eficiência térmica dependendo de seu adequado projeto.

II.A.1.1 - SECADORES CONTRACORRENTES E CONCORRENTES

Em 1988, TELIS & MENEGALLI propuseram a secagem de proteína texturizada de soja em secadores de leito deslizante em fluxos contracorrentes, em substituição aos tradicionais secadores de esteira empregados para esse produto. Na figura II.1 é mostrado um esquema do secador de leito deslizante em fluxos contracorrentes.

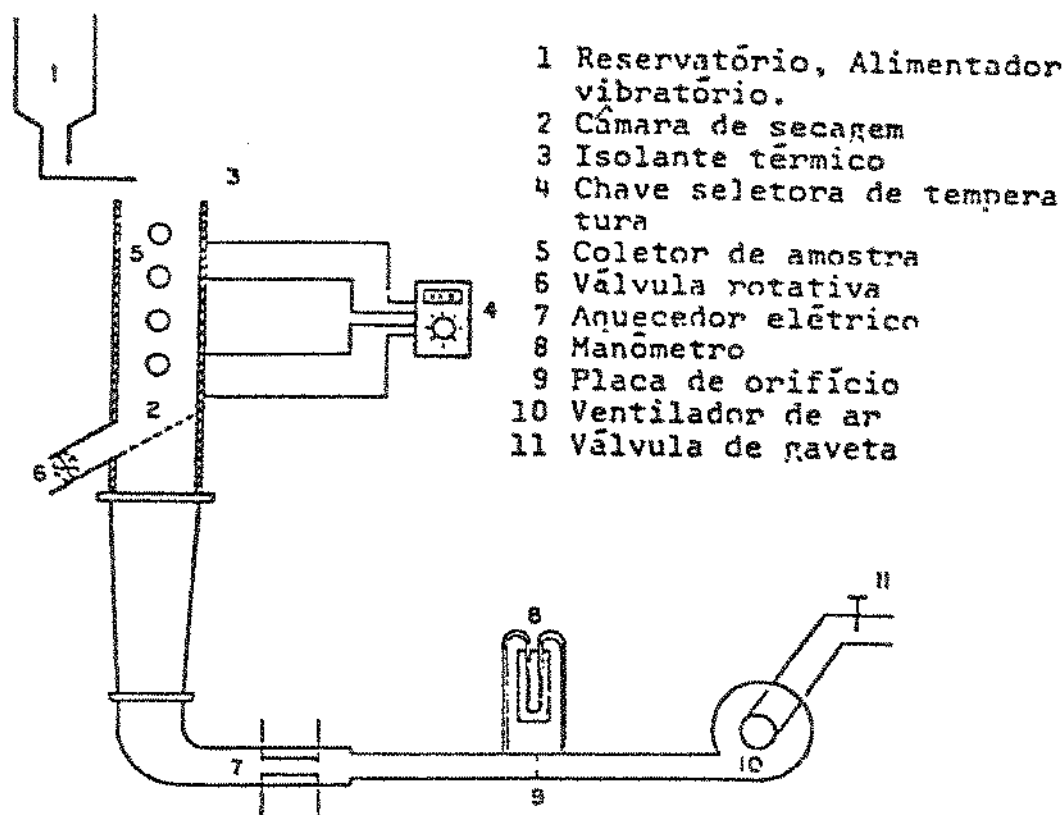


Figura II.1 - Esquema do secador de leito deslizante em fluxos contracorrentes.
Fonte: TELIS & MENEGALLI (1988).

Em geral pode se assegurar que os secadores em escoamentos contracorrentes são mais eficientes energeticamente que os secadores com outras configurações, resultando também em secadores de menor volume. Entretanto, neste tipo de secador, a saída do sólido mais seco contacta com o gás mais quente. Esta situação pode provocar injúria térmica na maioria das substâncias alimentares. Este problema limita a temperatura de entrada do gás no secador.

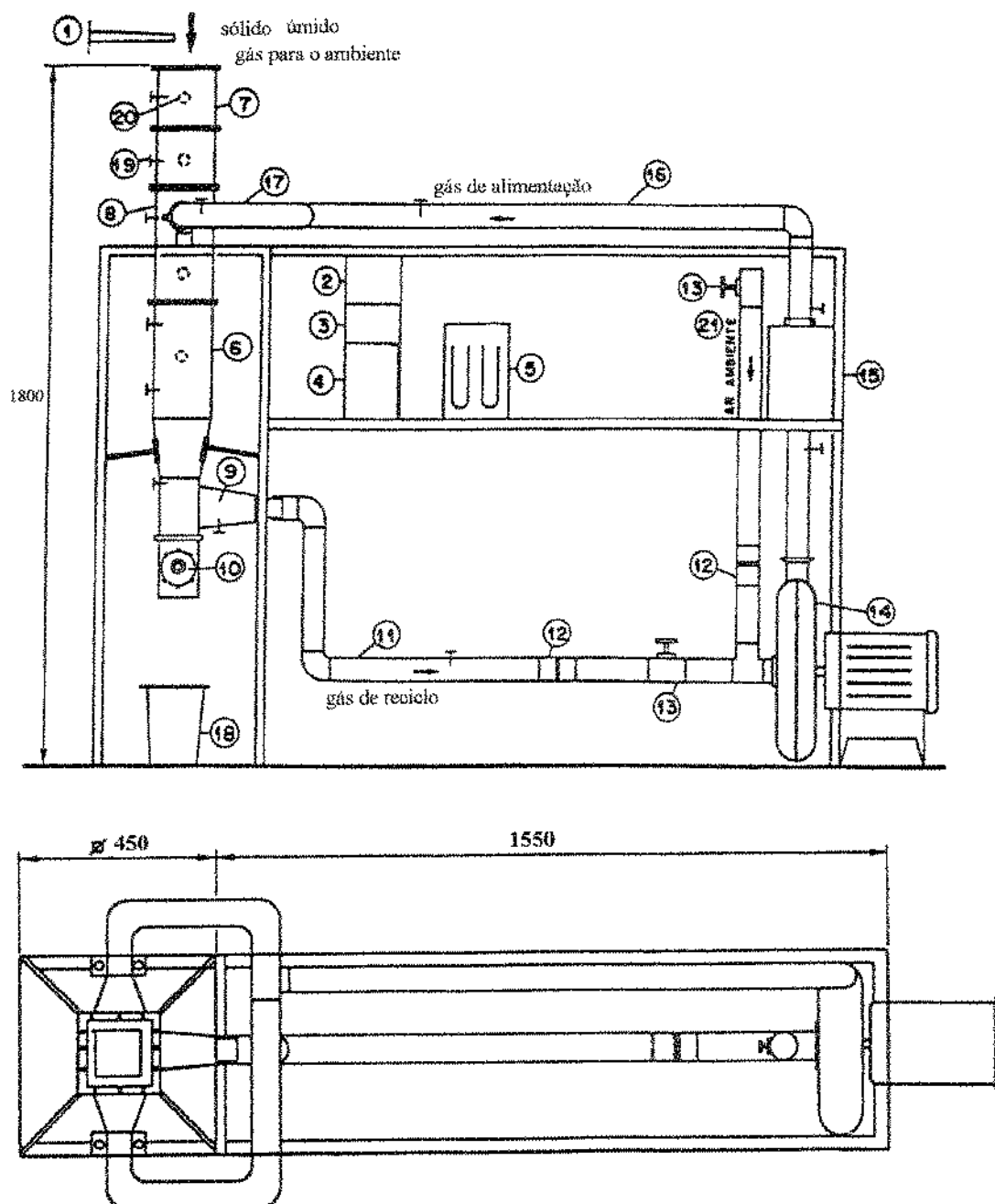
Secadores concorrentes apresentam menor eficiência térmica, já que em toda operação com este escoamento, os potenciais de transferência variam muito entre a entrada e saída. Entretanto, esta situação é benéfica do ponto de vista da qualidade do produto já que a temperatura do sólido de saída tenderá à

temperatura do gás de saída que será relativamente baixa.

FERREIRA et al. (1994) projetaram e construíram um secador misto de leite deslizante. Os secadores de leite deslizante mistos apresentam a associação em série de um secador contracorrente e um concorrente. Este secador com dois corpos tem duas funções principais: no corpo que opera em contracorrente, o sólido seca e perde a maior parte de sua umidade. Na parte do secador que opera em concorrente, o sólido já aquecido continua perdendo umidade, porém mais lentamente e passa a se resfriar, diminuindo os riscos de injúria e degradação por ser submetido a condições de secagem mais brandas. Na figura II.2 é mostrado um esquema do secador de leite deslizante misto apresentado por FERREIRA et al. (1994).

TELIS & MENEGALLI (1988) estudaram a secagem de proteína de soja texturizada num secador de leite deslizante com escoamentos contracorrentes. Construíram o equipamento, determinaram os perfis de umidade e temperatura do produto e estudaram a influência da temperatura do ar de entrada no secador, vazão de ar e vazão de alimentação. Compararam os dados com o secador de leite estático para dois tipos de proteína de soja texturizada. Demonstraram através da análise que o escoamento dos alimentos no secador era muito afastado do tipo pistão. Os secadores deslizantes, pelo dispositivo de saída do sólido e pelo atrito nas paredes, apresentam um escoamento que se afasta do ideal tipo pistão (HUBINGER & MENEGALLI, 1992a).

Com o objetivo de avaliar o efeito de distribuição de tempos de residência do sólido, HUBINGER & MENEGALLI (1989) determinaram experimentalmente as curvas de distribuição de tempos de residência para um secador de leite deslizante contracorrente com proteína texturizada de soja. Estudaram a influência de vazão do sólido e do gás na distribuição de tempo de residência (DTR) concluindo que a vazão de gás tem influência e a do sólido não apresenta influência. Analisaram a eficiência térmica do secador levando em conta a distribuição de tempo de residência do alimento e concluíram que a eficiência térmica é menor quando a distribuição de tempo de residência se afasta do escoamento tipo pistão. Esta distribuição de tempos de residência no secador foi determinada através da técnica de injeção de pulso de partículas coloridas. Estes resultados foram analisados em função de um modelo de reator tubular em série com um conjunto de dois tanques agitados em paralelo. Este modelo foi proposto por MOO-YOUNG & CHAN (1971) para explicar o fluxo não ideal de fluidos viscosos através dos tanques agitados. HUBINGER (1994) concluiu que o modelo proposto por MOO-YOUNG & CHAN para explicar o fluxo não ideal de fluidos viscosos através de tanques agitados se ajusta bem ao processo de secagem de proteína texturizada de soja no secador de leite deslizante.



- | | |
|---|--|
| 1. Alimentação - calha vibratória | 11. Tubulação de gás de reciclo |
| 2. Registrador de temperatura com 24 canais | 12. Placa de orifício |
| 3. Controlador de temperatura | 13. Válvula gaveta |
| 4. Controlador de motorreductor | 14. Ventilador centrifugo |
| 5. Manômetro em U para placas de orifício | 15. Resistência elétrica para o aquecimento do gás |
| 6. Corpo do secador - trecho concorrente | 16. Tubulação de alimentação do gás |
| 7. Módulo superiores - trecho concorrente | 17. Curvas para o módulo de entrada |
| 8. Módulo de entrada do gás quente | 18. Coleta de sólidos |
| 9. Saída do ar | 20. Tomadas de amostras |
| 10. Válvula controladora de vazão de sólido com motorreductor | 21. Entrada do ar ambiente |

Figura II.2 - Esquema do secador de leito deslizante misto.

Fonte: FERREIRA et al. (1994).

Com o objetivo de corrigir a umidade para a distribuição de tempo de residência observados nos secadores de leito deslizante, foi calculado o fator de desvio do escoamento pistão. Com a introdução do fator nas equações de balanço, foi feito um estudo da influência da distribuição de tempo de residência na eficiência de secagem de proteína texturizada de soja em secador de leito deslizante. Três diferentes situações de distribuição de tempo de residência no secador foram analisadas: o fluxo pistão, fluxo pistão com dispersão axial e fluxo pistão em série com um tanque agitado e volume morto. Verificou-se que a existência de moderada dispersão axial afeta pouco a secagem quando comparada ao fluxo pistão ideal, mas que o fluxo pistão em série com tanque agitado diminui consideravelmente a eficiência de secador. Analisaram-se através de simulações o grau de secagem e a eficiência energética de secadores de leito deslizante, operando em escoamentos concorrentes e contracorrentes, através de um modelo que incorpora a distribuição de tempo de residência. Foi avaliada a influência da relação vazão de gás-vazão de sólido, temperatura de gás e comprimento do secador, no grau de secagem e na eficiência térmica do processo. Verificou-se que os pontos de operação ótima encontram-se próximos das condições mínimas de temperatura e vazão que asseguram a umidade final de projeto exigida (HUBINGER, 1994).

Neste mesmo trabalho, foi apresentado um estudo de secadores de leitos deslizantes mistos para proteínas texturizadas de soja onde se avalia a eficiência térmica deste secador através da simulação e modelagem com base nos seus trabalhos anteriores, considerando-se que todo o gás de saída do corpo em concorrente era reciclado. Estudaram-se a influência da temperatura do ar de entrada no secador e o efeito de diferentes combinações entre comprimento do secador contracorrente e concorrente. A condição mais eficiente do processo é a temperatura mais baixa de ar de entrada no secador.

II.A.1.2 - SECADORES DE FLUXOS CRUZADOS

A configuração com fluxos cruzados é a mais comum entre os secadores industriais. Embora este tipo de secador seja menos eficiente termicamente do que os outros dois (concorrente e contracorrente), além de apresentar um produto heterogêneo em relação à umidade e temperatura dos grãos, possui algumas vantagens operacionais como, por exemplo, uma menor diferença de pressão imposta ao escoamento de ar de secagem, o que possibilita o uso de sopradores de menor potência em relação às outras configurações de escoamentos. NOVAIS & SARTORI (1988) afirmam que, ainda que possa apresentar redução na qualidade do produto quanto à injúria mecânica, foi largamente difundido por baixo custo econômico, fácil construção e operação simples de unidade.

Alguns autores consideram que a eficiência térmica deste tipo de secador pode ser melhorada incluindo reversão e reciclo no secador. Na figura II.3 é mostrado o esquema de um secador de fluxos cruzados.

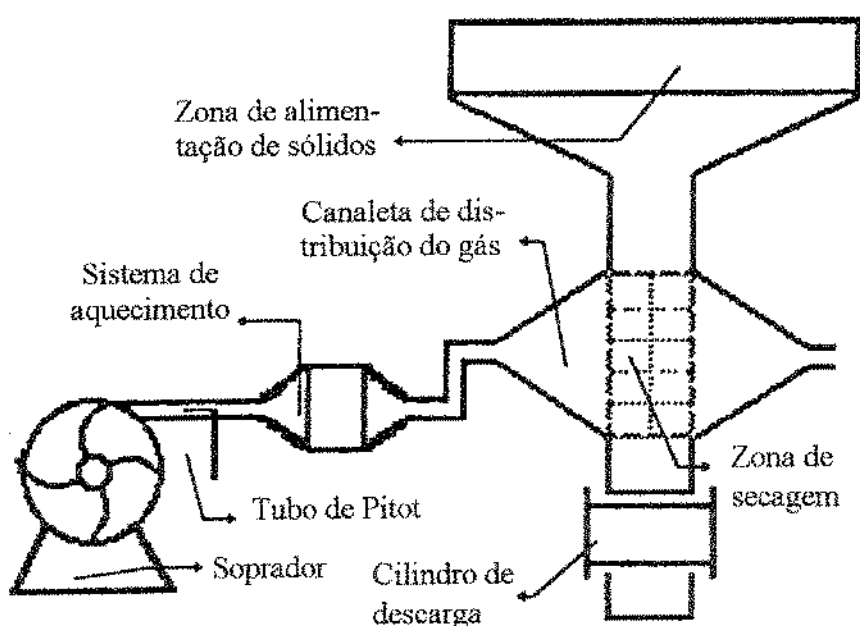


Figura II.3 - Esquema da unidade de secagem de um secador de fluxo cruzado.
Fonte: ARNOSTI JÚNIOR & SARTORI (1992).

A secagem de sementes de soja em secador de leito fixo em camada fina e de leito deslizante com escoamentos cruzados, também em camada fina, foi

comparada por BARROZO et al. (1995). A comparação revelou que a difusividade efetiva foi 24 % a 44% maior para o leito deslizante.

A coleta de dados experimentais de uma unidade-piloto do secador de fluxos cruzados e a comparação com os dados de simulação através da resolução das equações de conservação de massa e energia foram feitas por ASSUMPÇÃO et al. (1984). Estes autores determinaram os coeficientes de transferência de calor e massa na secagem de grão de soja.

Com o objetivo de minimizar a dispersão de umidade dos sólidos na saída do secador e aumentar a capacidade de secagem, PINTO & MASSARANI (1987) estudaram várias configurações diferentes de secadores de fluxos cruzados com recírculos de ar e reversão de sólidos.

Utilizando o modelo de duas fases, MAYTAS et al. (1993) estimaram o coeficiente volumétrico de transferência de massa gás-sólido na secagem de grão de soja em leito deslizante e fluxos cruzados. Estudaram o efeito da velocidade mássica do sólido e do gás sobre o coeficiente volumétrico de transferência de massa gás-sólido e concluíram que o mesmo apresenta dependência linear tanto com a velocidade mássica do sólido quanto com a do gás, quando uma delas é alterada permanecendo o valor das outras condições constantes. MANCINI et al. (1995) também propuseram uma correlação para o coeficiente volumétrico de transferência de massa na secagem de milho em secadores de camada espessa em leito fixo e deslizante tendo em vista a ampliação de faixa de validade para as condições de operação.

Visando estudar o processo de secagem de semente de soja, em 1988, NOVAIS & SARTORI projetaram e construíram uma unidade de leito deslizante e escoamentos cruzados. Estudaram a viabilidade deste processo e afirmaram ser promissor pela baixa redução na qualidade da semente (germinação e vigor). Constataram ainda a presença de região a taxa constante e transiente na faixa de secagem. Um estudo adicional, em 1989, com duas variedades de sementes de soja, reforçou a viabilidade deste processo ainda que constatando a heterogeneidade em relação ao teor de umidade na região de saída do sólido. Foram observadas também diferenças entre as reduções de qualidade nas duas variedades de soja (Doko e IAC-8) analisadas e a dependência da qualidade com as condições operacionais.

A influência da velocidade do fluido sobre a qualidade de semente de soja no processo de secagem de sementes em leito deslizante e escoamentos cruzados foi estudada por ARNOSTI Jr & SARTORI (1991). Antes e após a secagem, a qualidade das sementes foi avaliada através de teste-padrão de germinação, teste de envelhecimento precoce para vigor e teste de fissuras. Notaram que com o aumento da velocidade do fluido, há queda do poder germinativo e queda de qualidade em relação às fissuras. O vigor manteve-se constante. No entanto, a uma velocidade de fluido inferior a 1,5 m/s, a influência na qualidade da semente tende a desaparecer. Em 1992, ARNOSTI

& SARTORI estudaram a influência da velocidade intersticial do fluido de secagem, para diferentes valores de temperatura, na qualidade do material utilizado, em relação às suas propriedades físicas e fisiológicas, num secador de leito deslizante com fluxos cruzados. Os estudos efetuados desaconselham o uso da combinação de velocidades de fluido elevadas com temperaturas altas, quando se deseja manter a qualidade da semente em níveis desejados. Os autores comprovaram experimentalmente que a distribuição de velocidade para a região de entrada é constante, sendo este comportamento constatado também para 85% na região central da área transversal de escoamento do fluido, na região de exaustão.

MERGUIZO & SARTORI (1991) constataram que para vazão de sólido alta, ocorrem as maiores perdas na qualidade do produto. Conforme a vazão do sólido diminui, os danos na qualidade das sementes tendem a desaparecer. Os danos dos aspectos físicos prevalecem sobre danos fisiológicos.

A umidade relativa do ar no processo de secagem de sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados tem influência sobre a qualidade do produto em relação ao poder germinativo, vigor e fissuras. As maiores perdas são constatadas para baixos valores de umidade relativa de ar. À medida que a umidade do ar de secagem aumenta as perdas tendem a desaparecer (SCHEIBER & SARTORI, 1989, 1990).

Os pesquisadores FLAUZINO & SARTORI (1991, 1992) através de experimentos de secagem de sementes de soja no secador de leito deslizante com fluxos de ar cruzados mostraram que a umidade inicial das sementes influencia a qualidade do produto em termos de germinação, fissuras e vigor. Também tem interferência na distribuição de umidade e de temperatura das sementes na região de saída.

BARROZO & SARTORI (1994) realizaram um estudo da influência conjunta de umidade de ar, teor de umidade do grão, temperatura do ar, vazão do sólido e velocidade de ar na secagem sobre a qualidade das sementes; germinação, vigor e fissuras no secador de leito deslizante com fluxos cruzados utilizando a técnica de superfície de resposta. Os autores afirmam que a metodologia por superfície de resposta possibilitou analisar a influência conjunta das condições operacionais sobre a qualidade final das sementes. Concluíram que os dados experimentais obtidos confirmaram a adequada representação dos índices de qualidade pelas equações empíricas.

II.A.1.3 - SECADOR DE LEITO DESLIZANTE E RECIRCULAÇÃO PNEUMÁTICA

A recirculação pneumática associada ao tradicional secador de leito deslizante de fluxos cruzados conduz a altos níveis de movimentação e mistura de sólidos. Como consequência este sistema permite combinar a eficiência térmica do leito deslizante com a qualidade superior do produto final obtido no leito de jorro (CALADO & MASSARANI, 1988). A figura II.4 mostra um esquema das vistas laterais de um secador de leito deslizante e recirculação pneumática.

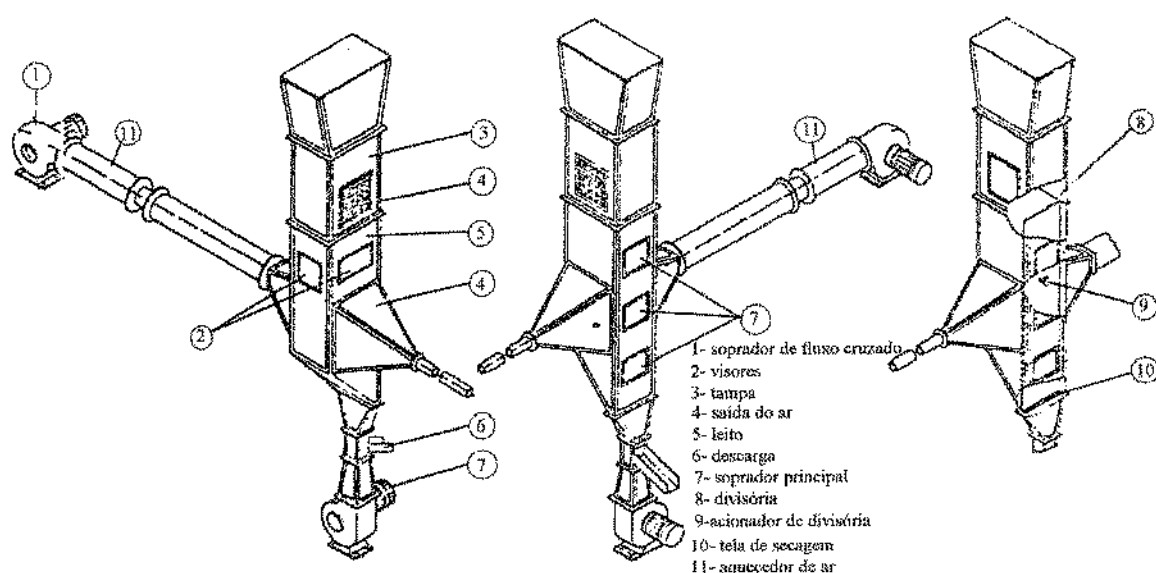


Figura II.4 - Esquema das vistas laterais de um secador de leito deslizante e recirculação pneumática.

Fonte: CALADO & MASSARANI (1988)

A secagem neste tipo de secador ocorre na região de leito deslizante e fluxos cruzados com gás quente. O transporte pneumático conduzido com ar à temperatura ambiente e operando como válvula de descarga do silo promove a recirculação, a uniformização e o resfriamento parcial dos grãos. A recirculação de sólidos no secador depende da configuração do equipamento, da curva característica dos sopradores utilizados e da carga de grãos.

CALADO & MASSARANI (1988) ao estudarem comparativamente um sistema de secador de leito deslizante com fluxos cruzados com recirculação pneumática, com o leito de jorro, concluíram que em condições iguais de produtividade, o sistema de leito deslizante requer $1/3$ da “potência de sopro” e $2/3$ da “potência térmica” do sistema em leito de jorro.

PEREIRA & MASSARANI (1988) constataram que a determinação do coeficiente de transferência de calor sólido-fluido, modelo a duas fases, pode ser feito num equipamento que opera em leito deslizante, fluxos cruzados, recirculação pneumática e regime permanente. Assim, com esta hipótese, um estudo com soja, milho e partículas de polietileno seco com o ar foi feito neste tipo de equipamento.

A influência da umidificação artificial no processo de secagem de soja, foi estudada por BARROZO et al. (1991), que constataram que a cinética da secagem era similar à da soja com umidade natural; no entanto a quebra de grãos aumentou significativamente no sistema de um secador tipo pneumático com fluxos cruzados.

II.A.2 – OTIMIZAÇÃO DE SECADORES DE ALIMENTOS

Existem alguns antecedentes de otimização do processo de secagem, entretanto, são relativamente poucos, considerando os altos níveis de uso de energia desta operação.

BOX, em 1965, publicou o método “complex” utilizado mais tarde por muitos pesquisadores na otimização de processos e secadores inclusive na área de secagem de alimentos.

Em 1978, BROOK & ARKEMA estudaram a otimização de energia e custos de capital de secadores de grãos. Compararam os secadores concorrentes com um único estágio, multiestágios e secadores com fluxos cruzados. Desenvolveram um algoritmo de programação dinâmica para este fim. Delimitaram o conteúdo final de umidade desejada e o máximo valor permitido de fatores de qualidades dos grãos.

DOE e MENARY (1979) apresentam um trabalho de otimização de conteúdo de alfa ácido no processo de secagem de lúpulo. Neste trabalho, a otimização é feita baseada nas comparações dos gráficos dos resultados.

NORBACK (1986) sugere que a escolha da função objetivo de problema de otimização é freqüentemente a parte mais importante do processo.

Em 1982, EVANS publica sobre a teoria de otimização na área de processamento de alimentos e suas aplicações.

MISHKIN et al. (1982) estudaram dois métodos de otimização: método “complex” (BOX, 1965) e o método de Pontryagin na otimização de

desidratação de alimentos.

MISHKIN et al. (1983a) estudaram a otimização da retenção de ácido ascórbico na secagem a ar de um alimento hipotético. A otimização dinâmica utilizando o método “complex” foi feita tendo como delimitação a inativação de catalase. Ainda neste ano MISHKIN et al.(1983b) publicaram um trabalho sobre a minimização do escurecimento não-enzimático no processo de desidratação de batatas. E no ano seguinte MISHKIN et al. (1984b) estudaram a maximização da retenção de ácido ascórbico e minimização de tempo de secagem no processo de desidratação de batatas.

Em 1986, BERTIN e BLAZQUEZ estudaram a otimização e a modelagem de um secador de túnel para secagem de ameixa, com o objetivo de ter a máxima capacidade de produção satisfazendo a qualidade final dos produtos. Concluíram que a recirculação de ar de saída melhorava a eficiência térmica.

As condições ótimas de operação em secadores de túnel com a finalidade de minimizar o consumo de energia com a condição de ter a qualidade do produto satisfatória foram estudadas por LEE e PYUN (1993). O alimento estudado foi o rabanete.

BANGA e SINGH (1994) apresentaram várias funções objetivas usuais em problemas de otimização relacionadas à secagem de alimentos: maximização de eficiência energética, minimização de tempo de processo, maximização de retenção de nutrientes ou enzimas e maximização de nutrientes com uma delimitação sobre a retenção final de uma enzima.

A minimização de consumo de energia levando em conta a conservação de qualidade do produto na secagem de grãos foi estudada por SOARES et al. (1996).

Um dos maiores obstáculos do processo de otimização na área de secagem de alimentos é sobre a utilização de um método adequado. A otimização pelo método de superfície de resposta é um método prático e fácil de ser utilizado. Toda a teoria de método por superfície de resposta pode ser encontrada no livro-texto de planejamento e otimização de experimentos (BARROS NETO et al., 1995).

II.B - MATERIAL E MÉTODOS

Esta secção descreve os materiais e os métodos com o objetivo de otimizar energeticamente um secador de leito deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente em função das condições de operação do sistema.

II.B.1 – MATERIAL

II.B.1.1 - MATÉRIA-PRIMA

Neste estudo utilizaram-se como referência a mesma matéria-prima e as condições de processo utilizadas por HUBINGER (1994).

Foi estudada a secagem de proteína texturizada de soja, tipo R-NR 3007 (50% de proteína; 2% de matéria graxa; 6,5% de cinzas e 8% de água) da Nutrimental. As propriedades físicas deste produto foram caracterizadas por TELIS & MENEGALLI (1988) e TELIS (1988). Considerou-se a umidade inicial do sólido (X_1) igual a 0,245 (b.s.) e a temperatura de entrada do sólido (T_{p1}) 32°C. Para as condições do ar ambiente, considerou-se a umidade absoluta de ar, a uma condição ambiente média de 60% de umidade relativa e temperatura de 25°C (observada em Campinas, S.P.). Foram fixadas a vazão do sólido (W_s - proteína texturizada de soja) de $3,3 \cdot 10^{-3}$ kg/s e a umidade final de sólido (X_f) de 0,07 kg água/kg s.s.

II.B.1.2 - EQUIPAMENTOS

A figura II.5 mostra o esquema do secador simulado e otimizado neste trabalho. A área transversal do secador se manteve constante, $A=0,0225\text{m}^2$.

O funcionamento básico do secador está descrito a seguir. O sólido entra com um conteúdo de umidade X_1 (0,245 kg água/kg s.s.) e temperatura T_{p1} (32 °C) na secção contracorrente. Ocorrendo a troca térmica e mássica, o ar sai parcialmente seco e aquecido, com conteúdo de umidade X_2 e temperatura T_{p2} . A seguir o sólido entra na secção concorrente e no interior desta ocorrem novamente os fenômenos de transferência de calor e massa, saindo o ar

finalmente seco (a umidade desejada) e um pouco resfriado, a um teor de umidade X_3 ($0,07 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$) e temperatura T_{p3} .

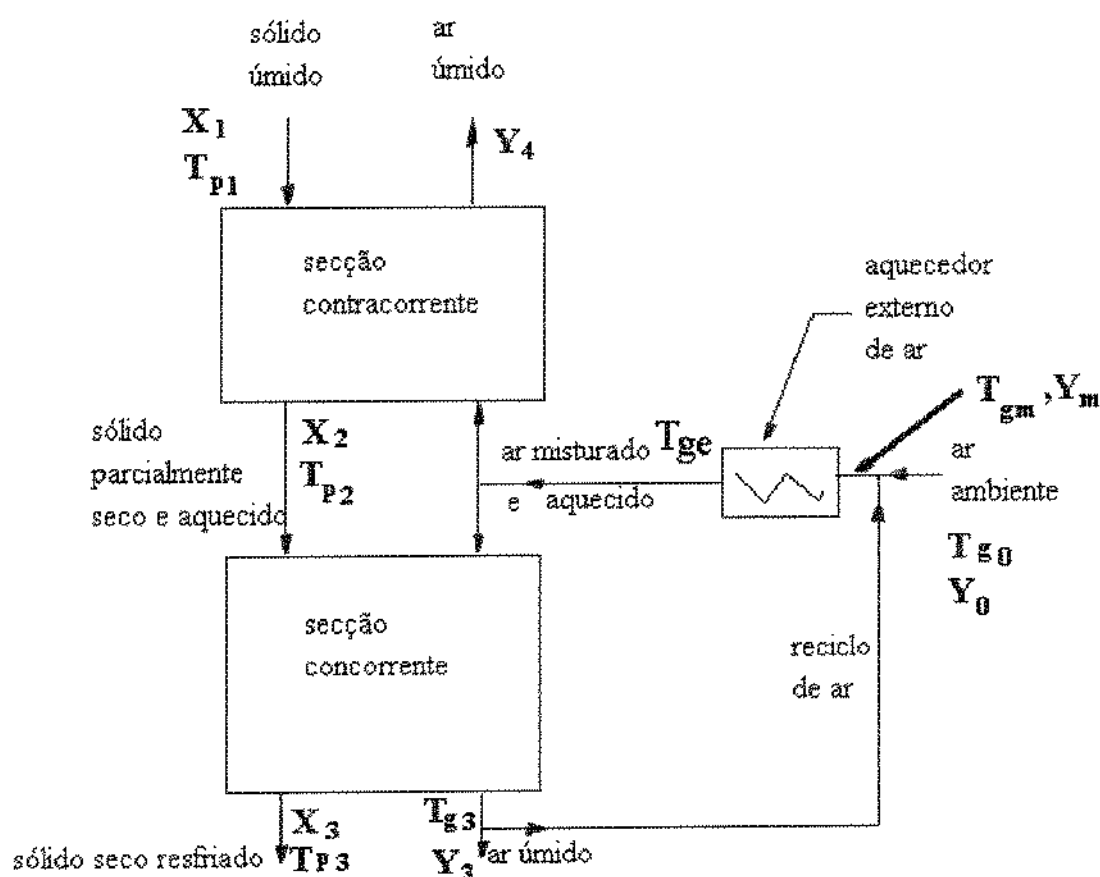


Figura II.5 – Esquema do secador de leito deslizante misto (concorrente e contracorrente) com reciclo de ar na secção concorrente.

O ar entra à temperatura T_{ge} e alimenta a secção concorrente e contracorrente. Uma parte do ar que sai na base do secador (secção concorrente) com a temperatura T_{g3} e umidade Y_3 é reciclada e se mistura ao gás externo, com temperatura T_{g0} (25°C) e umidade Y_0 ($0,013 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) gerando um gás de mistura com uma temperatura T_{gm} e umidade Y_m . Este gás é aquecido por um aquecedor até a temperatura T_{ge} desejada (70°C , 80°C , 90°C e 100°C) na entrada do secador e então alimentado conforme a proporção desejada entre as secções concorrente e contracorrente do secador.

II.B.2 – MÉTODOS

II.B.2.1 – SIMULAÇÃO DE SECADOR MISTO

Na modelagem e simulação de secadores deslizantes, aplicam-se as equações que governam a transferência de calor e massa, aliada à cinética de secagem do material. Foram utilizadas a modelagem e a simulação para o processo de secagem em leito deslizante desenvolvidas por HUBINGER & MENEGALLI (1989; 1992a, b) e HUBINGER (1994) onde é levada em conta a distribuição de tempo de residência do sólido no modelo, supondo que o escoamento do sólido é do tipo pistão, associado a um volume agitado. As equações para a secagem em leito deslizante, para escoamentos contracorrentes e concorrentes com distribuição de tempo de residência são descritas como segue:

- balanço de massa global

$$\frac{dY}{dt} = \pm \frac{W_s}{W_g} \frac{dX}{dt} \quad (\text{II.1})$$

- balanço de massa para a fase sólida

$$\frac{d\bar{X}_i}{dt_m} = (X_{i-1} - X_e) \left(-\sum_{n=1}^i \frac{B_n}{i} \right) \left(u + \frac{1}{\sum_{n=1}^i \frac{B_n}{i} t_m + R} \right) \quad (\text{II.2})$$

- balanço de energia para a fase sólida

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\lambda}{Cp_p} \frac{dX}{dt} + \frac{h}{Cp_p} a_e \left(T_g - \bar{T}_p \right) \quad (\text{II.3})$$

- balanço de energia para a fase gasosa

$$\frac{dT_g}{dt} = \pm \frac{W_s}{W_g \cdot Cp_g} \left(-\lambda \frac{dX}{dt} + Cp_p \frac{dT_p}{dt} \right) \quad (\text{II.4})$$

Os sinais (+) referem-se aos escoamentos contracorrentes e (-) aos escoamentos concorrentes.

onde:

Y	umidade absoluta de ar, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$;
X	teor de umidade do sólido, base seca, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$;
W_s	vazão do sólido, $\text{kg}_{\text{sólido seco}}/\text{s}$;
W_g	vazão de gás, $\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$;
X_e	teor de umidade de equilíbrio, base seca, $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$;
B_n	constante cinética das equações que calculam a cinética de secagem nos i intervalos do secador;
T_p	temperatura da partícula, °C;
λ	calor latente de vaporização, $\text{Kcal}/\text{kg}_{\text{água}}$;
C_{p_p}	calor específico do sólido úmido, $\text{kJ}/(^{\circ}\text{C}.\text{kg}_{\text{s.s.}})$;
C_{p_g}	calor específico do gás úmido, $\text{kJ}/(^{\circ}\text{C}.\text{kg}_{\text{ar seco}})$;
h	coeficiente convectivo de transferência de calor gás-sólido, $\text{Kcal}/\text{s}.\text{m}^2.^{\circ}\text{C}$;
a_e	área específica do sólido, m^2/kg ;
$\underline{R}$	relação entre volume total do secador e volume do tanque agitado;
t_m	tempo de residência médio;
i	número de intervalos em que se divide o secador;
u	relação entre volume do pistão por volume total do secador.

Este sistema de equações diferenciais ordinárias foi resolvido através de algoritmo de Runge Kutta de 4ª ordem e as condições de contorno específicas para cada tipo de secador foram:

1 – para o escoamento contracorrente:

$$T_g(t_1) = T_{ge};$$

$$T_p(0) = T_{p1} = 32^{\circ}\text{C};$$

$$Y(t_1) = Y_m;$$

$$X(0) = X_1 = 0,245 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}};$$

onde, $t = 0$, é o tempo inicial na entrada do sólido na secção contracorrente;

$t = t_1$, é o tempo em que o sólido sai da secção contracorrente e entra na secção concorrente.

2 – para o escoamento concorrente:

$$T_p(t_1) = T_p \text{ na saída da secção contracorrente};$$

$$T_g(t_1) = T_{ge};$$

$$Y(t_1) = Y_m;$$

$$X(t_1) = X \text{ na saída da secção contracorrente;}$$

onde $t = t_1$, é o tempo em que o sólido entra na secção concorrente.

Obs.: O tempo de saída do sólido na secção concorrente é dependente da umidade requerida ($X_f = 0,07 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$) do mesmo. Como a umidade final do sólido (X_f) é fixa, o tamanho total do secador é obtido como resultado da simulação. A simulação foi feita de tal maneira que o sólido ficaria o tempo de residência necessário até atingir a umidade desejada (no caso $X_f = 0,07 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$). A própria simulação determina o valor de comprimento para cada caso quando a umidade final é atingida (condição de parada de simulação no programa PASCAL), portanto é um valor a ser determinado automaticamente (valor dependente).

Na verdade, para cada simulação, o tamanho da secção contracorrente (L_{ct}) é definido, mas na secção concorrente (L_{cc}) não é fixo, porque é nesta secção que o sólido completa a secagem, até atingir a umidade final X_f desejada de $0,07 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$. E isto causa então um comprimento total (L_{total}) do secador não definido.

Através de balanço de massa e energia no ponto (nó) do sistema onde acontece a mistura de ar entre o ar ambiente e o ar reciclado pode-se calcular a temperatura T_{gm} e a umidade Y_m do ar de mistura. Este nó está mostrado na figura II.16,

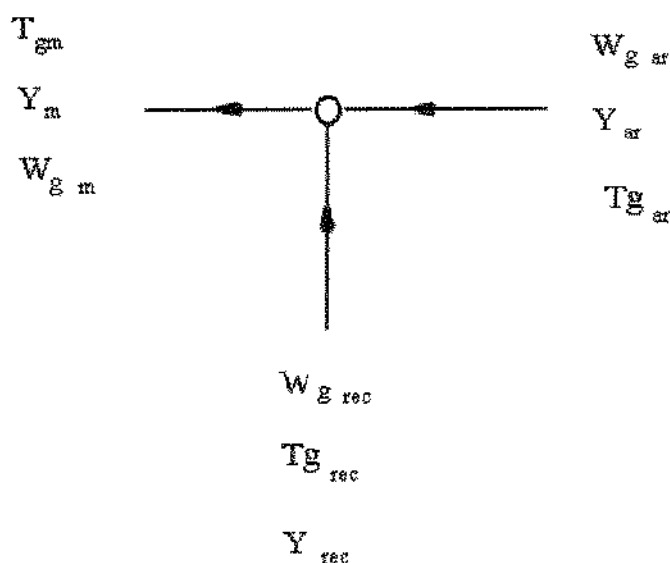


Figura II.6 - Nó do sistema estudado onde ocorre a mistura de ar externo e o ar vindo de reciclo.

As expressões para o cálculo da temperatura do ar de mistura (T_{gm}) e teor de umidade do ar de mistura (Y_m) estão mostrados a seguir:

$$T_{gm} = \frac{Wg_{ar} \cdot Tg_{ar} + Wg_{rec} \cdot Tg_{rec}}{Wg_{ar} + Wg_{rec}} \quad (II.5)$$

$$Wg_{rec} = R_{rec} \cdot R_{cc} \cdot W_s \quad (II.6)$$

$$Wg_{ar} = [(R_{ct} + R_{cc}) - R_{rec} \cdot R_{cc}] W_s \quad (II.7)$$

$$Y_m = \frac{Wg_{rec} \cdot Y_m + Wg_{ar} \cdot Y_{ar}}{Wg_{ar} + Wg_{rec}} \quad (II.8)$$

onde:

T_{gm}	temperatura de ar de mistura em °C;
Tg_{ar}	temperatura de ar ambiente em °C;
Tg_{rec}	temperatura de ar do reciclo ou a temperatura de ar na saída da secção concorrente em °C;
Y_m	teor de umidade de ar de mistura em $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$;
Y_{ar}	teor de umidade de ar ambiente em $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$;
Y_{rec}	teor de umidade de ar de reciclo em $kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$;
Wg_{ar}	vazão de ar ambiente em kg/s;
Wg_{rec}	vazão de ar de reciclo em kg/s;
R_{rec}	razão entre a vazão de ar de reciclo e ar na secção concorrente do secador;
R_{cc}	razão entre a vazão de ar na secção concorrente e vazão de sólido;
R_{ct}	razão entre a vazão de ar na secção contracorrente e a vazão de sólido.

II.B.2.2 – PROPRIEDADES FÍSICAS DA PROTEÍNA TEXTURIZADA DE SOJA

A cinética de secagem utilizada é baseada em modelo tipo exponencial e os valores das constantes deste modelo foram obtidos por TELIS & MENEGALLI (1988).

A constante cinética de secagem usada (B) é dependente da temperatura (equação de Arrhenius) e é apresentada a seguir:

$$B = B_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{R} \frac{1}{T_{g_{abs}}}\right) \quad (\text{II.9})$$

onde:

- B_0 constante cinética;
- ΔE energia de ativação;
- R constante universal dos gases;
- $T_{g_{abs}}$ temperatura absoluta do gás em cada ponto do secador.

Os valores de B_0 e $\Delta E/R$ para a proteína texturizada de soja estudada são apresentados na tabela II.1.

Tabela II.1 – Parâmetros do modelo cinético de secagem para a proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007.

Fonte: HUBINGER (1994)

Constante cinética B_0	$0,564 \text{ s}^{-1}$
Energia de ativação	$5,89 \text{ Kcal/g.mol}$ $24,65 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kg.mol}$
$\Delta E/R$	$1885 \text{ (K}^{-1}\text{)}$

HUBINGER (1994) na simulação utilizou os dados da relação entre volume total e volume do tanque agitado como $\underline{R} = 5,5656$ e a relação entre volume de pistão e volume do secador como $u = 0,70$, necessário para o cálculo da unidade que considera a distribuição de tempo de residência. O modelo físico do sistema é um escoamento pistão em 70% do volume e com 20 % de tanques agitados. A fração restante corresponde ao volume morto.

A umidade de equilíbrio (X_e) foi calculada em cada passo da simulação através da equação de GAB que teve melhor ajuste segundo HUBINGER

(1994) para o par proteína texturizada de soja-ar:

$$X_e = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w)(1 - k \cdot a_w + C \cdot k \cdot a_w)} \tag{II.10}$$

onde:

- X_m umidade de monocamada;
- C constante de Guggenheim;
- k constante de monocamada.

HUBINGER (1994) utilizando os dados experimentais apresentados por TELIS (1988) determinou os valores de X_m, C e k da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 para as várias temperaturas. Estes valores estão mostrados na tabela II.2.

Tabela II.2 – Valores de constantes da equação de GAB (X_m, C e k) da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 para diversas temperaturas.

Fonte: HUBINGER (1994)

Temperatura °C	Umidade de Monocamada (X _m)	Constante de Guggenheim (C)	Constante de Monocamada (k)
30	0,04126	14,406	0,9715
40	0,04261	11,7528	0,9845
50	0,03786	32,261	1,0062
60	0,0371	24,443	1,0175
70	0,0338	25,485	1,0178
80	0,0336	53,725	1,0439
90	0,032	34,448	1,0573

O cálculo da atividade da água (a_w) foi feito utilizando a seguinte expressão:

$$a_w = \frac{Y \cdot P}{P_{ws} \cdot (0,622 + Y)} \quad (\text{II.11})$$

onde:

- a_w atividade da água;
- Y umidade absoluta de ar de secagem;
- P pressão total do sistema e é igual a 94700 Pascal (pressão atmosférica de Campinas);
- P_{ws} pressão de saturação à temperatura do gás.

A pressão de saturação (P_{ws}), para a faixa de temperatura de 0 a 200°C, pode ser calculada segundo ASHRAE (1985), pela seguinte expressão:

$$\ln(P_{ws}) = C_8/T + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln T \quad (\text{II.12})$$

onde:

- $C_8 = -5800,2206$;
- $C_9 = 1,3914993$;
- $C_{10} = -0,04860239$;
- $C_{11} = 0,41764 \cdot 10^{-4}$;
- $C_{12} = -0,14452093 \cdot 10^{-7}$;
- $C_{13} = 6,5459673$;
- T é a temperatura em K.

O calor latente de vaporização (λ) utilizado é o da água, considerado aproximadamente constante ao longo do secador e tem o valor de $\lambda = 550,7$ kcal/kg = 2305,2 kJ/kg.

O calor específico do sólido foi calculado através de uma correlação apresentada por RHA (1975), segundo a equação:

$$C_{pp} = 1,0X_a + 0,5X_g + 0,3X_s \quad (\text{II.13})$$

onde:

- C_{pp} calor específico do sólido, kJ/(kg_{ss} °C);
- X_a fração de água;
- X_g fração de gordura;

X_s fração de sólido.

O valor de C_p é calculado por kg de sólido seco.

Na tabela II.3 são mostradas as características químicas da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007

Tabela II.3 – Características químicas da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007.

Fonte: HUBINGER (1994)

Proteína (Nx 6,23)	50,0 % b.s.min.
Matéria graxa	2,0 % b.s.min.
Cinzas	6,5 % b.s.min.
Fibras	4,0 % b.s.
Umidade	7,0 – 8,0 % b.s.

A área específica do leito foi calculada como:

$$a_e = 6 \frac{(1 - \varepsilon)}{d_p \cdot \rho_s} \quad (\text{II.14})$$

onde:

a_e área específica de leito em m^2/kg ;
 d_p diâmetro da partícula em m;
 ρ_s densidade aparente do leito em kg/m^3 ;
 ε porosidade do leito.

HUBINGER (1994) apresenta os valores de $d_p = 0,87\text{cm}$ e $\rho_s = 0,57\text{g}/\text{cm}^3$ para proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007. A porosidade do leito é de 0,49.

Para o cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor gás-sólido para secador deslizante, foi utilizada a correlação determinada por SARTORI (1986). A expressão está mostrada a seguir:

$$N_u = P(P_r^{1/3})(R_e^Q) \quad (\text{II.15})$$

sendo que P e Q assumem os valores de 1,54 e 0,57 para escoamento contracorrente e 0,84 e 0,65 para fluxo concorrente.

onde:

- N_u número de Nusselt;
- P_r número de Prandt;
- R_e número de Reynolds.

As definições destes adimensionais estão apresentadas no anexo B.

II.B.2.3 – EFICIÊNCIA TÉRMICA (E.T.)

A eficiência energética (ou térmica) de um secador (E.T.) ou eficiência baseada na primeira lei da termodinâmica pode ser definida pela equação :

$$E.T. = \frac{\text{energia demandada para evaporar unidade do solido a temperatura } T}{\text{energia total fornecida ao secador}} \quad (\text{II.16})$$

onde:

T é a temperatura de alimentação do sólido.

Neste trabalho, foi utilizada a seguinte expressão para o cálculo da eficiência térmica (HUBINGER, 1994; STRUMILLO et al., 1986; KAMINSKI et al., 1989):

$$E.T. = \frac{W_a \cdot \Delta H}{W_{g_m} \cdot C_{p_g} \cdot (T_{g_e} - T_{g_m})} = \frac{W_s (X_0 - X_f) \cdot \Delta H}{W_{g_m} \cdot C_{p_g} \cdot (T_{g_e} - T_{g_m})} \quad (\text{II.17})$$

onde:

- W_a vazão mássica de água evaporada da proteína texturizada de soja;
- ΔH entalpia de vaporização da água na temperatura de secagem a T_{g_e} ;

W_{g_m} vazão mássica de ar de mistura do secador (ar ambiente mais o ar de recirculação);
 C_{p_g} calor específico de ar à pressão constante;
 T_{g_e} temperatura de entrada de ar no secador;
 T_{g_m} temperatura de ar de mistura entre o ar ambiente e de recirculação;
 W_s vazão mássica do sólido;
 X_0 umidade inicial do sólido;
 X_f umidade final do sólido.

II.B.2.4 – MÉTODOS NUMÉRICOS

Para resolver o sistema de equações diferenciais (equações II.1; II.2; II.3; II.4) foi usado o método numérico de Runge Kutta de 4ª ordem. Uma programação desta resolução foi feita por HUBINGER (1994) na linguagem PASCAL. Neste trabalho utilizou-se o algoritmo desenvolvido por HUBINGER (1994), melhorando-se o programa nos seguintes pontos: no secador contracorrente adotaram-se alguns procedimentos para simular melhor a chegada à saturação na saída do gás e ainda acoplou-se o programa de simulação da secção contracorrente com a secção concorrente e a secção de mistura de ar. Com estas modificações foi possível fixar uma umidade de saída no secador para dado conjunto de variáveis operacionais e obter a eficiência térmica e comprimento do secador.

II.B.2.5 - OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

A otimização energética foi feita utilizando o método de análise de superfície de resposta (BARROS NETO et al., 1995).

Foram estudadas as seguintes faixas de condições de operação:

- 1 – temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}): 70°C a 100°C;
- 2 – razão entre a vazão de ar na secção contracorrente e vazão do sólido (R_{ct}) : 8 a 12;
- 3 – comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}) : 20 cm a 40 cm.

A escolha das faixas de R_{ct} , T_{ge} e L_{ct} obedeceu o seguinte critério:

- a. a faixa de velocidade de ar foi fixada de 1 m/s a 2 m/s, estabelecendo uma vazão máxima para vazão de gás por unidade de área para não termos o arraste do sólido. A relação R_{ct} e R_{cc} está determinada pelo balanço de massa e energia, condição de saturação do ar para um dado grau de secagem do sólido;
- b. as faixas de temperatura T_{ge} foram escolhidas em função das condições operacionais do trabalho de TELIS (1988);
- c. as faixas de L_{ct} foram escolhidas de tal maneira que a umidade final desejada do sólido não atinja na saída da secção contracorrente do secador misto mesmo nas condições de operação mais crítica onde o ar satura. Este foi o motivo da escolha de valores da faixa de 20 cm a 40 cm.

As seguintes condições de operação foram fixas e serão discutidas no item II.C.1:

- 1 – razão entre a vazão de ar de reciclo e vazão de ar na secção concorrente (R_{rec}) igual à 1,0 (100%);
- 2 – razão entre a vazão de ar na secção concorrente e vazão do sólido (R_{cc}) igual à 10.

A seguir é mostrada uma tabela de planejamento de simulação (tabela II.4).

As variáveis são:

- temperatura de entrada de ar (T_{ge}) em °C;
- razão entre vazão de ar na secção contracorrente e vazão de sólido ($R_{ct}=W_{ct}/W_s$);
- comprimento do secador da secção contracorrente (L_{ct}).

As respostas são a eficiência térmica (E.T) e o comprimento total do secador (L_{total}).

Tabela II.4 - Valores das variáveis (T_{ge} , R_{ct} , L_{ct}) para o planejamento de simulação de um secador de leito deslizante misto com objetivo de otimizar a eficiência térmica (E.T.).

número da simulação	variáveis		
	T_{ge} [°C]	R_{ct}	L_{ct} [cm]
1	72,4	8,3	21,6
2	97,6	8,3	21,6
3	72,4	11,7	21,6
4	97,6	11,7	21,6
5	72,4	8,3	38,4
6	97,6	8,3	38,4
7	72,4	11,7	38,4
8	97,6	11,7	38,4
9	85,0	10,0	30,0
10	70,0	10,0	30,0
11	100,0	10,0	30,0
12	85,0	8,0	30,0
13	85,0	12,0	30,0
14	85,0	10,0	20,0
15	85,0	10,0	40,0

Inserindo estes valores no pacote denominado ESTATÍSTICA, instalado no microcentro do departamento da FEA/UNICAMP, pode-se obter a superfície de resposta mostrada na próxima secção (secção II.C).

Os ajustes das superfícies de resposta foram avaliados por dois métodos: teste F e porcentagem de variância explicada (BARROS NETO et al., 1995).

Os testes F foram feitos a níveis de 99% e 95% de significância. Considera-se que a curva de superfície de resposta se ajustou quando a razão entre F calculado ($F_{calculado}$) e F tabelado ($F_{tabelado}$) fornece um valor maior que 1. Quanto maior o valor desta razão, melhor é o ajuste. Assim, quando a razão $F_{calculado}/F_{tabelado}$ a nível de significância de 99% for maior que 1, diz-se que a curva de superfície de resposta se ajustou, ao nível de significância de 99%. Do mesmo modo, quando o valor da razão $F_{calculado}/F_{tabelado}$ a nível de significância de 95% for maior que 1, então a curva de superfície de resposta se ajustou a nível de significância de 95%. O valor de $F_{calculado}$ foi calculado utilizando o pacote "OTIMIZA", instalado no microcentro do departamento de FEA/UNICAMP. O valor de $F_{tabelado}$ pode ser encontrado nos livros e manuais de estatística.

Outro indicador de ajuste da curva de superfície de resposta é a porcentagem de variância encontrada. Considera-se que a curva de superfície de resposta se ajustou bem quando a porcentagem de variância é maior que 90% e quanto mais próximo de 100%, melhor o ajuste desta curva.

II.C - RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

II.C.1 - ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SECADOR DE LEITO DESLIZANTE MISTO COM RECICLO DE AR

TELIS (1988) iniciou um estudo de secagem de proteína texturizada no secador de leito deslizante contracorrente, avaliando as vazões de gás e sólido, temperatura de gás e tipo de soja. A modelagem para secadores de leito deslizante tanto para concorrente quanto contracorrente foi desenvolvida por HUBINGER & MENEGALLI (1992b). HUBINGER (1994) fez um estudo com estes modelos utilizando dados para proteína texturizada, comparando vários aspectos de secadores de leito deslizante concorrente, contracorrente e mistos. FERREIRA et al. (1994) construíram e estudaram experimentalmente um secador de leito deslizante misto contracorrente-concorrente com reciclo de ar com várias condições de operação com proteína texturizada.

Este trabalho teve como objetivo abordar aspectos não avaliados e não concluídos nos trabalhos anteriores, analisando a influência dos diversos grupos adimensionais na performance do secador, complementando os trabalhos de otimização do sistema.

O método de otimização é uma ferramenta muito poderosa e imprescindível, que determina com precisão as condições ótimas requeridas, seja na eficiência energética, seja na qualidade do produto final, seja na produtividade. No entanto, este método muitas vezes não fornece informações seguras quando se quer uma análise fenomenológica do processo. Isto nos motivou a estudar isoladamente a influência das condições operacionais na eficiência térmica com a finalidade de selecionar os grupos adimensionais relevantes.

Assim nesta secção II.C.1, foram analisados o grau de secagem e a eficiência energética de secadores de comprimento fixo. Estudou-se a influência da relação vazão de gás na secção concorrente/secção contracorrente (0,5 a 3), à temperatura de 80°C e 100°C, para duas relações de reciclo de 50 e 100 %. A relação entre vazão na seção concorrente e vazão de sólido foi variada de 8 até 12. Consideraram-se a umidade inicial do sólido (X_1) igual a 0,245 (b.s.) e a temperatura de entrada do sólido (T_{p1}) igual a 32°C. Para a temperatura de ar adotou-se a temperatura de 25°C. Foi fixada a vazão do ar seco na secção contracorrente (W_{ct}) de 0,033 kg/s. O comprimento total do secador (L_{total}) foi considerado como 60cm, dividido em duas secções iguais de 30cm, concorrente e contracorrente, na primeira etapa do trabalho. Na segunda etapa foi considerada uma secção contracorrente de 20cm e uma secção concorrente de 40cm. Vários conjuntos de condições não puderam ser simulados porque o gás saturava antes da saída (Ex. para o caso onde W_{ct}/W_{cc}

$= 3$, $W_{ct}/W_s = 8$, $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$, Reciclo = 50%, $L_{ct} = L_{cc} = 30\text{cm}$ e $W_{ct} = 0,033\text{ kg/s}$).

- Estudo da eficiência térmica (E.T.)

Analísaram-se em primeiro lugar as eficiências térmicas (E.T.) em função de cada variável: razão entre vazão de ar de mistura contracorrente e vazão do sólido ($R_{ct} = W_{ct}/W_s$), razão entre vazão de ar de mistura na secção contracorrente e vazão de ar de mistura na secção concorrente (W_{ct}/W_{cc}) e temperatura de gás nas entradas (T_{ge}) dos dois corpos do secador. Nas figuras II.7 e II.8 é mostrada a eficiência térmica (E.T.) em função da razão entre vazão de ar na secção contracorrente e concorrente; com a diferença que a temperatura fixa de entrada de ar (T_{ge}) na figura II.7 é $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$ e na figura II.8 é de $T_{ge} = 100^\circ\text{C}$. Foram fixados: reciclo = 50%, comprimento do secador da secção concorrente $L_{cc} = 30\text{cm}$, comprimento da secção contracorrente $L_{ct} = 30\text{cm}$ e vazão de ar na secção contracorrente, $W_{ct}=0,033\text{kg/s}$. Estas mesmas condições foram fixas em todos os gráficos, desde a figura II.7 até a II.13.

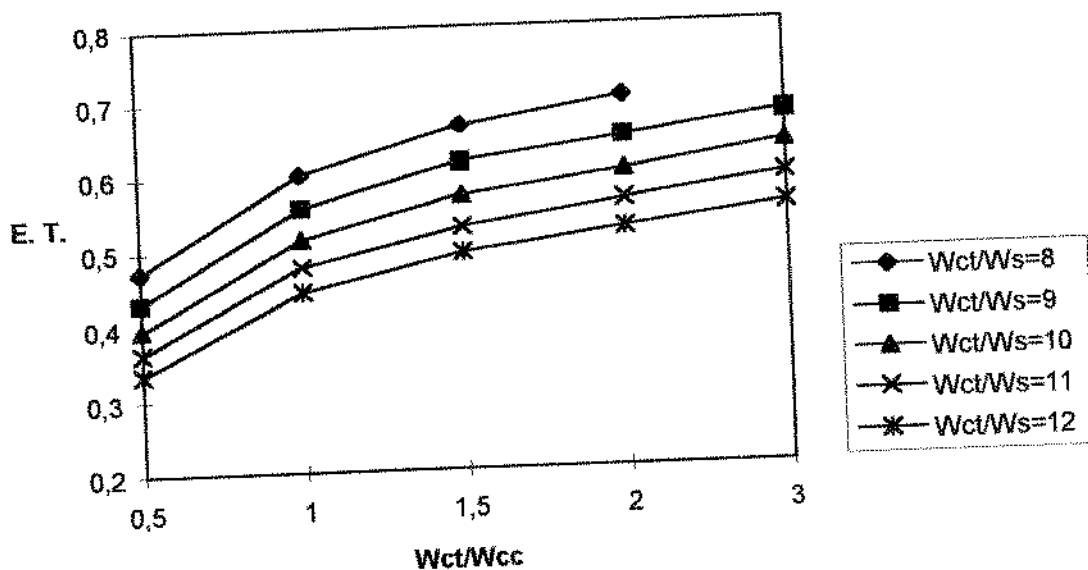


Figura II.7 - Eficiência térmica (E.T.) em função da razão entre vazão de ar na secção contracorrente e concorrente (W_{ct}/W_{cc}) do secador.
 $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$ Reciclo = 50% $L_{ct} = 30\text{cm}$ $L_{cc} = 30\text{cm}$ $W_{ct} = 0,033\text{kg/s}$

A análise da figura II.7 mostra que os valores das eficiências térmicas (E.T.) diminuem com o aumento dos valores da razão $R_{ct} = W_{ct}/W_s$. Este fato era esperado, pois com o aumento da vazão do sólido (W_s) há maior aproveitamento da energia interna do ar aquecido, embora a umidade do sólido na saída (X_f) do secador aumente.

Nesta mesma figura, pode-se observar que os valores da eficiência térmica (E.T.) aumentam com o aumento dos valores da razão W_{ct}/W_{cc} . Isto se deve à perda da energia térmica do ar quente, que não é aproveitada na saída do secador na secção concorrente. Esta perda é maior quanto maior for a vazão de ar nesta secção (W_{cc}) e menor a relação de reciclo. Nestas condições, há maiores quantidades de ar quente escoando na saída da secção contracorrente do secador.

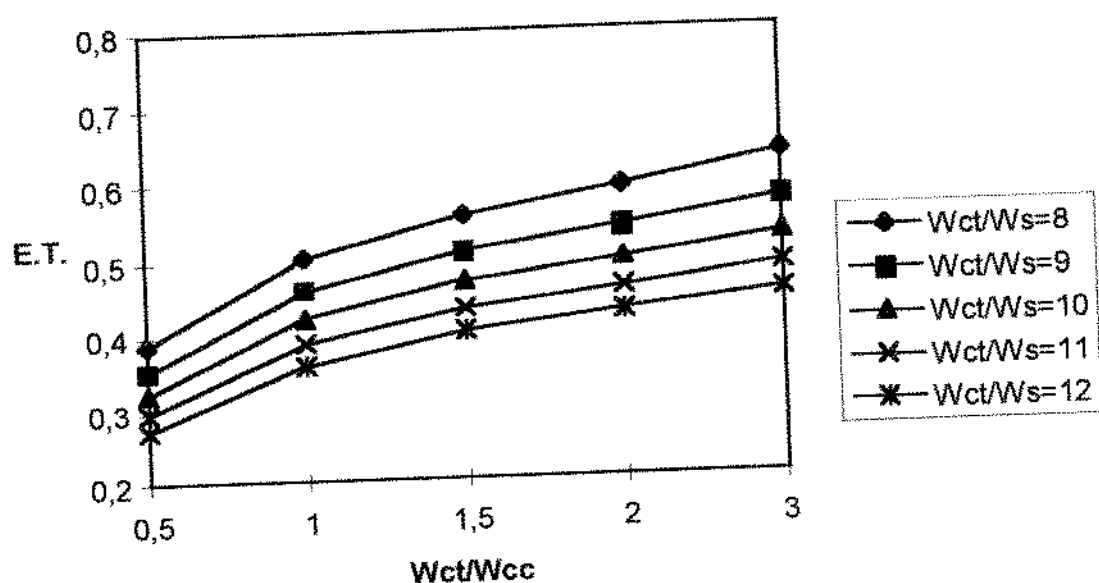


Figura II.8 - Eficiência térmica (E.T.) em função da razão entre vazão de ar na secção contracorrente e concorrente (W_{ct}/W_{cc}) do secador.

$T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$ Reciclo = 50% $L_{ct} = 30\text{cm}$ $L_{cc} = 30\text{cm}$ $W_{cl} = 0,033 \text{ kg/s}$

Ao comparar as figuras II.7 e II.8, nota-se que os valores das eficiências térmicas (E.T.) são menores para valores maiores de temperatura de ar nas entradas dos secadores (T_{ge}).

- Estudo da umidade do sólido na saída do secador ($X_f = X_3$)

As figuras II.9 e II.10 mostram a umidade do sólido na saída da secção concorrente do secador (X_f) em função da razão entre a vazão de ar na secção contracorrente e concorrente (W_{ct}/W_{cc}). A diferença entre elas está na condição fixa de temperatura T_{ge} . Na figura II.10, a condição fixa é de $T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$ e na outra é de $T_{ge} = 80^{\circ}\text{C}$, sendo mantidos constantes: $\text{reciclo}=50\%$, $L_{cc} = L_{ct} = 30\text{cm}$, $W_{ct} = 0,033 \text{ kg/s}$.

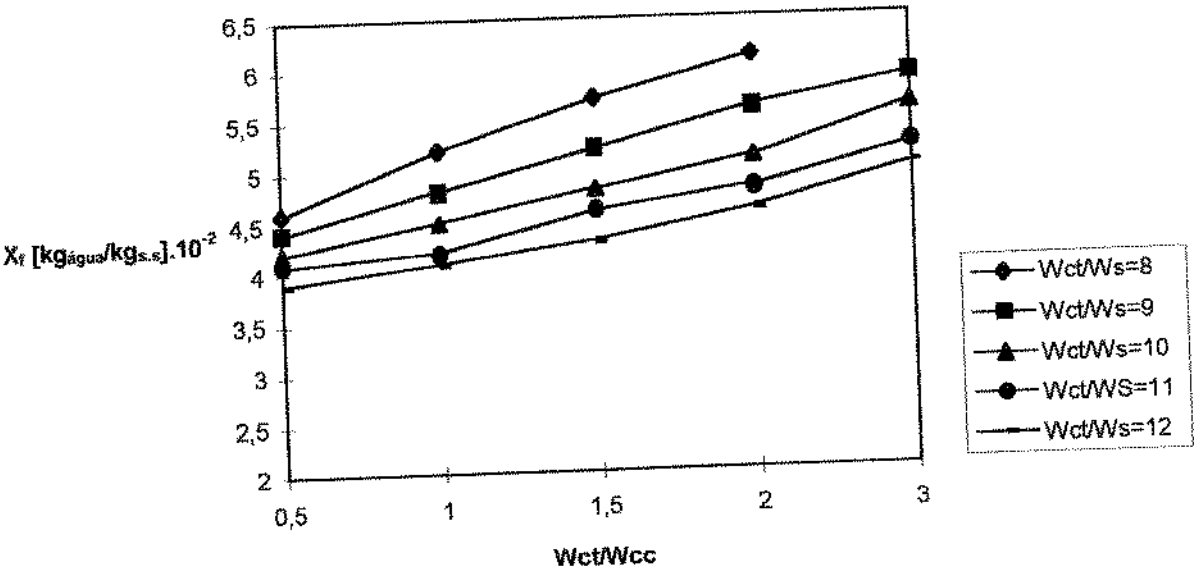


Figura II.9 - Umidade do sólido na saída da secção concorrente do secador (X_f) em função da razão W_{ct}/W_{cc} .
 $T_{ge} = 80^{\circ}\text{C}$ $\text{Reciclo} = 50\%$ $L_{ct} = 30\text{cm}$ $L_{cc} = 30\text{cm}$ $W_{ct} = 0,033 \text{ kg/s}$

Analisando a figura II.9, a simulação mostra que o valor da umidade na saída do corpo concorrente (X_f) aumenta significativamente com o aumento da razão W_{ct}/W_{cc} . Aumentar a razão W_{ct}/W_{cc} significa diminuir a vazão do ar no secador na secção concorrente e com isto diminui a temperatura do ar e aumenta a sua umidade ao longo do secador, diminuindo portanto a força impulsora de transferência de calor e massa. A simulação no ponto W_{ct}/W_s não pôde ser feita porque o ar saturava.

Observou-se ainda, pela figura II.9, que a umidade do sólido na saída do secador na secção concorrente (X_f) aumenta com a diminuição da razão W_{ct}/W_s . Isto porque ao se aumentar a vazão do sólido (W_s), mantendo fixa a vazão do ar tanto na secção concorrente (W_{ct}) como na contracorrente (W_{cc}),

diminui a força motriz da transferência de massa de água do sólido, e conseqüentemente a umidade na saída do secador (X_f) aumenta.

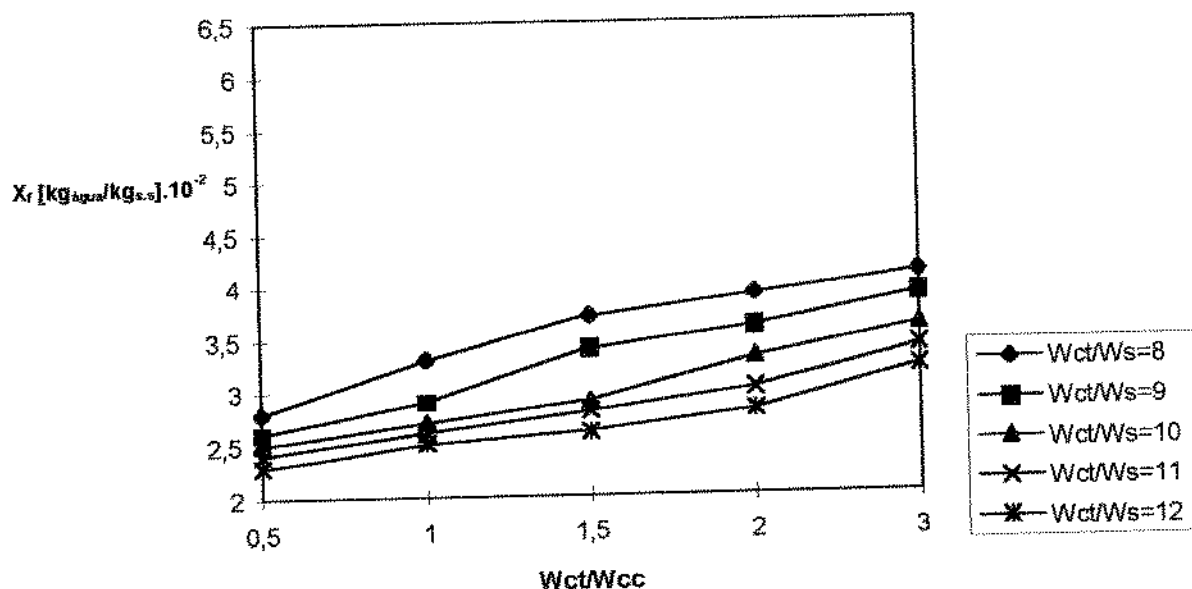


Figura II.10 - Umidade do sólido na saída da seção concorrente do secador (X_f) em função da razão W_{ct}/W_{cc} .

$T_{ge} = 100^\circ\text{C}$ Reciclo = 50% $L_{ct} = 30\text{cm}$ $L_{cc} = 30\text{cm}$ $W_{ct} = 0,033\text{ kg/s}$

Um estudo comparativo entre as figuras II.9 e II.10 mostra que ao se elevar a temperatura do ar de entrada nos secadores (T_{ge}), os valores das umidades do sólido na saída do secador concorrente (X_f) diminuíram, devido ao aumento da transferência de massa e calor do ar para secar o sólido, tanto na seção contracorrente como na concorrente.

- Estudo da influência do reciclo

A figura II.11 mostra a eficiência térmica (E.T.) em função de razão entre a vazão de ar na seção concorrente e contracorrente (W_{ct}/W_{cc}) durante a secagem da proteína texturizada no secador. As condições fixas estão indicadas na figura. O ponto W_{ct}/W_s não pôde ser simulado porque o ar saturava.

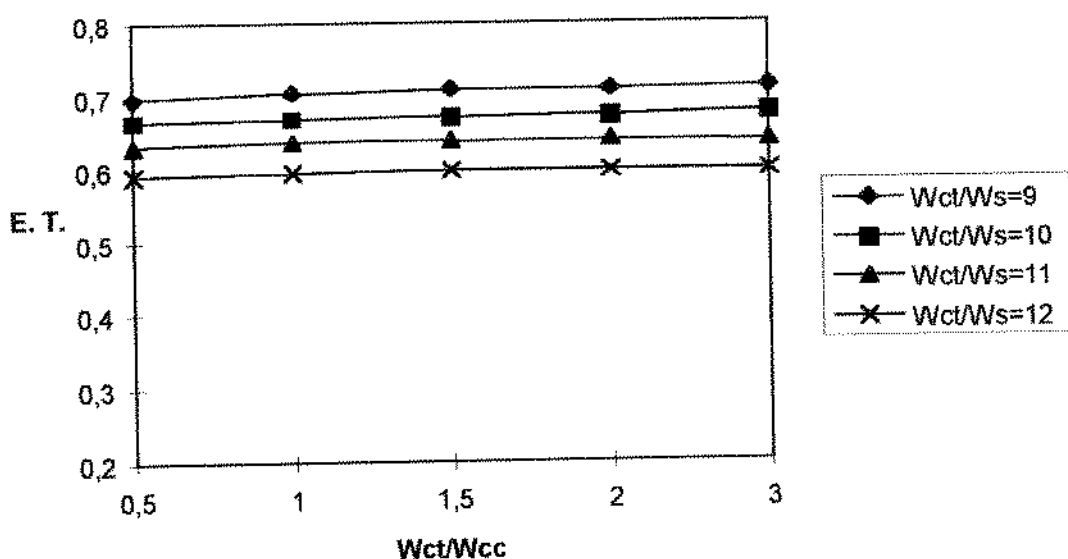


Figura II.11 - Eficiência térmica (E.T.) em função da razão W_{ct}/W_{cc} .
 $T_{ge} = 80^{\circ}\text{C}$ Reciclo = 100% $L_{ct} = 30\text{cm}$ $L_{cc} = 30\text{cm}$ $W_{ct} = 0,033\text{ kg/s}$

Pode-se analisar a influência do reciclo no secador (figura II.11). O sistema de reciclo máximo (100%) mostra que a eficiência térmica possui um valor máximo com pequenos aumentos, à medida que as relações de vazão crescem, porém este aumento é insignificante. Uma análise comparativa entre as figuras II.7 e II.11 mostra que o sistema com reciclo de 50% apresenta um valor de eficiência térmica significativamente mais baixo, que cresce à medida que o valor da razão W_{ct}/W_{cc} aumenta. Ao aumentar o valor do reciclo, maior será a energia recuperada na saída da secção concorrente do secador, atingindo o máximo com o reciclo de 100%, tornando quase que totalmente independente da razão W_{ct}/W_{cc} . Os valores da eficiência caem “levemente” para relação de W_{ct}/W_{cc} decrescente, quando o aumento da umidade do gás reciclado começa a ter influência, à medida que a vazão do contracorrente decresce. Ao contrário, quando o reciclo é baixo, quanto maior a vazão de ar na secção concorrente (W_{cc}) maior é a perda de eficiência térmica.

Na figura II.12 é mostrada a umidade de saída do sólido (X_f) do secador.

Pode-se analisar a influência do reciclo sobre a umidade final do sólido na saída do secador (X_f). Uma observação comparativa entre as figuras II.9 e II.12 mostra que o valor da umidade do sólido na saída do secador (X_f) para o sistema de reciclo de 100% é ligeiramente superior ao de 50%. Esta era uma tendência esperada, pois aumentar o reciclo significa aumentar a umidade do ar na entrada do secador, tanto na secção contracorrente como na concorrente e

conseqüentemente a capacidade de secagem do ar diminui. Este acréscimo na umidade de ar, no caso estudado, afeta pouco a secagem.

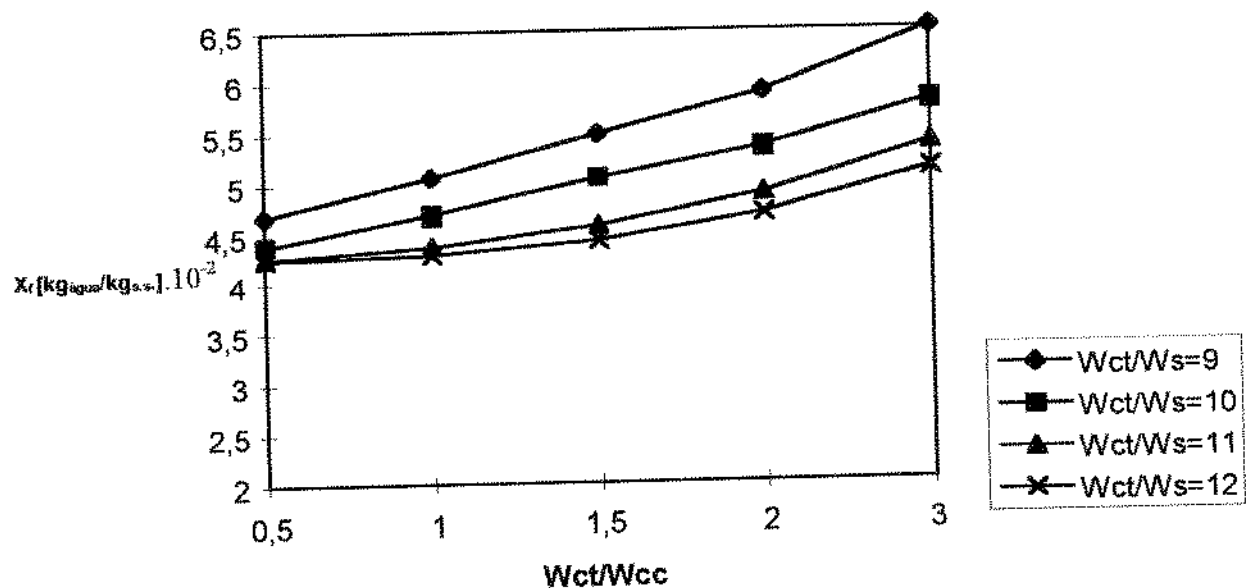


Figura II.12 - Umidade do sólido na saída do secador (X_f) em função da razão W_{ct}/W_{cc} .
 $T_{ge} = 80^{\circ}C$ Reciclo = 100% $L_{ct} = 30cm$ $L_{cc} = 30cm$ $W_{ct} = 0,033 \text{ kg/s}$

- Estudo da influência da relação entre comprimento da secção contracorrente e concorrente (L_{ct}/L_{cc})

O gráfico da figura II.13 mostra a eficiência térmica (E.T.) em função da razão W_{ct}/W_{cc} para $L_{ct} = 20cm$ e $L_{cc} = 40cm$.

Nos casos analisados anteriormente, foi fixado um comprimento igual para a secção contracorrente e concorrente de $L_{ct} = L_{cc} = 30cm$. No presente caso, para a mesma faixa de variáveis, foram calculadas a eficiência energética e a umidade de saída para um comprimento de $L_{ct} = 20cm$ e $L_{cc} = 40cm$. As eficiências energéticas calculadas quando se decresce o comprimento da secção contracorrente em relação à concorrente foram menores em todos os casos. Já tinha sido concluído por HUBINGER (1994) que o secador contracorrente é o mais eficiente. Entretanto, pode-se verificar que à medida que decresce a secção contracorrente, pode-se utilizar a razão entre a vazão de gás no setor contracorrente e vazão de sólido menor ($R_{ct} = W_{ct}/W_s = 8$) para aumentar a eficiência energética a níveis anteriores (Figura II.13).

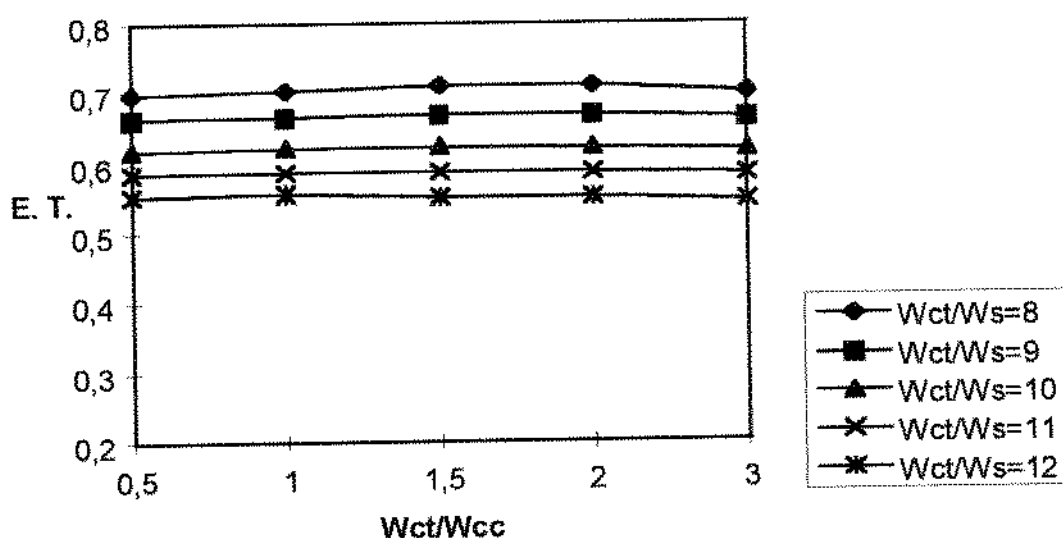


Figura II.13 - Eficiência térmica (E.T.) em função da razão W_{ct}/W_{cc} .
 $T_{ge} = 80^{\circ}\text{C}$ Reciclo = 100% $L_{ct} = 20\text{cm}$ $L_{cc} = 40\text{cm}$ $W_{ct} = 0,033 \text{ kg/s}$

II.C.2 - OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM SECADOR DE LEITO DESLIZANTE MISTO

Nesta secção são apresentados os dados de simulação e otimização da eficiência térmica de um secador misto na forma de superfície de resposta. O modelo matemático de ajuste de dados da eficiência térmica é representado pelas três variáveis dependentes: T_{ge} , R_{ct} e L_{ct} . Isto torna impossível construir uma superfície de resposta numa única figura, pois esta figura possui 4 dimensões. Desta maneira há a necessidade de analisar a superfície de resposta (eficiência térmica) com variáveis dois a dois, fixando as outras variáveis no ponto central das faixas estudadas, resultando num total de 3 figuras. A figura II.14 representa a superfície de resposta da eficiência térmica (E.T) em função das variáveis T_{ge} e R_{ct} . A figura II.15 representa a superfície de resposta da eficiência térmica em função das variáveis T_{ge} e L_{ct} . A figura II.16 representa a superfície de resposta da eficiência térmica em função das variáveis R_{ct} e L_{ct} .

Nesta secção foram otimizadas as seguintes faixas de condições de operação:

- temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) de 70°C a 100°C ;
- razão entre a vazão de ar e sólido na secção contracorrente ($R_{ct} = W_{ct}/W_s$) de 8 a 12;
- comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}) de 20cm a 40cm.

A razão entre a vazão de ar de reciclo e vazão de ar na secção concorrente (R_{rec}) foi fixa igual a 1,0; e a razão entre a vazão de ar na secção concorrente e a vazão do sólido (R_{cc}) foi adotada como constante e igual a 10. Estas variáveis podem ser fixadas em função do demonstrado no item anterior que a eficiência é máxima para reciclagem total de ar da secção concorrente e independe portanto da vazão nesta secção.

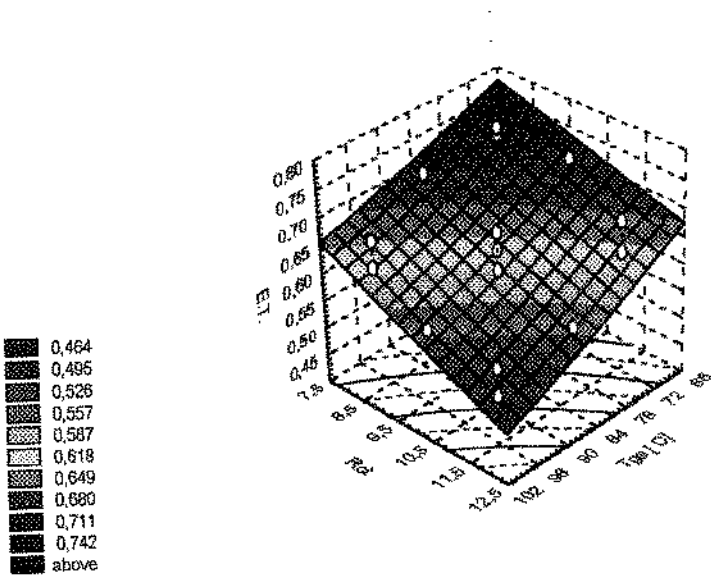


Figura II.14 – Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T) em função das variáveis T_{ge} e R_{ct} , $= W_{ct}/W_s$, calculada no ponto central $L_{ct}=30\text{cm}$.

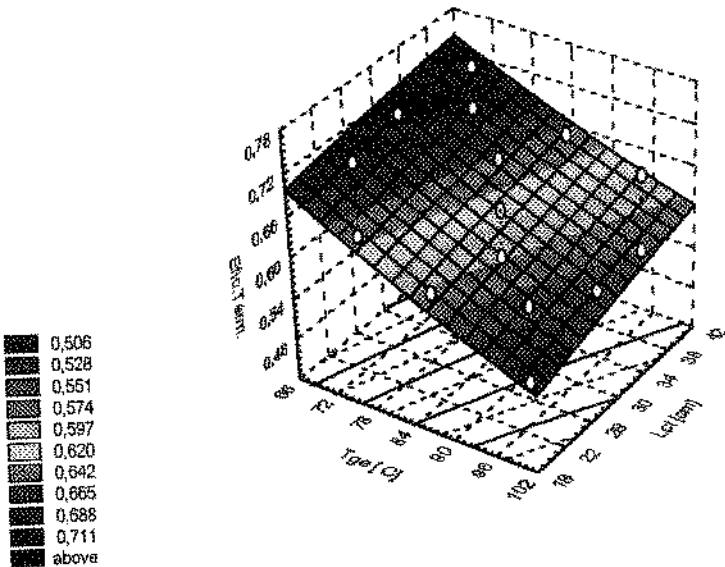


Figura II.15 – Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T) em função das variáveis T_{ge} e L_{ct} , calculada no ponto central $R_{ct} = 10$.

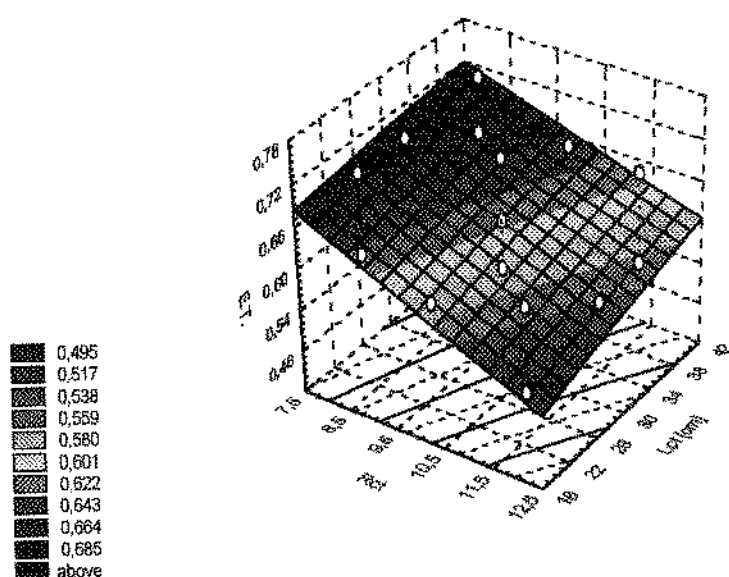


Figura II.16 – Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T) em função das variáveis L_{ct} e R_{ct} , calculada no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$.

A tabela II.5 mostra os índices de ajuste destas superfícies de respostas da eficiência térmica aos dados simulados.

Tabela II.5 – Ajuste de superfície de resposta da eficiência térmica aos dados da simulação de secador de leite deslizante misto.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 61,90$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 10,16$	6,09
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	12,98
Porcentagem de variância explicada = 99,1%		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

A partir da tabela II.5, pode-se observar que a superfície de resposta da eficiência térmica se ajustou bem aos dados simulados. O teste F mostra que tanto a nível de 99% como 95% de significância, a superfície de resposta se ajustou significativamente. A porcentagem de variância explicada de 99,1% é outro índice que a superfície de resposta se ajustou bem.

Agrupando as informações das 3 superfícies, conclui-se que a eficiência térmica possui um valor máximo nos seguintes valores de variáveis : $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 8,0$ e $L_{ct} = 40\text{cm}$. Estes valores indicam que a tendência do secador atingir a eficiência térmica máxima é no sentido de saturação do ar com a umidade pois:

1. o ar de entrada do secador com temperatura (T_{ge}) mais baixa, ao sair do secador na secção contracorrente possui umidade maior comparada ao ar com aquela com temperatura T_{ge} maior;
2. vazão menor de ar (R_{ct} , W_{ct}/W_s menor) terá maior umidade na saída do secador comparado com aquele de vazão maior;
3. o ar que permanece em contato com o sólido por maior tempo (L_{ct} maior) terá maior umidade na saída do secador.

Estes fatos evidenciam que a eficiência térmica do secador será maior quanto mais próximo o ar na saída estiver da região de saturação.

As figuras mostram ainda que a eficiência térmica aumenta quando T_{ge} e R_{ct} diminuem e L_{ct} aumenta. Ainda pela observação das figuras, através das comparações das inclinações das superfícies, nota-se que a influência das variáveis T_{ge} e R_{ct} tem as magnitudes próximas (figura II.14), enquanto a variável L_{ct} possui uma influência bem menor sobre a eficiência térmica (figura II.15 e II.16), especialmente na zona de máxima E.T., ou seja, valores baixos de T_{ge} e R_{ct} .

Nas figuras II.17, II.18 e II.19 são mostradas as superfícies de resposta do comprimento total do secador misto (L_{total}) em função de temperatura de ar na entrada do secador (T_{ge}), razão entre a vazão de ar e sólido na secção contracorrente (R_{ct}) e comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}). O comprimento total do sistema é a soma dos comprimentos da secção concorrente e contracorrente. O objetivo é estudar como o comprimento total do secador misto se relaciona com a eficiência térmica (E.T) máxima.

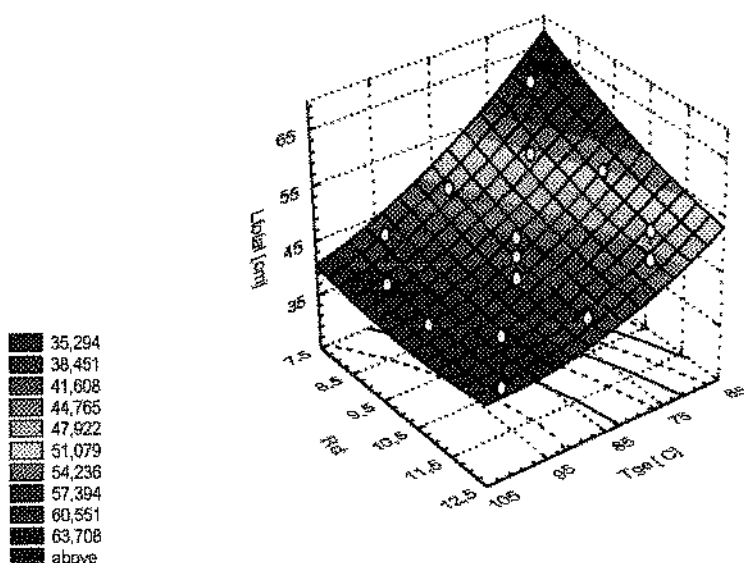


Figura II.17 – Superfície de resposta do comprimento total do secador (L_{ct}) em função das variáveis T_{ge} e R_{ct} , $=W_{ct}/W_s$, calculada no ponto central $L_{ct} = 30\text{cm}$.

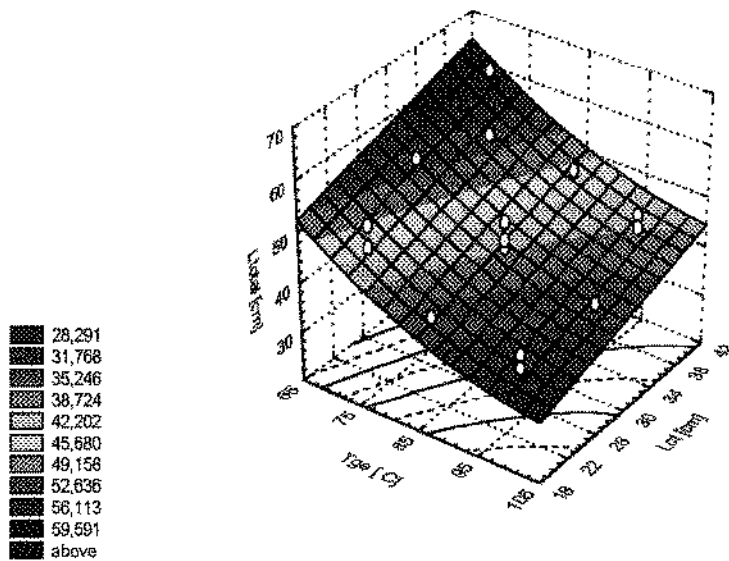


Figura II.18 – Superfície de resposta do comprimento total do secador (L_{total}) em função das variáveis T_{ge} e L_{ct} , calculada no ponto central $R_{ct}=10$.

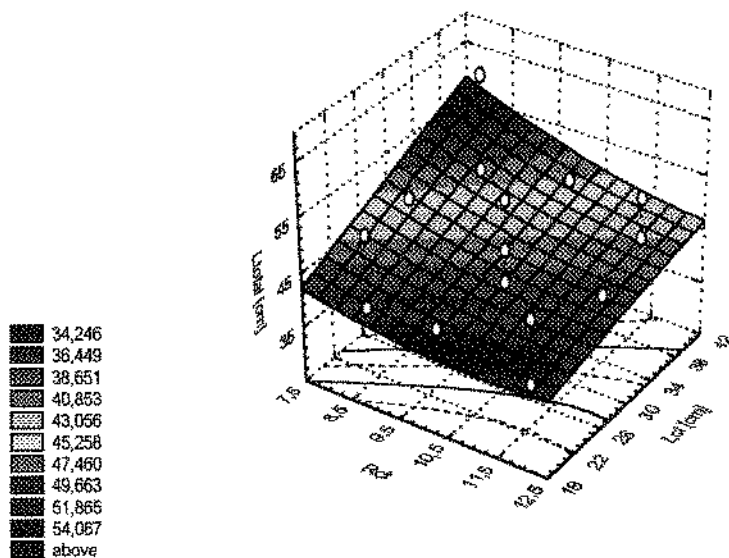


Figura II.19 – Superfície de resposta do comprimento total do secador misto (L_{total}) em função das variáveis L_{ct} e R_{ct} , calculada no ponto central $T_{ge}=85^{\circ}\text{C}$.

A tabela II.6 mostra os índices de ajuste destas superfícies de respostas do comprimento total do secador (L_{total}) aos dados simulados.

Tabela II.6 – Ajuste de superfície de resposta do comprimento total do secador da simulação de secador de leite deslizando misto.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 7,94$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9,5} = 10,16$	0,8
	$F_{0,95; 9,5} = 4,77$	1,76
Porcentagem de variância explicada = 93,5%		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

Pela análise da tabela II.6, pode-se observar que a superfície de resposta do comprimento total do secador se ajustou bem em termos de porcentagem de variância explicada. O teste F mostra que a nível de 95% de significância, a superfície de resposta se ajustou bem. Embora a nível de 99% de significância não tenha se ajustado, o cálculo de erro médio mostrou um valor de 4% de erro, que é pequeno.

Nas condições de operação ótima para ter a máxima eficiência térmica (E.T.): $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = W_{ct}/W_s = 8$ e $L_{ct} = 40\text{cm}$, observa-se que nas superfícies de resposta das figuras II.17, II.18 e II.19, tem-se o secador misto com o seu maior tamanho. Conclui-se deste fato que a eficiência térmica maior (ou máxima) é conseguida à custa de tamanhos maiores de secadores.

II.D - CONCLUSÕES

- 1 - Há máximos de eficiências quando se trabalha com o reciclo de 100 %.
- 2 - Menores temperaturas do ar de entrada nos secadores (T_{ge}) assim como a diminuição da relação $R_{ct} = W_{ct}/W_s$ (vazão de ar na secção contracorrente baixa) levam ao aumento da eficiência térmica.
- 3 - A variável R_{cc} (vazão de ar na secção concorrente) mostrou-se ter pouca influência, quando mantido o valor de reciclo $R_{rec} = 100\%$. A variável R_{cc} passa a influenciar a eficiência térmica quando a R_{rec} possui valores menores que 100% e quanto menor a R_{rec} a influência será maior.
- 4 - A eficiência térmica do secador de leito deslizante misto na secagem da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 (dentro das faixas estudadas) tem um valor máximo de $E.T = 0,73$ nos pontos: $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$, $R_{ct} = 8$, $L_{ct}=40\text{cm}$ e mantido o valor de $R_{rec} = 100\%$. O valor de L_{cc} nestas condições foi de $L_{cc} = 25\text{cm}$.
- 5 - A tendência da eficiência térmica é máxima quando o ar que seca o sólido tende a saturar, porém à medida que a secagem se aproxima desta região de saturação de ar com a umidade fica cada vez mais difícil a secagem de alimentos, exigindo um secador cada vez mais comprido.

Capítulo III

III – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA CINÉTICA DE SECAGEM NO TEMPO DE RESIDÊNCIA E NA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM SECADOR DE LEITO DESLIZANTE MISTO (CONTRACORRENTE MAIS CONCORRENTE)

III.A - INTRODUÇÃO

Esta parte do trabalho consiste em um estudo teórico sobre a influência da cinética de secagem no tempo de residência do sólido e na eficiência térmica de secador de leito deslizante misto com reciclo de ar. Para analisar o efeito da mudança na taxa de secagem, foi adotada uma cinética tipo exponencial na qual foram mudadas as constantes e verificado o seu efeito na performance do secador.

III.B - MATERIAL E MÉTODOS

III.B.1 - MATERIAL

Foram feitas as mesmas considerações do capítulo II, item II.B.1:

- umidade inicial do sólido $X_1 = 0,245$ (b.s);
- temperatura de entrada do sólido $T_{p1} = 32^\circ\text{C}$;
- vazão do sólido $W_s = 3,3 \cdot 10^{-3}$ kg/s;
- área transversal do secador $A = 2,25 \cdot 10^{-2}$ m²;
- temperatura do ar $T_{ar} = 25^\circ\text{C}$ (com 60% de umidade relativa).

A umidade final do sólido foi fixada em $X_f = 0,1$ kg água/kg s.s.

III.B.1.1 - EQUIPAMENTOS

O mesmo esquema de equipamento da figura II.5 mostrado no item II.B.1 foi utilizado na simulação. Todas as considerações do item II.B.1: as equações II.1, II.2, II.3 e II.4; as condições de operação fixas de $R_{rec} = 100\%$ e $R_{cc} = 10$ foram adotadas.

Nesta secção foram adotados os seguintes valores: $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$; $R_{ct} = 10$; e L_{ct} com valores dependentes da constante cinética B que será explicada mais

adiante no item III.B.3. Estas condições de operação: temperatura de entrada de ar (T_{ge}), razão entre a vazão de ar e sólido na secção contracorrente (R_{ct}) e comprimento na secção contracorrente (L_{ct}) foram fixadas já que não é objetivo deste capítulo a otimização energética.

III.B.2 - MÉTODOS

Foram feitas as mesmas considerações do capítulo II, itens II.B.2.1; II.B.2.2; II.B.2.3 e II.B.2.4 com exceção do item II.B.2.5, pois não é de interesse otimizar alguma resposta.

III.B.3 - VALORES ADOTADOS DA CONSTANTE CINÉTICA B

Ao contrário do capítulo II, não foram adotados valores fixos de constantes cinéticas B_0 e $\Delta E/R$, pois o objetivo é avaliar a influência destas constantes no tempo de residência do sólido e eficiência térmica do secador.

A expressão para cálculo da constante cinética B está mostrada a seguir:

$$B = B_0 \cdot \exp\{-E_A/(R \cdot T)\} = B_0 \cdot \exp(-A_0/T) \quad (III.1)$$

Como pode ser observado, o valor de B depende de duas constantes B_0 e A_0 , conseqüentemente o estudo foi dividido em três partes:

- estudo da influência de B_0 ,
- estudo da influência de A_0 ,
- estudo da influência simultânea do A_0 e B_0 .

Em particular, foi analisada a influência das constantes cinéticas A_0 e B_0 sobre:

- o tempo de residência do produto no interior do secador (t_{rm}), ou seja, como a vazão do sólido é constante e foi fixada a umidade final requerida $X_f = 0,1$ kg_{água}/kg_{s.s.}, o comprimento total do secador é variável e dependente desta umidade final (a própria simulação determina este valor);
- a eficiência térmica do sistema (E.T).

HUBINGER (1994) utilizou os valores das constantes cinéticas A_0 e B_0 para a proteína texturizada R-NR 3007, onde $A_0 = 1885 \text{ K}^{-1}$ e $B_0 = 0,564 \text{ s}^{-1}$. Foram adotados os valores A_0 e B_0 de tal maneira a se conseguir taxas de secagem médias nos valores de 1/4, 1/3, 1/2, 2 e 3, da taxa de secagem para o extrusado de soja. Para este fim os seguintes valores de B_0 foram adotados: um quarto, um terço, metade, dobro e triplo dos valores de B_0 da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007. Para os valores de A_0 foram escolhidos valores tais que o fator $\exp(-A_0/T)$ resultasse em: um quarto, um terço, metade, dobro e triplo dos valores do fator $\exp(-A_0/T)$ da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007. Para este cálculo o valor da temperatura T considerado foi o valor médio entre a temperatura de ar de entrada e saída no secador estudado. Algumas simulações com as constantes cinéticas da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 mostraram que este valor médio de temperatura T é próximo de $58,8^\circ\text{C}$. Adotou-se este procedimento porque, conforme observado na equação III.1, a constante cinética total B é diretamente proporcional ao fator $\exp(-A_0/T)$.

Para avaliar a influência simultânea das constantes cinéticas A_0 e B_0 foi planejado um estudo de tal maneira que o produto $B_0 \cdot \exp(-A_0/T)$ tivesse as seguintes proporções em relação ao valor deste termo para a proteína texturizada : 1/4, 1/3, 1/2, 2 e 3; além disso, a constante cinética B_0 deve ter a mesma contribuição que o fator $\exp(-A_0/T)$.

Com o intuito de poder comparar os resultados tratou-se de manter aproximadamente a relação entre comprimento da secção contracorrente/comprimento total do secador (L_{cc}/L_{total}) constante, já que é a variável que mais afeta a eficiência térmica.

Foi estabelecido o valor de 30cm para o comprimento da secção contracorrente (L_{ct}) no secador, para as constantes cinéticas da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007, com todas as condições de operações fixadas. Para cada nova constante cinética estudada, foi fixado um valor de L_{ct} diferente. Este valor de L_{ct} foi calculado multiplicando o fator: 1/4, 1/3, 1/2, 2 e 4 ao valor de 30cm. Isto porque um aumento na taxa de secagem acarretará aproximadamente o mesmo aumento no comprimento do secador, nas mesmas condições de operação. Estes valores foram calculados através de um estudo “exploratório” para um secador mais simples, concorrente e contracorrente. Estes dados não são mostrados aqui. Para o secador misto, este estudo é feito em termos de comprimento total do secador (L_{total}) na secção III.C.1. Deste modo, embora o comprimento da secção contracorrente (L_{ct}) é fixo para cada simulação de acordo com a tabela III.1, o comprimento na secção concorrente (L_{cc}) ao contrário é variável. Este comprimento L_{cc} será determinado automaticamente pela simulação quando a umidade final do sólido atingir $0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$.

Os valores de B_0 , A_0 e L_{ct} utilizados estão mostrados na tabela III.1.

Tabela III.1 – Valores adotados de constantes cinéticas A_0 e B_0 e comprimento da secção contracorrente do secador misto.

Fator	Constante cinética B_0 ($A_0=1885 \text{ K}^{-1}$)	Constante cinética A_0 ($B_0=0,564 \text{ s}^{-1}$)	Estudo simultâneo das constantes cinéticas A_0 e B_0		Comprimento da secção contracorrente para todos os casos
-	$B_0 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$A_0 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$B_0 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$A_0 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$L_{ct} \text{ [cm]}$
3	1,692	1492	0,977	1688	90
2	1,128	1637	0,798	1761	60
1	0,564	1885	0,564	1885	30
$\frac{1}{2}$	0,282	2133	0,399	2009	15
$\frac{1}{3}$	0,188	2278	0,326	2082	10
$\frac{1}{4}$	0,141	2381	0,282	2133	7,5

No estudo da influência da constante cinética B_0 , o valor de A_0 foi mantido constante igual a 1885 K^{-1} . No estudo da constante cinética A_0 , o valor de B_0 foi mantido constante igual a $0,564 \text{ s}^{-1}$.

III.C - RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

III.C.1 - INFLUÊNCIAS DAS CONSTANTES CINÉTICAS SOBRE O TEMPO DE RESIDÊNCIA DO SÓLIDO

Primeiramente analisar-se-á o efeito de mudar a taxa de secagem no tempo de residência média do sólido no secador, ou seja, no comprimento total do mesmo.

Nas figuras III.1, III.2 e III.3 estão os resultados das simulações do sistema mostrando respectivamente os efeitos das constantes cinéticas B_o , A_o e seus efeitos simultâneos sobre o tempo de residência.

Os números nas abscissas representam os valores relativos de B_o , o fator $\exp(-A_o/T)$ e o fator $B_o \cdot \exp(-A_o/T)$ em relação às constantes calculadas em função de $B_{o\text{referência}} = 0,564 \text{ s}^{-1}$ e $A_{o\text{referência}} = 1885 \text{ K}^{-1}$, da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007. Estes valores de referência são respectivamente $B_{o\text{referência}} = 0,564 \text{ s}^{-1}$; $\exp(-A_{o\text{referência}}/T_{\text{médio}}) = 3,418 \cdot 10^{-3}$ e $B_{o\text{referência}} \cdot \exp(-A_{o\text{referência}}/T) = 1063,14$.

Nas ordenadas tem-se os valores de tempo de residência relativo (t_{relativo}) ao tempo de residência simulado com constantes cinéticas A_o e B_o da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007, mantidas todas as condições de operação dos secadores constantes. Com todas as condições de operação citadas na metodologia da secção III.B.1 e III.B.2, através da simulação obteve-se o valor de tempo de referência $t_{\text{referência}}$ igual a 820 segundos.

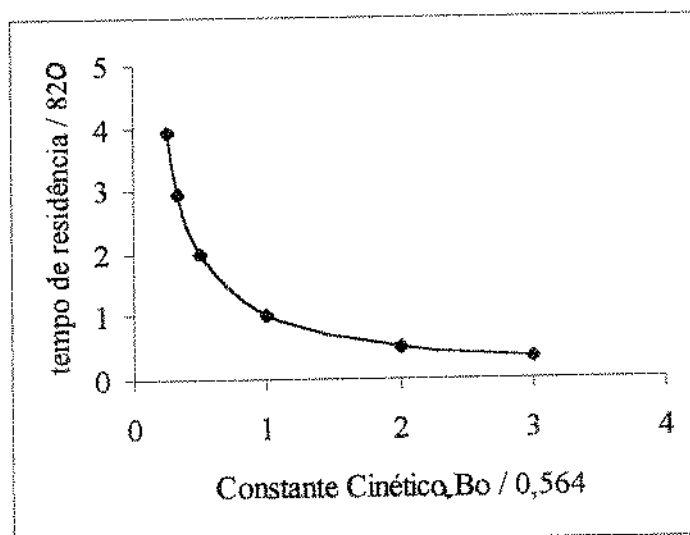


Figura III.1 - Gráfico de resultado da simulação de tempo de residência relativo ($t/t_{\text{referência}}$) em função da constante cinética B_o relativa ($B_o/B_{o\text{referência}}$) do secador misto.

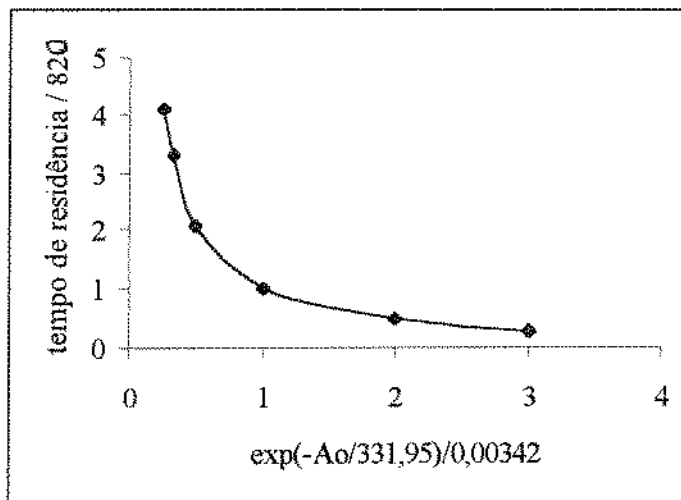


Figura III.2 - Gráfico do resultado da simulação de tempo de residência relativo (t/t_{relativo}) em função do fator $\exp(-A_o/T)$ relativo ($\exp(-A_o/T)/\exp(-A_o_{\text{referência}}/T_{\text{médio}})$) do secador misto.

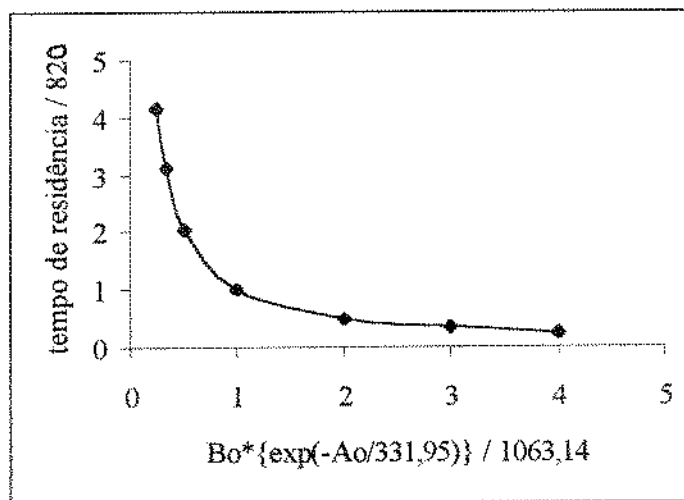


Figura III.3 - Gráfico de resultados da simulação de tempo de residência relativo ($t/t_{\text{referência}}$) em função do fator $B_o_{\text{relativo}} \cdot \exp(-A_o_{\text{relativo}}/T)$ $\{B_o \cdot \exp(-A_o/T)/B_o_{\text{relativo}} \cdot \exp(-A_o_{\text{relativo}}/T)\}$ do secador misto.

Observando os gráficos das figuras III.1, III.2 e III.3 pode-se notar que o tempo de residência varia inversamente ao valor da constante cinética B_o ,

fator $\exp(-A_0/T)$ e fator $B_0 \cdot \exp(-A_0/T)$.

Estes resultados eram esperados, pois para altos valores de constantes cinéticas, os tempos de residência serão pequenos porque o sólido seca mais rapidamente.

Uma explicação dos resultados em termos matemáticos está mostrada abaixo.

A equação cinética de secagem pode ser descrita como:

$$\frac{dX}{dt} = -B_0 \cdot \exp\left(-\frac{A_0}{T}\right) \{X - X_{eq}\} \quad (\text{III.2})$$

quando se tem uma secagem à temperatura constante T, pode integrar-se:

$$\int_{X_1}^{X_2} dX = -B_0 \cdot \exp\left(-\frac{A_0}{T}\right) \{X - X_{eq}\} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (\text{III.3})$$

rearranjando

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{\int_{X_1}^{X_2} dX}{-B_0 \cdot \exp\left(-\frac{A_0}{T}\right) \{X - X_{eq}\}} \quad (\text{III.4})$$

Como a umidade inicial e a final do sólido são fixas, então o termo $\int_{X_1}^{X_2} dX$ não variará. Da mesma forma, como as constantes de GAB são fixas,

então o termo $(X - X_{eq})$ é constante. Assim o termo $\int_{t_1}^{t_2} dt$ é inversamente proporcional ao termo $B_0 \cdot \exp(-A_0/T)$. O termo $\int dt$ representa o tempo de residência do sólido durante a secagem.

Nas simulações realizadas a alteração da cinética de secagem modificou também os perfis de temperatura ao longo do secador que por sua vez também altera a taxa de secagem. Nesta situação, outras constantes que também são função do alimento como C_p , constantes da equação de GAB foram mantidas

constantes.

Na simulação foi utilizada uma equação bastante complexa para a cinética de secagem onde se leva em conta a distribuição de tempo de residência (equação (II.2); capítulo II; item II.B.2.1) desenvolvida por HUBINGER (1994).

III.C.2 - INFLUÊNCIA DA CINÉTICA DE SECAGEM SOBRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA

Nas figuras III.4, III.5 e III.6 estão mostrados os valores da eficiência térmica para os diversos secadores simulados variando os valores das constantes B_o , fator $\exp(-A_o/T)$ ou o fator $B_o \cdot \exp(-A_o/T)$.

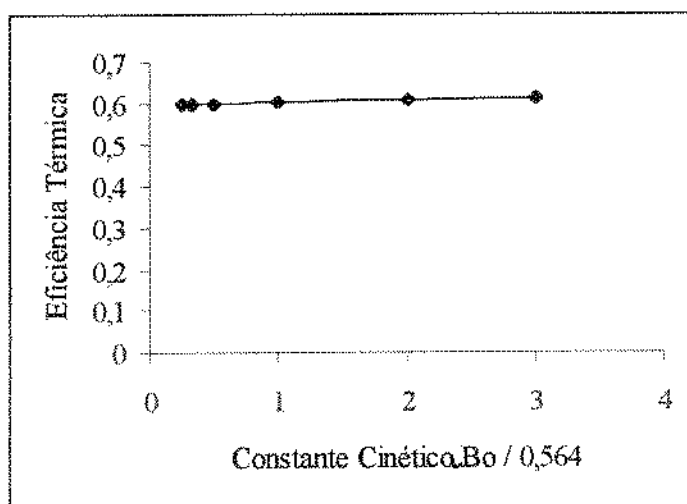


Figura III.4 - Gráfico da eficiência térmica em função da constante cinética $B_{o\text{relativo}}$.

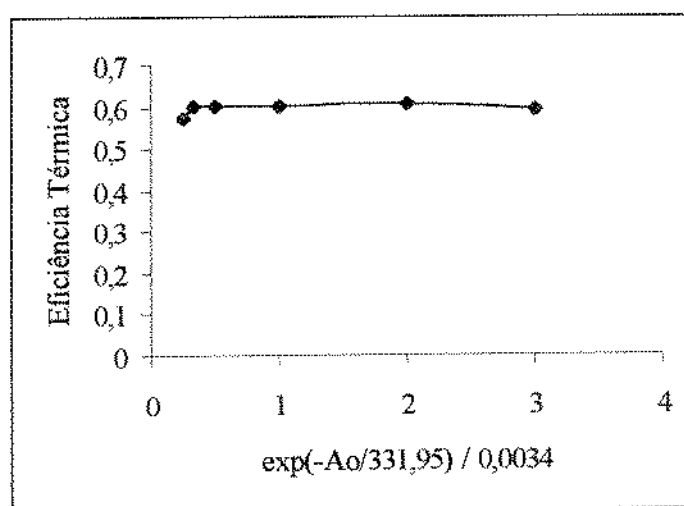


Figura III.5 - Gráfico da eficiência térmica em função de fator $\exp(-A_o/T)$ relativo.

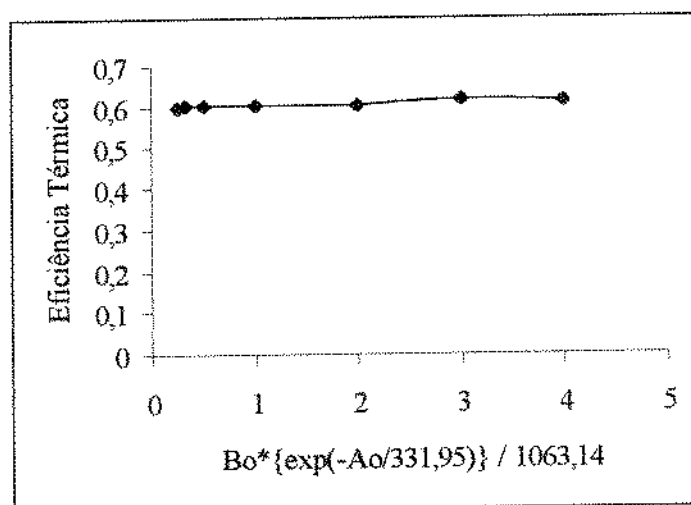


Figura III.6 – Gráfico da eficiência térmica em função de fator $B_o \cdot \exp(-A_o/T)$ relativo.

A partir das figuras III.4, III.5 e III.6 observa-se que a eficiência térmica do secador é praticamente igual com o valor de $E.T. = 0,6$ com a variação da constante cinética B_o , ou o fator $\exp(-A_o/T)$ ou o fator $B_o \cdot \exp(-A_o/T)$. Os valores médios da eficiência térmica das figuras III.4, III.5 e III.6 são 0,599; 0,598 e 0,604 respectivamente e os erros médios em relação a estes valores

médios são 0,7%, 1,5% e 0,6% respectivamente. Isto quer dizer que a eficiência térmica do sistema não varia com as mudanças da difusividade mássica efetiva, desde que mantidas todas as outras condições estudadas fixas, ou seja, mesmos níveis de temperatura, vazão de gás e sólido, umidade inicial e umidade final do sólido. Este resultado não é muito óbvio, já que a mudança de taxa de secagem influencia os perfis de temperatura ao longo do secador e estes a eficiência térmica. Uma análise matemática dos modelos a seguir permite avaliar este fato.

A seguir estão listadas as expressões matemáticas válidas para os sistemas mostrados na secção de metodologia:

$$E.T. = (\text{calor latente da água evaporada}) / (\text{calor fornecido}) =$$

$$= \lambda \cdot W_s \cdot (X_f - X_0) / W_{g_m} \cdot (T_{g_e} - T_{g_m}) \quad (\text{III.5})$$

$$T_{g_m} = (W_{g_{ar}} \cdot T_{g_{ar}} + W_{g_{rec}} \cdot T_{g_{rec}}) / W_{g_m} \quad (\text{III.6})$$

$$T_{g_{rec}} = T_{g \text{ na saída do secador}} \quad (\text{setor concorrente}) \quad (\text{III.7})$$

$$dT_g/dt = \pm \{ W_p / (W_g \cdot C_{p_g}) \} \cdot \{ -\lambda \cdot dX/dt + C_{p_p} \cdot dT_p/dt \} \quad (\text{III.8})$$

$$dT_p/dt = \{ (\lambda / C_{p_p}) \cdot (dX/dt) \} + \{ (h / C_{p_p}) \cdot \hat{a}_c \cdot (T_g - T_p) \} \quad (\text{III.9})$$

Devido às condições fixas do sistema, para o caso específico estudado, as expressões acima podem ser escritas como:

$$\text{Eficiência Térmica} = f(T_{g_m}) \quad (\text{III.10})$$

$$T_{g_m} = f_1(T_{g_{rec}}) = f(T_{g \text{ saída do secador}}) \quad (\text{III.11})$$

$$T_{g \text{ saída do secador}} = f_2 \left\{ \int (dT_g/dt) \cdot dt \right\} \quad (\text{III.12})$$

$$dT_g/dt = f_3 \{ (dT_p/dt), (dX/dt) \} \quad (\text{III.13})$$

$dT_p/dt=f_4\{(dX/dt),T_g,T_p\}$ (III.14)

$T_g=f_5(dX/dt)$ (III.15)

e $T_p=f_6(dX/dt)$ (III.16)

Assim, a influência da variável dX/dt na eficiência térmica é ilustrada pelo procedimento a seguir:

- 1. se T_g e T_p são funções de dX/dt então $dT_p/dt=f(dX/dt)$
- 2. se dT_p/dt é função de dX/dt então $dT_g/dt=f(dX/dt)$
- 3. se dT_g/dt é função de dX/dt então $T_{g\text{saída do secador}}=f(\int dX/dt)$
- 4. se T_{gm} é função de $\int(dX/dt)$ então a Eficiência Térmica é função de $\int(dX/dt).dt$

Desta maneira a Eficiência Térmica não se altera muito com as mudanças de B_o ou A_o , mantidas constantes as condições adotadas.

Através das simulações realizadas foram obtidos os valores das temperaturas do ar de saída no secador ($T_{g\text{final}}$) para valores diferentes das constantes cinéticas A_o e B_o do sistema. A tabela III.2 mostra estes valores.

Tabela III.2 - Valores de $T_{g\text{final}}$ para vários valores de A_o e B_o .

Fator	Estudo da influência da constante cinética B_o		Estudo da influência da constante cinética A_o		Estudo da influência simultânea das constantes cinéticas A_o e B_o		
	B_o (s^{-1})	$T_{g\text{final}}$ ($^{\circ}C$)	A_o (K^{-1})	$T_{g\text{final}}$ ($^{\circ}C$)	A_o (K^{-1})	B_o (s^{-1})	$T_{g\text{final}}$ ($^{\circ}C$)
3	1,692	38,8	1490	37,6	1703	0,977	37,6
2	1,128	37,6	1637	37,6	1770	0,798	37,6
1	0,564	37,6	1885	37,6	1885	0,564	37,6
1/2	0,282	37,6	2133	37,6	2000	0,399	37,3
1/3	0,188	37,3	2278	37,6	2067	0,326	37,6
1/4	0,141	37,3	2381	37,6	2115	0,282	37,3

Conforme esperado, pode-se notar que os valores das temperaturas de saída de ar do secador têm valores praticamente iguais, independente dos valores das constantes cinéticas A_0 e B_0 , mantidas todas as condições estudadas fixas. O valor médio do $T_{g_{final}}$ da tabela IV.2 é de $37,6^\circ\text{C}$ e o erro médio dos valores em relação a este valor médio de temperatura foi de 0,3%.

O balanço de entalpia para o ar de mistura (T_{gm}) é descrito a seguir considerando que os calores específicos do ar para o ar ambiente, ar de reciclo e ar de mistura são iguais:

$$Cp_g \cdot (W_{ga} + W_{g_{rec}}) \cdot T_{gm} = Cp_g \cdot (W_{ga} \cdot T_{ga} + W_{g_{rec}} \cdot T_{g_{final}}), \quad (III.17)$$

onde vazão de ar ambiente (W_{ga}), vazão de reciclo ($W_{g_{rec}}$), temperatura de ar ambiente (T_{ga}) são mantidas constantes no estudo. Nestas condições com valores de temperatura de saída de ar ($T_{g_{final}}$) conforme a tabela III.3 permanecendo constante, a temperatura de mistura de ar (T_{gm}) não variará. Conforme a equação II.17 do capítulo II, a eficiência térmica (E.T.) pode ser escrita como:

$$E.T. = \frac{W_a \cdot \Delta H}{W_{gm} \cdot Cp_g \cdot (T_{ge} - T_{gm})} \quad (III.18)$$

Como a umidade inicial e final do sólido a ser seco é o mesmo, o termo $W_a \cdot \Delta H$ não varia quaisquer que sejam as constantes A_0 e B_0 . Os valores W_{gm} , Cp_g e T_{ge} são fixos no estudo. E como demonstrado acima, o valor de T_{gm} não varia porque $T_{g_{final}}$ mantém-se constante. Com isto o termo $W_{gm} \cdot Cp_g \cdot (T_{ge} - T_{gm})$ permanece sempre com o mesmo valor quaisquer que sejam os valores de A_0 e B_0 .

Uma vez que os valores $W_a \cdot \Delta H$ e $W_{gm} \cdot Cp_g \cdot (T_{ge} - T_{gm})$ não variam, então a eficiência térmica E.T. permanecerá sempre igual.

III.D - CONCLUSÕES

- 1 - O tempo de residência no secador de leito deslizante misto varia inversamente proporcional à variação da constante cinética B .
- 2 - Mantidos a vazão de sólido e o grau de secagem, ou seja, umidade inicial e final do sólido, para condições fixas de relação de vazão de gás e sólido na seção concorrente e contracorrente, vazão de reciclo e temperatura, a Eficiência Térmica do processo independe da natureza do sólido, ou seja, de sua cinética de secagem desde que varie o comprimento do secador proporcional a nova constante cinética. Portanto, os ótimos operacionais serão dependentes das variáveis otimizadas no capítulo II para todos os casos uma vez que varie o comprimento do secador proporcionalmente a nova constante cinética.

Capítulo IV

IV – ESTUDO DA CINÉTICA DA DEGRADAÇÃO DE QUALIDADE DURANTE A SECAGEM EM SECADORES DE LEITO DESLIZANTE CONCORRENTE, CONTRACORRENTE E MISTO

O objetivo deste capítulo é estudar a degradação de qualidade, especificamente a degradação de ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático em um “alimento-modelo”, nos secadores de leite deslizante durante a secagem em função das condições de operação.

Na secção da revisão bibliográfica, procurou-se descrever os fundamentos básicos de degradação de qualidade desde o aspecto geral até o específico, enfocando a degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático. Paralelamente apresenta-se a revisão da modelagem cinética desde um panorama genérico de perdas de qualidade dos produtos durante a secagem até um enfoque específico. Procurou-se, assim, detalhar o modelo cinético de degradação de ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático. Considerou-se uma revisão complementar dos capítulos anteriores.

Ao descrever material e métodos, neste capítulo, procurou-se não repetir as informações já descritas nos capítulos anteriores sem, no entanto, omitir as que se necessitem para complementar o procedimento utilizado. Assim, são descritos o funcionamento de secadores de leite deslizantes concorrentes, contracorrentes e mistos; as condições de operação utilizadas na simulação; as equações de transferência de massa e calor e de equilíbrio termodinâmico. Procurou-se enfocar com detalhe a cinética de degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático. É comentado o método numérico utilizado.

Na secção de análises, resultados e discussões, foram apresentados os resultados em termos de tipos de secadores na ordem de concorrente, contracorrente e misto. Nos secadores concorrente e contracorrente é mostrado o resultado da influência de três condições de operação sobre a degradação de ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático. Em primeiro lugar a influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}), em segundo a influência do ar de reciclo no secador (R_{rec}) e depois a influência de vazão de ar de secagem na forma de razão (R_{cc} e R_{ct}). No secador misto estudaram-se as influências da temperatura de entrada de ar (T_{ge}), vazão de ar na secção contracorrente (R_{ct}) e comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}). Na parte final é apresentado o resultado comparativo entre os três tipos de secadores.

IV.A - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

IV.A.1 - QUALIDADE DE ALIMENTOS NA SECAGEM

Nos últimos anos houve uma crescente conscientização dos consumidores sobre a qualidade e valores nutricionais dos alimentos processados. Além disso, um requerimento governamental obrigatório tal como rotular os nutrientes tem colocado os fabricantes de alimentos a pesquisar as condições de processamento que resultarão em uma qualidade final ótima de produtos. No passado, a relação entre condições de processamento e qualidade do produto final foi frequentemente negligenciada. Contudo, durante o passar dos anos, uma quantidade crescente de pesquisas tem sido realizada sobre a cinética de degradação de nutrientes durante o processamento térmico e estocagem (FRANZEN et al., 1990). Assim melhoramentos devem ocorrer possivelmente pelo aumento no conhecimento da cinética da deterioração do alimento, pelo avanço dos métodos analíticos e pela disponibilidade de métodos numéricos e computadores poderosos que podem simular o comportamento de um sistema complexo. A simulação requer um conjunto de equações (algébricas, diferenciais e diferenciais parciais) que descrevam aspectos comportamentais dinâmicos para o sistema a ser analisado. Este conjunto é referido como o modelo matemático. O modelo é geralmente resolvido pela aplicação do esquema numérico (algoritmo) num programa de computador.

A aproximação analítica para a deterioração de qualidade do alimento permite um panorama mais amplo de investigação que pode fornecer processos alternativos, condições diferentes ou operações mais eficientes em minimizar perdas de qualidade, ou um conhecimento mais profundo do mecanismo controlando o processo estudado.

A qualidade do alimento não apenas depende do seu estado antes de processar e estocar, mas também da extensão das alterações ocorridas durante o processamento. Isto é verdadeiro para as propriedades organolépticas (cor, cheiro e textura), bem como para conteúdo de nutrientes (SAGUY & KAREL, 1980).

Na desidratação ou secagem de alimentos, a relação entre as condições de processamento e a qualidade do produto é mais complicada que em outros processos, isto é devido à larga faixa de temperatura e umidade durante a secagem de alimentos. As taxas de degradação dos atributos da qualidade, freqüentemente são funções da umidade, bem como da temperatura. Idealmente o que é necessário é um conhecimento da relação entre a qualidade do alimento e todos os fatores conhecidos que afetam as taxas de degradação. Estes incluem: tempo, temperatura, umidade, pH, níveis de oxigênio,

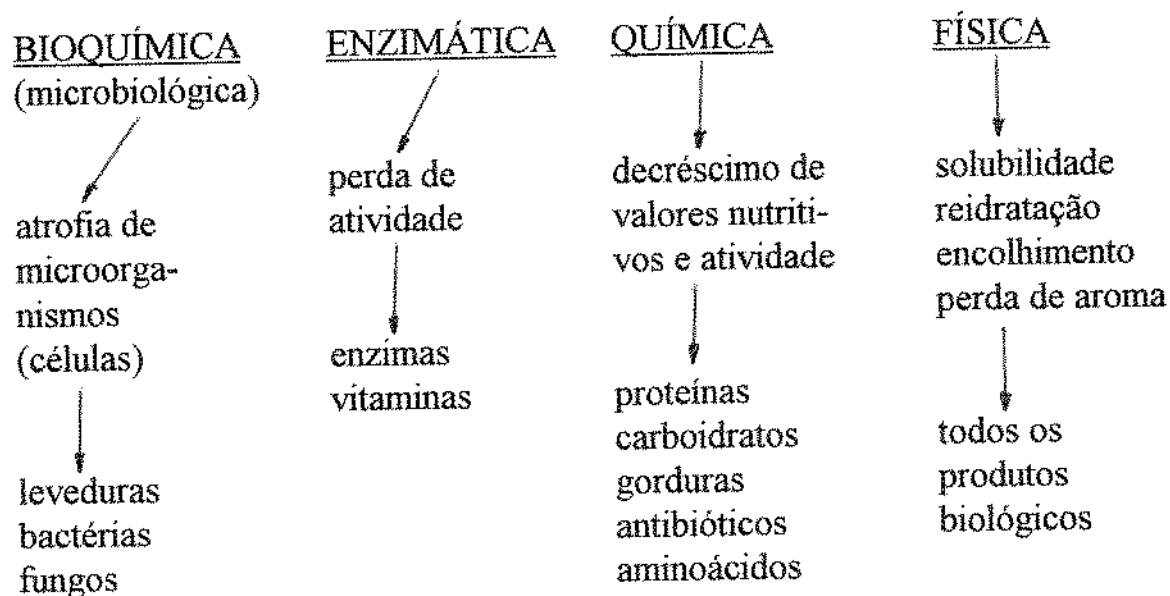
composições (gordura, açúcar, proteínas, etc.), níveis de correagentes (ex. sulfitos), variedade e traços de metais e outros catalisadores, intensidade da luz, etc. A pesquisa deveria envolver medidas de uma larga faixa de parâmetros de qualidade para alimentos ou “alimento-modelo” de várias composições sobre uma larga faixa de condições de processamento e estes dados deveriam ser analisados e utilizados para construir modelos cinéticos descrevendo a relação entre qualidade, composição e condições de processamento (FRANZEN et al., 1990).

IV.A.2 - CLASSIFICAÇÃO DA DEGRADAÇÃO NA QUALIDADE DO PRODUTO DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM

STRUMILLO & ADAMIEC (1991) classificam as alterações nas propriedades dos produtos biológicos durante o processo de secagem segundo dois critérios (tabelas IV.1 e IV.2). Exemplos de alterações básicas são dados na tabela IV.1. Quatro tipos de alterações são distinguidas: bioquímicas (microbiológicas), enzimáticas, químicas e físicas.

Tabela VI.1 - Alterações de propriedades de produtos biológicos durante a secagem

Fonte: STRUMILLO & ADAMIEC (1991)



As alterações bioquímicas características de leveduras, bactérias e fungos estão estreitamente conectadas com a perda de água nas células e nos seus elementos estruturais individuais. Alterações enzimáticas incluem principalmente as mudanças da atividade causada pela decomposição estrutural dos biopolímeros. Alterações químicas normalmente resultam em decréscimo de valores nutritivos de produtos biológicos ou numa formação de substâncias nocivas para o meio. Alterações bioquímicas e químicas são freqüentemente manifestadas como alterações físicas: os produtos biológicos perdem suas solubilidades ou capacidade de ligar água, também perdem componentes aromáticos devido à decomposição ou à alta volatilidade. Descoloração do produto é freqüentemente observada.

Na tabela IV.2. se apresentam exemplos de alterações em classes particulares de produtos biológicos e seus principais componentes durante a secagem, os resultados esperados e fatores que dependem em cada caso.

THIJSEN (1979) classificou os efeitos adversos nos alimentos em:

- perdas de materiais: perdas de partículas (finas, pó, etc.); perdas de sólidos dissolvidos; perda dos voláteis (perda de aromas);
- alterações físicas deteriorativas: 1. alterações nas estruturas, densidades, cores, permeabilidades; 2. alterações nos estados de agregação tais como fusão, dissolução, cristalização;
- reações químicas degradando qualidade: reações enzimáticas e de escurecimento não-enzimático, destruição de vitaminas, destruição de aminoácidos, destruição de pigmentos, desenvolvimento de "flavor" indesejáveis pela reação dos produtos;
- crescimento de microorganismos e desenvolvimento de toxinas.

THIJSEN (1979) relata que os efeitos colaterais acontecem porque durante a operação de secagem, vários fenômenos ocorrem simultaneamente tais como processos físicos, mecânicos, bioquímicos e microbiológicos. Todos os fenômenos adversos são dependentes da relação tempo-temperatura-umidade. Processos cinéticos, propriedades físicas e químicas e equilíbrios químicos são também influenciados pela temperatura e umidade. A relação tempo-temperatura-umidade dos espécimes em secagem é fortemente dependente do tipo de secadores e condições de processo.

Tabela IV.2 - Tipo de processo de degradação durante a secagem térmica
 Fonte: STRUMILLO & ADAMIEC (1991)

	Tipo de degradação	Resultado	Fator para minimizar
<u>Vitaminas</u> Reações químicas	Origem em alguns aminoácidos	Inativação parcial	Diminuir a taxa de calor
<u>Lipídeos</u> Reações enzimáticas	Peroxidação de lipídeos (descoloração dos produtos)	Reação com outros componentes (incluindo proteínas e vitaminas)	Redução de nível de oxigênio ou adicionar antioxidante hidroxitolueno butilado (BHT ou BHA)
<u>Proteínas</u> Reações químicas e enzimáticas	Destruição total de aminoácidos	Desnaturação de proteínas e enzimas	Secagem à temperatura de bulbo úmido no primeiro estágio e secagem à vácuo ou liofilização no segundo estágio
	Origem em alguns aminoácidos individuais	Desnaturação parcial, perda de valores nutritivos	Atmosfera inerte ou vácuo
	Reação de reticulação entre aminoácidos	Alteração da funcionalidade da proteína. Reações de enzimas	
<u>Carboidratos</u> Reações químicas	Gelatinização de amino, hidrólise	Melhora a digestibilidade e utilização de energia. Fragmentação da molécula	Esta parte é uma vantagem
<u>Açúcares simples</u> Alterações físicas	Caramelização (reação Maillard), fundição	Perda de cor e odor	Transição rápida através de $a_w=0,5-0.8$ Redução da temperatura e redução de pH (para ácido) ou adicionar inibidores (SO ₂ ou metabisulfito)

Neste trabalho foram escolhidos dois tipos de degradação de atributos de qualidade para serem estudados: ácido ascórbico (vitamina C) e escurecimento não-enzimático como reações-padrão para acompanhar a injúria térmica durante a secagem.

IV.A.3 - ÁCIDO ASCÓRBICO (vitamina C)

A vitamina C é encontrada em concentrações razoáveis em todas as plantas superiores. Apesar das fontes mais ricas de vitamina C serem vegetais verdes frescos e frutas cítricas, foi escolhido como parâmetro de sensibilidade porque o ácido ascórbico é muito sensível às condições de processamento e pode ser usado como indicador da qualidade do produto (MISHIKIN et al., 1984a). Na tabela IV.3 temos algumas fontes de vitamina C.

Tabela IV.3 - Teor de ácido ascórbico de alguns alimentos
Fonte: BOBBIO & BOBBIO (1985)

Alimentos	Ácido ascórbico mg/100g
Leite de vaca	1,5
Brócolis	150
Repolho de bruxelas	90
Repolho roxo	60
Repolho branco	40
Cenoura	7
Couve-flor	60
Alface	15
Ervilha	25
Espinafre	25
Tomate	20
Abacate	10
Banana	40
Limão	80
Goiaba	200
Laranja	50
Abacaxi	25
Morango	60
Tangerina	30

A vitamina C é muito importante na saúde pública, pois sua deficiência causa uma doença chamada escorbuto. O escorbuto é uma doença conhecida há muitos anos e já em 1593 havia sido observada que essa doença era evitada ou curada por ingestão de frutas cítricas. Um estudo clínico em 1747 feito por Lind com marinheiros que, em viagens muito longas, recebiam dietas carentes de frutas e verduras verificou que estes apresentavam sintomas de escorbuto. Em 1907, Holst e Frolich para melhor estudarem a doença e seu tratamento provocaram o escorbuto experimental em cobaias. Os sintomas clínicos agudos, de uma dieta deficiente em vitamina C, são caracterizados por hemorragias de ferimentos. Casos menos graves são caracterizados por inflamação e sangramento de gengivas.

A estrutura da vitamina C foi conhecida em 1932 e 1933 por Haworth, Hirst e colaboradores. Na realidade a vitamina C pertence à classe dos carboidratos. Quimicamente ela é a lactona do ácido derivado de um monossacarídeo. Tem a fórmula empírica $C_6H_8O_6$.

É um sólido branco, cristalino com ponto de fusão de 190-192°C; é bastante solúvel em água e etanol absoluto, insolúvel nos solventes orgânicos comuns, como clorofórmio, benzeno e éter. No estado sólido é relativamente estável. No entanto, quando em solução é facilmente oxidado em reação de equilíbrio ao ácido L-desidroascórbico. Essa facilidade de oxidação da vitamina C é devido ao grupo fortemente redutor, denominado redutona.

O ácido L-desidroascórbico tem a mesma atividade biológica da vitamina C, mas é destruído muito mais facilmente.

A principal causa da degradação da vitamina C é a oxidação aeróbica ou anaeróbica, ambas levando à formação de furaldeídos, compostos que polimerizam facilmente com formação de pigmentos escuros, e rapidamente destruída pela ação da luz.

Embora de modo geral a estabilidade da vitamina C aumente com o abaixamento da temperatura e a maior perda se dê durante o aquecimento de alimentos, existem casos de perda durante o congelamento, ou armazenamento de alimentos a baixas temperaturas. Também há perdas de vitamina C na lixiviação de alimentos, sendo a perda ainda maior quando a lixiviação é feita com aquecimento (BOBBIO & BOBBIO, 1985).

IV.A.4 - ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO

Escurecimento não-enzimático é um parâmetro de qualidade de muita importância para muitos alimentos desidratados. Para muitos produtos, tais como produtos assados, café, melaço, alguns alimentos do café da manhã, o escurecimento é desejado. Contudo em outros alimentos, o escurecimento é indesejável depreciando o valor qualitativo dos produtos. Os efeitos de deterioração de escurecimento sobre estes alimentos incluem: decréscimo de valores nutricionais devido à perda de proteínas, desenvolvimento de odores desagradáveis, decréscimo de solubilidade, alteração na textura, destruição de vitaminas e aumento de acidez (COLTER et al., 1951; RESNICK & CHIRIFE, 1979; SALTMARCH et al., 1981).

O escurecimento não-enzimático é acelerado durante a desidratação, pois reagentes são concentrados à medida que a água é removida. A desidratação envolve freqüentemente altas temperaturas, que também tendem a aumentar a taxa de escurecimento.

O escurecimento não-enzimático não é apenas uma reação, mas um conjunto complexo de reações. Um período de indução tem sido encontrado para suceder o escurecimento (MIZRAHI et al., 1970 a, b; WARMBIER et al., 1976; SINGH et al., 1983). Durante este período, alterações químicas significativas ocorrem, em que produtos intermediários são formados (KAREL & NICKERSON, 1964). Ambas, umidade e temperatura influem na intensidade do período de indução. O período de indução diminui com o aumento da umidade (LABUZA et al., 1970) e de temperatura (WARMBIER et al., 1976). Depois de uma quantidade suficiente de produtos intermediários ter se formado, a reação então prossegue ao seu estágio final onde pigmentos de escurecimento são formados (FRANZEN et al., 1990). Portanto a taxa de escurecimento inicial com baixa intensidade é consequência do tempo de indução.

FRANZEN et al. (1990) reportaram que a taxa máxima de escurecimento para a batata ocorreu a uma umidade de 7 (b.s.).

IV.A.5 - FUNDAMENTOS DA MODELAGEM NA DETERMINAÇÃO DE QUALIDADE DE ALIMENTOS DURANTE O PROCESSAMENTO E ESTOCAGEM

A aproximação analítica para calcular e prever a deterioração de qualidade dos alimentos envolve um modelo cinético. O modelo é freqüentemente um conjunto de equações não lineares onde a solução analítica não existe ou é de solução muito complicada. Progressos têm sido feitos pelas simplificações destas equações para condições específicas. A taxa de degradação pode ser generalizada e correlacionada com fatores ambientais (temperatura, pressão, etc.) e fatores composição (concentração, pH, etc.).

A equação geral descrevendo a perda de qualidade pode ser dada por:

$$-\frac{dC}{dt} = f(E_i, F_j) \quad (IV.1)$$

onde,

$-dC/dt$	velocidade de deterioração;
E_i	fatores ambientais ($i=1, \dots, n$);
F_j	fatores concentrações ($j=1, \dots, m$).

Os efeitos de alguns destes fatores podem ser expressos numa relação funcional que é similar para muitas situações de deterioração e sistemas de alimentos. Outros são mais complicados e únicos em seu comportamento e devem ser obtidos separadamente para cada produto e sistema de alimentos investigados.

Algumas relações funcionais gerais têm sido descobertas para os efeitos da temperatura, concentração, atividade da água ou umidade, oxigênio e modelos mistos.

A seguir são apresentados os modelos de degradação de qualidade relacionados aos efeitos da temperatura, umidade, atividade de água, concentração de oxigênio e efeitos simultâneos. Estes modelos são mostrados respectivamente nos itens IV.A.5.1, IV.A.5.2, IV.A.5.3, IV.A.5.4, IV.A.5.5 e IV.A.5.6.

IV.A.5.1 - MODELOS RELACIONANDO OS EFEITOS DE TEMPERATURA

A suposição válida mais comum e geral é que a relação da velocidade de deterioração com a temperatura seguirá a equação de Arrhenius:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E_A}{R.T}\right) \quad (\text{IV.2})$$

onde,

- K constante da taxa na relação de destruição dos nutrientes;
- K₀ constante independente da temperatura (também conhecida como pré-exponencial ou fator de frequência);
- E_A energia de ativação;
- R constante do gás ideal;
- T temperatura absoluta.

O uso da equação IV.2 constitui a aproximação para modelar dependência da temperatura. A energia de ativação é geralmente determinada da inclinação da reta lnK em função de 1/T e depende de fatores, tais como atividade de água, umidade, concentração do sólido, pH e outros (HENDEL et al., 1955; JENSEN, 1960; KAREL & NICKERSON, 1964; LABUZA, 1972; LEE et al., 1977; MIZRAHI et al., 1970a; RIEMER & KAREL, 1977; SAGUY et al., 1979a, b, 1980). Uma informação adicional é que quando o mecanismo de reação se altera com a temperatura, a energia de ativação pode variar substancialmente. Portanto, todas as equações, incluindo a relação de Arrhenius, têm aplicação limitada e a faixa de validade e a influência de outros fatores na energia de ativação devem ser consideradas.

Outras funções fora da relação de Arrhenius têm surgido ocasionalmente para correlacionar dados de estabilidade dos alimentos. KWOLEK & BOOKWALTER (1971) consideraram a reação de deterioração de alimentos de ordem zero, representada pela seguinte equação:

$$Y=Y_0+f(T).t \quad (\text{IV.3})$$

onde

- Y índice de qualidade (ex. conteúdo de nutrientes);
- Y_0 índice de qualidade no tempo zero;
- t tempo;
- $f(T)$ constante dependente da temperatura.

KWOLEK & BOOKWALTER (1971) consideraram, entre outras, as seguintes formas de dependência da temperatura:

linear: $f(T) = a + b.T$ (IV.4)

exponencial: $f(T) = aT^b$ (IV.5)

hiperbólica: $f(T) = \frac{a}{(b - T)}$ (IV.6)

onde,

a e b são constantes.

SAGUY & KAREL (1980) relatam que o modelo hiperbólico (equação IV.6) e a equação de Arrhenius deram a melhor correlação e foram aplicáveis a faixas maiores de temperatura, quando testados com dados do estudo da estabilidade, que inclui índice de qualidade dos alimentos e características organolépticas. No entanto, mesmo que a aproximação linear possa ser aplicada para uma faixa estreita de temperaturas (OLLEY & RATKOWKY, 1973) a equação de Arrhenius deve ser usada devido a seu fundamento teórico.

IV.A.5.2 - MODELOS RELACIONANDO OS EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO

Este modelo descreve a dependência desta taxa de degradação sobre a concentração de reagentes, produtos e inibidores. Esta taxa é representada como proporcional à concentração dos reagentes elevada a um certo expoente. Uma reação de ordem zero é escrita como:

$$-\frac{dC}{dt} = K \quad (\text{IV.7})$$

e após a integração resulta em:

$$C - C_0 = K \cdot (t - t_0) \quad (\text{IV.8})$$

onde,

C_0 é a concentração no tempo t_0 .

A equação (IV.8) indica que a constante da reação (K) pode ser calculada através do coeficiente angular desta relação linear.

Um comportamento da reação de ordem zero tem sido observado para o escurecimento não-enzimático em muitos produtos: frutas, vegetais, leite seco, sistema-modelo contendo carboidratos, etc. Foi observado inclusive para perda de ácido ascórbico (DENG et al., 1978).

A reação de primeira ordem é descrita como:

$$-\frac{dC}{dt} = K \cdot C \quad (\text{IV.9})$$

e integrando:

$$C = C_0 \cdot \exp[-K \cdot (t - t_0)] \quad (\text{IV.10})$$

Uma reação de primeira ordem foi observada em muitos sistemas de alimentos: perdas de ácido ascórbico, perda de cor (CHOU & BREENE, 1972; RAMAKRISHNAN & FRANCIS, 1980), amolecimento de textura durante o processamento com calor (NICHOLAS & PFLUG, 1962) e outros.

Diferentes ordens de reação podem ser obtidas, dependendo do sistema de alimentos e fatores de qualidade envolvidos. Reações enzimáticas que seguem a cinética de Michaelis-Mentem normalmente representam reações de ordem mista. A mesma reação de ordem mista é esperada na oxidação de lipídeos. Se contudo a ordem da reação não é conhecida da teoria, isto pode ser determinado pelo método numérico que aproximará seus valores (SAGUY & KAREL, 1980).

IV.A.5.3 - MODELOS RELACIONANDO OS EFEITOS DA UMIDADE E ATIVIDADE DA ÁGUA

A água é importante em controlar as taxas de reações deteriorativas, incluindo aquelas resultando em perda de nutrientes. Não só o conteúdo da água, mas também a atividade da água é freqüentemente usada para expressar a taxa de reação.

O início do crescimento de microorganismos é freqüentemente correlacionado a um nível crítico da atividade da água, mas muitas reações químicas são influenciadas de uma maneira mais complexa, porque a água pode agir como solvente para reagentes e produtos, como reagente (em reações hidrolíticas) ou modificando a atividade de catalisadores e inibidores.

Inúmeras relações têm sido sugeridas para descrever a dependência da taxa de reação com relação ao conteúdo de umidade (ou atividade da água).

Vários autores que estudaram o escurecimento de vegetais registraram uma relação exponencial entre a taxa de escurecimento e umidade (LEGAUT et al., 1951; ROSS, 1948).

QUAST et al. (1972) reportaram que a oxidação da batata frita foi inversamente relacionada à raiz quadrada da atividade da água. Algumas vezes uma relação linear entre a umidade e a taxa de reação ou entre a atividade de água e a taxa de reação aproxima satisfatoriamente a retenção de nutrientes em alimentos secos.

BEETNER et al. (1974, 1976) encontraram que a retenção de tiamina e riboflavina em extrusão é afetada por várias variáveis (incluindo umidade), cada uma devendo ser aproximada por uma relação linear que foi validada

numa estreita faixa dos valores experimentais estudados. LABUZA (1972) sugeriu que os dados de vários investigadores, que estudaram a retenção de ácido ascórbico, mostraram uma correlação simples linear entre o logaritmo da constante da taxa de reação e atividade da água. WANNINGER (1972) propôs um modelo no qual a constante da taxa de reação é diretamente proporcional à concentração da água. Contudo, um estudo mais recente sobre vários sistemas diferentes indicou que a perda de ácido ascórbico depende do teor de água de maneira mais complexa (LEE & PYUN, 1993; MISHIKIN et al., 1983b; SINGH et al., 1983).

Investigações adicionais da complexidade da taxa de qualidade de deterioração do alimento como afetado pela umidade (SAGUY et al., 1979a; b) indicaram uma relação funcional bastante complexa.

IV.A.5.4 - MODELOS RELACIONADOS AOS EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO

O efeito da concentração de oxigênio é simplesmente uma questão de quantidade total disponível para a reação com componentes de alimentos. Se esta quantidade é limitada a um nível que causa um efeito não significativo no alimento, e não há um potencial para o oxigênio adicional vindo em contato com o alimento, então a taxa de reação é irrelevante. Em outros casos, quando a quantidade total de oxigênio potencialmente capaz de reagir com nutrientes é de fato significativa, o efeito da concentração de oxigênio (ou pressão parcial) sobre a taxa deve ser considerado. Uma forma geral freqüentemente útil em correlacionar taxa de reação com concentração de oxigênio é:

$$R = \frac{O_2}{(K_1 + K_2 \cdot O_2)} \quad (IV.11)$$

onde,

R	taxa de reação;
O_2	concentração de oxigênio;
K_1, K_2	constantes.

Quando $K_2 \cdot O_2$ é menor que K_1 , a taxa é linear com concentração de

oxigênio. Quando $K_2.O_2$ é muito maior que K_1 , a taxa é independente da concentração. Ambos os casos destes extremos podem ocorrer no mesmo produto, dependendo da temperatura, razão superfície-volume, pressão de oxigênio e extensão de reação (KAREL, 1974).

IV.A.5.5 - MODELOS RELACIONADOS A VÁRIOS EFEITOS SIMULTANEAMENTE (MODELOS MISTOS)

Os modelos mistos descrevem uma combinação de um efeito do modelo geral (tais como a temperatura) e uma relação empírica que leva em conta um sistema específico de alimentos. Nestes modelos, os parâmetros (tais como a energia de ativação) têm uma dependência com as variáveis de composição (umidade, concentração do sólido, etc.).

O modelo misto pode ser mostrado pelo seguinte exemplo que descreve um modelo cinético da perda de ácido ascórbico durante a secagem por ar (SAGUY et al., 1978a):

$$-\frac{dC}{dt} = K(m, T).C \quad (IV.12)$$

e

$$-\frac{dC}{C} = K_0(m). \exp\left[-\frac{E_A(m)}{R.T}\right] dt \quad (IV.13)$$

onde

m é a umidade.

A equação IV.13 expressa a taxa de perda de ácido ascórbico de acordo com o modelo geral da dependência da temperatura (Arrhenius) e concentrações (ordem da reação). A relação funcional exata entre fator de frequência K_0 e a energia de ativação E_A sobre a umidade tem de ser determinada por dados experimentais através de técnicas de ajuste.

IV.A.6 - MODELAGEM CINÉTICA DA DEGRADAÇÃO DO ÁCIDO ASCÓRBICO

Um dos objetivos deste capítulo é estudar a degradação do ácido ascórbico durante a secagem, motivo pelo qual foi feita uma revisão detalhada sobre o assunto.

A perda de ácido ascórbico foi observada em muitos sistemas de alimentos como uma reação de primeira ordem (LEE & PYUN, 1993; SAGUY et al., 1978a; RIEMER & KAREL, 1977; MISHKIN et al., 1984a; 1984b; 1983b; BANGA & SINGH, 1994; LEE et al., 1977).

Os primeiros modelos eram determinados a temperaturas constantes gerando várias retas, conseqüentemente mais simples e eram reações de ordem zero (DENG et al., 1978; LAING et al., 1978).

Uma teoria que contribuiu para modelar a degradação de ácido ascórbico foi a equação de Arrhenius que incorpora o efeito da temperatura na cinética da perda da vitamina C. Na área da secagem, as principais condições operacionais no processo são a temperatura, a perda de umidade e o tempo em que o produto é submetido a estas condições. Portanto, é bastante razoável supor que as variáveis mais importantes que influem na taxa da perda da vitamina C sejam temperatura, umidade e tempo do processo. Assim, nas modelagens mais recentes, o modelo cinético das perdas de ácido ascórbico leva em conta a temperatura (através da equação de Arrhenius), umidade e tempo (LEE & PYUN, 1993; SAGUY et al., 1978a; BANGA & SINGH, 1994; MISHKIN et al., 1983b; MISHKIN et al., 1984a, 1984b.). Outros pesquisadores modelaram em função de tempo-temperatura-atividade de água (RIEMER & KAREL, 1977).

O modelo da degradação de ácido ascórbico é dado como:

$$-\frac{dC_a}{dt} = K_a \cdot C_a \quad (\text{IV.14})$$

onde C_a concentração do ácido ascórbico;
 K_a constante da taxa de perda de ácido ascórbico.

A constante cinética K_a da equação (IV.14) depende da:

- temperatura do sólido (T);
- umidade do sólido (X) ou atividade de água (a_w).

Alguns autores como MISHKIN et al. (1984a), LEE & PYUN (1993), SAGUY et al. (1978a), RIEMER & KAREL (1977) utilizaram a equação de Arrhenius para modelar a constante da taxa de degradação de ácido ascórbico K_a . Esta equação está mostrada abaixo.

$$K_a = K_{0a} \cdot \exp\left[-\frac{E_{Aa}}{R.T}\right] \quad (\text{IV.15})$$

onde E_{Aa} é a energia de ativação da destruição do ácido ascórbico.

Os pesquisadores, por sua vez, correlacionaram as constantes K_{0a} e E_{Aa} da equação de Arrhenius em função de umidade (X) em forma de polinômios. Estas equações estão mostradas a seguir.

$$\ln(K_{0a}) = p_1 + p_2.X + p_3.X^2 \quad (\text{IV.16})$$

$$E_{Aa} = p_4 + p_5.X + p_6.X^2 + p_7.X^3 \quad (\text{IV.17})$$

onde:

X umidade no alimento;
 $p_1 \dots p_7$ constantes paramétricas.

Este modelo cinético foi utilizado por MISHKIN et al. (1984 a) na desidratação de batatas; por LEE & PYUN (1993) na secagem de rabanete e por SAGUY et al. (1978a) na secagem de beterraba.

Outros pesquisadores modelaram as constantes K_{0a} e E_{Aa} da equação IV.15 de Arrhenius em função de atividade de água (a_w) em vez da umidade (X). Estas equações estão mostradas abaixo:

$$K_{0a} = \exp(\alpha - \beta.a_w) \cdot 10^{10} \quad (\text{IV.18})$$

$$E_{Aa} = \exp(\gamma - \delta.a_w) \quad (\text{IV.19})$$

onde α, β, γ e δ constantes paramétricas;
 a_w atividade de água.

Estes modelos apresentam uma parte teórica (equação de Arrhenius) e outra empírica (constantes K_{0a} e E_{Aa}).

Outro modelo totalmente empírico para a constante da taxa de perda de ácido ascórbico, K_a , em função da temperatura e umidade ao mesmo tempo é apresentado a seguir:

$$\ln(K_a) = a_1.X + a_2.T^{-3} + a_3.X^3 + a_4.X_2.T^{-1} + a_5.X.T^{-2} + a_6.X^3.T^{-3} + a_7 \quad (\text{IV.20})$$

T temperatura absoluta;
 $a_1 \dots a_7$ constantes paramétricos.

Este modelo foi utilizado por VILLOTA & KAREL (1980a, 1980b), BANGA & SINGH (1994). Na equação IV.20, RIEMER & KAREL (1977) fizeram um estudo levando em conta apenas o efeito da temperatura (equação de Arrhenius) sem a parte da atividade da água. O resultado disto é que surgem várias retas para cada valor, plotando a perda de ácido ascórbico em função do tempo.

IV.A.7 - MODELAGEM CINÉTICA DE ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO

Outro objetivo deste capítulo é estudar o escurecimento não-enzimático nos produtos, durante a secagem do mesmo.

A reação de escurecimento não-enzimático é tipicamente descrita pela reação cinética de ordem zero (LEE & PYUN, 1993; FRANZEN et al., 1990; RAPUSAS & DRISCOLL, 1995; SAGUY & KAREL, 1980; KAREL & NICKERSON, 1964; RESNICK & CHIRIFE, 1979; HENDEL et al., 1955; MIZRAHI et al., 1970a; FLINK et al., 1974; LABUZA et al., 1972; KAREL

& LABUZA, 1968; SAGUY et al., 1979b; SAMANIEGO-ESGUERRA et al., 1991).

A equação de reação de ordem zero é descrita como:

$$\frac{dB}{dt} = K_b \quad (\text{IV.21})$$

Integrando esta equação, tem-se:

$$B = B_0 + K_b \cdot t \quad (\text{IV.22})$$

onde B índice óptico;
B₀ índice óptico inicial;
K_b constante da taxa de reação;
t tempo.

RAPUSAS & DRISCOLL (1995) mostraram que a constante da taxa de reação aumenta com aumento na temperatura. Uma tendência similar foi observada pelo SAMANIEGO-ESGUERRA et al. (1991).

A equação de Arrhenius fornece um excelente ajuste de dados de taxa de escurecimento em função da temperatura, a cada nível de umidade (FRANZEN et al., 1990). No entanto, os trabalhos mais recentes têm estudado um modelo que tenta abranger uma faixa maior de ajuste dos dados experimentais. Assim, alguns pesquisadores estudaram um modelo que leva em conta ambas: a dependência de umidade (ou atividade da água) e a temperatura na taxa de escurecimento não-enzimático. Assim, LEE & PYUN (1993), FRANZEN et al. (1990) e MISHKIN et al. (1983) estudaram a cinética do escurecimento não-enzimático em função da temperatura e umidade nos seguintes produtos: rabanete, leite seco desnatado, batata e repolho. Outros estudaram-na em função da temperatura e atividade da água (RAPUSAS & DRISCOLL, 1995; SINGH et al., 1983) nos seguintes produtos: cebolas e maçãs. SAGUY et al. (1978b) calcularam (em função da temperatura e sólido solúveis) a cinética de escurecimento não-enzimático no suco de uva.

Nestes modelos, a energia de ativação (E_A) e o fator K₀ são funções de umidade (ou atividade da água ou sólidos solúveis).

RAPUSAS & DRISCOLL (1995) descrevem que para se obter um valor de K, deve-se fixar uma temperatura e atividade da água. Assim, notaram que

mantendo a temperatura constante, o valor da taxa de escurecimento não-enzimático (K) aumentava com a elevação de atividade de água (a_w) até atingir um certo nível, para depois decrescer. Isto ocorreu para várias temperaturas fixas no sistema. Esta tendência indica a ocorrência de uma taxa máxima no escurecimento não-enzimático para um certo valor de a_w . Este comportamento é ilustrado na figura IV.1.

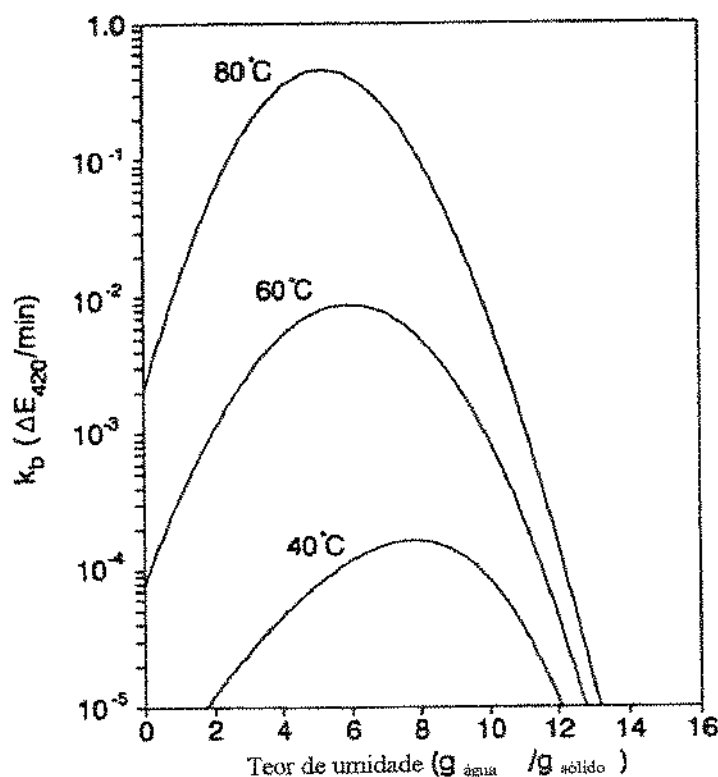


Figura IV.1 - Constante da taxa de reação para escurecimento não-enzimático (k_b) em pedaços de cebola como uma função da atividade da água a 40, 60 e 80°C.

Fonte: RAPUSAS & DRISCOLL (1995)

A mesma curva é obtida ao plotar a constante da taxa de escurecimento não-enzimático em função da umidade. Este aumento ocorre porque ao aumentar a umidade, cresce a mobilidade do reagente. Porém, após a umidade crítica, um aumento de umidade apenas dilui os reagentes, diminuindo a taxa de escurecimento não-enzimático.

Muitos pesquisadores como LEE & PYUN (1993), MISHKIN et al. (1983), MIZRAHI et al. (1970a, b), SINGH et al. (1983) utilizaram o seguinte modelo originário de Arrhenius, em função de uma temperatura de referência:

$$\ln(K_b) = \ln(K_{bref}) - \left(\frac{E_{Ab}}{R} \right) \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (IV.23)$$

onde,

K_{bref}	K_b a temperatura de T_{ref} ;
E_{Ab}	energia de ativação de escurecimento não-enzimático;
R	constante universal dos gases;
T_s	temperatura do alimento;
T_{ref}	temperatura de referência.

Os fatores K_{bref} e E_{Ab} da equação (IV.23) por sua vez são dependentes de umidade (X) do sólido ou atividade de água (a_w).

SINGH et al. (1983) consideraram que o valor de E_{Ab} é constante. Outros pesquisadores como LEE & PYUN (1993), MISHKIN et al. (1983) e MIZRAHI et al. (1970a, b) consideraram a dependência com a umidade e de tipo polinomial.

Ao modelar o termo K_{bref} , os pesquisadores como LEE & PYUN (1993), MISHKIN et al. (1983) e MIZRAHI et al. (1970a, b) o fizeram em função de umidade, enquanto SINGH et al. modelaram em termo de atividade de água (a_w).

A seguir é mostrada uma lista dos modelos das constantes K_{bref} e E_{Ab} da equação (IV.23):

1. Modelos estudados por LEE & PYUN (1993) na cinética de escurecimento não-enzimático durante a secagem de rabanete,

$$\ln(K_{bref}) = a + b.X + c.X^2 \quad (IV.24)$$

$$\ln(E_{Ab}) = d + e.X + f.X^2 \quad (IV.25)$$

onde,

X	umidade do alimento;
a...f	constantes paramétricas;
T_{ref}	temperatura de referência (338 K).

2. Modelos estudados por MISHKIN et al. (1983) na cinética do escurecimento não-enzimático na desidratação de batata,

$$E_{ab} = b_3.X + b_4 \quad (IV.26)$$

$$\ln(K_{bref}) = b_1.\ln(X) + b_2 \quad (IV.27)$$

onde, $b_1...b_4$ constantes paramétricas;
 T_{ref} temperatura de referência (338 K).

3. Modelos estudados por MIZRAHI et al. (1970a, b) na cinética do escurecimento não-enzimático na desidratação de repolho,

$$K_{bref} = b_1 \left[\frac{(b_2 + X)}{(b_3 + X)} \right]^{b_4} \quad (IV.28)$$

$$E_{ab} = b_5.\exp(-b_6.X) \quad (IV.29)$$

onde, $b_1...b_6$ constantes paramétricas.

4. Modelos estudados por SINGH et al. (1983) na cinética do escurecimento não-enzimático na estabilidade de estocagem de maçã,

$$\ln(K_{bref}) = b_1 + b_2(a_w - a_{w,ref}) \quad (IV.30)$$

onde, $a_{w,ref}$ atividade de água de referência;
 $b_1...b_4$ constantes paramétricas;
 T_{ref} temperatura de referência a 313 K.

Na equação (IV.30) a temperatura de referência T_{ref} é o valor da temperatura ambiente, onde foi feito o experimento.

Outros pesquisadores como FRANZEN et al. (1990) utilizaram uma equação de Arrhenius mais simples como mostrada abaixo:

$$\ln(K_b) = \ln(K_o) - \frac{E_{AB}}{R.T} \quad (\text{IV.31})$$

onde a relação das constantes K_o e E_{AB} com a umidade é dada por:

$$\ln(K_o) = b_1 + \frac{b_2}{X} \quad (\text{IV.32})$$

$$\frac{E_{AB}}{R} = b_3 + \frac{b_4}{X^3} \quad (\text{IV.33})$$

onde, $b_1 \dots b_6$ constantes paramétricas;
 K_o fator pré-exponencial.

FRANZEN et al. (1990) utilizaram esta equação na cinética de escurecimento não-enzimático, durante o armazenamento de leite desnatado seco.

SAGUY et al. (1978b) ao utilizar a equação (IV.31) modelaram os fatores K_o e E_{AB} em função de sólidos solúveis (B_x). Estes modelos estão mostrados a seguir:

$$K_o = \exp(b_5.E_{AB}-b_6) \quad (\text{IV.34})$$

$$E_{Ab} = b_1 + b_2 \left(\frac{B_x}{10} \right) - b_3 \left(\frac{B_x}{10} \right)^2 + b_4 \left(\frac{B_x}{10} \right)^3 \quad (\text{IV.35})$$

onde, B_x sólidos solúveis (Brix °);
 $b_1 \dots b_6$ constantes paramétricas.

SAGUY et al. (1978b) determinaram estas relações na cinética do escurecimento não-enzimático no processo térmico e de concentração de suco de uva.

Entre várias relações, há algumas controvérsias se o escurecimento não-enzimático deve ser modelado como uma função de umidade ou da atividade da água (a_w). Defensores do estudo da atividade da água dizem que isto é uma medida da quantidade da água disponível para a reação. Assim, a_w deve ser o termo apropriado.

Aqueles que acreditam que a umidade é o parâmetro controlador da taxa, apontam que em alguns produtos (ex. leite desnatado) existe a histerese nas isotermas de adsorção e desorção. Assim, dois valores diferentes de taxas de escurecimento não-enzimático serão obtidos para um único valor de a_w (FRANZEN et al., 1990).

A energia de ativação não é uma função da temperatura. Ao modelar E_{Ab} em função da atividade da água, a energia de ativação pode variar indiretamente com a temperatura, porque a atividade da água é função da temperatura. Este é mais um motivo dos defensores do modelo em função da umidade (FRANZEN et al., 1990).

IV.A.8 - LIMITE DE ACEITAÇÃO DE QUALIDADE (CONSTRAINT)

Teor e composição de cada componente biológico e químico em cada alimento variam numa faixa muito grande. Mesmo num tipo de alimento, os componentes variam com as espécies e até com as safras. Em alguns alimentos, existem certos componentes e em outros este mesmo componente

simplesmente não existe. Assim, quando se processa um determinado alimento, há componentes mais importantes que se refletem na qualidade do mesmo. Procurar um limite de quantidade de um certo componente de qualidade no produto final depende de muitos fatores tais como tipo de alimentos, tipos de produto final, teor inicial do atributo de qualidade, condições de processamento e outros.

A otimização de perda de qualidade de alimento num processo está fortemente ligada à otimização de outros fatores tais como a eficiência energética, produtividade, etc. Na maioria dos casos a perda de qualidade aumenta com o ganho em eficiência energética. Desta maneira, tornam-se impossíveis as otimizações simultâneas. Muitos pesquisadores escolheram um limite de “estrangulamento” para um certo atributo de qualidade e otimizaram as eficiências energéticas no processo de secagem dos alimentos (LEE & PYUN, 1993; BANGA & SINGH, 1994; MISHKIN et al., 1984b). Esta situação não é única. BANGA & SINGH (1994) descrevem os seguintes problemas de otimização ao estudarem a perda de ácido ascórbico na secagem de alimentos:

- a - maximização da retenção do ácido ascórbico dentro de uma faixa limite,
- b - minimização do tempo do processo, com valor-limite de retenção final do ácido ascórbico,
- c - maximização da eficiência energética com valor-limite de retenção final do ácido ascórbico.

A seguir tem-se alguns valores de limite utilizados por alguns pesquisadores em determinados alimentos:

- 1 - LEE & PYUN (1993) utilizaram o valor-limite para o ácido ascórbico de 330mg/100g s.s e 0,177 (D O a 420nm) para o escurecimento não-enzimático no processo de secagem de rabanetes em túnel.
- 2 - BANGA & SINGH (1994) utilizaram o valor-limite de 35% de retenção de ácido ascórbico para secagem a ar de um sistema celulósico ao otimizar a eficiência térmica.
- 3 - MISHKIN et al. (1984b) utilizaram o valor-limite como 27% da retenção do ácido ascórbico na desidratação de batata ao otimizar o tempo de processo de secagem.

IV.B - MODELAGEM

IV.B.1 - “ALIMENTO-MODELO”

A proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007 tratada no capítulo II possui uma cinética de secagem rápida por ser um sólido bastante poroso com a umidade inicial baixa (0,245 b.s.) e ainda um material proteico pouco susceptível à degradação. É objetivo deste capítulo tratar a secagem de materiais alimentares de alto conteúdo de água, secados até um limite de umidade na qual sejam passíveis de injúria térmica. Não foi encontrado, na literatura, um alimento específico que possuísse as propriedades e características físicas desejadas para efetuar este estudo. Assim, com o intuito de primeiro estabelecer o procedimento de simulação e posteriormente aplicá-lo a casos reais, foi estabelecido um “alimento-modelo”, com as seguintes características:

- As constantes de GAB e as propriedades de transferência de calor são as mesmas da proteína texturizada tipo R-NR 3007 (TELIS, 1988; HUBINGER, 1994).
- Constantes cinéticas de secagem: foram adotadas as determinadas por RAPUSA & DRISCOLL (1995b) para a secagem de fatias de cebola branca.
- As constantes cinéticas de degradação do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático são determinadas na secagem de rabanete (LEE & PYUN, 1993).

IV.B.1.1 – CINÉTICA DE SECAGEM DO “ALIMENTO-MODELO”

As equações II.1, II.3 e II.4 (capítulo II, secção II.B) para a simulação de secagem de proteína texturizada tipo R-NR 3007 foram utilizadas aqui para estudar a secagem do “alimento-modelo” no secador de leito deslizante concorrente, contracorrente e misto. A exceção foi a equação II.2 (capítulo II, secção II.B) que inclui a distribuição de tempo de residência na curva cinética de secagem. A equação II.2 (capítulo II, secção II.B) foi substituída pela equação IV.36, que supõe um modelo de escoamento de fluxo pistão, sem levar em conta a distribuição de tempo de residência. Esta equação está mostrada a seguir (HUBINGER, 1994):

$$dX/dt = -B.(X-X_e) \quad (IV.36)$$

onde,

B é a constante cinética de secagem do “alimento-modelo”.

A equação (IV.36) representa fisicamente apenas a secagem no período da taxa decrescente de umidade.

A constante cinética de secagem do sólido (B) pode ser escrita como:

$$B = B_0 \cdot \exp\{\Delta E/(R \cdot T_p)\} \quad (IV.37)$$

O teor de umidade do “alimento-modelo” possui uma umidade dez vezes maior que da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007. Isto levou a procurar uma constante cinética de secagem B dez vezes menor para o “alimento-modelo” em relação à constante cinética da proteína texturizada de soja, para obter tempo de residência dez vezes maior para a secagem do “alimento-modelo”. Assim, o valor de $\Delta E/R$ aqui adotado equivale ao obtido do processo de secagem da cebola (RAPUSA & DRISCOLL, 1995b), sendo de 3014 K^{-1} com um valor de $B_0 = 1,4836 \text{ s}^{-1}$. Com o valor de B resultante, o tempo de secagem do “alimento-modelo” equivale a dez vezes o tempo de residência na secagem da proteína texturizada de soja tipo R-NR 3007.

IV.B.1.2 - CINÉTICA DE DESTRUIÇÃO DE ÁCIDO ASCÓRBICO DO “ALIMENTO-MODELO”

Na simulação da destruição do ácido ascórbico na secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante foram utilizados os resultados cinéticos obtidos pelo trabalho de LEE & PYUN (1993) ao estudarem a secagem do rabanete no secador de túnel.

A destruição do ácido ascórbico na secagem do rabanete como uma função da umidade e temperatura foi modelada pelos autores, através das seguintes equações (IV.38) a (IV.41):

$$\frac{d(VitC)}{dt} = -K_a \cdot (VitC) \quad (IV.38)$$

$$K_a = K_{0a} \cdot \exp\left(-\frac{E_{Aa}}{R \cdot T_p}\right) \quad (\text{IV.39})$$

$$\ln K_{0a} = 16,101 + 1,3927 \cdot X + 0,1106 \cdot X^2 \quad (\text{IV.40})$$

$$E_{Aa} = 15138,6 + 740,57 \cdot X + 45,494 \cdot X^2 + 2,5302 \cdot X^3 \quad (\text{IV.41})$$

onde,

- VitC concentração do ácido ascórbico (mg/100g_{s.s.});
- K_a constante da taxa de destruição de ácido ascórbico (s⁻¹);
- K_{0a} fator de frequência em destruição de ácido ascórbico (s⁻¹);
- E_{aa} energia de ativação da destruição de ácido ascórbico (cal/mol);
- R constante universal de gases (1987 cal/mol.K);
- T_p temperatura do sólido (°C);
- X umidade do sólido (kg_{água}/kg_{s.s.}).

O perfil da constante da taxa de destruição do ácido ascórbico na secagem do rabanete está mostrado na figura IV.2.

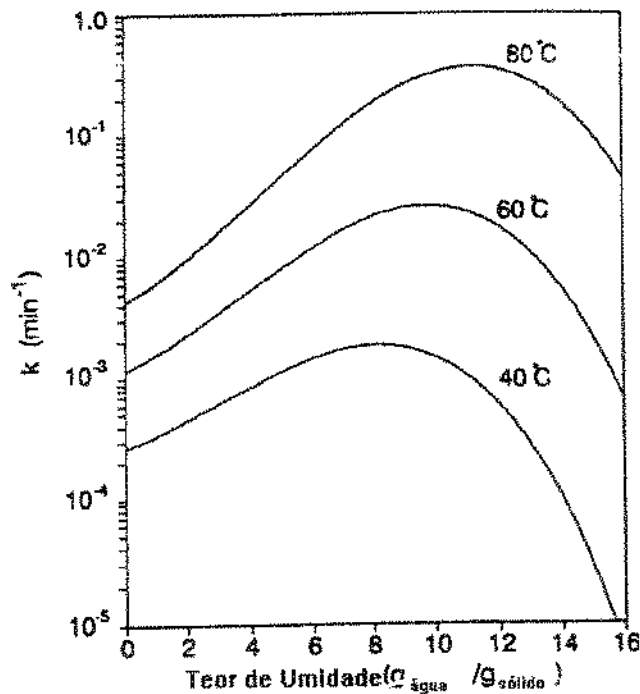


Figura IV.2 - Variação da constante da taxa de destruição do ácido ascórbico em função da umidade e temperatura do alimento.

Fonte: LEE & PYUN (1993)

IV.B.1.3 - CINÉTICA DE ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO DO “ALIMENTO-MODELO”

Na simulação do escurecimento não-enzimático na secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante, também foram utilizados os resultados cinéticos obtidos pelo trabalho de LEE & PYUN (1993) ao estudarem a secagem do rabanete no secador de túnel.

O escurecimento não-enzimático na secagem do rabanete foi descrito pelos autores, usando as seguintes equações (IV.42) a (IV.45):

$$\frac{dE}{dt} = K_b \quad (\text{IV.42})$$

$$\ln K_b = \ln K_{b_{ref}} - \left(\frac{E_{ab}}{R} \right) \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (\text{IV.43})$$

$$\ln K_{b_{ref}} = -8,619 + 1,712 \cdot X - 0,150 \cdot X^2 \quad (\text{IV.44})$$

$$\ln E_{ab} = 10,550 + 0,1336 \cdot X - 0,0179 \cdot X^2 \quad (\text{IV.45})$$

onde,

E	nível de escurecimento (densidade ótica (D.O) a 420nm);
K _b	constante de taxa de escurecimento (ΔE ₄₂₀ /min.);
K _{b_{ref}}	K _b à temperatura de T _{ref} (ΔE ₄₂₀ /min.);
E _{ab}	energia de ativação de escurecimento não-enzimático (J/mol);
T _p	temperatura do sólido;
T _{ref}	temperatura de referência (338 K);
R	constante universal dos gases (1987 cal/mol.K).

O perfil da constante do escurecimento não-enzimático na secagem do rabanete está mostrado na figura IV.3.

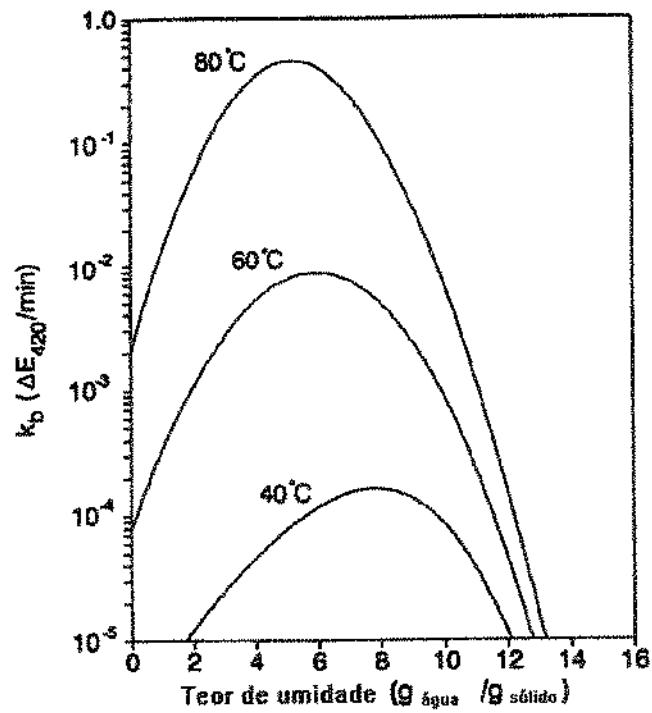


Figura IV.3 - Constante da taxa de escurecimento não-enzimático em função da umidade e temperatura do rabanete.

Fonte: LEE & PYUN (1993).

IV.B.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Considerou-se a umidade inicial do sólido (X_1) igual a $2,3\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$, temperatura de entrada do sólido (T_{p1}) igual a 32°C , temperatura de ar ambiente (T_{gar}) igual a 25°C e umidade relativa de 60%. As vazões dos sólidos (W_s) foram fixadas para $1,27 \cdot 10^{-4}\text{kg/s}$ nos secadores concorrente e contracorrente e $2,35 \cdot 10^{-4}\text{kg/s}$ nos secadores mistos. A umidade final do sólido (X_f) foi fixado como $0,1\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$. Adotaram-se o teor de vitamina C inicial (vitC_0) como $480\text{mg}/100\text{g}_{\text{s.s.}}$ e o índice de escurecimento não-enzimático inicial (E_0) como 0,077 D.O a 420nm.

Nas figuras IV.4 e IV.5 estão mostrados os esquemas de um secador concorrente e contracorrente, respectivamente.

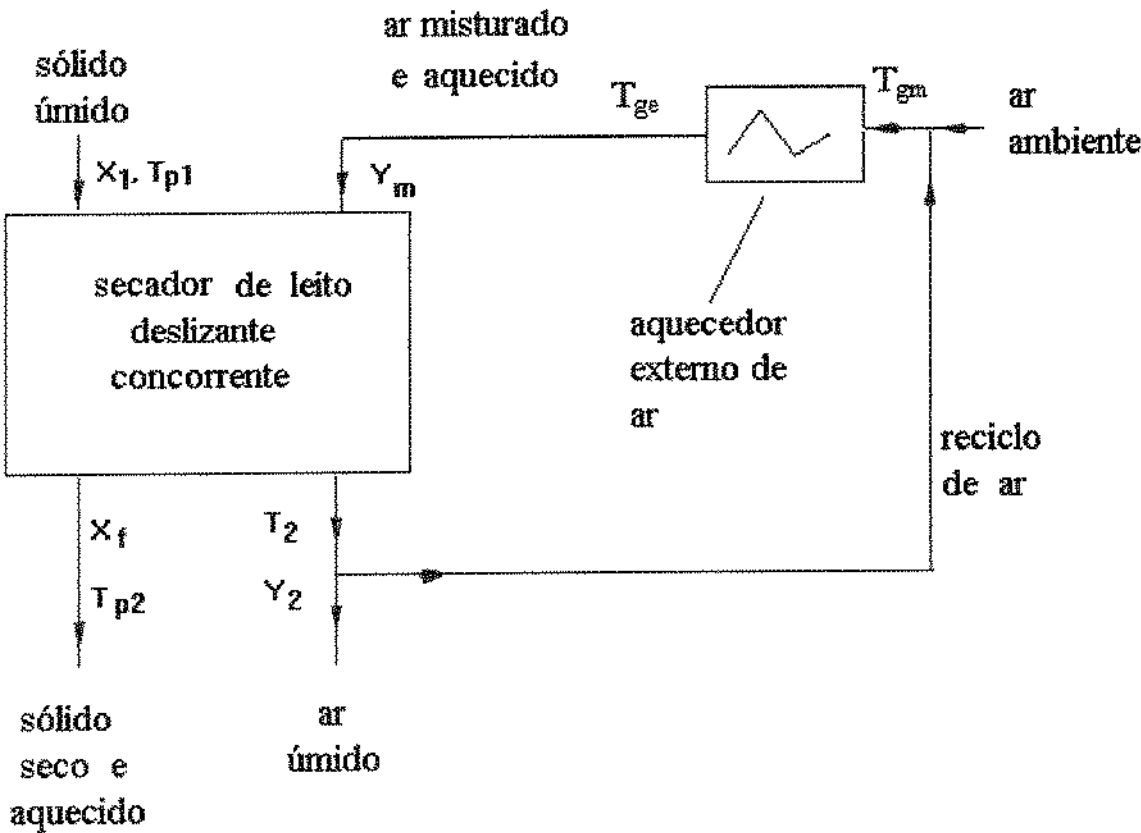


Figura IV.4 – Esquema do secador de leite deslizante concorrente com reciclo de ar.

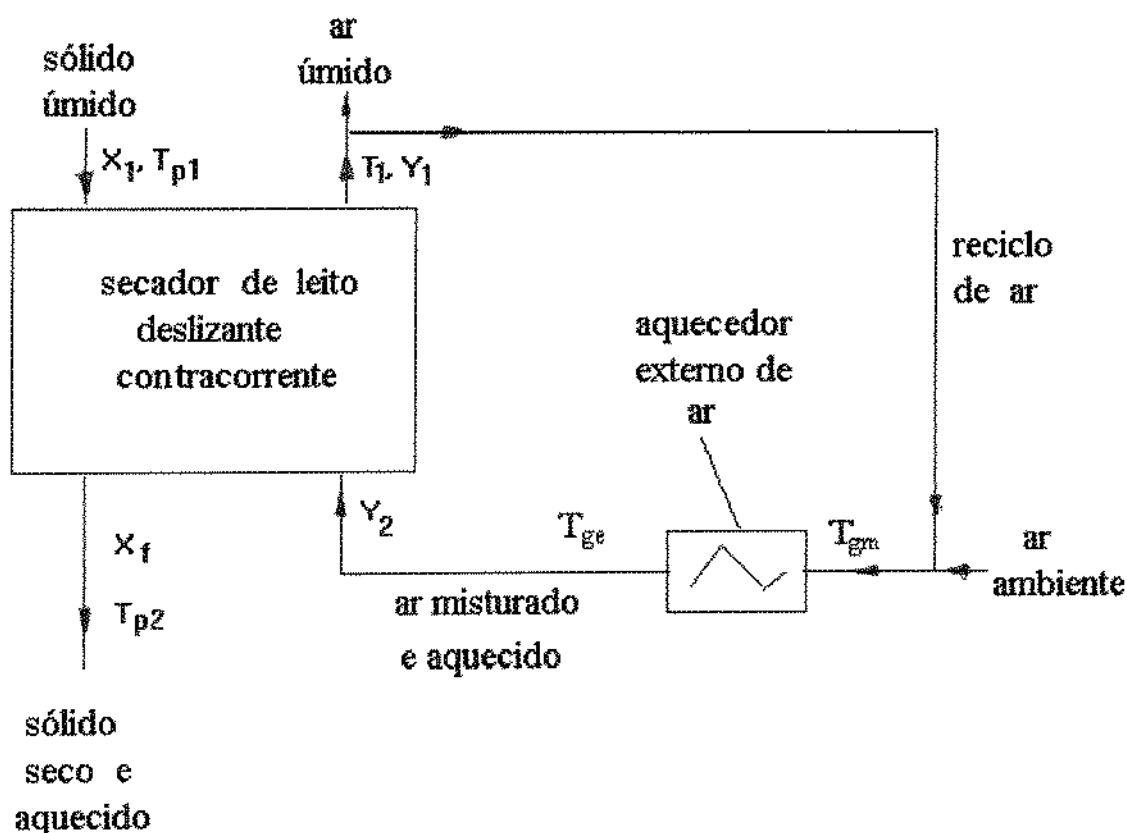


Figura IV.5 - Esquema do secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

No secador concorrente, o sólido e o ar entram no topo do secador e o sólido escoa para baixo pela gravidade. No secador contracorrente, o sólido entra no topo, mas o ar é introduzido na base do secador. Um “protótipo” de secador contracorrente pode ser visto na figura II.1, secção II.A.1.1 no capítulo II. Os sólidos entram com o teor de umidade X_1 (2,3 b.s.) e temperatura T_{p1} (32°C), ocorre a troca térmica e mássica no interior do secador e saem secos e aquecidos com teor de umidade X_f (0,1 b.s.) e temperatura T_{p2} .

Uma parte do ar na saída do secador é reciclada e misturada com o ar ambiente, aquecido externamente a uma temperatura T_{ge} e então introduzido no secador. O ar entra a uma temperatura T_{ge} e umidade Y_m e sai a uma temperatura T_2 e umidade Y_2 no secador concorrente. O ar no secador contracorrente entra, pela nomenclatura utilizada aqui, a uma temperatura T_{ge} e umidade Y_2 e sai a uma temperatura T_1 e teor de umidade Y_1 .

Através do balanço de massa e energia pode se calcular a temperatura T_{gm} e a umidade Y_m de mistura de ar. Estas expressões estão mostradas a seguir:

$$T_{g_m} = (W_{g_{ar}} \cdot T_{g_{ar}} + W_{g_{rec}} \cdot T_{g_{rec}}) / (W_{g_{ar}} + W_{g_{rec}}) \quad (IV.46)$$

$$Y_m = (W_{g_{ar}} \cdot Y_{ar} + W_{g_{rec}} \cdot Y_{rec}) / (W_{g_{ar}} + W_{g_{rec}}) \quad (IV.47)$$

onde,
para secador concorrente,

$$W_{g_{rec}} = R_{rec} \cdot R_{cc} \cdot W_s \quad (IV.48)$$

$$W_{g_{ar}} = R_{cc} \cdot W_s \cdot (1 - R_{rec}) \quad (IV.49)$$

para o secador contracorrente,

$$W_{g_{rec}} = R_{rec} \cdot R_{ct} \cdot W_s \quad (IV.50)$$

$$W_{g_a} = R_{ct} \cdot W_s \cdot (1 - R_{rec}) \quad (IV.51)$$

O esquema, funcionamento básico, protótipo, cálculo de Y_m e T_{g_m} para um secador deslizante misto com reciclo de ar foram descritos e mostrados no capítulo II, secção II.B.1.

No estudo da cinética de degradação da qualidade nos secadores deslizantes concorrente e contracorrente, avaliaram-se a influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador, o reciclo e a vazão de ar no secador. As seguintes condições de operação foram adotadas:

- 1 - para estudar a influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}), adotaram-se $T_{ge} = 73^\circ\text{C}$, 80°C , 90°C e 100°C , mantendo fixos os valores de $R_{rec} = 0,55$ e $R_{cc} = R_c = 191$;
- 2 - para o estudo de vazão de ar no reciclo (razão de ar entre o reciclo e o secador) R_{rec} , quatro valores foram adotados, $R_{rec} = 0,05$; $0,2$; $0,4$ e $0,5$ mantendo fixos os valores $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$ e $R_{cc} = R_{ct} = 191$;
- 3 - no estudo da influência de vazão de ar, foram usados quatro valores de $R_{cc} = R_{ct} = 190$, 240 , 290 e 340 ; mantendo fixo os valores $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$ e $R_{rec} = 0,3$.

Para o secador deslizante com configuração mista, foram estudadas as influências das temperaturas de ar de entrada (T_{ge}), vazão de ar na secção contracorrente e comprimento do secador na secção contracorrente. Foram fixas a razão entre a vazão de ar de reciclo e vazão de ar na secção concorrente do secador (R_{rec}) igual a 1,0 (100%) e razão entre a vazão de ar na secção concorrente e vazão de sólido (R_{cc}) igual a 144. As seguintes condições de operação foram adotadas:

- 1 - para estudar a influência da temperatura de entrada de ar (T_{ge}), adotaram-se 4 valores $T_{ge} = 73^{\circ}\text{C}$, 80°C , 90°C e 100°C , mantendo fixos os valores de $R_{rec} = 0,55$ e $R_{cc} = R_{ct} = 191$;
- 2 - no estudo da influência de vazão de ar na secção contracorrente (razão entre a vazão de ar e sólido na secção contracorrente) R_{ct} , quatro valores de R_{ct} foram fixados: 103, 130, 157 e 184, mantendo fixo os valores $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$, $R_{cc} = 103$ e $L_{ct} = 27\text{cm}$;
- 3 - para o estudo da influência do comprimento da secção contracorrente (L_{ct}), adotaram-se 4 valores: $L_{ct} = 14\text{cm}$, 19cm , 24cm e 29cm ; mantendo fixos os valores $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$ e $R_{cc} = R_{ct} = 144$.

Os motivos da escolha dos valores para T_{ge} , R_{cc} e R_{ct} dos sistemas concorrentes e contracorrentes são os mesmos do sistema misto do capítulo II. No caso dos valores para o reciclo para estes sistemas é de interesse estudar desde a região próxima da ausência do reciclo até uma região onde é percebida a ação do reciclo. Deste modo, foram escolhidos os valores de 0,05 a 0,5.

Os valores de parâmetros (R_{cc} , R_{ct} ou T_{ge}) fixos foram escolhidos de tal maneira que o ar não sature na saída do secador na condição mais crítica, pois as equações da cinética de secagem do sólido não simulam quando o ar satura. Procurou-se escolher valores fixos de tal maneira que a eficiência térmica permaneça alta apesar de não ser necessária para atingir o objetivo desejado. O que se observará na discussão dos dados é que a escolha destes valores fixos dos parâmetros dentro das faixas estudadas não interfere na análise e discussão do resultado obtido, pois as tendências dos perfis cinéticos (vitamina C, escurecimento não-enzimático, umidade e temperatura do sólido) ao longo dos secadores concorrente, contracorrente e misto é a mesma.

Foram utilizadas as seguintes condições de contorno na resolução de sistemas das equações II.1, II.3, II.4 (capítulo II, secção II.B) e IV.36.

- 1 - Para o secador de fluxo concorrente:

$$T_g(0) = T_{ge};$$

$$Y(0) = Y_m;$$

$$T_p(0) = 32^{\circ}\text{C};$$

$$X(0) = 2,3 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}};$$

$$\text{VitC}(0) = 480 \text{ mg}/100\text{g}_{\text{s.s.}};$$

$$E(0) = 0,077 \text{ D.O a } 420\text{nm}.$$

2 - Para o secador de fluxo contracorrente:

$$T_p(0) = 32^{\circ}\text{C};$$

$$X(0) = 2,3 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}};$$

$$Y(t_f) = Y_m;$$

$$T_g(t_f) = T_{g_c};$$

$$\text{VitC}(0) = 480 \text{ mg}/100\text{g}_{\text{s.s.}};$$

$$E(0) = 0,077 \text{ D.O a } 420\text{nm}.$$

3 - Para o secador misto:

a. Secção contracorrente:

$$T_p(0) = 32^{\circ}\text{C};$$

$$X(0) = 2,3 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}};$$

$$Y(t_1) = Y_m;$$

$$T_g(t_1) = T_{g_c};$$

$$\text{Vit}(0) = 480 \text{ mg}/100\text{g}_{\text{s.s.}};$$

$$E(0) = 0,077 \text{ D.O a } 420\text{nm}.$$

b. Secção concorrente:

$$T_p(t_1) = T_p \text{ na saída da secção contracorrente};$$

$$T_g(t_1) = T_{g_c};$$

$$Y(t_1) = Y_m;$$

$$X(t_1) = X \text{ na saída da secção contracorrente};$$

$$\text{VitC}(t_1) = \text{VitC na saída da secção contracorrente};$$

$$E(t_1) = E \text{ na saída da secção contracorrente}.$$

IV.B.3 - MÉTODOS NUMÉRICOS

A resolução das equações das cinéticas da destruição do ácido ascórbico (equações IV.38, IV.39, IV.40 e IV.41) e escurecimento não-enzimático (equações IV.42, IV.43, IV.44 e IV.45) combinadas às equações II.1, II.3, II.4 (capítulo II, secção II.B) e IV.36 foi feita pelo método numérico de Runge Kutta de 4ª ordem.

IV.C - RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

O objetivo principal deste trabalho é otimizar os secadores com a finalidade de ter o máximo de eficiência térmica e mínimo de degradação de ácido ascórbico e de escurecimento não-enzimático. Do modelo estudado aqui (equação IV.38 a IV.41 e equação IV.42 a IV.45), sabe-se que a degradação de vitamina C e o escurecimento não-enzimático dependem da temperatura e umidade do sólido e do tempo de secagem. Sabe-se, de trabalhos prévios (HUBINGER, 1994; HUBINGER & MENEGALLI, 1994; KAJIYAMA et al., 1995), que as condições mais importantes na eficiência térmica são: razão de vazão do ar e sólido no secador, razão de reciclo e entrada de ar no secador, temperatura de ar de entrada no secador, tempo de residência do sólido no secador ou comprimento do secador. Assim, a influência destas variáveis na degradação da qualidade durante a secagem foi avaliada e os resultados são apresentados a seguir, para os diversos secadores.

IV.C.1 - SECADOR CONCORRENTE

IV.C.1.1 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DE AR (T_{ge})

As figuras IV.6, IV.7, IV.8 e IV.9 mostram respectivamente o teor de umidade do sólido (X), temperatura da partícula (T_p), teor da vitamina C (vitC) e escurecimento não-enzimático (E) em função do tempo de secagem. Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do sólido no secador $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{ss}/s$; umidade final do sólido $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{ss}$; razão entre as vazões de reciclo e entrada de ar no secador $R_{rec} = 0,55$; razão entre a vazão de ar e sólido no secador $R_{cc} = 191$.

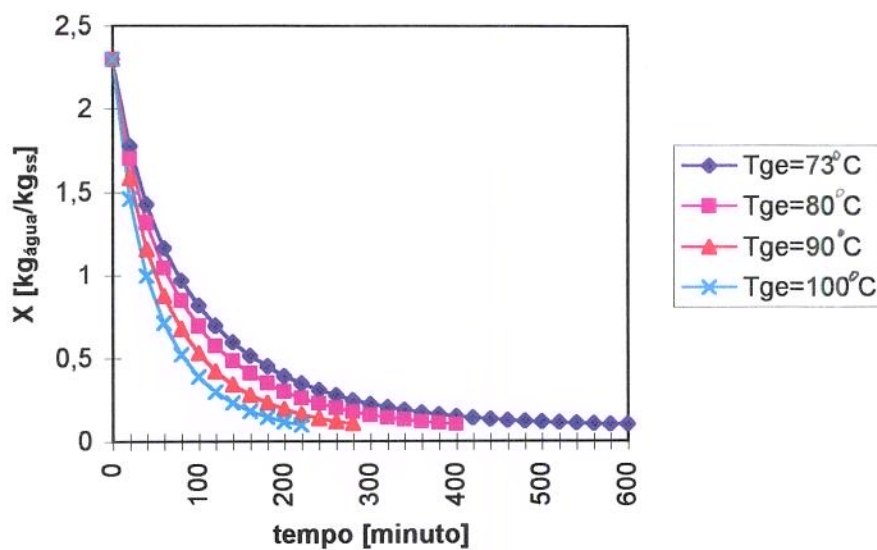


Figura IV.6 - Variação do teor de umidade do sólido (X) em função do tempo para secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s}} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{cc}} = 191$$

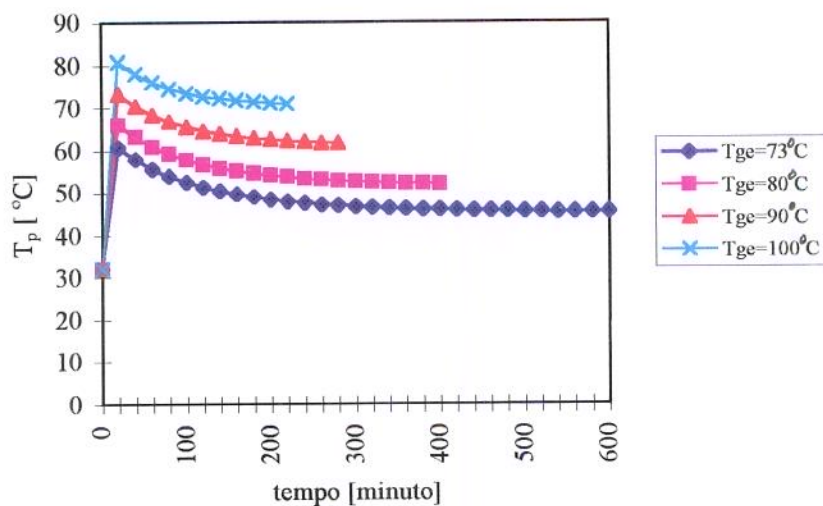


Figura IV.7 - Variação da temperatura do “alimento-modelo” em função de tempo para secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s}} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{cc}} = 191$$

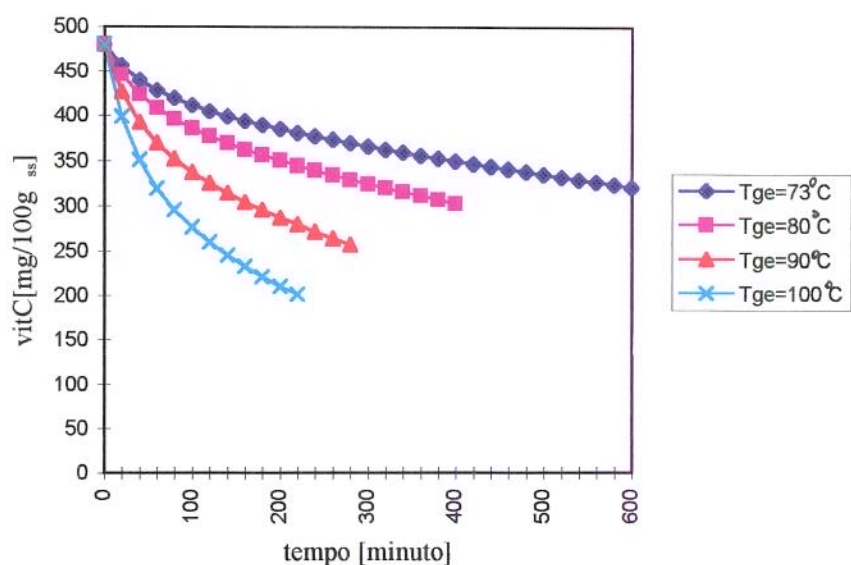


Figura IV.8 - Variação de teor de vitamina C (vit C) em função do tempo para secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{cc}} = 191$$

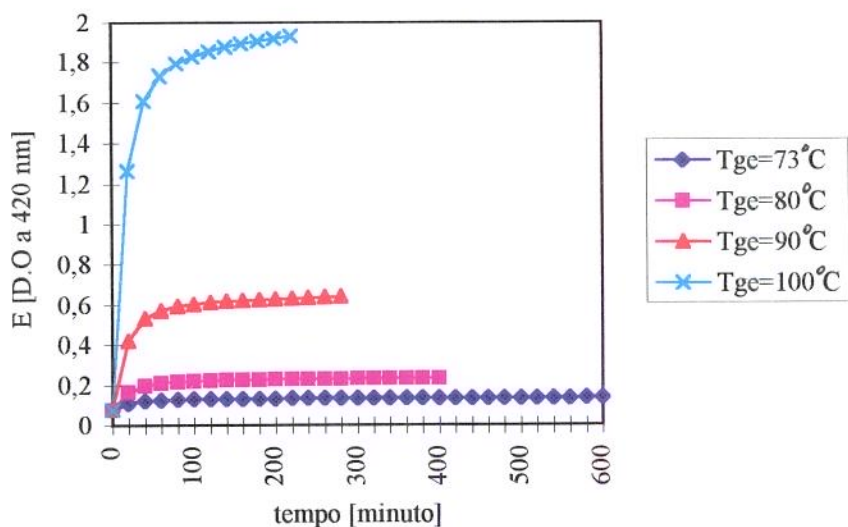


Figura IV.9 - Variação do índice de escurecimento não-enzimático (E) em função do tempo para secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{cc}} = 191$$

Na figura IV.6, observa-se que o teor de umidade do sólido (X) decresce mais rapidamente a uma temperatura mais alta de ar de entrada ($T_{ge}=100^{\circ}\text{C}$). Isto era esperado, pois o ar ambiente aquecido a uma temperatura maior possui menor atividade de água ou umidade relativa, ou seja, possui maior potencial para transferência de massa de vapor de água e energia. Em consequência disto, ainda na figura IV.6 observa-se que para atingir o mesmo teor de umidade final (X_f) da partícula, o tempo de residência da partícula no secador é maior para aqueles sistemas de secadores que utilizam uma temperatura de ar de entrada (T_{ge}) menor.

Na figura IV.7, observa-se que a temperatura da partícula é sempre maior, qualquer que seja o tempo de residência no secador operando a uma temperatura de ar de entrada (T_{ge}) maior. Quando o sólido sofre um aumento rápido de temperatura nos primeiros 10 minutos, posteriormente a temperatura começa a decrescer, atingindo uma temperatura final mais baixa quando o sólido está seco, que é função da temperatura de entrada do secador.

Na figura IV.8, observa-se que a degradação de ácido ascórbico é sempre maior a uma temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) maior. O modelo utilizado nesta simulação (equação IV.38, IV.39, IV.40 e IV.41) é fortemente dependente da temperatura da partícula (T_p) e do teor de umidade do sólido (X). Analisando a equação IV.39, ao aumentar a temperatura da partícula, a constante da taxa da degradação do ácido ascórbico (K_a) aumenta e conseqüentemente há maior intensidade na degradação do ácido ascórbico. Entretanto, ao diminuir o teor de umidade do sólido (X), para umidades menores que certo valor a constante da taxa de degradação do ácido ascórbico (K_a) decresce (figura IV.2). Pode observar-se uma velocidade de degradação maior na primeira secção do secador e posteriormente a velocidade de degradação se faz menor. A temperatura de 100°C , entretanto, a taxa de degradação se mantém alta ao longo de todo o secador.

A figura IV.9 mostra o escurecimento não-enzimático do “alimento-modelo” estudado em função do tempo. Observa-se que o escurecimento não-enzimático é mais intenso a uma temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) maior. Isto era esperado, pois no modelo utilizado na simulação (equação IV.43) a constante da taxa de escurecimento não-enzimático aumenta com o aumento da temperatura da partícula que está sendo seca (T_p) e T_p é maior quanto maior for T_{ge} conforme visto na figura IV.7. Mas ainda pode observar-se que o escurecimento se mantém mais baixo em 73°C e 80°C , para aumentar de 3 a 10 vezes quando se aumenta a temperatura a 90°C e 100°C . Neste caso, o maior escurecimento se dá nos primeiros 60 minutos de tempo de residência no secador.

IV.C.1.2 - INFLUÊNCIA DO RECICLO (R_{rec})

As curvas das figuras IV.10, IV.11, IV.12 e IV.13 representam as influências do reciclo nas seguintes grandezas: perda de umidade no sólido (X), temperatura do alimento (T_p), perda do ácido ascórbico (vitC) e escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo de residência do secador. Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão de sólidos no secador $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$, umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$, temperatura de entrada de ar no secador $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$ e razão entre valores de vazão de ar e sólido na entrada do secador $R_{cc} = 191$.

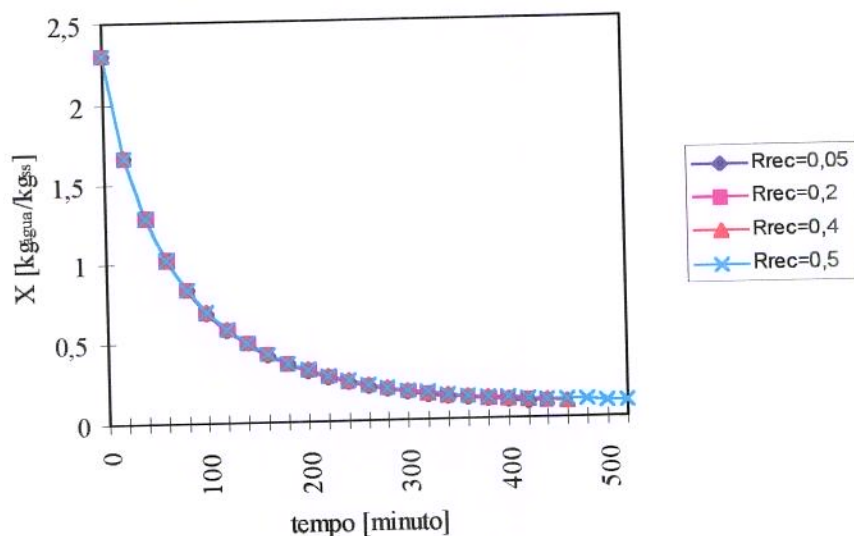


Figura IV.10 - Variação da umidade em função do tempo, para diferentes relações de reciclo, na secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.} \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C} \quad R_{cc} = 191$$

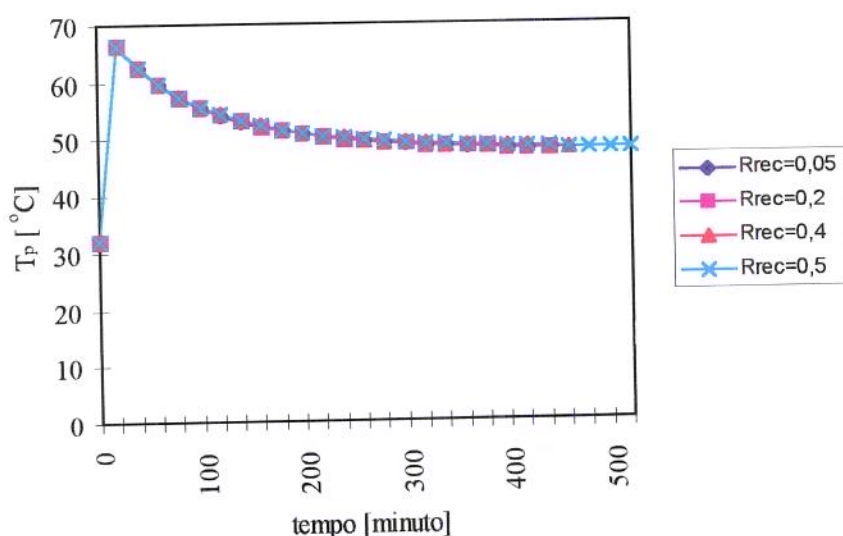


Figura IV.11 - Variação da temperatura do “alimento-modelo” em função do tempo, para diferentes relações de reciclo em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C} \quad R_{cc} = 191$$

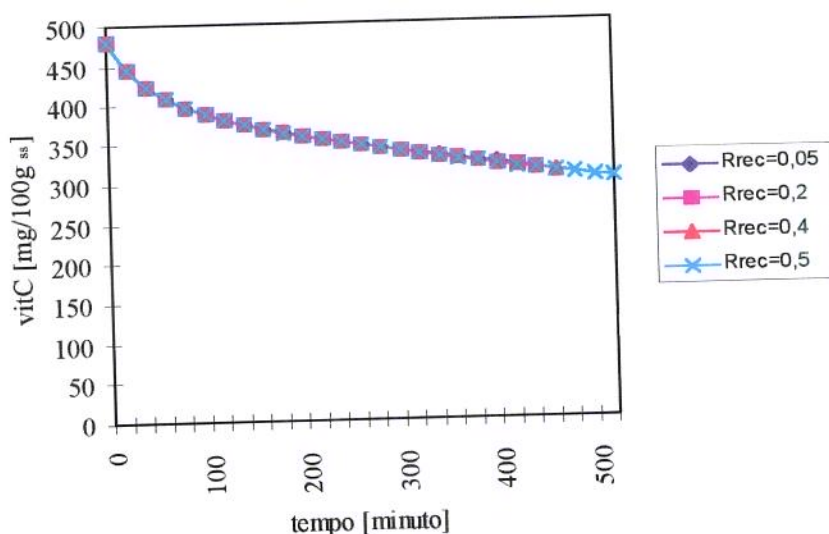


Figura IV.12 - Variação de teor de vitamina C (vitC) em função do tempo, para diferentes relações de reciclo, na secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C} \quad R_{cc} = 191$$

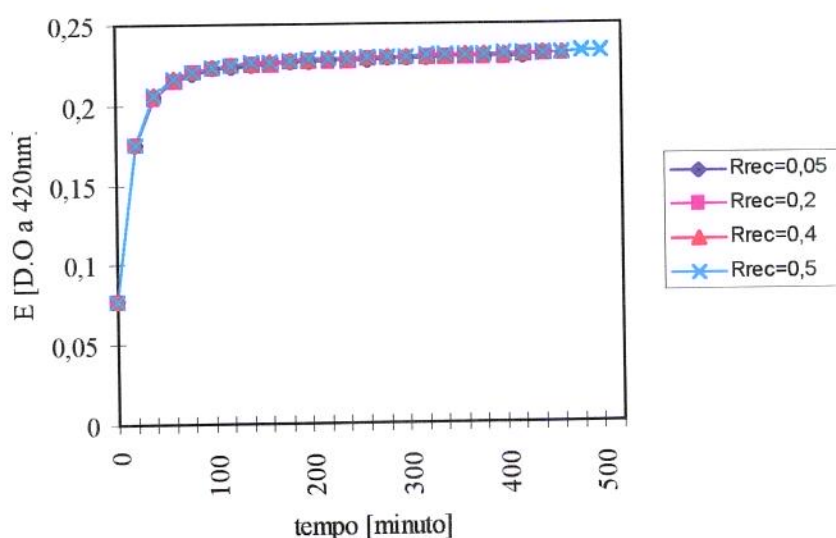


Figura IV.13 - Variação de índice de escurecimento não-enzimático (E) em função do tempo, para diferentes relações de reciclo, na secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s}} \quad T_{\text{ge}} = 85^{\circ}\text{C} \quad R_{\text{cc}} = 191$$

Pela observação da figura IV.12, nota-se que as curvas que possuem valores diferentes de razões de reciclo (R_{rec}) se sobrepõem, mostrando que as perdas de vitamina C dos alimentos têm os mesmos valores em cada tempo de secagem no secador concorrente. Também nota-se que os valores da vitamina C na secagem final do alimento são praticamente os mesmos. Isto significa que o reciclo de ar no secador concorrente afeta muito pouco as temperaturas (T_p) e umidade (X) do alimento durante a secagem e conseqüentemente não influi na degradação da vitamina C. De fato o modelo utilizado na simulação da degradação do ácido ascórbico (equação IV.43, IV.44 e IV.45) só depende da temperatura e umidade do alimento em cada instante e a menos que o reciclo influencie indiretamente nas temperaturas e umidades do alimento na secagem, a degradação da vitamina C devido à alteração da razão de reciclo não ocorrerá. Pelas figuras IV.10 e IV.11, observa-se que os valores das temperaturas (T_p) e umidade do alimento (X) não variam em cada instante com o reciclo de ar (sobreposições da curvas), provando que o reciclo não afeta a temperatura (T_p) nem a umidade do alimento em cada instante da secagem. Também a diferença dos valores finais das temperaturas (T_p) e umidade da partícula (X) na saída do secador concorrente de valores diferentes de reciclo de ar são insignificantes. Do mesmo modo pela observação da figura IV.13, o escurecimento não-

enzimático não se altera com as variações de valores no reciclo de ar, pois as curvas de escurecimento não-enzimático em cada instante da secagem sobrepõem e mesmo comparando os valores finais de escurecimento não-enzimático na saída do secador concorrente, estas diferenças são insignificantes. Na verdade o reciclo do ar afeta a temperatura de ar de mistura entre o ar de reciclo e ambiente, mas como esta mistura é aquecida até um valor predeterminado na entrada do secador (T_{ge}), o reciclo acaba não afetando as condições da operação. Embora o reciclo influa na umidade inicial do ar de entrada no secador, esta influência é muito pequena.

IV.C.1.3 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR (R_{cc})

Nesta secção foi estudada a influência de vazão de ar na degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático. Os valores de vazão de ar foram apresentados em relação à vazão de sólido (R_{cc}), em vez de valores absolutos. Foram estudadas quatro vazões sendo que as variações foram de $2,41 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar}/s$ a $3,68 \cdot 10^{-2} \text{ kg}/s$.

As figuras IV.14 e IV.15 mostram as curvas de degradação da vitamina C e escurecimento não-enzimático em função do tempo durante a secagem do “alimento-modelo” no secador de leito deslizante concorrente com reciclo de ar para vários valores de razões entre vazão de ar e alimento no secador (R_{cc}). Foram fixados os seguintes valores nas condições de operação durante a secagem: vazão do sólido $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s.}/s$; umidade final do alimento na secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{água}/\text{kg}_{s.s.}$; razão de reciclo de ar $R_{rec} = 0,30$ e temperatura de ar na entrada do secador $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$. As vazões de ar consideradas foram: $2,41 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar}/s$; $3,05 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar}/s$; $3,68 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar}/s$ e $4,32 \cdot 10^{-2} \text{ kg}_{ar}/s$; correspondendo respectivamente aos seguintes valores de R_{cc} : 190, 240, 290 e 340.

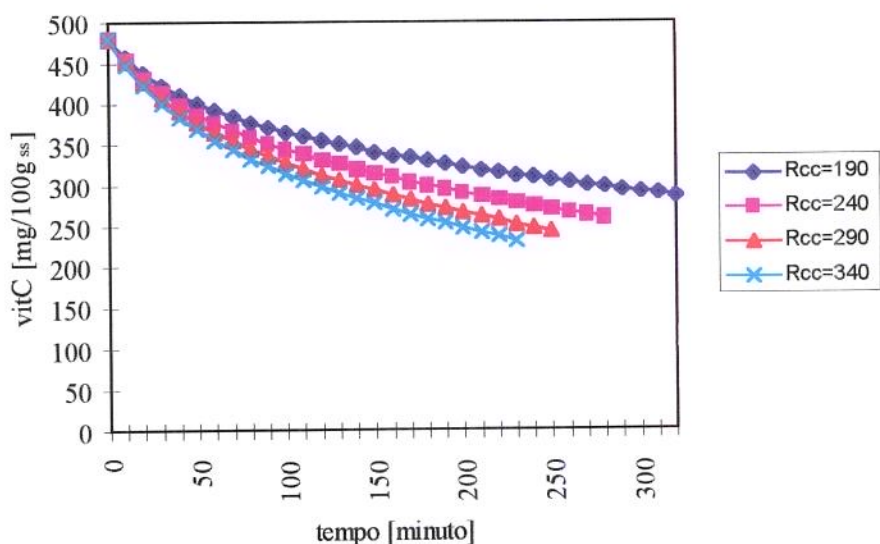


Figura IV.14 - Variação de teor de vitamina C (vitC) em função do tempo, para diferente razão entre vazão de ar e “alimento-modelo”, em secador de leito deslizante concorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

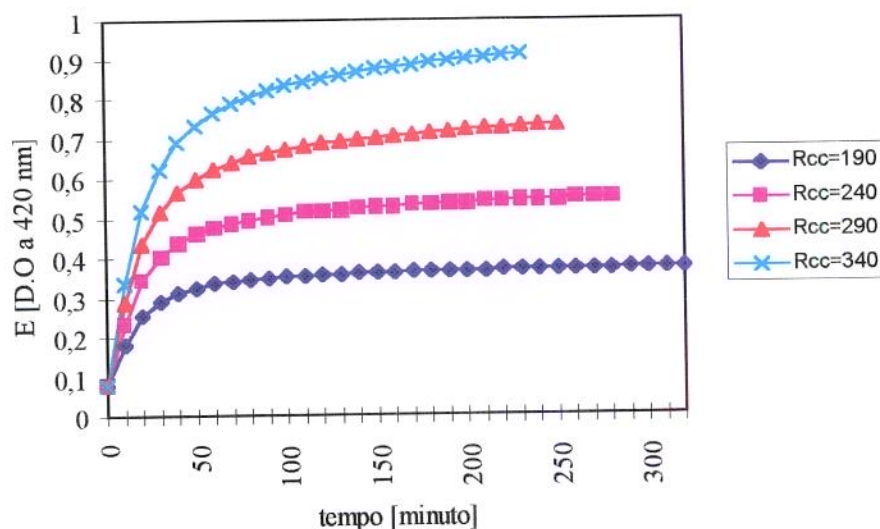


Figura IV.15 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo na secagem do “alimento-modelo” no secador de leito deslizante concorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

Na figura IV.14, observa-se que a degradação do ácido ascórbico é maior para um valor maior da razão de vazões entre o ar e alimento no secador (R_{cc}). Isto é decorrente do fato de que um valor mais alto da razão R_{cc} possibilita a maior troca térmica e mássica, entretanto o mais importante é que na medida que cresce a razão de ar em relação ao sólido, menor é a queda de temperatura na fase gasosa e correspondentemente na fase sólida (figura IV.16). Pode observar-se que a temperatura final do sólido muda ao redor de 14°C em função de R_{cc} .

A figura IV.17 mostra a variação de umidade do “alimento-modelo” durante a secagem. Através das curvas pode-se observar que para um valor maior da razão entre o ar e o sólido no secador (R_{cc}) há uma retirada maior de umidade.

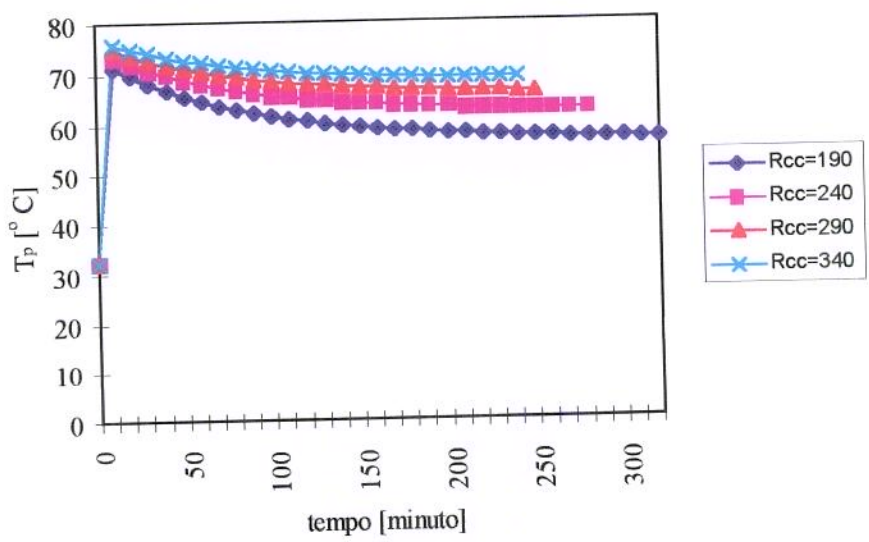


Figura IV.16 - Temperatura da partícula (T_p) em função do tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$ $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$ $R_{rec} = 0,30$ $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$

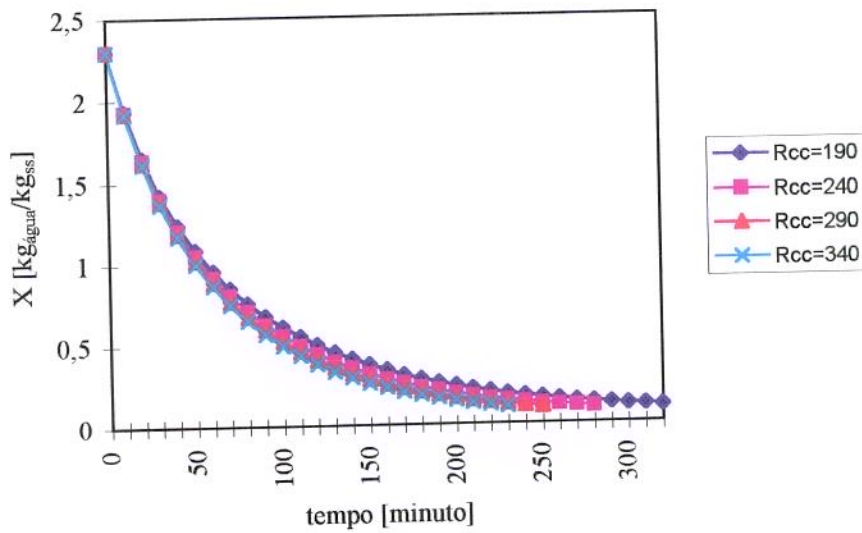


Figura IV.17 - Teor de umidade no sólido (X) em função de tempo na secagem de “alimento-modelo” no secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s}} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{gc}} = 85^\circ\text{C}$$

Da figura IV.15 pode-se observar que o escurecimento não-enzimático é maior para valores maiores da razão entre o ar e sólido no secador (R_{cc}). Isto era esperado, pois ao aumentar os valores de R_{cc} conforme visto nas curvas das figuras IV.16 e IV.17 as temperaturas das partículas aumentam (T_p) enquanto a umidade diminui (X). Neste caso, a influência da temperatura do sólido é ainda maior, produzindo um aumento de 3 vezes no escurecimento, quando se aumenta duas vezes a vazão de gás.

IV.C.2 - SECADOR CONTRACORRENTE

IV.C.2.1 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE ENTRADA DE AR (T_{ge})

O mesmo procedimento descrito na secção anterior (secção IV.C.1) foi efetuado para a configuração contracorrente. As figuras IV.18, IV.19, IV.20 e IV.21 mostram respectivamente o teor do ácido ascórbico (vitC), escurecimento não-enzimático (E), temperatura do alimento (T_p) e teor de umidade do sólido (X) em função do tempo de secagem no secador contracorrente. Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do alimento no secador $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$, umidade final do alimento seco $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$; razão entre as vazões de reciclo e entrada de ar no secador $R_{rec} = 0,55$ e razão entre a vazão de ar e sólido no secador contracorrente $R_{ct} = 191$.

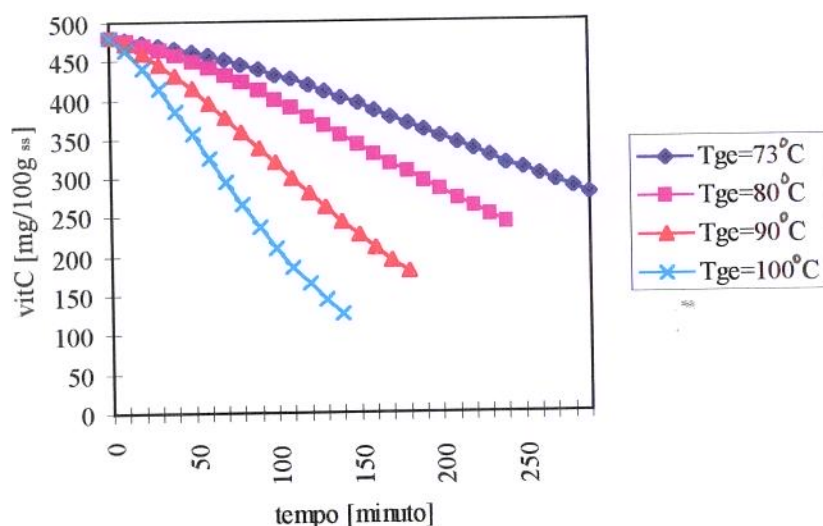


Figura – IV.18 - Vitamina C (vitC) em função de tempo para o secador de leite deslizante contracorrente com reciclo de ar, durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.} \quad R_{rec} = 0,55 \quad R_{ct} = 191$$

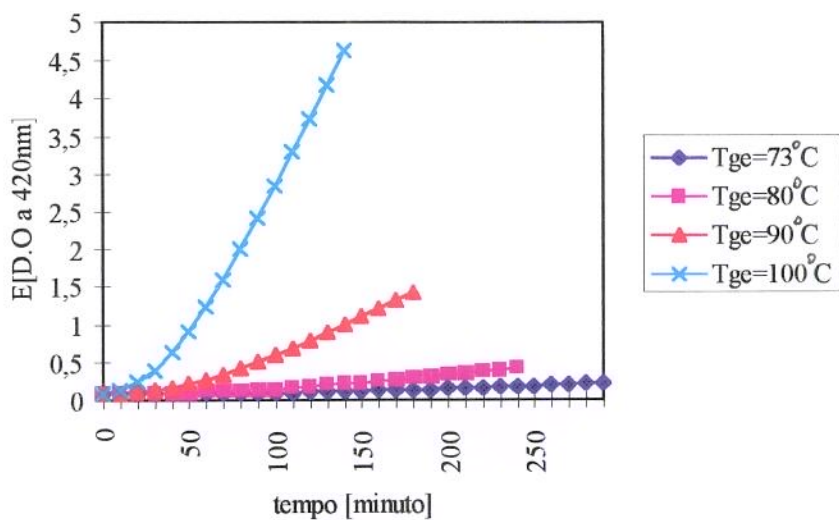


Figura IV.19 - Escurecimento não-enzimático (E) em função do tempo para o secador de leite deslizante contracorrente com reciclo de ar durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{ct}} = 191$$

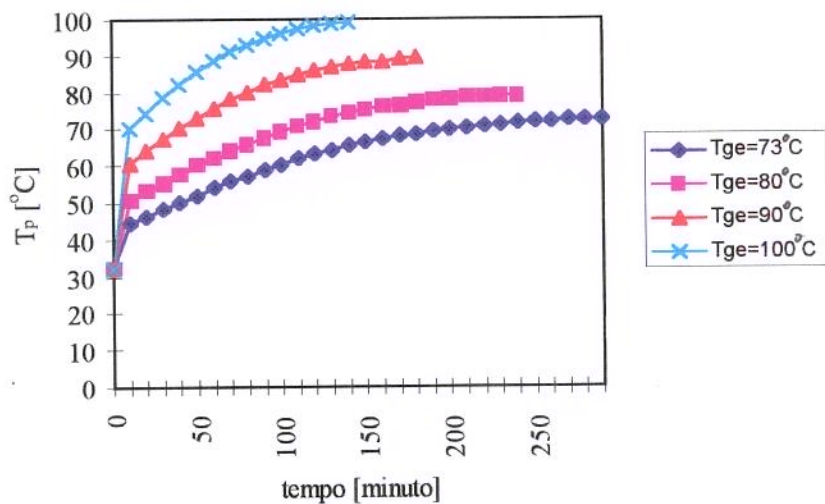


Figura IV.20 - Variação da temperatura do “alimento-modelo” em função de tempo para secador de leite deslizante contracorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{ct}} = 191$$

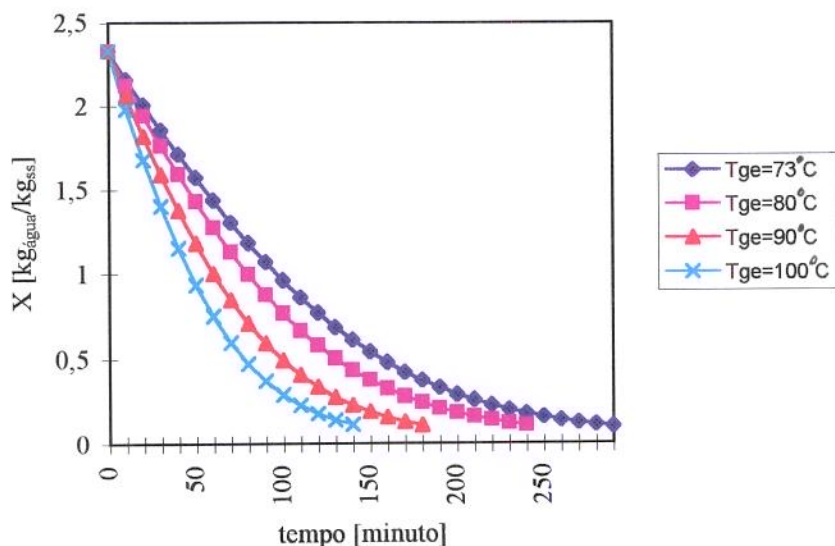


Figura IV.21 - Variação do teor de umidade do sólido (X) em função do tempo para secagem do “alimento-modelo” em secador de leito deslizante contracorrente com reciclo.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,55 \quad R_{\text{ct}} = 191$$

A figura IV.18 mostra que a degradação de ácido ascórbico depende fortemente da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador contracorrente.

O escurecimento não-enzimático é mais intenso à medida que a temperatura de entrada de ar (T_{ge}) aumenta (figura IV.19).

Como é esperado, a temperatura do sólido no secador contracorrente aumenta à medida que se desloca ao longo do secador (figura IV.20), o que reflete um aumento vertiginoso de escurecimento não-enzimático para temperaturas maiores de 80°C. Para temperaturas de 80°C e menores, a degradação se mantém controlada até 100 minutos de tempo de residência.

De acordo com os resultados observados nas figuras IV.18, IV.19, IV.20 e IV.21, conclui-se que a influência da temperatura de ar de entrada (T_{ge}) no secador contracorrente tem tendências semelhantes a do secador concorrente na degradação do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático, ainda mais marcantes. Esta análise e discussão podem ser vistas nas figuras A e B do anexo A na parte final da tese.

IV.C.2.2 - INFLUÊNCIA DO RECICLO

As figuras IV.22, IV.23, IV.24 e IV.25 representam a influência da variação da relação de reciclo com o tempo nas seguintes grandezas: perda de ácido ascórbico (vitC), escurecimento não-enzimático (E), temperatura do alimento (T_p) e teor de umidade do alimento (X) durante a secagem do “alimento-modelo” no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar. Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do alimento no secador $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s}$, umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$, temperatura de entrada de ar no secador $T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$ e razão entre valores de vazão de ar e alimento na entrada do secador $R_{\text{ct}} = 191$.

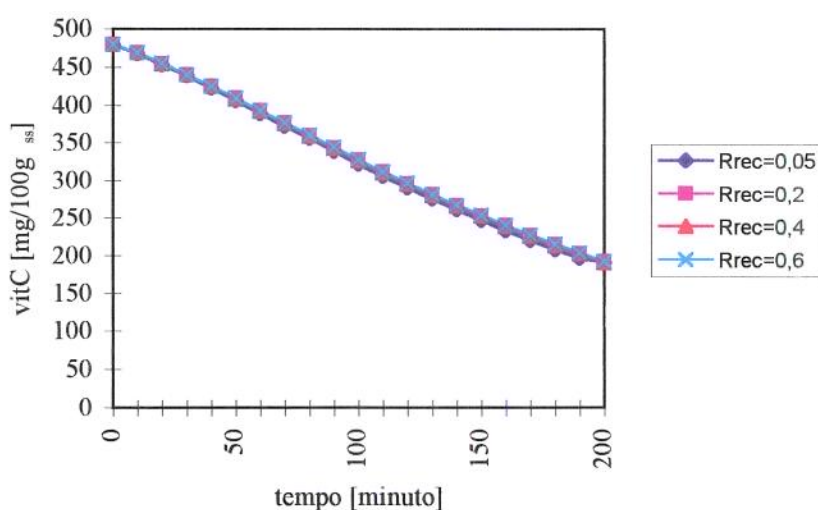


Figura IV.22 - Perda de ácido ascórbico (vitC) em função de tempo para secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C} \quad R_{\text{ct}} = 191$$

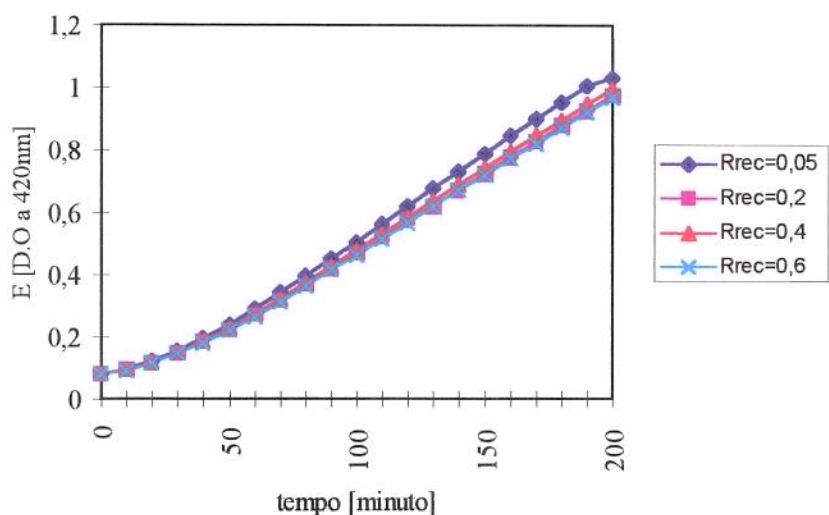


Figura IV.23 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/s \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad T_{ge} = 85^{\circ}\text{C} \quad R_{ct} = 191$$

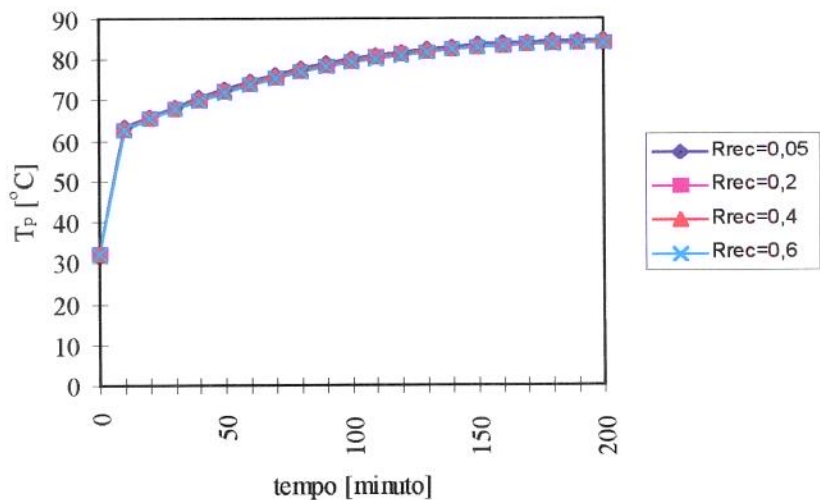


Figura IV.24 - Temperatura do alimento (T_p) em função de tempo para o “alimento-modelo” no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/s \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad T_{ge} = 85^{\circ}\text{C} \quad R_{ct} = 191$$

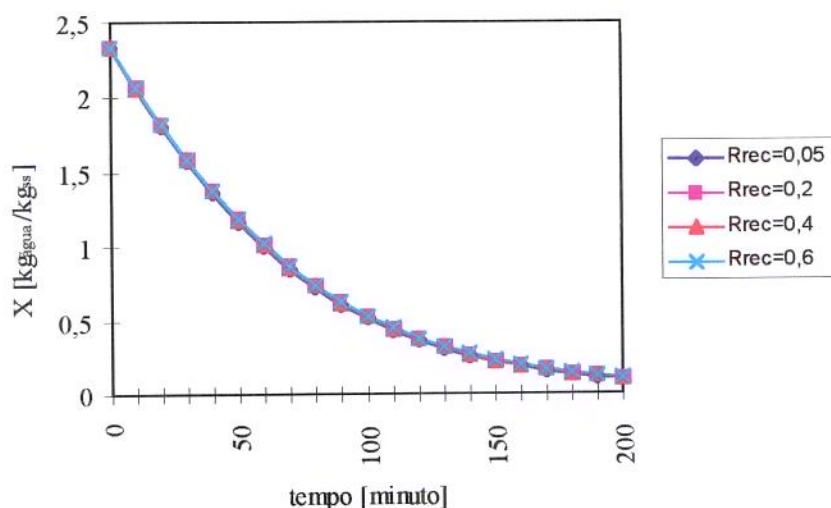


Figura IV.25 - Umidade do alimento (X) em função de tempo para o “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad T_{\text{ge}} = 85^{\circ}\text{C} \quad R_{\text{ct}} = 191$$

Observando as figuras IV.22 e IV.23, nota-se que as curvas para diferentes valores de razão de reciclo de ar (R_{rec}) se sobrepõem indicando que as perdas de vitamina C e escurecimento não-enzimático dos alimentos, ao longo do corpo do secador, são quantitativamente iguais durante a secagem deste mesmo alimento. Como a curva do escurecimento não-enzimático referente a $R_{\text{rec}} = 0,05$ está afastada visualmente das demais curvas na figura IV.23, é apresentada uma tabela com os valores de E e as porcentagens de erro médio em cada ponto da curva na tabela C no anexo C. Os números na tabela C mostram que o erro médio é pequeno. Os valores finais do teor de vitamina C e escurecimento não-enzimático no alimento ao fim da secagem são praticamente iguais. Este fato mostra que o reciclo de ar praticamente não afeta a degradação de vitamina C e o escurecimento não-enzimático. Para provar este fato, são mostradas nas figuras IV.24 e IV.25, respectivamente, as curvas de temperaturas (T_p) e umidade (X) dos alimentos ao longo do secador contracorrente com o tempo.

Nas figuras IV.24 e IV.25 nota-se que as curvas das temperaturas (T_p) e umidade (X) do alimento em função do tempo se sobrepõem para diversos valores de razão de reciclo (R_{rec}) indicando que tanto temperatura (T_p) como o teor de umidade (X) do alimento não dependem da relação de reciclo de ar.

De acordo com os resultados observados nas figuras IV.22, IV.23, IV.24 e IV.25, conclui-se que a razão de reciclo de ar no secador contracorrente tem o mesmo efeito observado no secador concorrente na degradação do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático. Esta

tendência se manteve tanto para o secador concorrente, como para o contracorrente.

IV.C.2.3 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR (R_{ct})

As figuras IV.26, IV.27, IV.28 e IV.29 mostram respectivamente os resultados das simulações das influências da razão entre a vazão de ar e alimento no secador contracorrente (R_{ct}) sobre a degradação do ácido ascórbico, escurecimento não-enzimático, temperatura do alimento (T_p) e teor de umidade do alimento (X), em função do tempo, durante a secagem num secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

Foram fixados os seguintes valores de condições de operação durante a secagem: vazão do alimento $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$; umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$; razão de reciclo de ar $R_{rec} = 0,30$ e temperatura de ar na entrada do secador $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$.

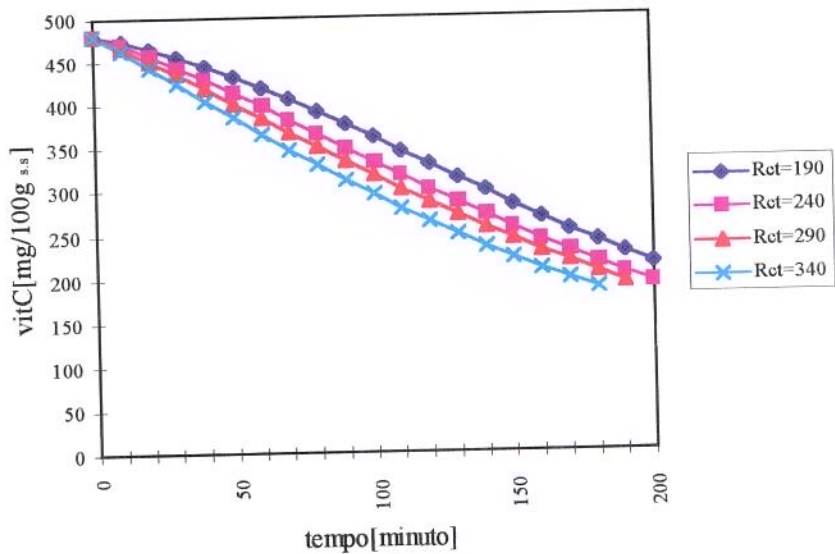


Figura IV.26 - Ácido ascórbico (vitC) em função de tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.} \quad R_{rec} = 0,30 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$

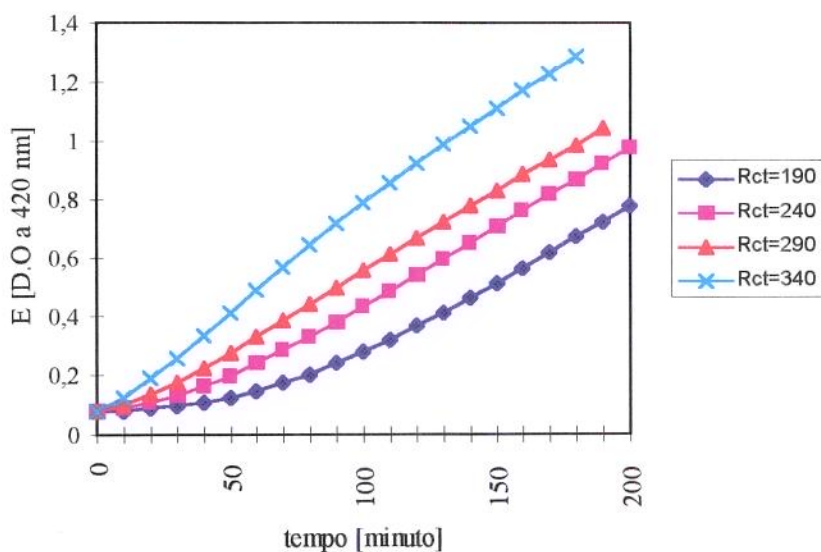


Figura IV.27 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

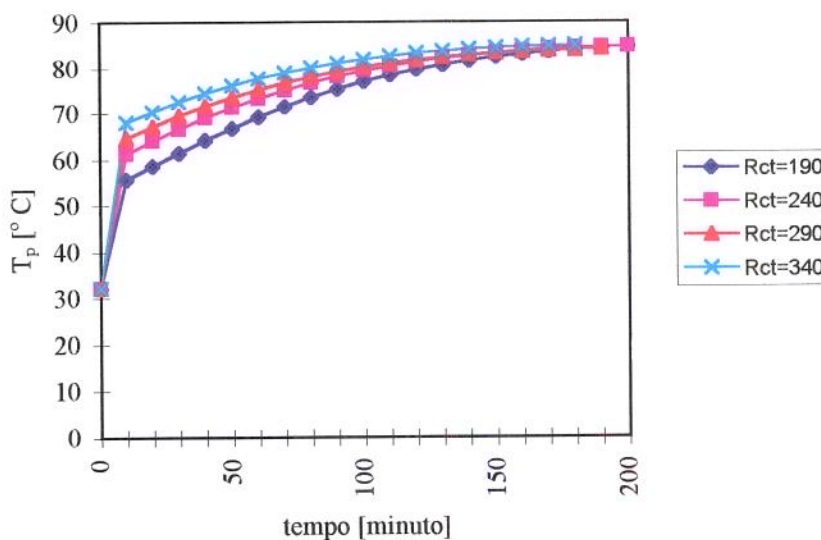


Figura IV.28 - Temperatura do alimento (T_p) em função de tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

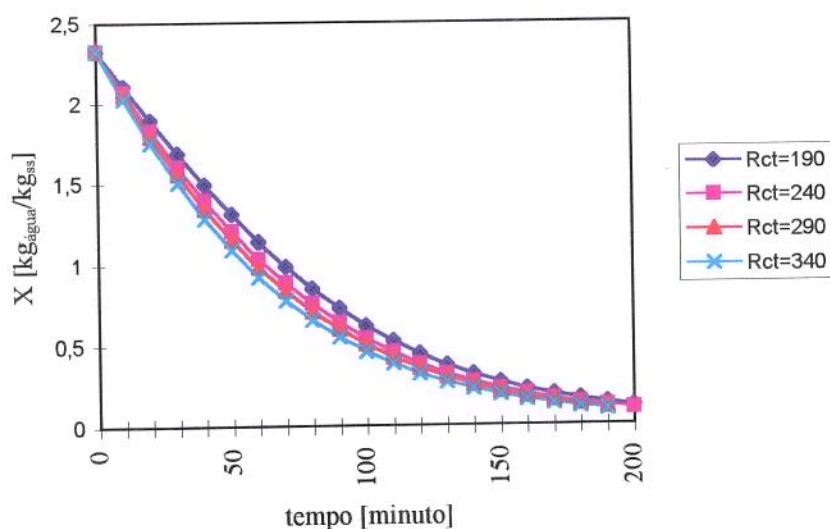


Figura IV.29 - Umidade do alimento (X) em função do tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

$$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}} = 0,30 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

A degradação da vitamina C é diretamente proporcional à vazão de ar (R_{ct} maior), sendo que para as várias relações R_{ct} , a taxa de degradação se mantém praticamente constante ao longo do secador. Somente na entrada, a taxa de degradação cai com a relação R_{ct} .

No escurecimento não-enzimático verificam-se as mesmas tendências de aumento com relação a R_{ct} . Neste caso, as maiores taxas de degradação se verificam na entrada, e na saída do secador continuam a uma taxa constante e razoavelmente alta independente de R_{ct} .

A partir da figura IV.29 pode-se ver o efeito da vazão de ar no perfil de umidade. Para uma quantidade maior de ar (R_{ct} maior), observa-se que a taxa de secagem é maior em relação à quantidade menor de ar. Este efeito da troca mássica é menor comparado ao efeito da temperatura de ar de entrada (T_{ge}), porque a troca mássica é intensamente relacionada com a temperatura de ar de secagem. Este efeito é uma das causas da degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático.

O gráfico da figura IV.28 mostra o perfil de temperatura do alimento durante a secagem. Para valores maiores de vazão de ar (R_{ct} maiores), tem-se valores de temperatura do sólido maiores, sobretudo na entrada do secador.

IV.C.3 - SECADOR MISTO

Um secador misto ao contrário do secador concorrente ou contracorrente é mais complexo, porque possui maior número de condições operacionais. No estudo prévio, a vazão de ar na secção contracorrente do secador misto foi importante no valor da eficiência térmica. Em contrapartida, a vazão de ar na secção concorrente não teve influência na eficiência térmica, quando o reciclo de ar na secção do mesmo era igual a 100%. Desta maneira, estudou-se a vazão de ar na secção contracorrente no secador misto com reciclo de ar de 100% na secção concorrente, para verificar como procede a degradação ao longo do secador em função destas condições operacionais.

IV.C.3.1 - INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA DE ENTRADA DE AR (T_{ge})

As figuras IV.30, IV.31, IV.32 e IV.33 mostram respectivamente o teor de ácido ascórbico (vitC), escurecimento não-enzimático (E), temperatura do alimento (T_p) e teor de umidade do alimento (X) em função do tempo de residência do “alimento-modelo” no secador misto. Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do sólido no secador $W_s = 2,35 \cdot 10^{-4}$ kg_{s.s.}/s, umidade final do sólido $X_f = 0,10$ kg_{água}/kg_{s.s.}, razão de reciclo de ar na secção concorrente $R_{rec} = 1,0$; razão entre as vazões de ar e sólido na secção contracorrente do secador misto $R_{cc} = 144$; razão entre vazões de ar e sólido na secção contracorrente do secador misto $R_{ct} = 103$ e comprimento do secador na secção contracorrente $L_{ct} = 27$ cm. As legendas dos gráficos S_{cc} significam secção concorrente e S_{ct} secção contracorrente. As curvas no início representam a parte da secção contracorrente (S_{ct}) e posteriormente a secção concorrente (S_{cc}).

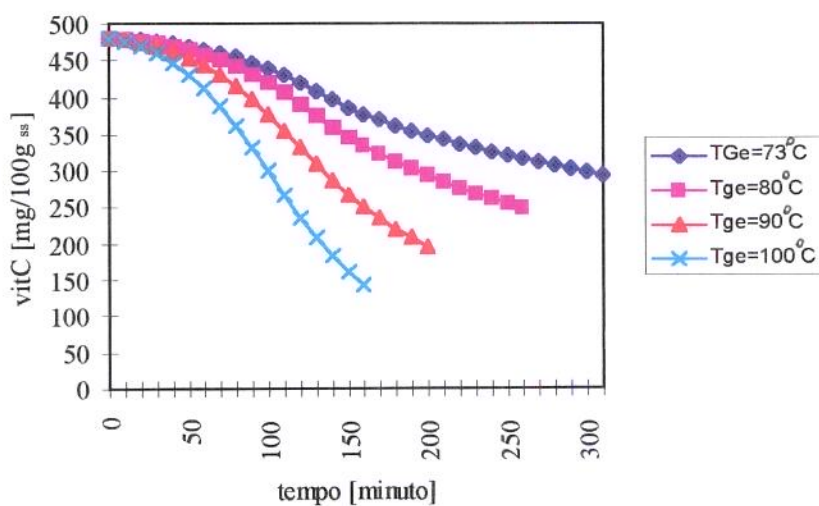


Figura IV.30 - Vitamina C (vitC) em função do tempo para o secador de leite deslizante misto, durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec_{cc}} = 1,0 \quad R_{cc} = 144$$

$$R_{ct} = 103 \quad L_{ct} = 27 \text{ cm}$$

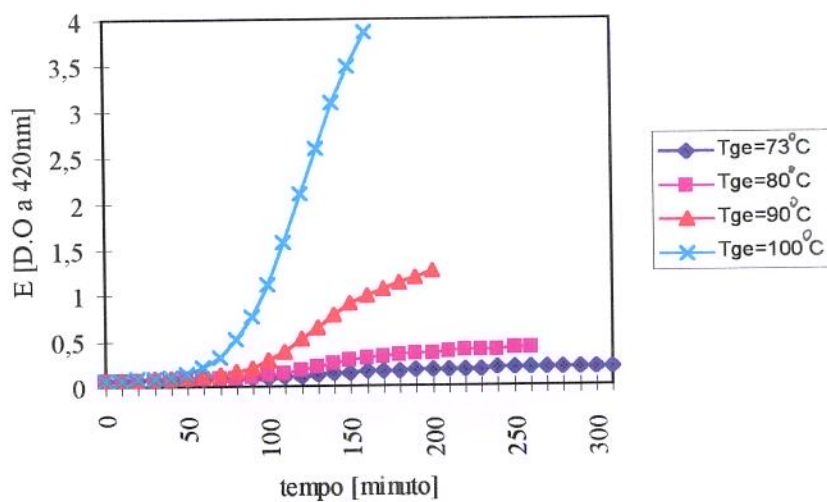


Figura IV.31 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo para o secador de leite deslizante misto durante, a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec_{cc}} = 1,0 \quad R_{cc} = 144$$

$$R_{ct} = 103 \quad L_{ct} = 27 \text{ cm}$$

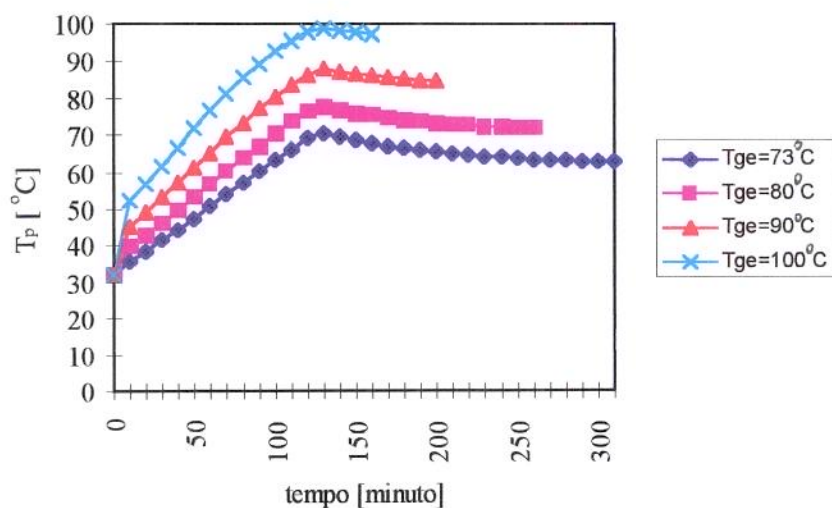


Figura IV.32 - Temperatura do alimento em função do tempo para o secador de leite deslizante misto, durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}_{\text{cc}}} = 1,0 \quad R_{\text{cc}} = 144 \\ R_{\text{ct}} = 103 \quad L_{\text{ct}} = 27 \text{ cm}$$

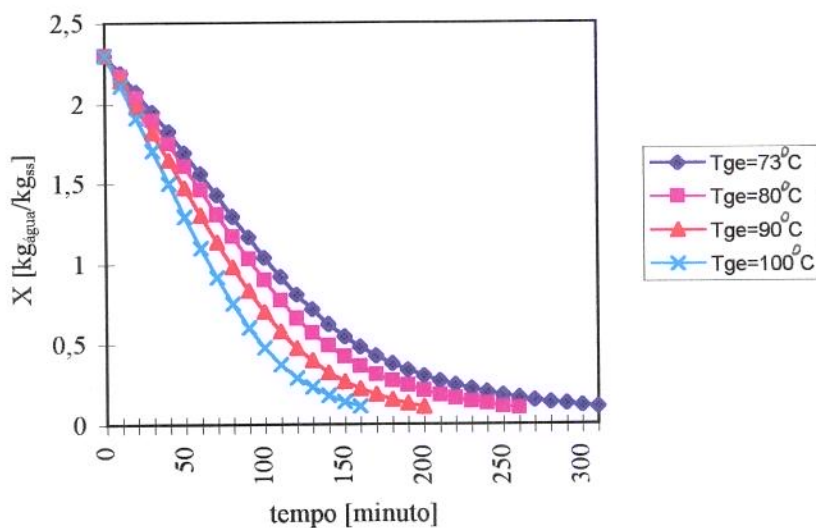


Figura IV.33 - Umidade do sólido em função do tempo para o secador de leite deslizante misto, durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec}_{\text{cc}}} = 1,0 \quad R_{\text{cc}} = 144 \\ R_{\text{ct}} = 144 \quad L_{\text{ct}} = 27 \text{ cm}$$

A figura IV.30 mostra que a degradação do ácido ascórbico é sempre maior a uma temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador misto maior.

O escurecimento não-enzimático é maior à medida que o valor de temperatura de ar de entrada (T_{ge}) no secador misto é maior. Este resultado pode ser visto no gráfico da figura IV.31.

Na figura IV.32 observa-se que a temperatura do alimento a cada instante é maior à medida que a temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador misto é maior.

Através da figura IV.33 observa-se que o teor de umidade é menor à medida que a temperatura de entrada (T_{ge}) de ar no secador misto é maior. Pode-se observar também que o tempo de secagem para atingir a umidade final requerida no secador é menor para a condição de operação onde a temperatura de entrada (T_{ge}) de ar no secador misto é maior $T_{ge} = 100^{\circ}\text{C}$.

De acordo com os resultados observados nas figuras IV.30, IV.31 IV.32 e IV.33 conclui-se que a influência da temperatura de ar de entrada (T_{ge}) no secador misto com reciclo de ar na secção concorrente tem efeitos semelhantes a dos secadores concorrente e contracorrente no comportamento do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático. Este fato é observado comparando os três gráficos juntos, dos sistemas concorrente, contracorrente e misto, sendo uma análise mais detalhada desnecessária e redundante, porque os argumentos serão idênticos.

IV.C.3.2 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR NA SECÇÃO CONTRACORRENTE DO SECADOR MISTO (R_{ct})

A partir dos resultados mostrados nas figuras IV.34, IV.35, IV.36 e IV.37, pode-se constatar a influência da razão entre a vazão de ar e o alimento (R_{ct}) na secção contracorrente num secador de leito deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente, durante a secagem do “alimento-modelo”. Os gráficos mostram respectivamente os resultados da simulação da perda de ácido ascórbico (vitC), escurecimento não-enzimático (E), temperatura do alimento (T_p) e perda de teor de umidade do alimento (X) em função do tempo. S_{cc} significa secção concorrente e S_{ct} secção contracorrente.

As condições de operações fixas foram: vazão do alimento no secador $W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/\text{s}$; umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s}$; razão de reciclo na secção concorrente $R_{rec} = 1,0$; temperatura de entrada de ar no secador $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$; razão entre a vazão de ar e o alimento na secção concorrente $R_{cc}=103$ e comprimento do secador na secção contracorrente $L_{ct} = 27\text{cm}$.

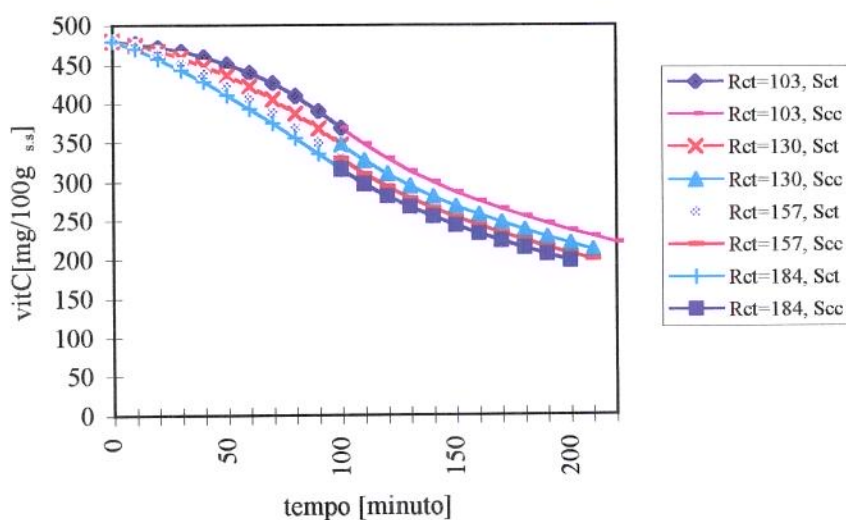


Figura IV.34 - Vitamina C em função de tempo para a secagem de “alimento-modelo” no secador deslizante misto, com reciclo de ar na seção concorrente.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 1,0 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec cc}} = 1,0 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{cc}} = 103 \quad L_{\text{ct}} = 27 \text{ cm}$$

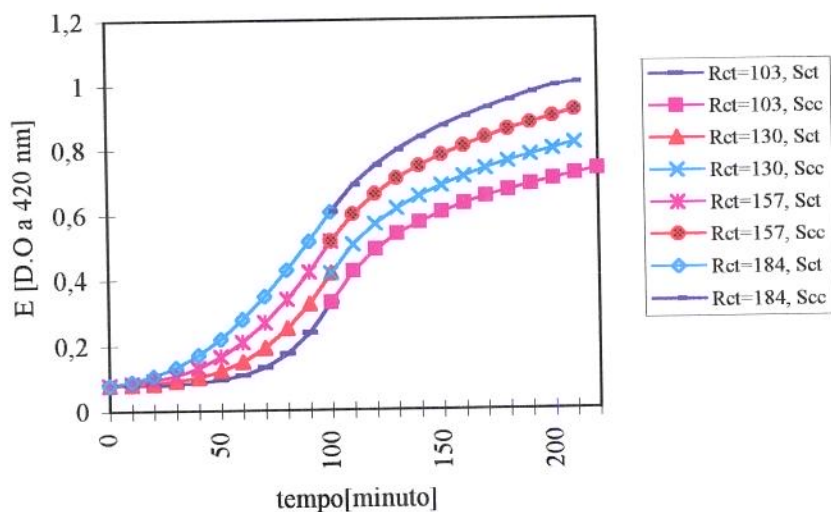


Figura IV.35 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de tempo para secador de leito deslizante misto, com reciclo de ar na seção concorrente durante a secagem de um “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec cc}} = 1,0 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{cc}} = 103 \quad L_{\text{ct}} = 27 \text{ cm}$$

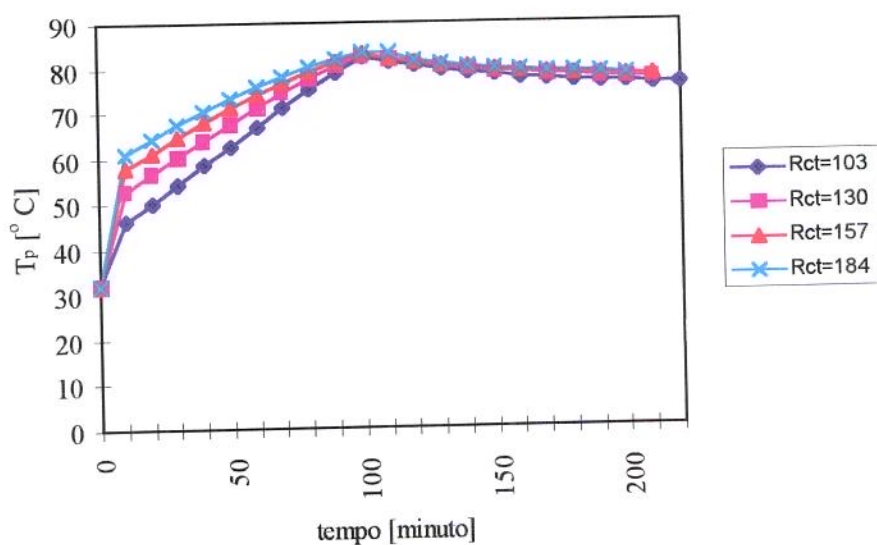


Figura IV.36 - Temperatura do alimento (T_p) em função de tempo para secagem em secador deslizante misto com reciclo de ar, na secção concorrente.

$$W_s = 2,35 \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec} = 1,0 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{cc} = 103 \quad L_{ct} = 27 \text{ cm}$$

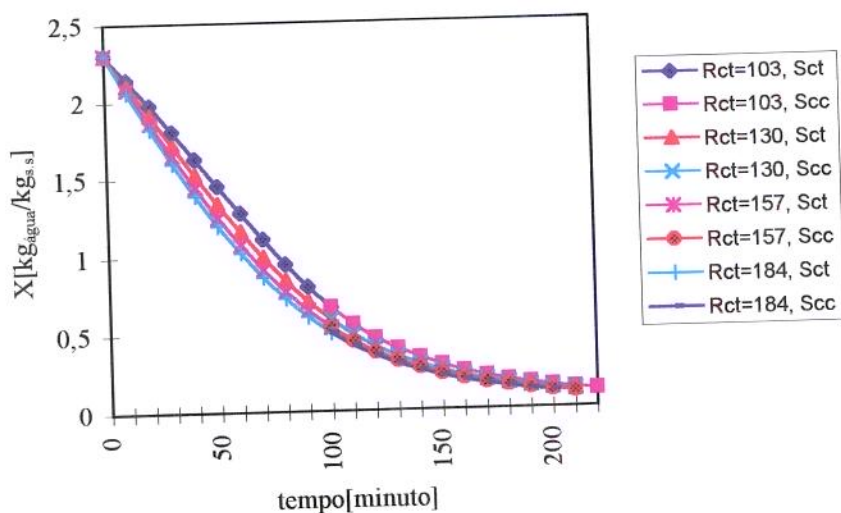


Figura IV.37 - Umidade do alimento (X) em função de tempo para secagem em secador deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente, durante a secagem.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec} = 1,0 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{cc} = 103 \quad L_{ct} = 27 \text{ cm}$$

Os gráficos apresentados nas figuras IV.34, IV.35, IV.36 e IV.37 dividem-se em dois períodos: de 0 a 100 minutos representam a secção contracorrente (S_{ct}) e o tempo restante a secção concorrente (S_{cc}) do secador misto.

Pela observação das figuras IV.34 e IV.35, nota-se que a taxa de degradação do ácido ascórbico e a taxa de aumento no escurecimento não-enzimático na secção contracorrente são mais intensas para aqueles sistemas que possuem valores da razão entre vazão de ar e alimento (R_{ct}) maiores. Ainda pela observação das figuras IV.34 e IV.35 nota-se que na secção concorrente do secador (após 100 minutos) as curvas se mantêm quase que equidistantes, ou seja, a taxa de degradação de vitamina C e o aumento no escurecimento não-enzimático têm pequenas diferenças com diferentes valores de razão entre vazão de ar e alimento (R_{ct}) na secção contracorrente do secador. Isto ocorre porque na secção concorrente, todas as condições operacionais se mantiveram constantes. Ainda na secção concorrente pode observar-se que as taxas de degradação são menores que na secção contracorrente devido à queda de temperatura que se processa nesta secção.

A partir dos resultados mostrados na figura IV.36, pode-se constatar a influência da vazão de ar na troca térmica do sistema. Observa-se que para aqueles sistemas que possuem razão entre vazão de ar e o alimento na secção contracorrente (R_{ct}) maiores, a temperatura do alimento é sempre maior na secção contracorrente, mas esta diferença diminui à medida que se aproxima da secção concorrente e tendem a um mesmo valor final. Na secção concorrente, observa-se que a temperatura do alimento (T_p) mantém-se praticamente constante.

Na figura IV.37 observa-se a influência da vazão de ar na secção contracorrente na variação de umidade do alimento. Para maiores valores da razão entre vazão de ar e alimento na secção contracorrente (R_{ct}) os teores de umidade são sempre menores qualquer que seja o tempo. Para os sistemas que possuem maiores valores da razão entre a vazão de ar e o alimento na secção contracorrente (R_{ct}), a taxa de secagem é maior no início, porém mesmo antes que o alimento saia da secção contracorrente, a velocidade de secagem se inverte em relação a R_{ct} . Assim, essa taxa de secagem na entrada do secador concorrente é menor para os valores maiores de R_{ct} e tende a se igualar na parte final da secagem, qualquer que seja o valor de R_{ct} . Na secção concorrente a taxa de secagem é bastante baixa comparada à da secção contracorrente, porque o material no período final de secagem, a taxa decrescente, e as umidades são muito baixas.

IV.C.3.3 - INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA SECÇÃO CONTRACORRENTE DO SECADOR MISTO (L_{ct})

Nesta secção foi feito um estudo da influência do comprimento da secção contracorrente na degradação do ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático num secador misto com reciclo de ar na secção concorrente. As figuras IV.38, IV.39, IV.40 e IV.41 mostram os resultados.

Foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do alimento no secador $W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/\text{s}$, teor de umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s}$, razão de reciclo de ar na secção concorrente $R_{rec_{cc}} = 1,0$; temperatura de entrada de ar na entrada do secador $T_{ge} = 85^\circ\text{C}$, razão de vazões entre o ar e alimento na secção concorrente do secador $R_{cc} = 103$ e razão de vazões entre o ar e o alimento na secção contracorrente $R_{ct} = 144$.

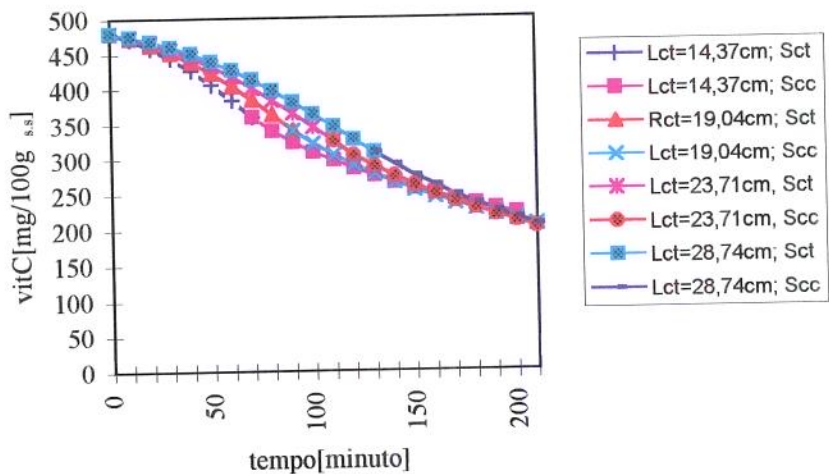


Figura IV.38 – Degradação do ácido ascórbico (vitC) em função do tempo para o secador de leito deslizante misto com reciclo de ar, durante a secagem do “alimento-modelo”.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec_{cc}} = 1,0 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$
$$R_{cc} = 103 \quad R_{ct} = 144$$

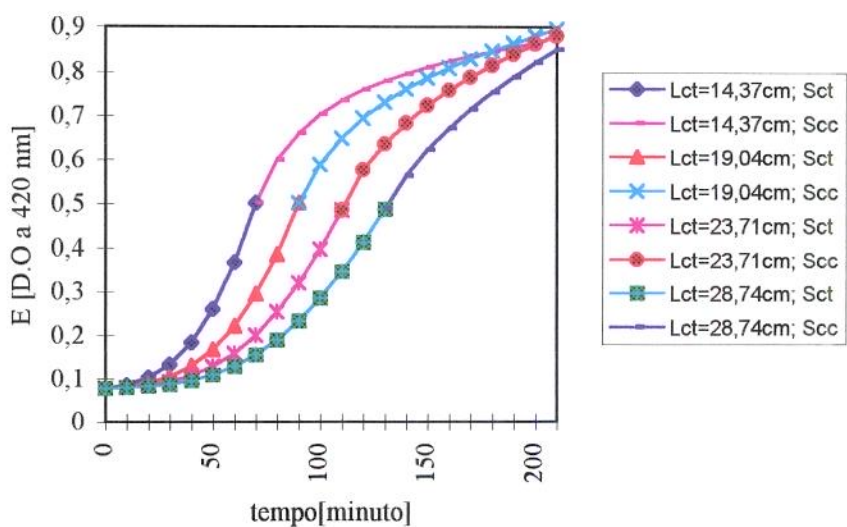


Figura IV.39 - Escurecimento não-enzimático (E) em função do tempo para a secagem do “alimento-modelo” no secador deslizante misto.

$$W_s = 2,37 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/s \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec_{cc}} = 1,0 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{cc} = 103 \quad R_{ct} = 144$$

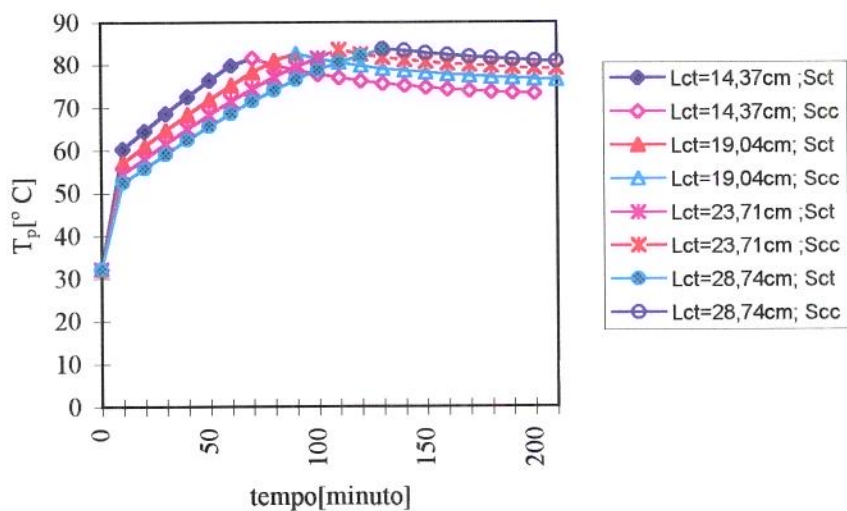


Figura IV.40 - Temperatura do alimento (T_p) em função do tempo para a secagem do “alimento-modelo” em secador deslizante misto.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s}/s \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s} \quad R_{rec_{cc}} = 1,0 \quad T_{ge} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{cc} = 103 \quad R_{ct} = 144$$

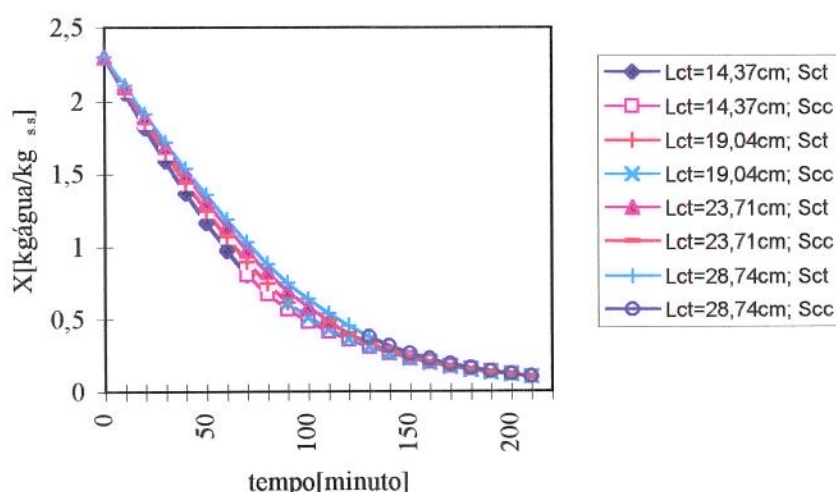


Figura IV.41 - Umidade do alimento (X) em função do tempo durante a secagem do “alimento-modelo” no secador misto com reciclo de ar na secção concorrente.

$$W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s} \quad X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}} \quad R_{\text{rec cc}} = 1,0 \quad T_{\text{ge}} = 85^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{cc}} = 103 \quad R_{\text{ct}} = 144$$

Nas figuras IV.38 e IV.39 observa-se que a degradação do ácido ascórbico e o aumento no escurecimento não-enzimático têm a forma sigmoidal. Nela observa-se que o sistema onde o comprimento na secção contracorrente (L_{ct}) é menor :

- as taxas de degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático melhora na secção concorrente do secador misto porque o sólido esfria ao longo do secador neste setor;
- os valores de teor da vitamina C são sempre inferiores, para o sistema que possui o comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}) menor. Esta diferença atinge o máximo na saída do secador contracorrente e tende a diminuir à medida que o alimento aproxima-se da saída do secador na secção concorrente. Na saída do secador misto, os teores de vitamina C para qualquer sistema se aproximam do mesmo valor;
- os valores de escurecimento não-enzimático são sempre superiores para o sistema que possui o comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}) menor, atingindo o máximo na saída do secador contracorrente e aumenta à medida que o alimento atinge o estágio final de secagem.

Na figura IV.40 observa-se que a temperatura do alimento no início da secagem, na secção contracorrente, tem um aumento “brusco” (aos 10 minutos), continua a aumentar até a saída da secção contracorrente e no início

da secção concorrente começa a diminuir gradativamente até o término da secagem do alimento. Esta tendência se observa qualquer que seja o comprimento da secção contracorrente (L_{ct}). Para o sistema onde o comprimento da secção contracorrente é mais curto, a temperatura do alimento (T_p) é sempre maior; porém esta tendência se inverte quando o alimento entra na secção concorrente. Pode-se observar (figura IV.40) conseqüentemente que o uso de comprimento no setor contracorrente mais curto, faz com que a temperatura da fase gasosa aumente ao longo de todo o secador contracorrente e conseqüentemente também a temperatura do sólido. O alimento ao entrar no secador concorrente começa a perder a temperatura, porque o sistema "rouba" calor latente para retirar umidade do alimento.

Na figura IV.41 pode-se observar que para o sistema onde o comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}) é menor:

- a. os valores de teores de umidade na secção contracorrente são sempre menores, aumentando a diferença de teor de umidade (em relação àquele sistema que possui comprimento na secção contracorrente (L_{ct}) maiores) à medida que o alimento avança no corpo do secador contracorrente, porém quando o alimento entra no secador concorrente, esta diferença começa a diminuir à medida que o alimento percorre o interior do mesmo e atinge o mesmo teor de umidade na saída do secador,
- b. a taxa de secagem do alimento é maior na secção contracorrente, porém quando o alimento entra na secção concorrente, esta taxa diminui rapidamente e inverte os valores, isto é, a taxa de secagem do sistema, cujo comprimento da secção contracorrente (L_{ct}) é menor, é inferior comparada ao sistema que possui um L_{ct} maior.

Na secção contracorrente do sistema, como a temperatura e a taxa de secagem do alimento é sempre maior para o sistema cujo comprimento da secção contracorrente é menor (L_{ct}), os efeitos da temperatura e taxa de secagem do alimentos se somam, degradando mais intensamente a vitamina C e aumentando o escurecimento não-enzimático.

Na secção concorrente do sistema, o processo se inverte; a temperatura do alimento (T_p) e a taxa de secagem são menores. Novamente os efeitos se somam, porém no sentido oposto, fazendo com que a taxa de degradação da vitamina C e escurecimento não-enzimático decresça ao longo da secção concorrente para aqueles sistemas que possuem o comprimento na secção contracorrente (L_{ct}) menor. Por este motivo, os valores finais da degradação do ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático se aproximam na parte final do processo de secagem quaisquer que sejam os valores do comprimento do secador na secção contracorrente (L_{ct}).

IV.C.4 - COMPARAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE ÁCIDO ASCÓRBICO E ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO ENTRE OS SECADORES DE LEITO DESLIZANTE CONCORRENTE, CONTRACORRENTE E MISTO

Nesta secção foi feita uma análise e discussão comparando a degradação de qualidade: a perda de vitamina C e o aumento no índice de escurecimento não-enzimático durante a secagem do “alimento-padrão” entre os secadores de leitos deslizante concorrente, contracorrente e misto.

As figuras IV.42, IV.43, IV.44 e IV.45 representam os resultados comparativos da simulação durante a secagem entre os três sistemas estudados. Elas mostram respectivamente as curvas do teor de ácido ascórbico (vitC), escurecimento não-enzimático (E), temperatura do alimento (T_p) e tempo de residência do alimento no secador (T_r).

As seguintes condições operacionais foram escolhidas considerando-se para cada secador numa faixa de eficiência térmica máxima.

Para os secadores concorrentes e contracorrentes, foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do alimento no secador $W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s}$; umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$; temperatura de entrada de ar no secador $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$; razão entre as vazões de reciclo e entrada de ar no secador $R_{rec} = 0,55$ e razão entre a vazão de ar e alimento no secador $R_{cc} = R_{ct} = 191$.

Para o secador misto foram fixadas as seguintes condições de operação: vazão do alimento no secador $W_s = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{\text{s.s.}}/\text{s}$; umidade final do alimento após a secagem $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$; temperatura de entrada do ar no secador $T_{ge} = 80^\circ\text{C}$; razão de reciclo na secção concorrente $R_{rec_{cc}} = 1,0$; razão entre a vazão de ar e alimento na secção contracorrente $R_{ct} = 144$; razão entre a vazão de ar e alimento na secção concorrente $R_{cc} = 103$ e comprimento do secador na secção contracorrente $L_{ct} = 27 \text{ cm}$.

O teor da vitamina C e o índice de escurecimento não-enzimático foram colocados em função de teor de umidade do alimento, porque qualquer que seja o sistema estudado, a umidade varia de $2,3 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ a $0,1 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$; enquanto o tempo de secagem depende do tipo de secador, tornando a comparação entre os secadores mais difícil.

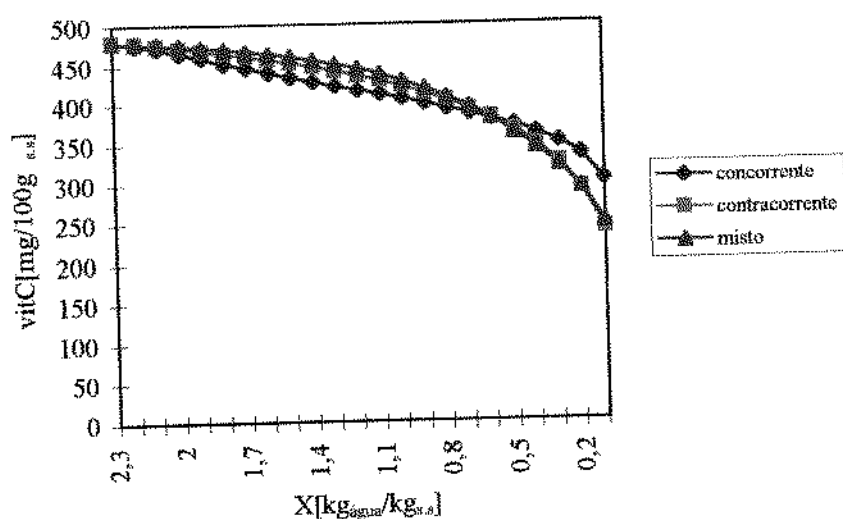


Figura IV.42 - Vitamina C (vitC) em função do teor de umidade do alimento (X) - gráficos comparativos dos resultados da simulação dos secadores de leito deslizante concorrente com reciclo de ar, contracorrente com reciclo de ar e misto com reciclo de ar na secção concorrente durante a secagem do alimento “modelo”.

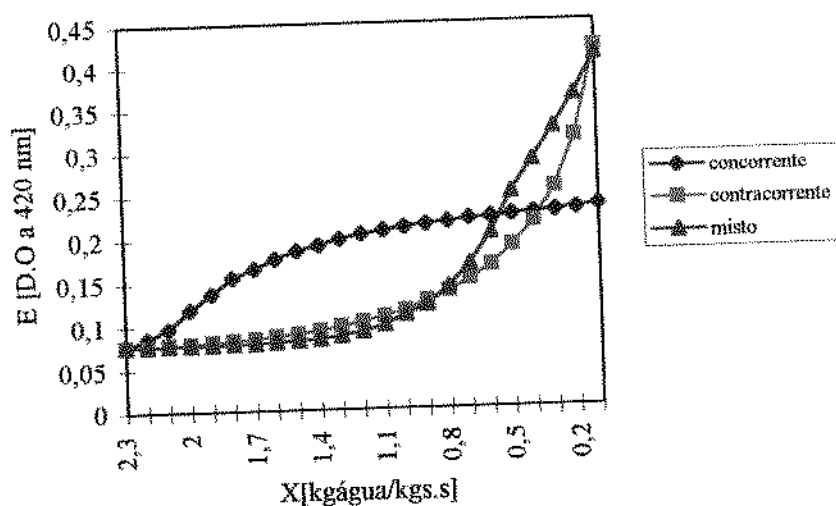


Figura IV.43 - Escurecimento não-enzimático (E) em função de teor de umidade do alimento (X) - gráficos comparativos dos resultados das simulações dos secadores de leito deslizante concorrente com reciclo de ar, contracorrente com reciclo de ar e misto com reciclo de ar na secção concorrente.

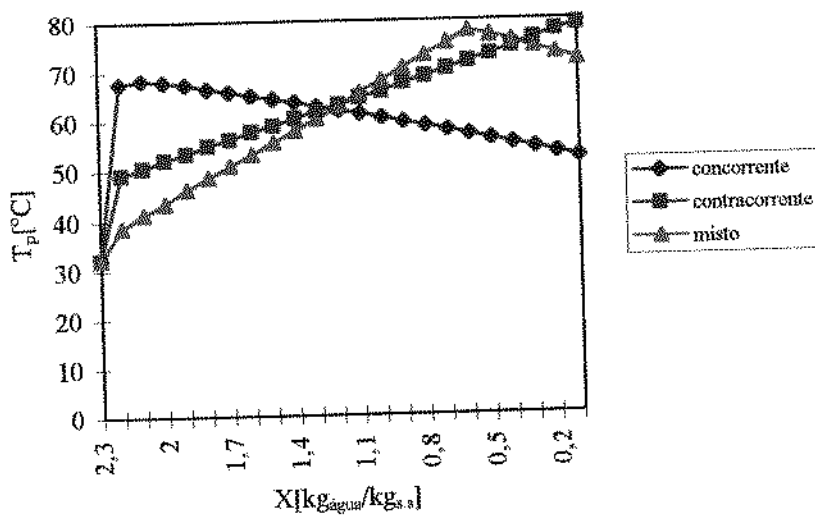


Figura IV.44 - Temperatura do alimento (T_p) em função de teor de umidade do alimento (X) - gráficos dos resultados das simulações dos secadores de leito deslizante concorrente com reciclo de ar, contracorrente com reciclo de ar e misto com reciclo de ar na secção concorrente.

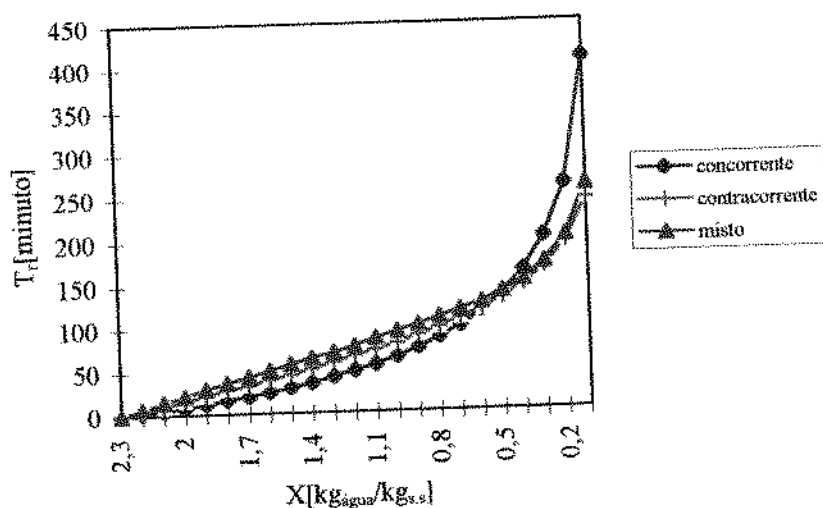


Figura IV.45 - Tempo de residência do alimento no secador (T_r) em função de teor de umidade do alimento (X) - gráficos dos resultados das simulações dos secadores de leito deslizante concorrente com reciclo de ar, contracorrente com reciclo de ar e misto com reciclo de ar na secção concorrente.

Na figura IV.42 observa-se que:

- a - a degradação total de ácido ascórbico no secador concorrente ($\text{vitC}=301,6\text{mg/kg}_{\text{s.s}}$) é menor, enquanto para o sistema contracorrente e misto são praticamente iguais ($\text{vitC} = 239,6 \text{ mg/kg}_{\text{s.s}}$ para contracorrente e $\text{vitC} = 248,3 \text{ mg/kg}_{\text{s.s}}$ para secador misto);
- b - a taxa de degradação da vitamina C por unidade de teor de umidade do alimento é mais intensa para o sistema concorrente no início da secagem, porém esta tendência se inverte na parte final da secagem, onde no sistema contracorrente e misto a degradação se torna mais intensa. Isto ocorre porque no início da secagem, o efeito da temperatura do alimento é mais elevado para o sistema concorrente e na parte final da secagem a situação inverte, onde o sistema contracorrente e misto possuem a temperatura do alimento (T_p) mais alta. Conforme a figura IV.44, pode-se observar que a temperatura do alimento no sistema concorrente tem um aumento brusco no início da secagem e diminui gradualmente à medida que o alimento perde a umidade. No sistema contracorrente, ao contrário, a temperatura aumenta sempre com a perda de umidade do alimento. No sistema misto, a temperatura do alimento aumenta com a secagem e na etapa final, na secção concorrente tem uma pequena queda;
- c - na etapa final da secagem, através da figura IV.42 nota-se que a degradação de vitamina C é intensa por unidade de teor de umidade do alimento qualquer que seja o sistema. No sistema concorrente, embora a temperatura do alimento seja baixa, o tempo de secagem é muito demorado na etapa final de secagem, porque o ar e o alimento se aproximam do equilíbrio, dificultando muito a troca mássica. No sistema contracorrente e misto, a degradação é mais intensa ainda, porque embora o tempo de residência, conforme pode ser observado na figura IV.45, seja muito menor que no sistema concorrente, a temperatura do alimento é bastante alta. Assim, a combinação de tempo de residência e temperatura alta do alimento na etapa final da secagem acarreta uma degradação de vitamina C ainda maior que no sistema concorrente.

Na figura IV.43, observa-se que:

- a - o valor do índice de escurecimento não-enzimático final é muito menor para o sistema concorrente e o sistema contracorrente e misto possuem praticamente os mesmos valores finais;
- b - no início da secagem, a velocidade do índice de escurecimento não-enzimático por unidade de umidade do alimento para o sistema misto e contracorrente é muito pequena, porém quando a umidade do alimento começa a decrescer e atinge um valor em torno de $X = 1,4 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$, inicia-se um aumento muito grande de escurecimento que continua até finalizar a secagem. Isto ocorre porque a equação de simulação utilizada aqui (equação IV.43) é muito sensível às temperaturas acima da $T_{\text{ref}} = 65^{\circ}\text{C}$ (338K). Quando o alimento atinge esta temperatura, começa a escurecer rapidamente e como as temperaturas finais dos sistemas contracorrente e mistos são altas na etapa final de secagem, o escurecimento é muito intenso atingindo um valor muito alto;
- c - na curva do sistema concorrente, observa-se o fenômeno inverso do contracorrente e misto. No início da secagem onde a umidade do alimento atinge a faixa de $X = 2,2 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ até $X = 1,5 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$, o escurecimento não-enzimático é intenso, e após esta fase a taxa de escurecimento não-enzimático por unidade de teor de umidade do alimento é pequeno. Isto ocorre como explicado na secção anterior devido à temperatura acima da $T_{\text{ref}} = 65^{\circ}\text{C}$. Da observação do gráfico da figura IV.45, pode-se conferir que nas faixas de umidade do alimento entre $2,2 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ a $1,2 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$, a temperatura do sistema está acima de $T_{\text{ref}} = 65^{\circ}\text{C}$.

IV.D - CONCLUSÕES

Do estudo sobre a degradação de ácido ascórbico e aumento de escurecimento não-enzimático, durante a secagem de um alimento “modelo”, num secador de leito deslizante concorrente com reciclo de ar, contracorrente com reciclo de ar e sistema híbrido com reciclo de ar na secção concorrente dentro das condições estabelecidas, principalmente a condição onde o teor de umidade final (X_f) do alimento é sempre o mesmo valor fixo, conclui-se que :

- 1 - A perda de ácido ascórbico e o aumento de escurecimento não-enzimático dependem da temperatura do alimento, taxa de secagem e tempo do processo, durante a secagem do alimento nos secadores de leitos deslizantes.
- 2 - O aumento na temperatura de ar de entrada no secador deslizante, qualquer que seja o tipo, concorrente, contracorrente ou misto, degrada com intensidade maior o teor de ácido ascórbico e torna mais intenso o escurecimento não-enzimático nos alimentos durante e após a secagem do alimento.
- 3 - Uma variação no valor de razão de reciclo nos secadores deslizantes concorrentes e contracorrentes não afeta significativamente a perda de ácido ascórbico e o aumento no escurecimento não-enzimático, durante a secagem do alimento. Isto ocorre porque a mistura de ar na entrada do secador é aquecida sempre ao mesmo valor de temperatura de entrada (T_{ge}) qualquer que seja o reciclo e, portanto, as condições energéticas serão as mesmas. Embora o sistema que possui o valor de razão de reciclo maior contenha o ar com maior teor de umidade, o estudo mostrou que isto é insignificante (embora isto afete muito a eficiência térmica).

- 4 - Um aumento na vazão de ar de entrada, mantida a vazão do alimento constante, causou uma perda maior de ácido ascórbico e aumentou o índice do escurecimento não-enzimático.
- 5 - O aumento do comprimento do secador deslizante híbrido na secção contracorrente mantendo uma razão de reciclo de 100% na secção concorrente:
- a - praticamente não altera o valor final do teor de ácido ascórbico ou índice do escurecimento não-enzimático no produto final de secagem, durante o processo. Isto ocorre por causa do efeito de compensação no período de secagem na secção concorrente;
 - b - o alimento na saída da secção contracorrente do sistema atinge o máximo de degradação do ácido ascórbico e índice de escurecimento não-enzimático para aqueles sistemas que possuem menor valor de comprimento na secção contracorrente (L_{ct}).
- 6 - Entre os três sistemas, o secador deslizante concorrente é o que menos causa a perda de ácido ascórbico e menos aumenta o escurecimento não-enzimático. O sistema contracorrente é o que mais degrada o teor de ácido ascórbico e causa o maior aumento de escurecimento não-enzimático. Os sistemas mistos têm índices de degradação similares ao sistema contracorrente e deve ser salientado que a vazão de sólido processada é 85% superior aos secadores concorrente e contracorrente.

Capítulo V

V - OTIMIZAÇÃO DOS SECADORES EM RELAÇÃO À QUALIDADE E À EFICIÊNCIA TÉRMICA

No capítulo anterior (IV), estudaram-se a degradação de ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático durante a secagem de um “alimento-modelo” ao longo do comprimento do secador. Isto permitiu analisar a influência das diversas variáveis e entender melhor, observando os perfis de umidade e temperatura do sólido, os mecanismos e zonas de maior degradação.

Neste capítulo serão analisados, por meio de metodologia de superfície de resposta, os conteúdos de vitamina C e o escurecimento não-enzimático na saída do secador; e eficiência energética em função das variáveis de operação com o objetivo de encontrar os ótimos operacionais considerando estas duas funções objetivas.

Para cada secador são otimizados a perda de ácido ascórbico, o escurecimento não-enzimático e a energia térmica, respectivamente. Na última secção são feitas as comparações entre estes três secadores.

V.A - MATERIAIS E MÉTODOS

V.A.1 - MATERIAIS

A maioria das informações necessárias estão no capítulo IV, secção IV.B.1, pois são idênticas com ressalvas em algumas das condições de operação. Estas diferenças estão mostradas abaixo.

As faixas de condições de operação estudadas neste capítulo para minimizar as perdas de ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático nos secadores concorrentes e contracorrentes são:

- temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}): 70°C a 100°C;
- razão entre a vazão de ar no reciclo e no secador (R_{rec}): 0 a 0,6;
- razão entre a vazão de ar e vazão de sólido no secador (R_{cc}): 177 a 354 (concorrente), ou
- razão entre a vazão de ar e vazão de sólido no secador (R_{ct}): 177 a 354 (contracorrente).

Para minimizar as perdas de ácido ascórbico e o escurecimento não-enzimático no secador de leito deslizante misto, as faixas de condições de operação estudadas neste capítulo foram:

- temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}): 70°C a 100°C;
- razão entre a vazão de ar e a vazão de sólido no secador (R_{ct}): 96 a 192 e $R_{cc}=144$ (fixo).

Os mesmos motivos comentados nos capítulos II e III são considerados ao escolherem os valores das faixas de condições de operação.

V.A.2 - MÉTODOS

Os mesmos procedimentos do capítulo IV, secções IV.B.2.1, IV.B.2.2, IV.B.2.3, IV.B.2.4, acrescidos do capítulo II, secções II.B.2.3, II.B.2.5 e II.B.2.6 foram seguidos na ordem descrita acima.

V.B - RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÃO

V.B.1 - SECADOR CONCORRENTE

V.B.1.1 - ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE VITAMINA C (vitC)

As figuras V.1, V.2, e V.3 mostram as influências das condições de operação: temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}), razão entre a vazão de ar e sólido no secador (R_{cc}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) na degradação da vitamina C, segundo método de superfície de resposta no secador concorrente.

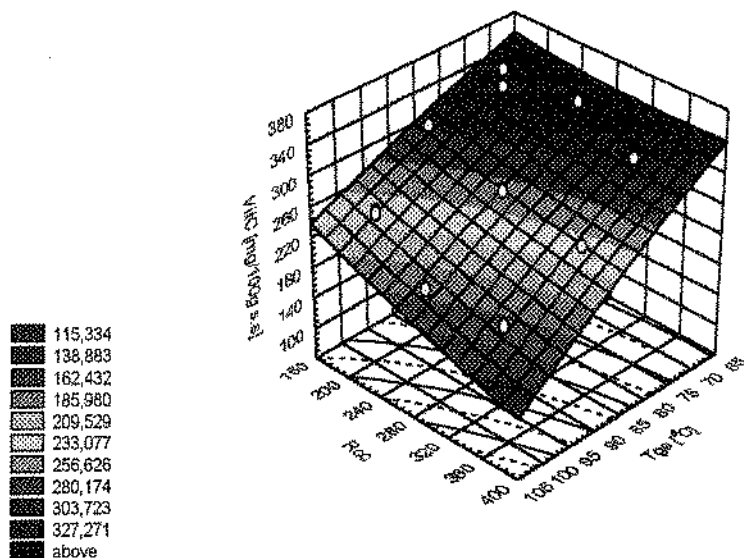


Figura V.1 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) em função de temperatura de ar de entrada (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar e sólido no secador (R_{cc}) no ponto central $R_{rec} = 0,3$.

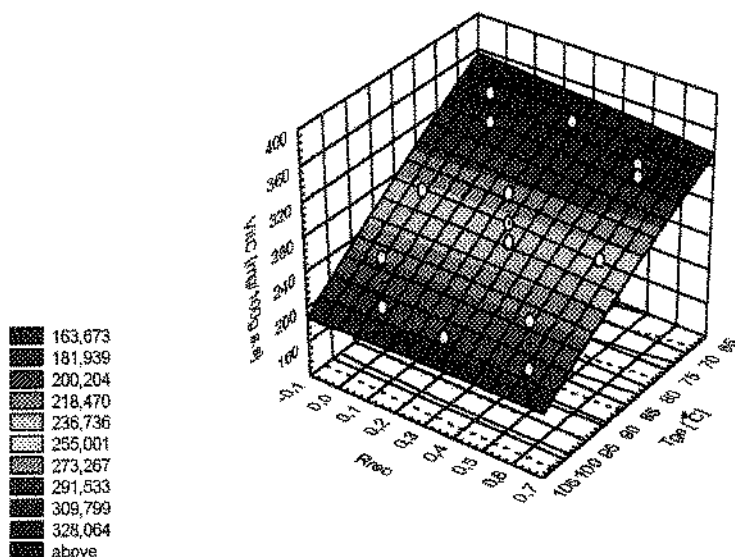


Figura V.2 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) em função de temperatura de entrada de ar (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) no ponto central $R_{cc} = 243$.

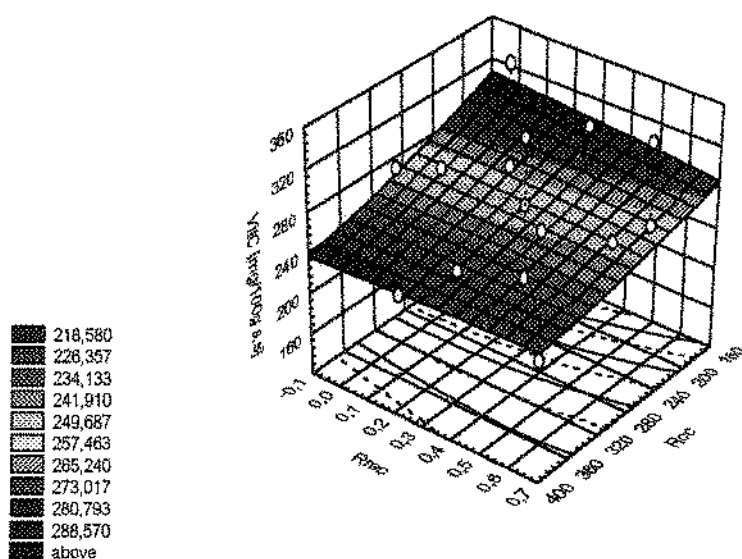


Figura V.3 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) em função da razão entre a vazão de ar e sólido (R_{cc}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) no ponto central $T_{ge}=85^{\circ}\text{C}$.

A tabela abaixo mostra o ajuste de superfície de resposta da degradação de ácido ascórbico nos alimentos aos dados simulados durante a secagem num secador de leito deslizante tipo concorrente.

Tabela V.1 - Ajuste de superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) aos dados simulados no secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

Teste F		
$F_{\text{calculado}}=31,23$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	2,12
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	6,55
Porcentagem de variância explicada = 98,25		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

Pela análise da tabela V.1, pode-se observar que a superfície de resposta da degradação de vitamina C se ajustou satisfatoriamente aos dados simulados.

O teste F mostra que tanto a nível de 99% ou 95% de significância, a curva de superfície de resposta se ajustou significativamente. Também a porcentagem de variância explicada indica um bom ajuste.

Pela figura V.1 e V.2 observa-se que a temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) tem grande influência na degradação da vitamina C, pois a inclinação da curva é bastante acentuada. A degradação é maior para valores maiores de temperatura de ar de entrada no secador.

Através das figuras V.2 e V.3 pode-se notar que já o valor da razão entre a vazão de ar e sólido (R_{cc}) tem influência menor. A degradação aumenta com aumento do valor R_{cc} .

Nas figuras V.1 e V.3 observa-se que a influência do ar de reciclo é desprezível na degradação da vitamina C, pois a inclinação da curva é praticamente nula.

Da análise conjunta das figuras V.1, V.2 e V.3 pode-se concluir que a degradação da vitamina C é mínima a baixas temperaturas e baixos valores de razão entre a vazão de ar e alimento (R_{cc}) independente do valor da razão de ar de reciclo e secador (R_{rec}). Especificamente estes valores são: $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$ e $R_{cc}=160$ para qualquer valor de reciclo.

V.B.1.2 - ESTUDO DO AUMENTO DE ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO (E)

As figuras V.4, V.5 e V.6 mostram as influências das condições de operação: temperatura de entrada de ar (T_{ge}), razão entre a vazão de ar e sólido (R_{cc}) e razão de vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) no escurecimento não-enzimático (E) durante a secagem de alimento no secador concorrente.

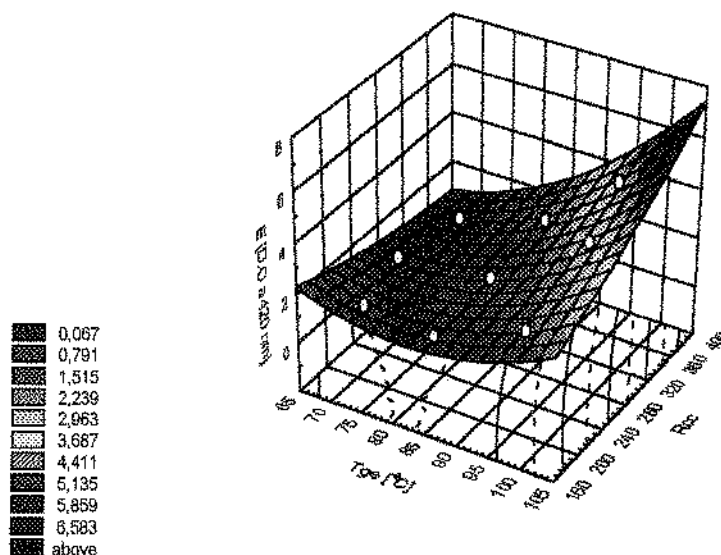


Figura V.4 - Superfície de resposta do escurecimento não-enzimático (E) em função da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar e sólido (R_{cc}) no ponto central $R_{rec} = 0,3$ durante a secagem do alimento no secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

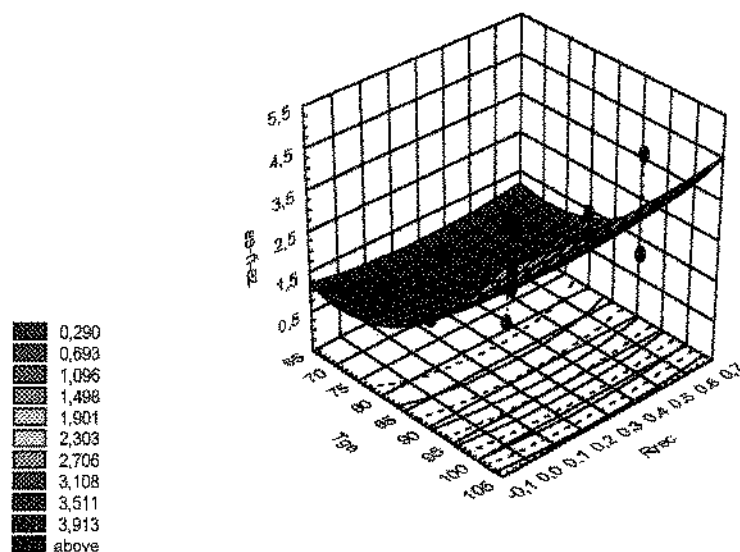


Figura V.5 - Superfície de resposta do escurecimento não-enzimático (E) na secagem do “alimento-modelo” em função da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) e razão de vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) de leito deslizante concorrente centrado no ponto $R_{cc} = 243$.

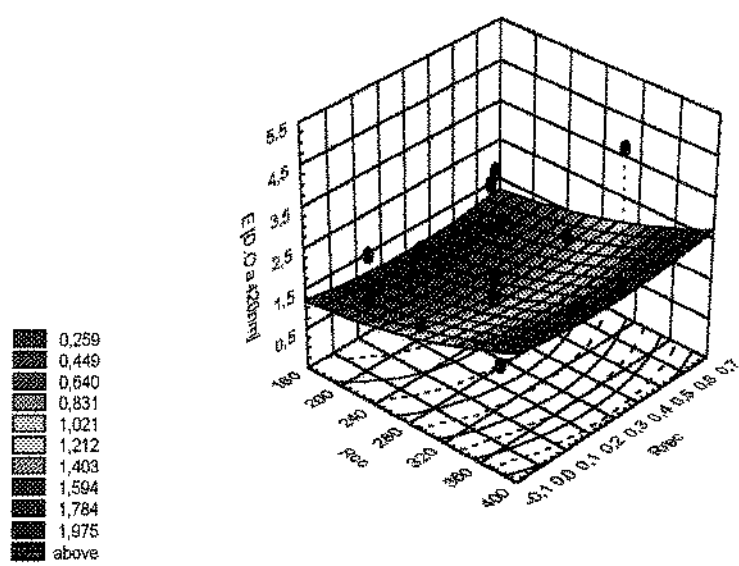


Figura V.6 - Superfície de resposta do aumento de escurecimento não-enzimático (E) na secagem do “alimento-modelo” em função de razão entre a vazão de ar e sólido (R_{cc}) e razão de vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) concorrente no ponto central $T_{ge}=85^{\circ}C$.

A tabela V.2 mostra o ajuste de superfície de resposta aos dados simulados do aumento de escurecimento não-enzimático (E) na secagem do alimento, num secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

Tabela V.2 - Ajuste de superfície de resposta de aumento de escurecimento não-enzimático (E) aos dados da simulação do secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

Teste F		
$F_{calculado} = 9,38$		$F_{calculado}/F_{tabelado}$
$F_{tabelado}$	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	0,64
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	1,97
Porcentagem de variância explicada = 94,41		
Grau de liberdade	Regressão=9	
	Resíduos=5	

Observando os números da tabela V.2, conclui-se que a superfície de resposta do escurecimento não-enzimático no secador concorrente se ajustou bem aos dados simulados a nível de 95% de significância, porém a nível de significância de 99% não se ajustou. O índice de porcentagem de variância mostra que a superfície de resposta do escurecimento não-enzimático se ajustou bem.

Pela figura V.4 e V.5 observa-se que a temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador tem grande influência sobre o escurecimento não-enzimático. O escurecimento é menor quanto menor for a temperatura deste ar.

Na figura V.5 nota-se que à baixa temperatura o valor da razão entre a vazão de ar e o alimento (R_{cc}) influi pouco no escurecimento, tendo uma leve queda com R_{cc} ; ao contrário à alta temperatura, a influência do R_{cc} torna-se mais acentuado sobre o escurecimento, aumentando com R_{cc} . Portanto, uma análise da superfície de resposta do escurecimento não-enzimático levou a reafirmar que a influência do R_{cc} no escurecimento depende do valor da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador. Ainda a baixos valores de vazão de gás ($R_{cc} = 160$) e faixa de reciclo de 0,3, o modelo prevê uma temperatura ótima de 65°C para o escurecimento.

Os valores das variáveis estudadas para que tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático após a secagem foram: $T_{ge} = 70^\circ\text{C}$ sendo que a essa temperatura, tanto o valor de R_{rec} como R_{cc} é quase que independente; $R_{cc}=160$ e $R_{rec} = 0,05$.

Uma análise conjunta de variáveis T_{ge} , R_{cc} e R_{rec} para eficiência térmica, degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático é feita nos próximos itens.

V.B.1.3 - ESTUDO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA (E.T.)

As figuras V.7, V.8, e V.9 mostram as influências das variáveis de operação: temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}), razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) e razão da vazão de ar e sólido no secador (R_{cc}) na eficiência energética.

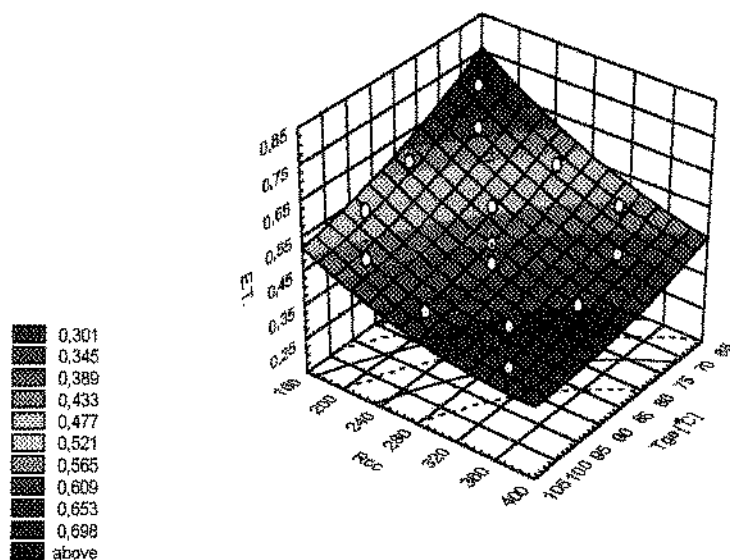


Figura V.7 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função da temperatura de entrada de ar (T_{ge}) no secador e a razão entre a vazão de ar e alimento no secador (R_{cc}) centrado no ponto onde o valor da razão entre a ar de reciclo e secador é $R_{rec} = 0,3$.

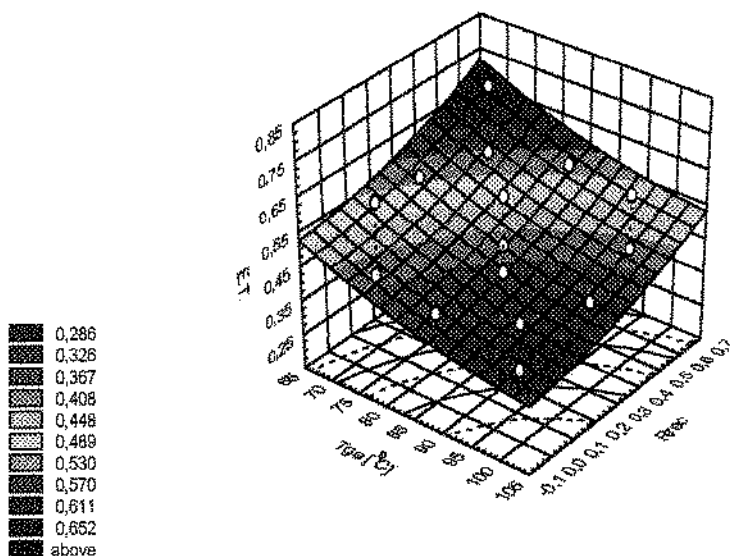


Figura V.8 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função de temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) centrado no ponto onde a razão entre a vazão de ar e sólido é $R_{cc} = 243$.

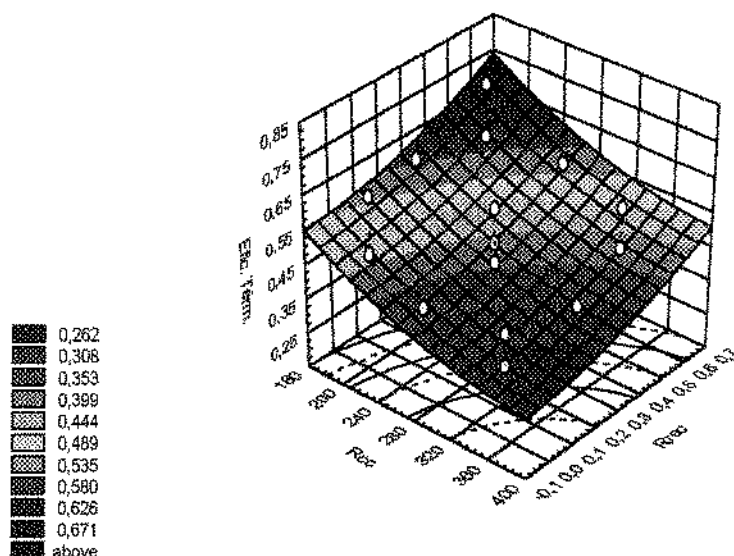


Figura V.9 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função da razão entre a vazão de ar e alimento (R_{cc}) no secador e razão de vazão de ar de reciclo e secador (R_{rec}) centrado no ponto onde $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$.

A tabela V.3 mostra o ajuste desta superfície de resposta da eficiência térmica aos dados simulados.

Tabela V.3 - Ajuste de superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) aos dados da simulação de secador deslizante concorrente com reciclo de ar.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 19,99$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	1,36
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	4,2
Porcentagem de variância explicada = 97,3 %		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduo = 5	

Pela análise da tabela V.3, pode-se observar que a superfície de resposta da eficiência térmica se ajustou bem aos dados simulados. O teste F mostra que pelo nível de significância de 99% ou 95% o ajuste é satisfatório. Pela porcentagem de variância, o índice mostra também que o ajuste é satisfatório.

As análises das superfícies das figuras V.7, V.8 e V.9 mostram que o

valor máximo da eficiência térmica se situa nos pontos onde tem-se (nas faixas estudadas):

- a - baixos valores de temperatura de ar de entrada no secador,
- b - altos valores de vazão de reciclo e
- c - baixos valores da razão entre a vazão de ar e o alimento no secador.

Especificamente estes valores são:

- temperatura de entrada de ar $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
- razão entre a vazão de ar de reciclo e secador $R_{cc} = 160$ e
- razão entre a vazão de ar de reciclo e secador $R_{rec} = 0,6$,
nas faixas estudadas.

V.B.1.4 - COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES ÓTIMAS DO SECADOR CONCORRENTE ENTRE AS PERDAS DE QUALIDADES E A EFICIÊNCIA TÉRMICA

A seguir é feita uma análise comparativa das melhores condições de operação para ter a mínima degradação de vitamina C e escurecimento não-enzimático contrastando com as condições para ter a máxima eficiência térmica. Abaixo é mostrada uma tabela comparativa entre os dois casos onde o caso 1 mostra as condições onde as degradações de qualidade são mínimas e no caso 2 onde a eficiência térmica é máxima.

Tabela V.4 - Tabela comparativa mostrando as condições de operação onde as perdas de qualidades (vitC e E) são mínimas em contraste onde a eficiência térmica (E.T.) é máxima em um secador deslizante concorrente na secagem de um “alimento-modelo”.

	T_{ge}	R_{cc}	R_{rec}	E.T.	VitC	E [D.O]	L_{cc}
Caso 1	72 °C	191	0,05	0,57	29 %	0,130	98 cm
Caso 2	72 °C	191	0,55	0,72	35 %	0,131	70 cm

A tabela V.4 mostra que das três condições de operação avaliadas, T_{ge} e R_{cc} têm os mesmos valores para se ter o mínimo de degradação de qualidades e máximo de eficiência térmica. Assim, a única condição que diferencia entre os dois objetivos é a condição R_{rec} . Os estudos anteriores da influência da R_{rec} nas degradações de qualidade mostraram ser pequenos, porém o objetivo aqui é comparar a degradação de qualidade com a eficiência térmica.. De fato o escurecimento não-enzimático possui praticamente o mesmo valor mínimo em torno de 0,130 D.O a 420nm qualquer que seja o valor de R_{rec} . A degradação de vitamina C é de 35% para R_{rec} maior “contra 30%”. Já a influência do R_{rec} na eficiência térmica é bastante alta variando de 0,57 a 0,72, mostrando que o caso 2 pode ser escolhido se quiser a eficiência térmica máxima. Embora o caso 2 tenha maior eficiência térmica, o comprimento de secador é maior. Assim, a eficiência térmica maior foi à custa de comprimento maior do secador. Na verdade, para se obter uma mesma condição ótima, tem-se várias opções, ora aumentando a vazão de reciclo, ora aumentando o comprimento do secador, assim se deseja ter um secador curto então deve-se aumentar a vazão de reciclo. Mesmo assim, depende muito da cinética de secagem de cada produto a ser seco e portanto as condições de operação de um secador são muito dependentes do produto em questão. No caso, o aumento do comprimento do secador foi apenas de 28cm, de modo que o caso 2 é mais vantajoso.

V.B.2 - SECADOR CONTRACORRENTE

V.B.2.1 - ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE VITAMINA C (vitC)

As figuras V.10, V.11 e V.12 mostram as influências das condições de operação T_{ge} , R_{ct} e R_{rec} num secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar na degradação de vitamina C, segundo método de superfície de respostas.

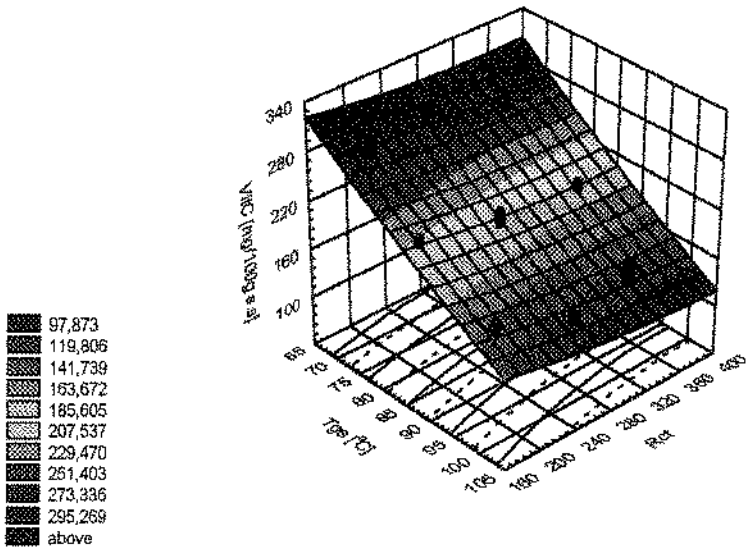


Figura V.10 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) do “alimento-modelo” na secagem em um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de T_{ge} e R_{ct} no ponto central $R_{rec} = 0,3$.

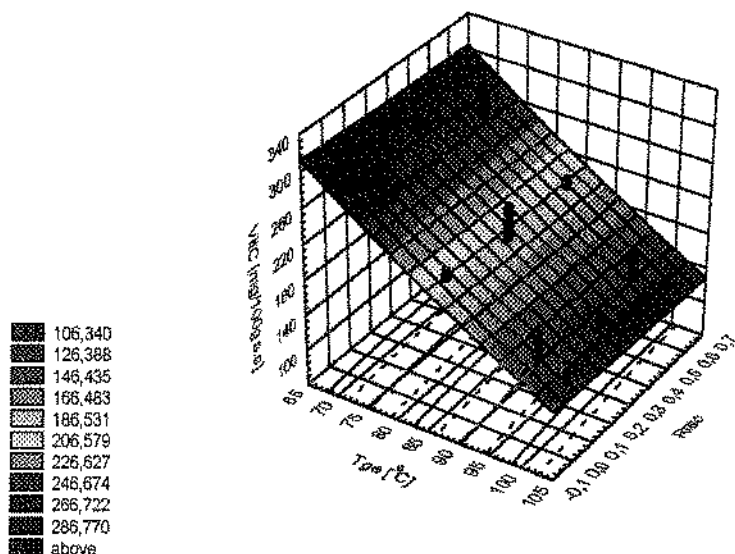


Figura V.11 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) na secagem do “alimento-modelo” num secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de T_{ge} e R_{rec} no ponto central $R_{ct} = 243$.

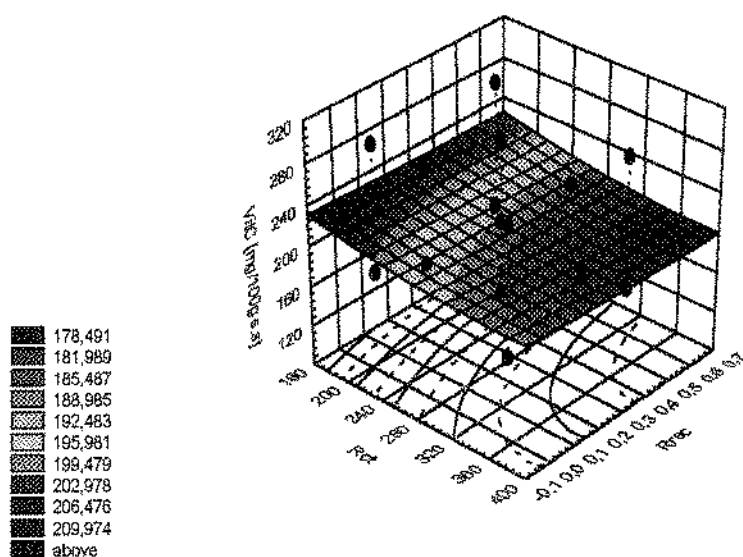


Figura V.12 - Superfície de resposta da degradação de vitamina C (vitC) na secagem do “alimento-modelo” em um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de R_{ct} e R_{rec} no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$.

A tabela V.5 mostra o ajuste de superfície de resposta da degradação de vitamina C aos dados de simulação na secagem de um “alimento-modelo” no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

Tabela V.5 - Índice de ajuste de superfície de resposta da degradação de vitamina C no alimento aos dados simulados, durante a secagem, no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 17,50$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	1,19
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	3,67
Porcentagem de variância explicada = 96,9 %		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

A tabela V.5 mostra que as superfícies das figuras V.10, V.11 e V.12 se ajustaram bem tanto pelo teste F aos níveis de significância de 99% e 95% como pela porcentagem de variância explicada.

As análises das figuras V.10, V.11 e V.12 mostram que a degradação de vitamina C é semelhante ao sistema concorrente, porém os valores finais são diferentes.

Das figuras V.10 e V.11 observa-se que a T_{ge} tem grande influência na degradação da vitamina C, aumentando com T_{ge} crescente.

Das figuras V.10 e V.12, pode-se notar que os valores de R_{ct} têm influência na degradação de vitamina C, apesar de ser menos acentuada que em relação à T_{ge} . A degradação aumenta com o valor de R_{ct} crescente.

Da figura V.12, nota-se que se for aumentada a vazão de ar do reciclo, a degradação aumenta menos acentuadamente que pela influência de T_{ge} e R_{ct} . Os valores R_{ct} e R_{rec} por si só não degradam a vitamina C, porém ao aumentar estas variáveis, a temperatura média no secador aumenta e isto faz com que a vitamina C degrade, apesar de ser pouco comparado com o aumento da temperatura T_{ge} .

A análise conjunta das figuras V.10, V.11 e V.12 mostra que a degradação da vitamina C é mínima a baixas T_{ge} , baixos valores de R_{ct} e baixos valores de R_{rec} ; apesar da influência de R_{ct} e R_{rec} ser menos acentuada. Estes valores nos pontos ótimos foram: $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 160$ e $R_{rec} = 0,05$. Ainda o efeito da vazão de ar de reciclo é muito pequeno a ponto de poder ser

desprezado. Estas mesmas tendências foram observadas no secador concorrente e será feita uma análise comparativa minuciosa mais adiante.

V.B.2.2 - ESTUDO DE AUMENTO DE ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO

As figuras V.13, V.14 e V.15 mostram as influências das variáveis T_{ge} , R_{ct} e R_{rec} no escurecimento não-enzimático de um “alimento-modelo” na secagem em um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar.

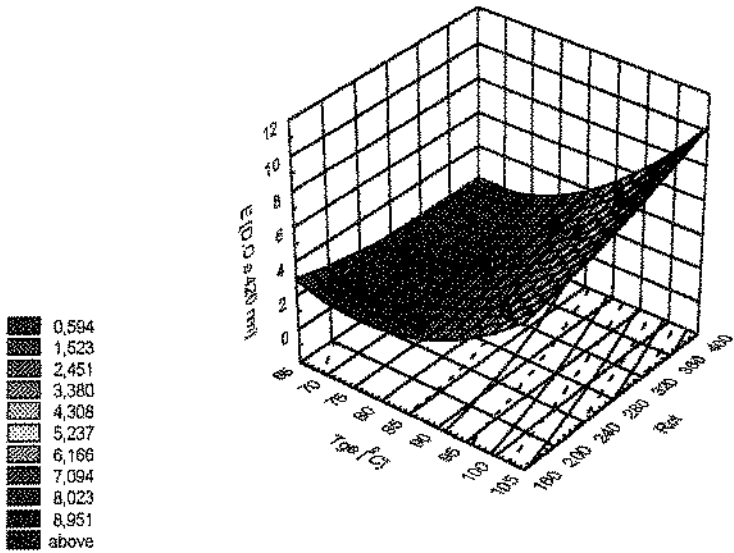


Figura V.13 - Superfície de resposta de escurecimento não-enzimático (E) na secagem do “alimento-modelo” de um secador deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de T_{ge} e R_{ct} , centrado no ponto $R_{rec}=0,3$.

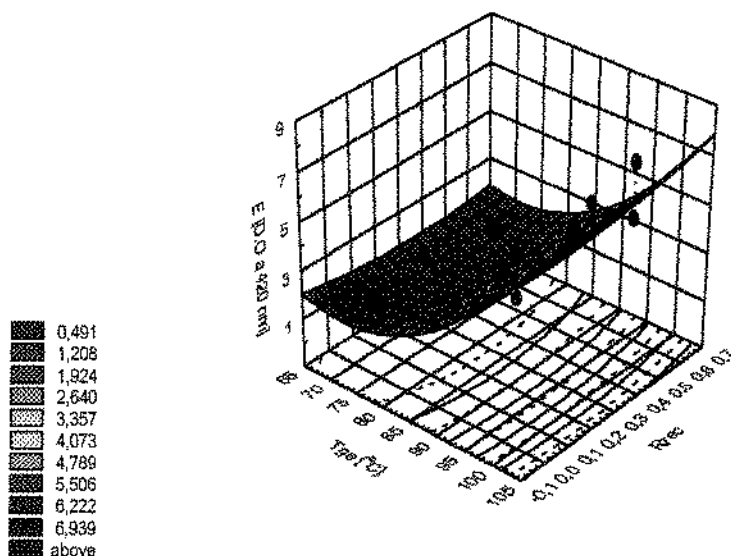


Figura V.14 - Superfície de resposta de escurecimento não-enzimático (E) na secagem do “alimento-modelo” em um secador deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de T_{ge} e R_{rec} , no ponto central $R_{cl} = 243$.

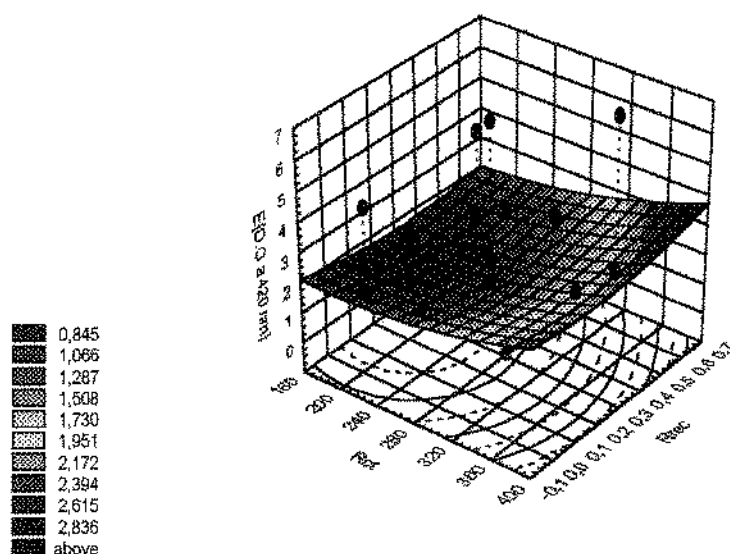


Figura V.15 - Superfície de resposta de escurecimento não-enzimático (E) na secagem do “alimento-modelo” em um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar em função de R_{cl} e R_{rec} no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$.

A tabela V.6 mostra o ajuste de superfície de resposta de dados simulados de escurecimento não-enzimático na secagem do “alimento-modelo”

no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar das figuras V.13, V.14 e V.15.

Tabela V.6 - Ajuste de superfície de resposta de dados de simulação de escurecimento não-enzimático de “alimento-modelo” no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar das figuras V.13, V.14 e V.15.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 14,88$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	1,01
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	3,12
Porcentagem de variância explicada = 96,4		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

A tabela V.6 mostra que as superfícies de resposta das figuras V.13, V.14 e V.15 se ajustaram bem aos dados simulados, tanto pelo teste F com níveis de significância 99% e 95% como pelo teste de porcentagem de variância explicada.

Pela figura V.13 e V.14 observa-se que o escurecimento não-enzimático é maior à medida que aumenta a T_{ge} ; aumenta com o aumento de R_{ct} especialmente à alta temperatura e aumenta com aumento de valores da R_{rec} . A influência de T_{ge} sobre o escurecimento não-enzimático é grande, enquanto a de R_{ct} especialmente à alta temperatura e R_{rec} é bem menos acentuada.

Uma análise conjunta das figuras V.13, V.14 e V.15 mostra que o escurecimento não-enzimático é mínimo quando: T_{ge} , R_{ct} e R_{rec} são mínimas, mais especificamente quando $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 160$ e $R_{rec} = 0,05$. Estes valores são os mesmos daqueles observados do secador concorrente.

V.B.2.3 - ESTUDO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA (E.T.)

As figuras V.16, V.17 e V.18 mostram a influência das variáveis de operação: temperatura de entrada de ar (T_{ge}), razão entre a vazão de ar e sólido (R_{ct}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) na eficiência térmica de um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar

utilizando o método de superfície de resposta.

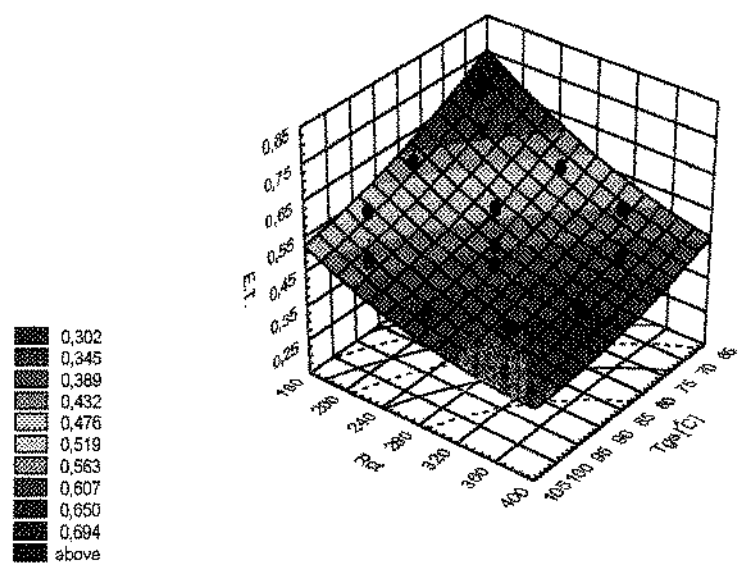


Figura V.16 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função de temperatura de entrada de ar (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar e sólido de um secador de leito deslizante contracorrente centrado no ponto $R_{rec} = 0,3$.

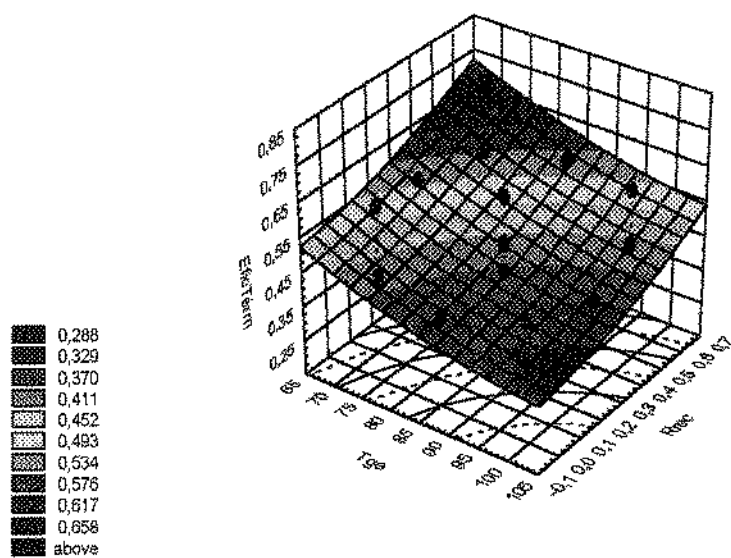


Figura V.17 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função de temperatura de entrada de ar (T_{ge}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) de um secador de leito deslizante contracorrente no ponto central $R_{ct} = 243$.

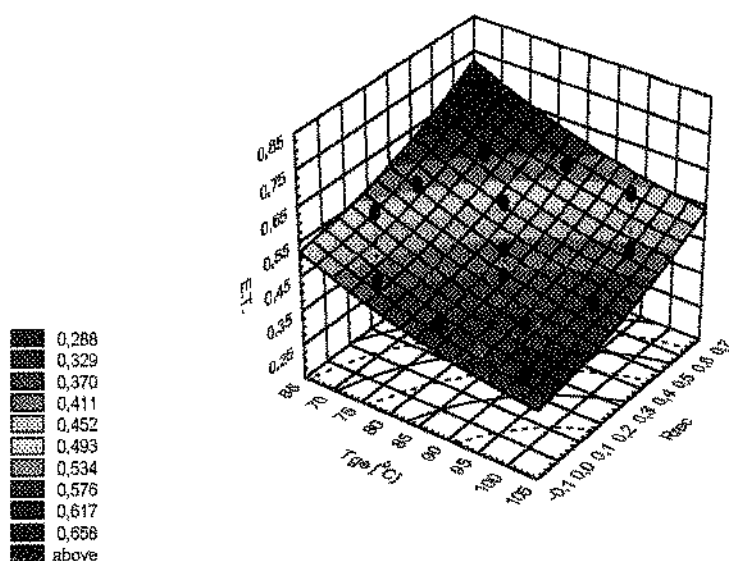


Figura V.18 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) em função de razão entre a vazão de ar e sólido (R_{ct}) e razão entre a vazão de ar de reciclo e ar no secador (R_{rec}) de um secador de leito deslizante contracorrente no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$.

A tabela V.7 mostra o ajuste da curva de superfície de resposta aos dados simulados da eficiência térmica de um secador de leito deslizante contracorrente na secagem de um “alimento-modelo”.

Tabela V.7 - Índice de ajuste de superfície de resposta da eficiência térmica aos dados de simulação de um secador deslizante contracorrente com reciclo de ar.

Teste F		
$F_{\text{calculado}}=17,07$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	1,16
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	3,58
Porcentagem de variância explicada = 96,85 %		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

Pela análise da tabela V.7 pode-se observar que a superfície de resposta

da eficiência térmica se ajustou bem aos dados simulados tanto pelo teste F a nível de 99% e 95% de significância como pelo índice de porcentagem de variância explicada.

A análise conjunta das superfícies de resposta das figuras V.16, V.17 e V.18 mostra que a eficiência térmica é máxima no secador deslizante contracorrente com reciclo de ar quando:

- a - a temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) é baixa;
- b - o valor da razão entre a vazão de ar de reciclo e secador (R_{rec}) é alto e
- c - o valor de razão entre a vazão e o alimento (R_{ct}) é baixo.

Estes valores nas faixas estudadas foram: $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 160$ e $R_{rec}=0,6$, e apresentaram condições ótimas em relação à eficiência térmica, sendo comparados aos valores do secador concorrente.

V.B.2.4 - COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES ÓTIMAS ENTRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA E PERDAS DE QUALIDADE

A seguir é feita uma análise comparativa das melhores condições de operação para se ter um mínimo de degradação de qualidade e uma máxima eficiência térmica.

Na tabela V.8 são mostrados estes valores das condições ótimas. O caso 1 mostra as melhores condições para se ter o mínimo de perdas de qualidade e o caso 2 mostra as condições ótimas para ter o máximo de eficiência térmica durante a secagem do “alimento-modelo” no secador de leito deslizante contracorrente com reciclo.

Tabela V.8 - Tabela comparativa mostrando as condições de operação onde as perdas de qualidade são mínimas em contraste onde a eficiência térmica é máxima em um secador de leito deslizante contracorrente com reciclo de ar na secagem de um “alimento-modelo”.

	T_{ge}	R_{ct}	R_{rec}	E.T.	VitC	E [D.O a 420 nm]	L_{ct}
Caso 1	72°C	191	0,05	0,57	41%	0,20	41cm
Caso 2	72°C	191	0,55	0,73	42%	0,21	41cm

A tabela V.8 mostra que as variáveis T_{ge} e R_{ct} são as mesmas para se ter o mínimo de degradação de qualidade e o máximo de eficiência térmica. Este mesmo fenômeno foi observado no secador concorrente.

A variável R_{rec} , como observado no secador concorrente, tem grande influência na eficiência térmica variando de 0,57 a 0,73 quando $R_{rec} = 0,05$ e $R_{rec} = 0,55$, respectivamente. Ao contrário na degradação de ácido ascórbico e aumento de escurecimento não-enzimático, a influência de variável R_{rec} é desprezível no secador, portanto o ponto ótimo de operação do secador é as condições do caso 2.

V.B.3 - SECADOR MISTO

As mesmas considerações feitas nos secadores concorrentes e contracorrentes foram tentadas para o efeito de comparação dos três sistemas, porém a complexidade do sistema acoplado aumenta as variáveis de operação e assim passa a ter várias opções quando se compara o sistema acoplado com os sistemas simples, como o concorrente ou o contracorrente.

Apesar de ter várias opções de escolha das condições de operação do sistema acoplado, o estudo prévio acerca da eficiência térmica foi levado em conta neste tópico (capítulo II, item II.C).

Assim, o estudo prévio no secador acoplado mostrou que as condições de operação mais importantes são:

- temperatura do ar de entrada no secador (T_{ge}),
- vazão de ar na secção contracorrente ou razão entre vazão de ar na secção contracorrente e sólido (R_{ct}), uma vez que a vazão do sólido é fixa,
- comprimento no secador na secção contracorrente (L_{ct}).

Outras condições de operação foram escolhidas de tal modo que a eficiência térmica permanecesse máxima. Estas variáveis foram:

- reciclo de ar na secção concorrente de 100%,
- vazão de ar na secção concorrente não influi quando o reciclo de ar é 100%.

Outra consideração é quanto à vazão do alimento. Como no sistema acoplado, o alimento é secado em duas etapas; na primeira etapa, o alimento é seco com teor de umidade mais alta. Isto faz com que a quantidade de ar necessária para secar a mesma quantidade de alimento seja menor em cada parte do secador. Por outro lado, é sabido que quanto mais a umidade de ar estiver próxima da saturação na saída, maior será a sua eficiência energética. Nos estudos anteriores, todas as condições ótimas de operação levaram o ar à saturação na saída do secador. Estas condições foram:

- temperatura de entrada de ar no secador (T_{ge}) baixa - satura o ar com vapor de água mais que T_{ge} alta,
- comprimento do secador alto (L) - satura o ar com vapor de água mais que L baixa,
- R_{cc} ou R_{ct} baixo - satura o ar com vapor de água mais que R_{cc} ou R_{ct} alta.

A vazão de ar é fixa em função da velocidade, 1m/s para a vazão mínima e 2m/s para a vazão máxima para evitar o fenômeno de fluidização. Por isso no sistema acoplado foi aumentada a vazão do alimento em relação ao sistema concorrente e contracorrente para a mesma faixa de vazão de ar. Este aumento foi feito de tal maneira que o ar sature em condição-limite. E este valor foi aproximadamente de **1,85 vezes** maior que a vazão de alimento no secador concorrente ou contracorrente. Este limite é muito dependente das outras condições de operação. Com isto a produtividade do secador acoplado

aumentou de 1,85 vezes em relação ao sistema contracorrente e concorrente. Com estas considerações (ou hipóteses) foi feito um estudo do sistema acoplado para tentar mais adiante uma comparação destes sistemas diferentes.

V.B.3.1 - ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE VITAMINA C

As figuras V.19, V.20 e V.21 mostram as influências das condições de operação T_{ge} , R_{ct} e L_{ct} na secagem do alimento num secador acoplado contracorrente mais concorrente com reciclo de ar na secção concorrente na degradação da vitamina C na forma de superfície de resposta.

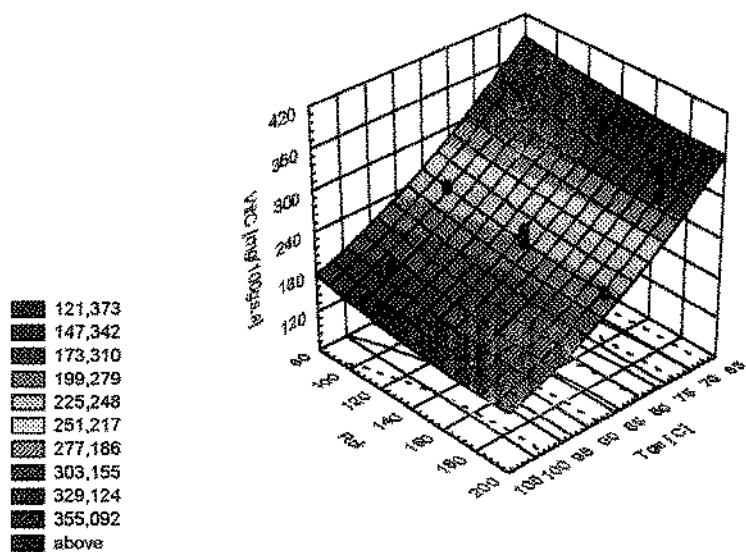


Figura V.19 - Superfície de resposta da vitamina C (vitC) em função de T_{ge} e R_{ct} centrado no ponto $L_{ct} = 14\text{cm}$ de um secador misto contracorrente com reciclo de ar na secção concorrente.

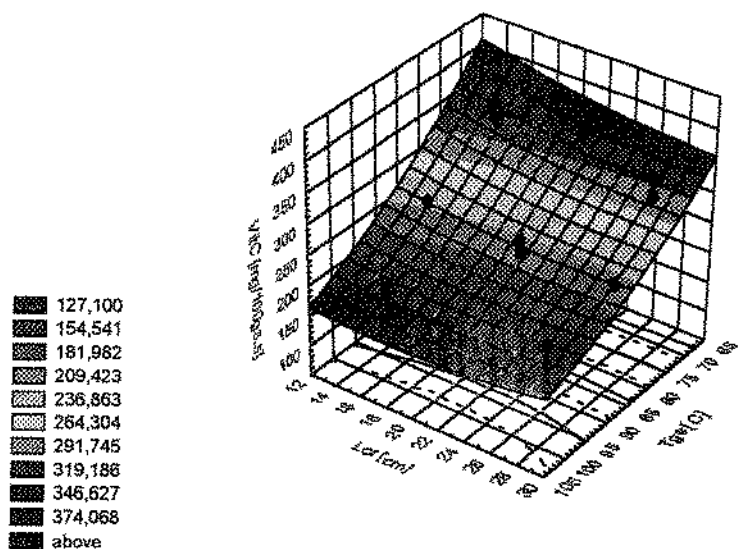


Figura V.20 - Superfície de resposta da vitamina C (vitC) em função de T_{ge} e L_{ct} no ponto central $R_{ct} = 144$ de um secador misto contracorrente mais concorrente com reciclo de ar na secção concorrente.

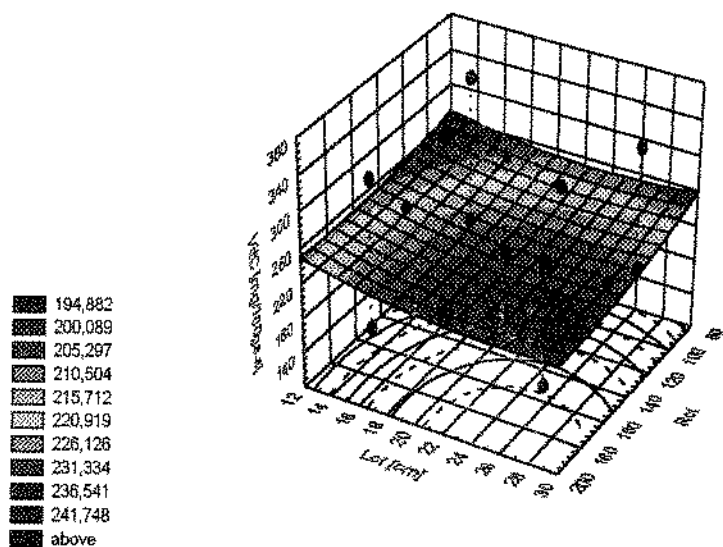


Figura V.21 - Superfície de resposta da vitamina C (vitC) em função de R_{ct} e L_{ct} no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$ de um secador acoplado contracorrente mais concorrente com reciclo de ar na secção concorrente.

A tabela V.9 mostra o ajuste da superfície de resposta aos dados simulados de degradação de vitamina C de um secador de leito deslizante misto na secagem de um “alimento-modelo”.

Tabela V.9 - Índice de ajuste da superfície de resposta da destruição de vitamina C aos dados de simulação de um secador deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente.

Teste F		
$F_{\text{calculado}}=16,5103$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5}=14,66$	1,12
	$F_{0,95; 9; 5}=4,77$	3,46
Porcentagem de variância explicada = 96,74 %		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

Pela análise da tabela V.9, pode-se observar que a superfície de resposta da degradação de vitamina C se ajustou bem aos dados simulados. O teste F mostra que pelo nível de significância de 99% e 95% o ajuste foi bom. Pela porcentagem de variância explicada, o índice mostra também que o ajuste é bom.

A análise conjunta das figuras V.19, V.20 e V.21 mostra que a degradação da vitamina C no sistema de secador acoplado contracorrente mais concorrente com reciclo de ar é mínimo no ponto $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 96$ e $L_{ct}=14\text{cm}$.

Das figuras V.19 e V.20 nota-se que a T_{ge} tem grande influência sobre a degradação de vitamina C comparada às variáveis R_{ct} e L_{ct} . A degradação é maior quanto maior a T_{ge} .

Da figura V.19 e V.21 observa-se que a influência da variável R_{ct} na degradação da vitamina C é pequena e aumenta com aumento de valores de R_{ct} .

Da figura V.20 e V.21 observa-se que a degradação da vitamina C é desprezível em relação à mudança de L_{ct} .

V.B.3.2 - ESTUDO DO ESCURECIMENTO NÃO-ENZIMÁTICO (E)

As figuras V.22, V.23 e V.24 representam os dados de simulação de escurecimento não-enzimático de um secador misto contracorrente e concorrente com reciclo de ar na secção concorrente na forma de superfície de resposta.

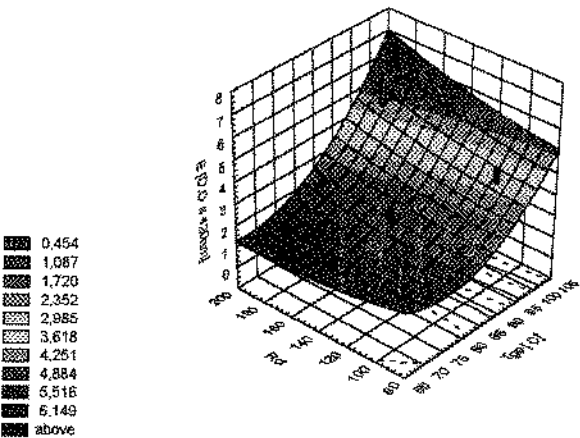


Figura V.22 - Superfície de resposta do escurecimento não-enzimático (E) em função de T_{ge} e R_{ct} no ponto central $L_{ct} = 14\text{cm}$ de um secador misto com reciclo de ar na secção concorrente.

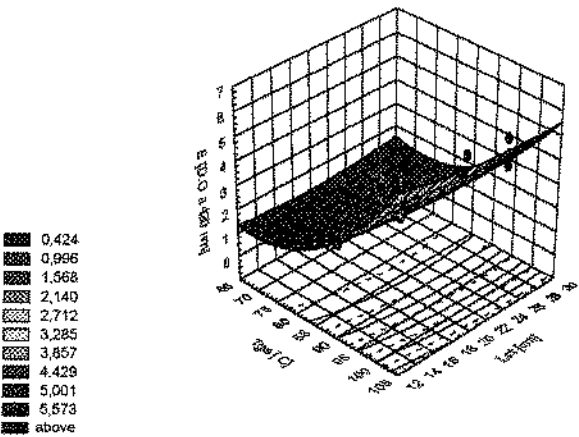


Figura V.23 - Superfície de resposta do escurecimento (E) não-enzimático em função de T_{ge} e L_{ct} centrado no ponto $R_{ct} = 144$ de um secador misto com reciclo de ar na secção concorrente.

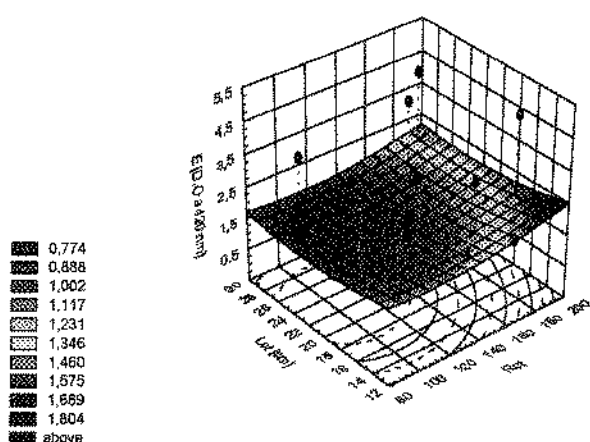


Figura V.24 - Superfície de resposta do escurecimento não-enzimático (E) em função de R_{ct} e L_{ct} no ponto central $T_{gc} = 85^{\circ}\text{C}$ num secador acoplado concorrente e contracorrente com reciclo de ar na secção concorrente.

A tabela V.10 mostra os índices de ajustes de superfícies de respostas de escurecimento não-enzimático aos dados simulados.

Tabela V.10 - Ajuste de superfície de resposta de escurecimento não-enzimático (E) aos dados da simulação de um secador de leito deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente na secagem de um “alimento-modelo”.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 15,95$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99;9;5} = 14,66$	1,1
	$F_{0,99;9;5} = 4,77$	3,3
Porcentagem de variância explicada = 96,6%		
Grau de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

A partir da tabela V.10, pode-se observar que a superfície de resposta de escurecimento não-enzimático se ajustou bem aos dados simulados. O teste F mostra que pelo nível de significância de 99% e 95%, o ajuste foi bom. Pela porcentagem de variância explicada, o índice mostra também que o ajuste foi bom.

As figuras V.22 e V.23 mostram que o escurecimento não-enzimático é fortemente afetado pela temperatura T_{ge} e aumenta com aumento de T_{ge} .

Na figuras V.22 e V.24 observa-se que o escurecimento não-enzimático aumenta com aumento de valor de R_{ct} em especial às temperaturas altas. A baixas temperaturas, o escurecimento se mantém praticamente constante.

Nas figuras V.23 e V.24 nota-se que a influência da variável L_{ct} no escurecimento não-enzimático é desprezível.

Uma análise conjunta das figuras V.22, V.23 e V.24 mostra que o escurecimento não-enzimático é mínimo no ponto: $T_{ge}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{ct}=96$ e L_{ct} variável.

V.B.3.3 - ESTUDO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA (E.T.)

As figuras V.25, V.26 e V.27 apresentam os dados de simulação e otimização na forma de superfície de respostas. Mostram as influências das condições de operação: T_{ge} , R_{ct} e L_{ct} na eficiência energética com todas as outras condições fixadas.

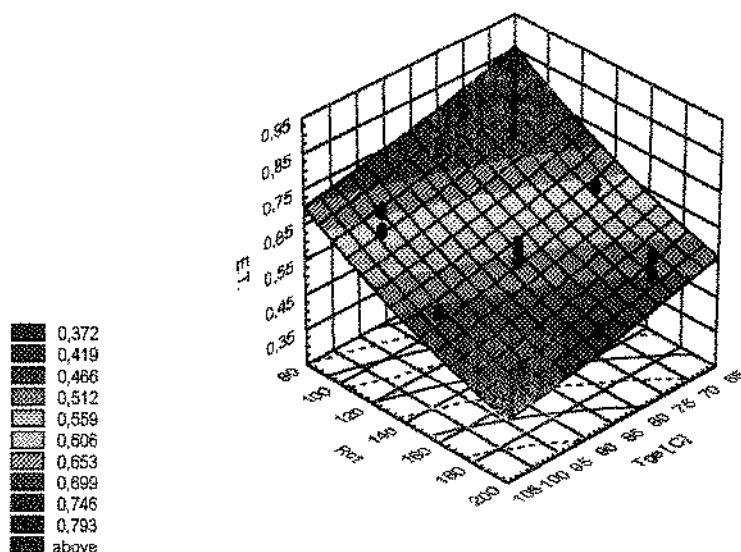


Figura V.25 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) na secagem do sólido em função de T_{ge} e R_{ct} no ponto central $L_{ct} = 14\text{cm}$ de um secador misto concorrente mais contracorrente.

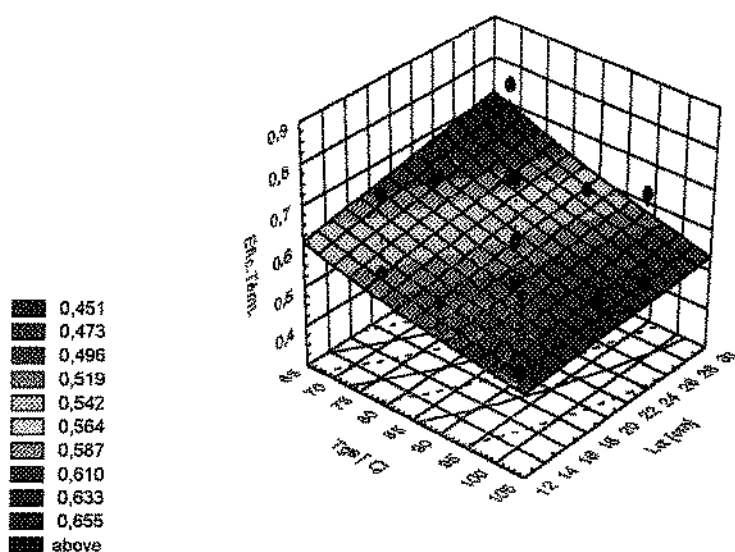


Figura V.26 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) na secagem do sólido em função de T_{ge} e L_{ct} no ponto central $R_{ct} = 144$ de um secador misto.

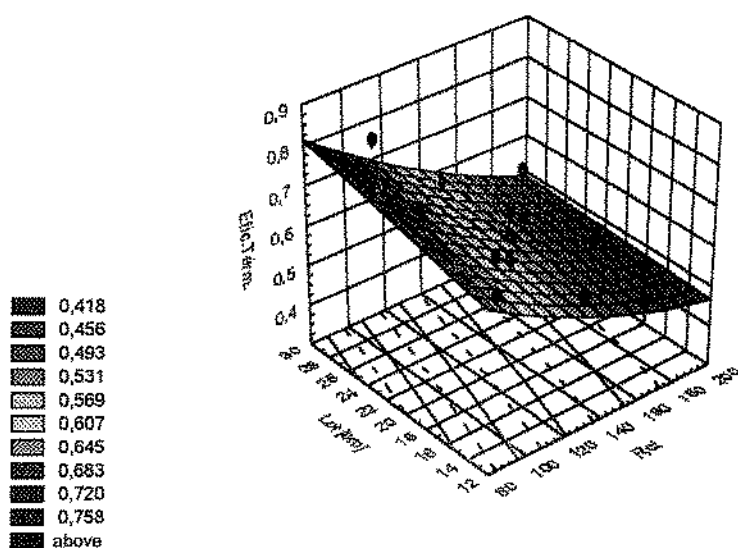


Figura V.27 - Superfície de resposta da eficiência térmica (E.T.) na secagem do sólido em função de R_{ct} e L_{ct} no ponto central $T_{ge} = 85^{\circ}\text{C}$ de um secador misto.

A tabela V.11 - mostra o ajuste de superfície de resposta das figuras V.25, V.26 e V.27 aos dados simulados na secagem de sólido no secador misto.

Tabela V.11 – Índice de ajuste da superfície de resposta da Eficiência Térmica aos dados de simulação de um secador deslizante misto com reciclo de ar na secção concorrente.

Teste F		
$F_{\text{calculado}} = 20,82$		$F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$
F_{tabelado}	$F_{0,99; 9; 5} = 14,66$	1,42
	$F_{0,95; 9; 5} = 4,77$	4,36
Porcentagem de variância explicada = 97,4%		
Graus de liberdade	Regressão = 9	
	Resíduos = 5	

A tabela V.11 mostra que as superfícies das figuras IV.25, V.26 e V.27 se ajustaram bem aos dados de simulação tanto pelo teste F a nível de 99% e 95% como pela porcentagem de variância explicada.

As análises das figuras V.25, V.26 e V.27 conjuntamente mostram que a eficiência energética é máxima nas faixas estudadas quando:

- a temperatura de ar de entrada no secador (T_{ge}) é baixa,
- a razão entre a vazão de ar e sólido na secção contracorrente (R_{ct}) é baixa e
- o comprimento dos secadores na secção contracorrente (L_{ct}) é longa.

Especificamente estes valores nas faixas estudadas foram: $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$, $R_{ct} = 96$ e $L_{ct} = 18\text{cm}$.

V.B.3.4 - COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES ÓTIMAS NO SECADOR MISTO ENTRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA E AS PERDAS DE QUALIDADE

Nesta secção é realizada uma comparação entre as condições ótimas de operação para se ter um mínimo de perdas de qualidade e um máximo de

eficiência térmica no sistema misto. A tabela V.12 apresenta estes dados. O caso 2 mostra as condições ótimas para se ter o mínimo de perdas de ácido ascórbico e escurecimento não-enzimático e o caso 1 mostra as condições ótimas para se ter o máximo de eficiência térmica.

Tabela V.12 - Tabela comparativa mostrando as condições de operação onde as perdas de qualidades são mínimas, contrapondo-se com as condições onde a eficiência térmica é máxima em um secador de leito deslizante misto na secagem de um “alimento-modelo”.

	T _{ge} [°C]	R _{ct}	L _{ct} [cm]	E.T.	vitC [mg/100g _{s.s}]	E [D.O a 420nm]	L _{total} [cm]
Caso 1	72	103	18	0,79	316,3 (21%)	0,181	29
Caso 2	72	103	15	0,68	342,5 (14%)	0,180	29

Da tabela V.12 observa-se que para se ter o mínimo de perdas de qualidade e máximo de eficiência térmica, as variáveis T_{ge} e R_{ct} são as mesmas. Este resultado foi observado também nos sistemas concorrente e contracorrente.

A variável L_{ct} imprime resultados opostos, onde a eficiência térmica é máxima (0,79) quando a variável L_{ct} é o valor máximo (18cm) onde o ar está próximo da saturação na saída da secção contracorrente do secador. Ao contrário, a destruição da vitamina C é mínima (condição ótima) para secadores cujo L_{ct} é mais curto (15cm). No entanto, o escurecimento não-enzimático praticamente não foi afetado pelo variável L_{ct}.

V.B.4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS SECADORES DE LEITO DESLIZANTE CONCORRENTE, CONTRACORRENTE E MISTO

Nesta secção foi feito um estudo comparativo dos sistemas com perdas de qualidade mínima e eficiências térmicas máximas nos secadores de sistemas concorrente, contracorrente e misto.

As tabelas V.13 e V.14 mostram os resultados da otimização destes 3

sistemas.

Tabela V.13 - Valores de condições de operação e seus resultados para que se obtenham o mínimo de perdas de vitamina C e o mínimo de escurecimento não-enzimático nos secadores concorrente, contracorrente e misto.

	Concorrente	Contracorrente	Misto
T_{ge} [°C]	72	72	72
R_{cc} ou R_{ct}	191	191	103
R_{rec}	0,05	0,05	1,0
L_{ct} [cm]	----	----	15,5
E.T.	0,57	0,57	0,68
vitC [mg/100g _{s.s}]	340	285	342,5
E [O.D a 420 nm]	0,13	0,20	0,18
L_{total} [cm]	70	41	44
W_s [kg _{s.s} /s]	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$

Tabela V.14 - Valores de condições de operação e seus resultados para que se tenha o máximo de eficiência térmica nos secadores de leito deslizante concorrente, contracorrente e misto.

	Concorrente	Contracorrente	Misto
T_{ge} [°C]	72	72	72
R_{cc} ou R_{ct}	191	191	103
R_{rec}	0,55	0,55	1,0
L_{ct} [cm]	----	----	18
E. T.	0,72	0,73	0,79
vitC [mg/100g _{s.s}]	313	278	316
E [O.D a 420 nm]	0,13	0,21	0,19
L_{total} [cm]	98	41	37
W_s [kg _{s.s} /s]	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$

A análise da tabela V.13 e V.14 nas faixas estudadas mostra que qualquer que seja o sistema:

- as condições de operação para que se tenha o mínimo de degradação de

vitamina C são diferentes das condições de operação para que se tenham eficiências térmicas máximas;

- as condições de operação para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático são as mesmas para que se tenha a máxima de eficiência térmica.

Na tabela V.13 observa-se que as eficiências térmicas máximas para o sistema concorrente e contracorrente praticamente são as mesmas enquanto no sistema misto a eficiência térmica é um pouco superior com cerca de 9,7%.

Na tabela V.14 observa-se que nas condições ótimas de operação na degradação da vitamina C, os sistemas concorrente e misto têm teores finais de vitamina C próximos. Nos sistemas misto e concorrente a degradação é menor que no contracorrente com cerca de 16% de diferença.

Na tabela V.14 observa-se que nas condições de operação ótimas para ter o mínimo de escurecimento enzimático, o sistema concorrente é mais favorável, seguido pelo sistema misto. O sistema contracorrente tem o pior desempenho, porém o valor está próximo do sistema misto.

LEE & PYUN (1993) estabeleceram um valor de retenção de 330mg/100g_{s.s} de ácido ascórbico e 0,177 D.O a 420 nm para o escurecimento como o valor-limite do produto final seco na secagem do rabanete. Ao aplicar este limite e ao observar as tabelas V.13 e V.14, apenas o secador concorrente na condição da tabela V.13 preenche este requisito com segurança. Nestas condições ótimas tem-se:

- eficiência térmica igual a 0,57,
- teor final de vitamina C igual a 340 mg/100g_{s.s}
- índice de escurecimento não-enzimático igual a 0,13 D.O a 420nm.

Outro sistema que se aproxima destes valores é o secador misto que nas condições ótimas tem-se as seguintes condições:

- eficiência térmica igual a 0,68;
- teor final de vitamina C igual a 342,5 mg/100g_{s.s};
- índice de escurecimento não-enzimático igual a 0,18 D.O a 420nm (passou de 0,01).

Entretanto, cada produto tem seus próprios valores-limites dos teores de qualidades apropriados após a secagem. Assim, estabelecer como limite de retenção para o teor final de vitamina C 330mg/100g_{s.s} e 0,17 D.O a 420 nm como limite para o índice de escurecimento não-enzimático neste trabalho é só indicativo, já que o produto não está bem definido. O valor desta pesquisa está em estabelecer um conhecimento e metodologia apropriada para futuros trabalhos.

Para fim de estudo, foi estabelecido aqui um “valor-limite” de 300mg/100g_{s.s} de ácido ascórbico e 0,2 D.O a 420nm para o índice de escurecimento não-enzimático. Respeitando estes limites, da tabela V.13 e V.14 observa-se que os sistemas concorrente e misto podem ser utilizados. Ao contrário no sistema contracorrentes estes limites são ultrapassados mesmo na

tabela V.14, onde se tem o limite ótimo de condições de operações nas perdas de qualidade.

Dentre as opções permitidas, o melhor sistema será o misto da tabela V.13, onde a eficiência térmica está otimizada e ao mesmo tempo as condições de qualidades são aceitáveis após a secagem do alimento. Este sistema terá a seguinte vantagem:

- a eficiência térmica é a maior de todos os sistemas (0,79),
- a porcentagem de retenção de vitamina C está dentro do limite estabelecido (300 mg/100g_{s.s}),
- o índice de escurecimento não-enzimático está abaixo do estabelecido (0,20 D.O a 420nm),
- a produtividade deste sistema é 1,85 vezes maior que o sistema concorrente e contracorrente,
- o tamanho do secador é menor.

A desvantagem deste sistema misto é que ele é mais complexo que o concorrente e contracorrente na construção do equipamento e também por possuir maior número de condições de operação a serem definidas.

V.C - CONCLUSÕES

Com base nos estudos da otimização dos secadores de leite deslizado em relação à qualidade dos produtos e a eficiência térmica dos sistemas dentro das condições estabelecidas, conclui-se que:

- 1 - As condições ótimas de operação no secador concorrente para que se tenha o mínimo de perdas de vitamina C foram:
 - o menor valor de T_{ge} estudado com valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{cc} estudado com valor de $R_{ct} = 177$,
 - o menor valor de R_{rec} estudado com valor de $R_{rec} = 0,05$.
- 2 - As condições ótimas de operação no secador contracorrente para que se tenha o mínimo de perda de vitamina C foram
 - o menor valor de T_{ge} estudado com valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{ct} estudado com valor de $R_{ct} = 177$,
 - o menor valor de R_{rec} estudado com valor de $R_{rec} = 0,05$; porém a diferença da degradação do R_{rec} mostrou ser pequena.
- 3 - As condições ótimas de operação no secador misto para que se tenha o mínimo de perda de vitamina C foram:
 - o menor valor de T_{ge} estudado com valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{ct} estudado com valor de $R_{ct} = 96$,
 - o menor valor de L_{ct} estudado com valor de $L_{ct} = 14,4\text{cm}$.
- 4 - As condições de operação ótimas no secador concorrente para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático foram:
 - o menor valor de T_{ge} estudado com o valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{cc} estudado com o valor de $R_{cc} = 177$,
 - R_{rec} não teve influência sobre o escurecimento não-enzimático.
- 5 - As condições de operação ótimas no secador contracorrente para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático foram:
 - o menor valor de T_{ge} estudado com o valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{ct} estudado com o valor de $R_{ct} = 177$,
 - R_{rec} não teve qualquer influência sobre o escurecimento não-enzimático.

- 6 - As condições de operação ótimas no secador misto para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático foram:
- o menor valor de T_{ge} estudado com o valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{ct} estudado com o valor de $R_{ct} = 96$,
 - L_{ct} não teve qualquer influência sobre o escurecimento não-enzimático.
- 7 - As condições ótimas de operação nos secadores concorrente e contracorrente para que se tenha a máxima eficiência térmica foram:
- o menor valor de T_{ge} estudado com o valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{cc} e R_{ct} estudado com valor de $R_{cc} = R_{ct} = 177$,
 - o maior valor de R_{rec} estudado com valor de $R_{rec} = 0,55$.
- 8 - As condições ótimas de operação no secador misto para que se tenha o máximo de eficiência térmica foram:
- o menor valor de T_{ge} estudado com valor de $T_{ge} = 70^{\circ}\text{C}$,
 - o menor valor de R_{ct} estudado com valor de $R_{ct} = 96$,
 - o maior valor de L_{ct} estudado com valor de $L_{ct} = 28,7\text{cm}$.
- 9 - Entre os três secadores estudados, nas condições ótimas de operação para que se tenha o máximo de eficiência térmica, o secador misto mostrou ser o mais eficiente com 0,79. Os secadores concorrente e contracorrente apresentaram a mesma eficiência térmica com o valor de 0,73.
- 10 - Entre os três secadores estudados, nas condições ótimas de operação para que se tenha o mínimo de degradação de vitamina C, os sistemas mistos e concorrentes mostraram um desempenho próximo e melhor do que o secador concorrente.
- 11 - Entre os três secadores estudados, nas condições ótimas de operação para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático, o secador concorrente mostrou ser melhor, seguido pelo secador misto e contracorrente. Os desempenhos entre os secadores misto e concorrente mostraram resultados aproximados.

- 12 - Nos secadores concorrente e contracorrente, a influência da T_{ge} nas condições ótimas de operação para que se tenha o mínimo de degradação de vitamina C foi a mais importante condição de operação. As condições de operação R_{cc} e R_{ct} mostraram influência menor em relação à T_{ge} . A influência da R_{rec} foi muito pequena.
- 13 - Nos secadores concorrente e contracorrente, a influência da T_{ge} nas condições ótimas de operação para que se tenha o mínimo de escurecimento não-enzimático foi grande; a da R_{cc} e R_{ct} foram pequenas e a influência da R_{rec} foi desprezível.
- 14 - No secador misto, a influência da T_{ge} nas condições ótimas de operação foi a principal causadora da degradação de vitamina C. A influência da R_{ct} e L_{ct} foi pequena.
- 15 - No secador misto, a influência de T_{ge} nas condições ótimas de operação foi a principal causadora de escurecimento não-enzimático. A influência da R_{ct} foi pequena. A influência do L_{ct} foi desprezível.
- 16 - O secador misto apresentou nas condições ótimas de operação, melhor desempenho na eficiência térmica, desempenho próximo ao de secador concorrente nas perdas de ácido ascórbico, desempenho intermediário no escurecimento não-enzimático entre concorrente e contracorrente. A produtividade do secador misto foi **1,85 vezes** maior que os concorrente e contracorrente. Tem a desvantagem do sistema ser mais complexo que os concorrente e contracorrente.
- 17 - O secador concorrente apresentou, nas condições ótimas de operação, melhor desempenho no índice de escurecimento não-enzimático, desempenho próximo do secador misto na degradação de vitamina C e desempenho próximo de eficiência térmica do secador contracorrente. Tem a desvantagem de ter comprimentos maiores do que os outros e uma produtividade baixa em relação ao secador misto.
- 18 - Muitos resultados obtidos utilizando o método de superfície de resposta corroboram os resultados obtidos no capítulo IV.

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOSTI JUNIOR, S. & SARTORI, D.J.M. Velocidade do fluido na secagem de soja em leito deslizante. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas - S.P., Vol. I: 309 - 317, 1991.
- ARNOSTI JUNIOR, S. & SARTORI, D.J.M. Processo de secagem de sementes em leito deslizante: fluidodinâmica e temperatura do ar. Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. II: 451 - 462, 1992.
- ASHRAE HANDBOOK Fundamentals Published by the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta 700 p. 1985.
- ASSUMPÇÃO, G.B.; MASSARANI, G.; MEDEIROS, J.L. Secagem de grãos em secador de fluxos cruzados III. Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Maringá - Paraná, Vol.II:63 - 72, 1984.
- BANGA, J.R. & SINGH, R.P. Optimization of air drying of foods. Journal of Food Engineering, v.23, p.189-211, 1994.
- BARROS NETO, B; SCARMINIO, J.S.; BRUNS, R.E Planejamento e otimização de experimentos, Ed. UNICAMP, 1995.
- BARROZO, M.A.S.; CALADO, V.M.A.; CALÇADA, L.A.; MASSARANI, G. Secagem de soja em leito deslizante e recirculação pneumática: influência da umidificação artificial. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas - S.P., Vol. I: 327 - 337, 1991.
- BARROZO, M.A.S. & SARTORI, D.J.M. Influência das variáveis de processo na qualidade da semente de soja submetida à secagem em leito deslizante. Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Florianópolis - S.C., Vol. II: 730 - 737, 1994.

- BARROZO, M.A.S.; SARTORI, D.J.M.; FREIRE, J.T. Estudo da cinética de secagem de sementes de soja em camada fina nos leitos fixo e deslizante. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXIII ENEMP), Maringá - Paraná, Vol. 1: 229 - 239, 1995.
- BEETNER, G.; TSAO, T.; FREY, A.; HARPER, J. A research note: Degradation of thiamine and riboflavin during extrusion processing. Journal of Food Science, v.39, p.207-208, 1974.
- BEETNER, G.; TSAO, T.; FREY, A.; LORENZ, K. Stability of thiamine and riboflavin during extrusion processing of triticales. Journal of Milk and Food Technology, v.39, n.4, p.244-245, 1976.
- BERTIN, R. & BLAZQUEZ, M. Modeling and optimization of a dryer. Drying Technology, v.4, n.1, p.45-66, 1986.
- BOBBIO, F.O.; BOBBIO, P.A. Introdução à química de alimentos. Campinas, Fundação Cargil, 1985.
- BOX, M.J. A new method of constrained optimization and a comparison whith other methods. Computer Journal, v.8, p.42-52, 1965.
- BROOK, R. C. & BAKKER-ARKEMA, F.W. Dynamic programming for process optimization 1. an algorithm for design of multi-stage grain dryers. Journal of Food Process Engineering, v.2, n.3, p. 199-211, 1978.
- CALADO, V.M.A.; MASSARANI, G. Análise preliminar de secador em leito deslizante e recirculação pneumática. Anais do XVI ENEMP, Petrópolis, Vol. II: 551 - 560, 1988
- CHOU, H; BREENE, W.M. Oxidative decoloration of β -carotene in low-moisture model systems. Journal of Food Science, v.37, n.1, p.66-68, 1972.

- COULTER, S.T.; JENNES, R.; GEDDES, W.F. Physical and chemical aspects of the production, storage, and utility of dry milk products. Advances in Food Research, v.3, p.45-118, 1951.
- DENG, J.C.; WATSON, M.; BATES, R.P.; SCHOROEDER, E. Ascorbic acid as an antioxidant in fish flesh and its degradation. Journal of Food Science, v.43, n.2, p.457-460, 1978.
- DOE, P.E. & MENARY, R.C. Optimization of the hop drying process with respect to alpha acid content. Journal of Agricultural Engineering Research, v.24, p.233-248, 1979.
- EVANS, L.B. Optimization theory and its application in food processing. Food Technology, v.36, n.7, p.88-93, 1982.
- FERREIRA, F.M.; VIOTTO, L.A.; MENEGALLI, F.C. Secador misto contracorrente-concorrente a leito deslizante. Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Florianópolis - S.C., Vol. II:720 - 729, 1994.
- FLAUZINO, R.S. & SARTORI, D.J.M. Teor de umidade do sólido na secagem de sementes de soja em leito deslizante. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas - S.P., Vol. I:318 - 326, 1991.
- FLAUZINO, R.S. & SARTORI, D.J.M. Teor de umidade do sólido na secagem de sementes de soja em leito deslizante II: efeitos imediatos. Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. II:439 - 449, 1992.
- FLINK, J.M.; HAWKES, J.; CHEN, H.; WONG, E. Properties of the freeze drying "scorch" temperature. Journal of Food Science, v.39, p.1244-1246, 1974.

FRANZEN, K.; SING, R.K.; OKOS, M.R. Kinetics of nonenzymatic browning in dried skim milk. Journal of Food Engineering, v.11, p.225-239, 1990.

HENDEL, C.E., SILVEIRA, V.G.; HARRINGTON, W.O. Rates of nonenzymatic browning of white potato during dehydration. Food Technology, v.9, p.433-438, 1955.

HUBINGER, M.D. Modelagem, simulação e avaliação energética e exergetica de secadores a leito deslizante. Tese de doutorado, FEA, UNICAMP, 179 p., 1994.

HUBINGER, M. D. & MENEGALLI, F.C. Estudo da distribuição de tempos de residência em secadores a leito deslizante. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. I:217 - 228, 1989.

HUBINGER, M.D. & MENEGALLI, F.C. Cálculo do fator de desvio do escoamento pistão para secadores a leito deslizante. Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. II:569 - 579, 1992a.

HUBINGER M.D. & MENEGALLI, F.C. Influência da distribuição de tempo de residência na eficiência de secagem de proteína texturizada de soja em secadores a leito deslizante. Anais do XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. II:581 - 594, 1992b.

HUBINGER, M.D. & MENEGALLI, F.C. Simulação de secadores em leito deslizante, com escoamentos concorrente e contracorrente. Análise da eficiência energética. Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Ouro Preto - M.G., Vol. II:522 - 532, 1993.

HUBINGER, M.D. & MENEGALLI, F.C. Análise da eficiência térmica de secador a leito deslizante misto (contra + concorrente) com reciclo de ar. Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Florianópolis - S.C., Vol. II:651 - 657, 1994.

JENSEN, A. Tocopherol content of seaweed meal. III. Influence of processing and storage on the content of tocopherols, carotenoids and ascorbic acid in seaweed meal. Journal of the Science of Food and Agriculture, v.20, p.622, 1960.

KAJIYAMA, T.; HUBINGER, M.,D.; MENEGALLI, F.C. Análise do desempenho de um secador a leito deslizante misto concorrente e contracorrente com reciclo de ar. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXIII ENEMP), Maringá - Paraná, Vol. 1: 209 - 218, 1995.

KAMINSKI, W.; ZBICINSKI, I.; GRABOWSKI, S.; STRUMILLO, C. Multiobjective optimization of drying process. Drying Technology, v.7, n.1, p.1-16, 1989.

KAREL, M. Packaging protection for oxygen-sensitive products. Food Technology, v.28, n.8, p.50, 1974.

KAREL, M.; LABUZA, T.P. Nonenzymatic browning in model food systems containing sucrose. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v.16, n.5, p.717-719, 1968.

KAREL, M.; NICKERSON, J.T.R. Effects of relative humidity, air, and vacuum on browning of dehydrated orange juice. Food Technology, v.18, n.8, p.1214-1218, 1964.

KWOLEK, W.F.; BOOKWALTER, G.N. Predicting storage stability from time-temperature data. Food Technology, v.25, n.10, p.51-57, 1971.

LABUZA, T.P. nutrient losses during drying and storage of dehydrated foods. CRC Crit. Rev. Food Technol., v.2, n.3, p.217, 1972.

LABUZA, T.P.; MIZRAHI, S.; KAREL, M. Mathematical models for optimization of flexible film packaging of foods for storage. Transactions of the ASAE, v.15, n.1, p.150-155, 1972.

- LABUZA, T.P.; SHAPERO, M.; KAMMAN, J. Prediction of nutrient losses. J. Food Preserv., v.2, p.91, 1979.
- LABUZA, T.P.; TANNENBAUM, S.R.; KAREL, M. Water content and stability of low-moisture foods. Food Technology, v.24, n.5, p.543-550, 1970.
- LAING, B.M.; SCHLUETER, D.L.; LABUZA, T.P. Degradation Kinetics of ascorbic acid at high temperature and water activity. Journal of Food Science, v.43, n.5, p.1440-1443, 1978.
- LEE, D.S. & PYUN, Y.R. Optimization of operating conditions in tunnel drying of food. Drying Technology, v.11, n.5, p.1025-1052, 1993.
- LEE, Y.C.; KIRK, J.R.; BEDFORD, C.L.; HELDMAN, D.R. Kinetics and computer simulation of ascorbic acid stability of tomato juice as functions of temperature, pH, and metal catalyst. Journal of Food Science, v.42, n.3, p.640-644, 1977.
- LEGAULT, R.R.; HENDEL, C.E.; TALBURT, W.F.; POOL, M.F. Browning of dehydrated sulfited vegetables during storage. Food Technology, v.5, n.10, p.417-423, 1951.
- MANCINI, M.C.; MASSARANI, G.; BISCAIA Jr., E.C. Transferência de massa na secagem de milho em secadores de camada espessa em leitos fixo e deslizante. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXIII ENEMP), Maringá - Paraná, Vol. 1: 219 - 228, 1995.
- MAYTAS S., M.A.; PINTO, J.C.; MASSARANI, G. Estudo de coeficiente de transferência de massa na secagem de grãos em leito deslizante e fluxos cruzados. Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Ouro Preto - M.G., Vol. II:396 - 407, 1993.
- MERGUIZO, G. & SARTORI, D.J.M. Efeitos mecânicos sobre sementes de soja em uma unidade de secagem em leito deslizante. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas - S.P., Vol. I:299 - 308, 1991.

MISHIKIN, M.A.; SAGUY, I.; KAREL, M. Applications of optimization in food dehydration. Food Tecnology, v.36, n.7, p.101-109, 1982.

MISHIKIN, M.A.; SAGUY, I.; KAREL, M. Dynamic optimization of dehydration processes: Minimizing browning in dehydrated potatoes. Journal of Food Science, v.48, p.1617-1621, 1983.

MISHIKIN, M.A.; SAGUY, I.; KAREL, M. A dynamic test for kinetic models of chemical changes during processing: ascorbic acid degradation in dehydration of potatoes. Journal of Food Science, v.49, n.5, p.1267-1270, 1984a.

MISHIKIN, M.A. ; SAGUY, I.; KAREL, M. Minimizing ascorbic acid loss during air drying with a constraint on enzyme inactivation for a hypothetical foodstuff. Journal of Food Processing and Preservation, v.7, n.3, p.193-210, 1983b.

MISHIKIN, M.A. ; SAGUY, I. ; KAREL, M. Optimization of nutrient retention during processing: ascorbic acid in potato dehydration. Journal of Food Science, v.49, n.5, p.1262-1266, 1984b.

MIZRAHI, S.; LABUZA, T.P.; KAREL, M. Feasibility of accelerated tests for browning in dehydrated cabbage. Journal of Food Science, v.35, p.804-807, 1970a.

MIZRAHI, S.; LABUZA, T.P.; KAREL, M. Computer-aided predictions of extent of browning in dehydrated cabbage. Journal of Food Science, v.35, p.799-803, 1970b.

MOO-YOUNG, M. & CHAN, K.W. Non-ideal flow parameters for viscous fluids flowing though stirred tanks. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.49, n.4, p.187-194, 1971.

NICHOLAS, R.C.; PFLUG, I.J. Over and under pasteurization of fresh cucumber peckles. Food Technology, v.16, n.2, p.104-108, 1962.

- NORBACK, J.P. Techniques for optimization of food processes. Food Technology, v.34, n.2, p.86, 1986.
- NOVAIS, A.F. & SARTORI, D.J.M. Secagem de sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados: análise preliminar. Anais do XVI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos - ENEMP, Petrópolis - R.J., Vol. II:543 - 550, 1988.
- NOVAIS, A.F. & SARTORI, D.J.M. Aplicação do leito deslizante e escoamentos cruzados na secagem de sementes de soja. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. I:229 - 240, 1989.
- OLLEY, J.; RATKOWSKY, D.A. Temperature function integration and its importance in the storage and distribution of fresh foods above the freezing point. Food Technology, v.25, n.2, p.66, 1973.
- PEREIRA, I.M.M.; MASSARANI, G. Transferência de calor sólido-fluido em leito deslizante e fluxos cruzados II. Anais do XVI ENEMP, Petrópolis - R.J., Vol. I:149 - 158, 1988.
- PINTO, J.C.C.S. & MASSARANI, G. Análise do desempenho do secador de fluxos cruzados para grãos. Anais do XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia - M.G., 478 - 492, 1987.
- QUAST, D.G.; KAREL, M.; RAND, W.M. Development of a mathematical model for oxidation of potato chips as a function of oxygen pressure, extent of oxidation, and equilibrium relative humidity. Journal of Food Science, v.37, n.5, p.673-678, 1972.
- RAMAKRISHNAN, T.V.; FRANCIS, F.J. Stability of carotenoids in model aqueous systems. Journal of Food Science, 1980.
- RAPUSAS, R.S. & DRISCOLL, R.H. Kinetics of Non-enzymatic Browning in Onion Slices During Isothermal Heating. Journal of Food Engineering, v.24, p.417-429, 1995.

RAPUSAS, R.S. & DRISCOLL, R.H. The thin-layer drying characteristics of white onion slices. Drying Technology, v.13, n.8 & 9, p.1905 - 1931, 1995b.

RESNICK, S.; CHIRIFE, G. Effect of moisture content and temperature on some aspects of nonenzymatic browning in dehydrated apple. Journal of Food Science, v.44, n.2, p.601-605, 1979.

RHA, C. Theory, determination and control of physical properties of food material. Series in Food Material Science. v.1, D. Reidel Publishing company, USA, 1975.

RIEMER, J.; KAREL, M. Shelf-life studies of vitamin C during food storage. Prediction of L-ascorbic acid retention in dehydrated tomato juice. Journal of Food Processing and Preservation, v.1, n.4, p.293-312, 1977.

ROSS, A.F. Deterioration of processed potatoes. Advances in Food Research, v.1, p.257-290, 1948.

SAGUY, I.; MIZRAHI, S.; VILLOTA, R.; KAREL, M. Accelerated method for determining the kinetic model of ascorbic acid loss during dehydration. Journal of Food Science, v.43, n.6, p.1861-1864, 1978a.

SAGUY, I. ; KAREL, M. Modeling of quality deterioration during food processing and storage. Food Technology, fevereiro, p.78, 1980.

SAGUY, I.; KOPELMAN, I.J.; MIZRAHI, S. Thermal kinetic degradation of red beet pigments (betalamic acid). Journal of Agricultural and Food Chemistry, v.26, n.2, p.360-364, 1978b.

SAGUY, I.; KOPELMAN, I.J. ; MIZRAHI, S. Simulation of ascorbic acid stability during heat processing and concentration of grapefruit juice. J. Food Proc. Eng., v.2, p.213, 1979a.

- SAGUY, I.; KOPELMAN, I.J.; MIZRAHI, S. Extent of nonenzymatic browning in grapefruit juice during thermal and concentration processes: Kinetics and prediction. Journal of Food Processing and Preservation, v.2, n.3, p.175-184, 1979b.
- SAGUY, I.; KOPELMAN, I.J.; MIZRAHI, S. Computer-aided prediction of beet pigment (betanine and vulgaxanthin-I) retention during air-drying. Journal of Food Science, v.45, n.2, p.230-235, 1980.
- SALTMARCH, M.; VAGNINI-FERRARI, M. & LABUZA, T.P. Theoretical basis and application of kinetics to browning in spray-dried whey food systems. Progress in Food and Nutrition Science, v.5 , 1981.
- SAMANIEGO-ESGUERRA, C.M.; BOAG, I.F.; ROBERTSON, G.L. Kinetics of quality deterioration in dried onions and green beans as a function of temperature and water activity. Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie, v.24, n.1, p.53-58, 1991.
- SARTORI, D.J.M. Transferência de calor em leite deslizando. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 219 p., 1986.
- SCHEIBER, E. & SARTORI, D.J.M. Influência da umidade do ar na secagem de sementes em leite deslizando e escoamentos cruzados. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos - S.P., Vol. I:241 - 252, 1989.
- SCHEIBER, E. & SARTORI, D.J.M. Influência da umidade do ar na secagem de sementes de soja em leite deslizando e escoamentos cruzados: efeitos imediatos e latentes. Anais do XVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Nova Friburgo - R.J., Vol. I:323 - 334, 1990.
- SINGH, R.P.; LUND, D.B.; BUELOW, F.H. Storage stability of intermediate moisture apples: Kinetics of quality change. Journal of Food Science, v.3, n.48, p.924-927, 1983.
- SOARES, J.B.; NEBRA, S.A.; BARROS CORREIA, P. Grain drying optimization at low temperatures. Drying'96 - Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS'96), v.B, p.1401-1408, 1996.

- STRUMILLO, C. & ADAMIEC, J. Advanced ing of biosynthesis products. Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas - S.P., Vol.I: 17-61, 1991.
- STRUMILLO, C. & KUDRA, T. Drying: Principles, Application and Design Ed: R. Hughes. Gordon and Breach Science Publishers, Londres, 448 p., 1986.
- TELIS, J.R. Secagem de proteína texturizada de soja em leito estático e deslizante. Tese de mestrado, FEA, UNICAMP, 156 pág, 1988.
- TELIS, J.R. & MENEGALLI, F.C. Secagem de proteína texturizada de soja em leito deslizante. Anais do XVI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos (ENEMP), Petrópolis, R.J., Vol.II:579 - 591, 1988.
- THIJSEN, H.A.C. Optimization of process conditions during drying with regard to quality factors. Lebensmittel-Wissenschaft +Technologie, v.12, n.6, p. 308-317, 1979.
- VILLOTA, R. & KAREL, M. Prediction of ascorbic acid retention during drying - I. Moisture and temperature distribution in a model system. Journal of Food Processing and Preservation, v.4, n.1-2, p.111-134, 1980a.
- VILLOTA, R. & KAREL, M. Prediction of ascorbic acid retention during drying - II. Simulation of retention in a model system. Journal of Food Processing and Preservation, v.4, n.3, p.141-159, 1980b.
- WANNINGER Jr., L.A. Mathematical model predicts stability of ascorbic acid in food products. Food Technology, v.26, n.6, p.42-45, 1972.
- WARMBIER, H.C.; SCHNICKELS, R.A.; LABUZA, T.P. Effect of glycerol on nonenzymatic browning in a solid intermediate moisture model food system. Journal of Food Science, v.41, n.3, p.528-531, 1976.

ANEXO A

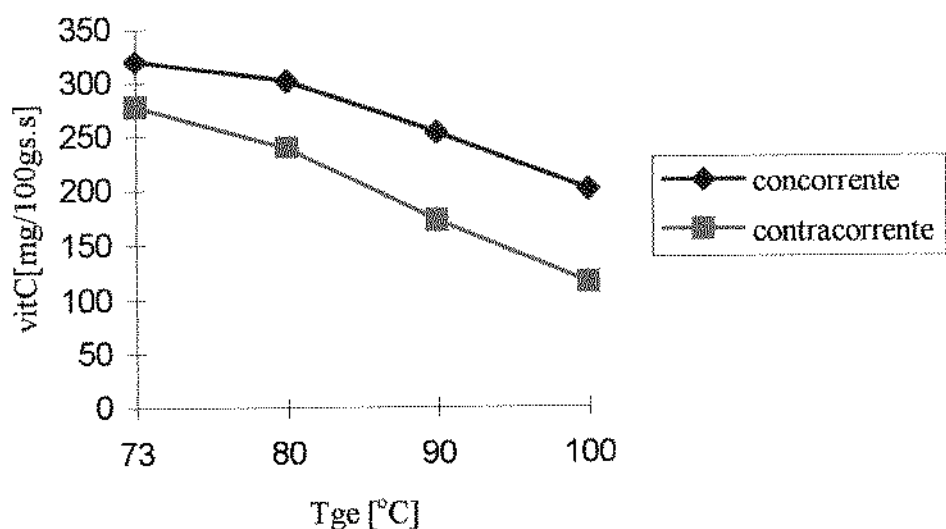


Figura A - Vitamina C (VitC) em função da temperatura de ar de entrada (T_{ge}) no secador de leito deslizante.

$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$ $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$ $R_{rec} = 0,55$ $R_{cc} = R_{ct} = 191$

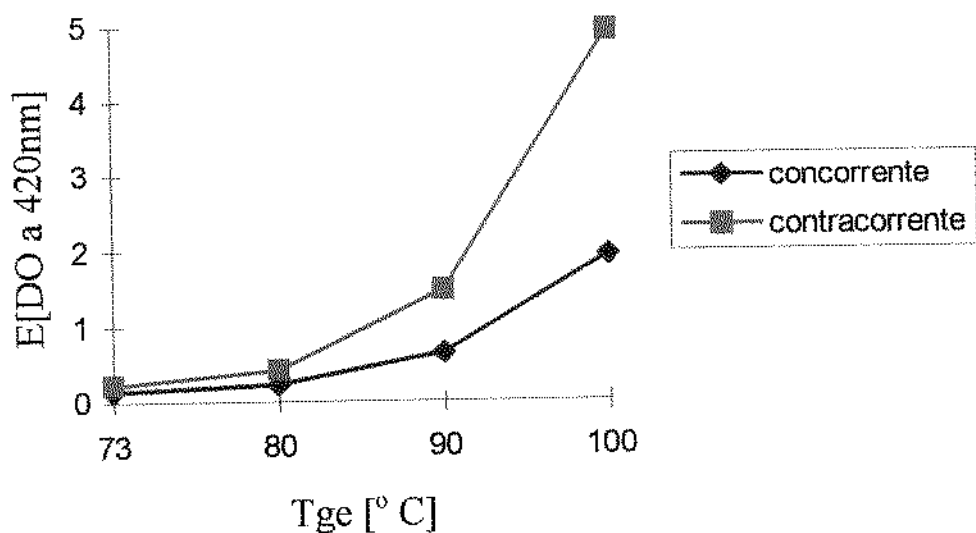


Figura B - Escurecimento não-enzimático (E) em função da temperatura de ar de entrada (T_{ge}) no secador de leito deslizante.

$W_s = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ kg}_{s.s./s}$ $X_f = 0,10 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{s.s.}$ $R_{rec} = 0,55$ $R_{cc} = R_{ct} = 191$

ANEXO B

$$Nu = \frac{h.d_p}{k}$$

$$Pr = \frac{Cp.\mu}{k}$$

$$Re = \frac{\rho.v.d_p}{\mu}$$

onde,

Nu	número de Nusselt;
Pr	número de Prandtl;
Re	número de Reynolds;
h	coeficiente de transferência de calor gás-sólido, kJ/s.m ² . °C;
d _p	diâmetro da partícula, m;
k	condutividade térmica, kJ/s.m. °C;
Cp	calor específico à pressão constante, kJ/kg.K;
μ	viscosidade, kg/m.s;
ρ	densidade, kg/m ³ ;
v	velocidade, m/s.

ANEXO C

Tabela C - Valores do escurecimento não-enzimático (E) da figura IV.23; valor médio e porcentagem de erro médio em cada ponto. É apresentada ainda a porcentagem de erro de cada ponto para o valor de reciclo $R_{rec} = 0,05$ que apresentou pontos mais afastados em relação às demais curvas.

tempo [min.]	E [D.O a 420 nm]					% de erro para $R_{rec} = 0,05$	% de erro médio
	$R_{rec} = 0,05$	$R_{rec} = 0,2$	$R_{rec} = 0,4$	$R_{rec} = 0,6$	valor médio		
0	0,0770	0,0770	0,0770	0,0770	0,0770	0	0
10	0,0939	0,0922	0,0926	0,0921	0,0927	1,3	0,6
20	0,1206	0,1163	0,1173	0,1160	0,1175	2,6	1,3
30	0,1539	0,1462	0,1481	0,1457	0,1485	3,6	2,4
40	0,1934	0,1818	0,1847	0,1810	0,1852	4,4	2,2
50	0,2384	0,2224	0,2263	0,2213	0,2271	5,0	2,5
60	0,2878	0,2671	0,2722	0,2657	0,2732	5,3	2,7
70	0,3404	0,3148	0,3211	0,3130	0,3223	5,6	2,8
80	0,3951	0,3646	0,3721	0,3625	0,3736	5,8	2,9
90	0,4511	0,4157	0,4244	0,4133	0,4261	5,9	2,9
100	0,5077	0,4676	0,4714	0,4648	0,4779	6,2	3,1
110	0,5646	0,5196	0,5307	0,5166	0,5329	3,0	2,2
120	0,6213	0,5717	0,5840	0,5683	0,5863	6,0	3,0
130	0,6778	0,6235	0,6370	0,6199	0,6395	6,0	3,0
140	0,7339	0,6751	0,6897	0,6712	0,6925	6,0	3,0
150	0,7895	0,7263	0,7420	0,7222	0,7450	6,0	3,0
160	0,8448	0,7772	0,7940	0,7728	0,7972	6,0	3,0
170	0,8995	0,8275	0,8455	0,8230	0,8489	6,0	3,0
180	0,9533	0,8772	0,8963	0,8725	0,8998	6,0	3,0
190	1,0064	0,9262	0,9463	0,9213	0,9500	6,0	3,0
200	1,0328	0,9748	0,9958	0,9694	0,9932	4,0	2,7