

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE SECADORES CONVECTIVOS DE
GRÃOS: DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Gracielle Johann

Eng.^a Química, M.Sc., 2008

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Co-orientador: Prof. Dr. Edson Antonio da Silva

Tese de Doutorado submetida à Universidade Estadual de Maringá, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química, Área de Desenvolvimento de Processos.

Maringá – PR – Brasil

Julho de 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Campus Regional de Cianorte - UEM, Cianorte – PR, Brasil)

J65m Johann, Gracielle
Modelagem, simulação e otimização de secadores conectivos de grãos: determinação da eficiência energética / Gracielle Johann. -- Maringá, 2016. 147 f.: col. figs. tabs.

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira.
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Antonio da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, 2016.

1. Secador de grãos. 2. Convecção forçada. 3. Modelagem e otimização. I. Pereira, Nehemias Curvelo, orient. II. Silva, Edson Antonio da, orient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 22.ed. 660.2842

MRP-003514

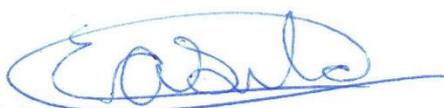
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Gracielle Johann perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 14 de julho de 2016.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Edson Antônio da Silva
Coorientador



Prof. Dr. Ivo Neitzel
Membro



Profª Drª Maraísa Lopes de Menezes
Membro



Prof. Dr. Esdras Penêdo de Carvalho
Membro



Prof. Dr. Marcelo Fernandes Vieira
Membro

Agradeço ao meus mestres Edson e Nehemias, pelos ensinamentos, exemplo, paciência e confiança.

O professor é o indivíduo vocacionado a tirar outro indivíduo das trevas da ignorância, da escuridão, para as luzes do conhecimento, dignificando-o como pessoa que pensa e existe.

No país que virou as costas para a educação e que faz apologia ao hedonismo inconsequente, através de tantos expedientes alienantes, reverencio o verdadeiro herói nacional, que enfrenta todas as intempéries para exercer seu “múnus” com altivez de caráter e senso sacerdotal: o professor.

Juiz Eliezer Siqueira de Sousa Junior, Sergipe-PE

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE SECADORES CONVECTIVOS DE GRÃOS: DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

AUTORA: GRACIELLE JOHANN

ORIENTADOR: PROF. Dr. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA

CO-ORIENTADOR: PROF. Dr. EDSON ANTONIO DA SILVA

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, Bloco E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, defendida em 14 de Julho de 2016. 147 p.

RESUMO

O agronegócio brasileiro é uma das mais importantes fontes geradoras de riquezas para o Brasil, de modo que o país apresenta grande potencial de produção agrícola. Este, por sua vez, vem crescendo significativamente nas últimas décadas. No entanto, esse bom desempenho produtivo não é acompanhado por melhorias nas atividades de pós colheita, como na secagem, no beneficiamento e, principalmente, no armazenamento de grãos. A função da armazenagem dos produtos agrícolas é garantir a oferta contínua dessa produção nos centros consumidores. Dessa forma, a prática de armazenamento e as operações associadas, tais como limpeza, secagem e tratamentos profiláticos dos grãos, se inserem num contexto de planejamento estratégico, fundamental para garantir a estabilidade social e econômica de qualquer país. A análise teórica e a modelagem de secadores de grãos são atividades complexas, devido ao número de fatores envolvidos. A obtenção de modelos fenomenológicos que descrevam o processo de secagem é de grande interesse, uma vez que podem ser utilizados para predição do tempo de secagem, quando esta é conduzida em diferentes condições de processamento. Já a avaliação do consumo de energia na secagem, objetiva averiguar as condições de secagem que levem ao menor consumo energético, sempre garantindo a manutenção da qualidade final do produto e o menor custo de processamento. Assim, o presente trabalho propôs o estudo numérico do processo de secagem de grãos de uva, variedade Cabernet Sauvignon, e de crambe, abrangendo a modelagem, simulação e otimização de secadores em convecção forçada. Foi estudada numericamente a secagem em camada fina, com parâmetros distribuídos, de grãos de uva, e testadas duas taxas de secagem. Para o emprego da

primeira taxa de secagem, foram estimados os coeficientes difusividade mássica efetiva e constante de secagem. Já, para a segunda taxa de secagem, foram ajustados os valores do coeficiente de difusividade mássica efetiva e do coeficiente de transferência convectiva de massa. Por fim, foi testada a condição de contorno de equilíbrio na superfície dos grãos. O modelo que melhor se adequou aos dados experimentais foi aquele em que foram estimados o coeficiente de difusividade mássica efetiva e o coeficiente de transferência convectiva de massa. De posse desses valores, foi provada a equivalência entre os resultados obtidos empregando o modelo de parâmetros distribuídos e o de parâmetros concentrados. Para tal, empregaram-se os valores da difusividade mássica efetiva e do coeficiente de transferência convectiva de massa, obtidos no estudo de secagem de grãos de uva em camada fina com parâmetros distribuídos, no modelo de leito profundo e de parâmetros concentrados, com dupla resistência à transferência de massa. Foi estudada a otimização energética do processo de secagem de grãos de uva e de crambe em leito fixo, sem e com a recirculação do ar de exaustão do secador convectivo. O comportamento da eficiência energética, definida como sendo a razão entre a quantidade de energia empregada na remoção da umidade, pela energia requerida para aquecer o ar de secagem, da temperatura ambiente até a temperatura de operação do secador, foi similar para ambos os grãos. As simulações foram conduzidas até que o leito de grãos atingisse 13% de umidade média, e conjunto de restrições impostas ao processo foi $50^{\circ}\text{C} \leq T_{G_{feed}} \leq 80^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s}$, $0\% \leq q \leq 100\%$. A maior eficiência energética, desconsiderando o reciclo do ar de secagem, foi obtida em 50°C e 1 m/s . Essas foram as condições mais amenas de secagem impostas pelo conjunto de restrições considerado. Para os grãos de uva, a eficiência máxima foi de 2,27% e para os grãos de crambe 3,06%. O consumo específico de energia foi tão menor quanto menor foi o fluxo de ar no secador. Para o caso dos grãos de uva, a eficiência energética, gerada pelo reaproveitamento do ar de exaustão foi de 12,07%, e para os grãos de crambe 13,26%, ambos para o secador operando a 80°C e 1 m/s , e 99 e 97% de razão de recirculação, respectivamente. Assim, concluiu-se que o emprego de menores vazões de ar de secagem são recomendadas, para a secagem convectiva de ambos os grãos, tanto em secadores convencionais, quanto naqueles operados com recirculação do ar de saída do leito. Já, também para ambos os grãos, quando o secador foi operado de forma convencional, sem reaproveitamento do ar de exaustão, maiores eficiências foram alcançadas com menores temperaturas. Entretanto, quando o equipamento foi provido de recirculação do ar de exaustão, quanto maior foi a temperatura de operação do processo, maior foi a eficiência.

Palavras-chave: Secador de grãos. Convecção forçada. Modelagem e otimização.

**MODELING, SIMULATION AND OPTIMIZATION OF CONVECTIVE GRAIN
DRYERS: DETERMINATION OF ENERGETIC EFFICIENCY**

AUTHOR: GRACIELLE JOHANN

SUPERVISOR: PROF. Dr. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA

CO-SUPERVISOR: PROF. Dr. EDSON ANTONIO DA SILVA

Ph.D. Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 - 09; CEP: 87020-900 - Maringá - PR, Brazil, defended on July 14, 2016, 147 p.

ABSTRACT

Brazilian agribusiness is one of the most important sources of riches for Brazil, so that the country has a great potential for agricultural production. This, in turn, has increased significantly in recent decades, with a view to inclusion of new production technologies. However, this good productive performance is not accompanied by improvements in post-harvest activities, such as drying, processing, and especially in grain storage. The function of the storage of agricultural products is to ensure the continuous supply of this production in the consumer centers. Thus, the practice of storage and the associated operations, such as cleaning, drying and prophylactic treatments of grains, are part of a strategic planning context, essential for ensuring social and economic stability of any country. Theoretical analysis and modeling grain dryers activities are complex due to the number of factors involved. Obtaining phenomenological models that describe the drying process is of great interest, since they can be used to predict the drying time, when it is carried out at different processing conditions. Since the evaluation of the energy consumption in drying, objective look into the drying conditions that lead to lower energy consumption, where for maintaining the quality of the final product and the lowest processing cost. Thus, this thesis proposes the numerical study of grain drying processes of grapes, Cabernet Sauvignon, and crambe, including modeling, simulation and optimization of dryers in forced convection. It was studied numerically the thin layer drying of grape grains, with distributed parameters, and tested two drying rates. For the employment of the first drying rate, the coefficients effective mass diffusivity and drying constant were estimated. Since, for the second drying rate were adjusted

values of the effective mass diffusivity coefficient and the convective mass transfer coefficient. Finally, we tested the equilibrium boundary condition on the surface of the grains. The model that best suited to the experimental data was one in which were estimated the coefficient of effective mass diffusivity and the mass convective transfer coefficient. With these values, it was proved the equivalence of the results obtained using the model of distributed parameters and the concentrated parameters. To this end, it was employed the values of effective mass diffusivity and convective mass transfer coefficient, obtained in thin layer drying study of grape grain with distributed parameters, in the deep bed and lumped parameters model, with double resistance to mass transfer. Energy optimization of the grape and crambe grains drying process in fixed bed, with and without recirculation of exhaust air of the convective dryer, was studied. The behavior of the energy efficiency, defined as the ratio between the amount of energy used in the removal of moisture, to the energy required to heat the drying air, from ambient to the dryer operating temperature, was similar for both grains. The simulations were conducted until the bed of grains reached 13% of average humidity, and set restrictions on the process was $50^{\circ}\text{C} \leq T_{G_{\text{feed}}} \leq 80^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s}$, $0\% \leq q \leq 100\%$. The increased energy efficiency, disregarding the recycling of the drying air, was obtained at 50°C and 1 m/s . These were milder drying conditions imposed by the set of constraints considered. For the grape grains, maximum efficiency was 2,27% and for the crambe grain 3,06%. The specific energy consumption was lower as was the lower the air flow in the dryer. In the case of grape grains, energy efficiency, generated by reusing the exhaust air was 12,07% and crambe grain 13,26%, both for the dryer operating at 80°C and 1 m/s , and 99 and 97% recirculation ratio, respectively. Thus, it was concluded that the use of lower drying air flow are recommended for convective drying of grains both in conventional dryers, as those operated with recirculation of the bed air outlet. Since also for both grains, when the dryer was operated conventionally without exhaust air recycling, greater efficiencies have been achieved at lower temperatures. However, when the device was provided with recirculation of exhaust air, the higher the operating temperature of the process, the higher the efficiency.

Key-words: Grain dryers. Forced convection. Modeling and optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1	Importância dos grãos na economia brasileira	4
2.2	Etapas do processamento de grãos	4
2.3	Processo de secagem	6
2.3.1	Parâmetros do processo de secagem	16
2.3.2	Coeficiente de Transferência de Massa e Calor.....	18
2.4	Secagem de grãos	20
2.4.1	Principais tipos de secadores de grãos em convecção forçada	22
2.5	Modelos Matemáticos de Secagem de Grãos.....	26
2.6	Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem de Grãos em Convecção Forçada	31
2.7	Eficiência energética de secadores	34
2.7.1	Eficiência energética de secadores convectivos com recirculação do ar de exaustão.....	38
2.8	Métodos de otimização de problemas não lineares	41
2.9	Adequação do modelo aos dados experimentais	49
2.10	Secagem de grãos de uva.....	50
2.11	Secagem de grãos de crambe.....	52
2.12	Conclusões da Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura	52
3.	SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS EM CAMADA FINA	54
3.1	Modelagem da Secagem de Grãos em Camada Fina	54
3.2	Propriedades Termo Físicas necessárias para a Solução dos Modelos de Secagem Convectiva em Camada Fina.....	58
3.3	Procedimento de Resolução do Modelo e Estimativa de Parâmetros	59
3.4	Coeficiente de Transferência de Calor e Eficiência da Transferência de Massa	61
3.5	Estudo da Secagem de Grãos de Uva em Camada Fina, Estimando os Coeficientes de Difusividade Mássica Efetiva e a Constante da Equação de Taxa de Secagem.....	61
3.6	Estudo da Secagem de Grãos de Uva em Camada Fina, Estimando a Difusividade Mássica Efetiva e o Coeficiente de Transferência Convectiva de Massa	70
3.6.1	Estudo II.I: Condição de equilíbrio na superfície do grão	71
3.6.2	Estudo II.II: Condição convectiva na superfície do grão.....	72
3.6.3	Comparação entre os resultados obtidos pelos Estudos II.I e II.II.....	72
3.7	Escolha do Melhor Modelo para Descrever a Secagem de Grãos em Camada Fina	86
3.8	Equivalência Entre o Modelo de Parâmetros Concentrados e Distribuídos Para Descrever a Secagem em Camada Fina	86
3.9	Conclusões Parciais	94
4	SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS EM LEITO PROFUNDO	96
4.1	Modelagem da Secagem de Grãos em Leito Profundo	96
4.2	Validação do Modelo e Técnica de Resolução	98
4.3	Conclusões Parciais	104
5	OTIMIZAÇÃO DE SECADOR CONVECTIVO DE GRÃOS EM LEITO PROFUNDO ...	105
5.1.	Otimização da Secagem de Grãos de Uva em Leito Profundo	107
5.2.	Otimização da Secagem de Grãos de Crambe em Leito Profundo Sem e Com Recirculação do Ar de Exaustão	116
5.3.	Conclusões Parciais	121
6	CONCLUSÕES FINAIS	123
7	REFERÊNCIAS	125

APÊNDICE A – Trabalhos publicados e apresentados	143
ANEXO A – Dedução da relação entre a difusividade mássica efetiva e o coeficiente interno de transferência de massa	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma convencional para uma unidade de beneficiamento de armazenagem de grãos, adaptado de Bortolaia (2011).....	5
Figura 2.2: Movimento da umidade durante a secagem, adaptada de Foust et al. (1982).....	10
Figura 2.3: Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, adaptada de Fellows (2006).....	12
Figura 2.4: Curva da taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, adaptada de Treybal (1980).....	12
Figura 2.5: Esquema dos processos de transferência de calor e massa durante a secagem, adaptada de Geankoplis (1993).....	18
Figura 2.6: Esquema dos quatro tipos básicos de secadores convectivos de grãos, adaptado de Laws e Parry (1983).....	24
Figura 2.7: Taxonomia das técnicas de otimização, adaptado de Martínez (2013).....	43
Figura 3.1: Sensibilidade do modelo ao parâmetro D_{eff}	63
Figura 3.2: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva, conduzida a 1,6 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1).....	64
Figura 3.3: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva, conduzida a 1,2 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1).....	64
Figura 3.4: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva, conduzida a 0,8 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1).....	65
Figura 3.5: Perfil de umidade dos grãos em diferentes tempos de secagem, para o ar de secagem a 1,6 m/s e 60 °C, conduzida com a primeira equação de taxa, Equação (3.1).....	67
Figura 3.6: Temperatura superficial atingida pelos grãos para o ar de secagem a (a) 0,8 m/s e 60 °C; (b) 0,8 m/s e 70 °C; e (c) 1,2 m/s e 80 °C.....	68
Figura 3.7: Perfil de temperatura dos grãos.....	69
Figura 3.8: Condição de equilíbrio na superfície.....	71
Figura 3.9: Condição convectiva na superfície.....	72
Figura 3.10: Sensibilidade do modelo II.I ao parâmetro D_{eff}	75
Figura 3.11: Sensibilidade do modelo II.II aos parâmetros D_{eff} e k_F	75
Figura 3.12: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,6 m/s e considerando condição de equilíbrio....	79
Figura 3.13: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,2 m/s e considerando condição de equilíbrio....	79
Figura 3.14: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 0,8 m/s e considerando condição de equilíbrio....	80
Figura 3.15: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,6 m/s e considerando condição convectiva.....	80
Figura 3.16: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,2 m/s e considerando condição convectiva.....	81
Figura 3.17: Curvas de secagem convectiva em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 0,8 m/s e considerando condição convectiva.....	81
Figura 3.18: Comparação entre os resultados experimentais e os calculados pelos dois modelos, para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s.....	82
Figura 3.19: Umidades média e interfacial dos grãos obtidas pelos modelos II.I e II.II.....	83
Figura 3.20: Temperaturas média e interfacial dos grãos obtidas pelos modelos II.I e II.II.....	84
Figura 3.21: Comparação entre a eficiência média da transferência de massa para a secagem conduzida a 0,8 m/s, para o modelo II.II.....	85
Figura 3.22: Perfil da eficiência da transferência de massa para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s, para o modelo II.II.....	85

Figura 3.23: Representação do mecanismo de secagem envolvendo dupla resistência à transferência de massa.....	87
Figura 3.24: Comparação entre os dados experimentais, Modelo de Glueckauf e Coates (1947), Eq. (3.27), e Eq. (3.28), para a secagem conduzida a 60 °C e 1,6 m/s.....	90
Figura 3.25: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 60 °C.....	92
Figura 3.26: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 70 °C.....	93
Figura 3.27: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 80 °C.....	94
Figura 4.1: Representação simplificada de um secador de grãos em leito fixo.....	96
Figura 4.2: Discretização do leito de grãos.....	100
Figura 4.3: Cinética de secagem de grãos de crambe em leito fixo, conduzida a 1,5; 2,5 e 2,0 m/s.....	103
Figura 5.1: Algoritmo de resolução otimização do processo de secagem.....	106
Figura 5.2: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de uva sem reciclo.....	108
Figura 5.3: Esquema do secador de grãos em leito fixo.....	110
Figura 5.4: Desenho esquemático de um processo de secagem de grãos em leito fixo com recirculação do ar de secagem.....	111
Figura 5.5: Detalhe da recirculação nos compartimentos do secador.....	112
Figura 5.6: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de uva com reciclo, para 80 °C e 1 m/s.....	113
Figura 5.7: Cinéticas de mistura do ar de secagem e de aquecimento do leito de grãos de uva ao longo da operação com recirculação.....	114
Figura 5.8: Superfícies geradas pela otimização energética da secagem de grãos de uva com recirculação do ar de exaustão.....	115
Figura 5.9: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de crambe sem reciclo.....	117
Figura 5.10: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de crambe com reciclo, para 80 °C e 1 m/s.....	118
Figura 5.11: Superfícies geradas pela otimização energética da secagem de grãos de crambe com recirculação do ar de exaustão.....	118
Figura 5.12: Cinéticas de mistura do ar de secagem e de aquecimento do leito de grãos de crambe ao longo da operação com recirculação.....	119
Figura 5.13: Valores do coeficiente interno de transferência de massa para os grãos de uva e de crambe.....	120
Figura 5.14: Isotermas de dessorção dos grãos de uva e de crambe, a 80 °C.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades termo físicas dos grãos de uva.....	58
Tabela 3.2: Valores de k_I e D_{eff} estimados pelo modelo aplicando a primeira equação de taxa, Ψ_I	62
Tabela 3.3: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva em camada fina, nas simulações conduzidas com a segunda equação de taxa, Equação (3.1)	66
Tabela 3.4: Coeficiente de difusividade mássica efetiva (modelos II.I e II.II) e coeficiente convectivo de transferência de massa ajustados.....	73
Tabela 3.5: Coeficientes convectivos de transferência de calor calculados pela relação de Lewis no modelo II.II.....	76
Tabela 3.6: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva para o modelo II.I.....	77
Tabela 3.7: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva para o modelo II.II....	77
Tabela 3.8: Resumo dos estudos realizados para camada fina.....	86
Tabela 3.9: Valores estimados para o coeficiente ajustável β	91
Tabela 4.1: Composição centesimal dos grãos de crambe, adaptado de Butarelli (2016)	99
Tabela 4.2: Propriedades termo físicas dos grãos de crambe e do leito de secagem	100
Tabela 4.3: Análise estatística dos resultados simulados	102
Tabela 5.1: Condições operacionais de secagem empregadas nas simulações em leito profundo	105
Tabela 5.2: Resultados da análise energética da secagem de grãos de uva em leito profundo	107
Tabela 5.3: Resultados da análise energética da secagem de grãos de uva em leito profundo com recirculação do ar de exaustão.....	112
Tabela 5.4: Resultados da análise energética da secagem de grãos de crambe em leito profundo	116
Tabela 5.5: Resultados da análise energética da secagem de grãos de crambe em leito profundo com recirculação do ar de exaustão.....	117

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de contato (m^2)
AIC	Critério de informação de Akaike
a	Área específica (m^{-1})
a_w	Atividade da água
b	Parâmetro do modelo de isoterma
Bi	Número de Biot
b.s.	Base seca (kg/kg)
b.u.	Base úmida (kg/kg)
CDOS	Método da direção conjugada com deslocamento ortogonal
c_i	Coefficientes da Equação (3.10)
$c_R(x)$	Restrições de igualdade e desigualdade
cp_G	Calor específico do ar ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
CP_G	Capacidade calorífica a pressão constante do gás ($kJ/^\circ C$)
$CP_{S,W}$	Capacidade calorífica a pressão constante da água no sólido ($kJ/^\circ C$)
CP_V	Capacidade calorífica a pressão constante do vapor no sólido ($kJ/^\circ C$)
$cp_{W,G}$	Calor específico da água no gás ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
cp_w	Calor específico da água pura ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
D	Coefficiente de difusão do líquido (m^2/min)
d	Parâmetro do modelo de isoterma
de	Diâmetro equivalente (m)
D_{eff}	Coefficiente de difusividade mássica efetiva (m^2/min)
D_M	Difusividade mássica (m^2/min)
D_T	Difusividade térmica (m^2/min)
E	Erro relativo
EDP	Equação diferencial parcial
E_D	Energia consumida para dessorver a umidade (kJ/min)
E_Q	Energia para aquecer o ar de secagem (kJ/min)
$f(x)$	Função objetivo
h	Limites de projeto
h_C	Coefficiente de transferência de calor convectivo ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
H_G	Entalpia do ar de secagem (kJ/kg)
H_H	Entalpia do ar na entrada do secador (kJ/kg)
H_M	Entalpia de mistura do ar de secagem (kJ/kg)
H_{MH}	Entalpia de mistura do ar de secagem aquecido (kJ/kg)
H_R	Entalpia de reciclo do ar de secagem (kJ/kg)
H_0	Entalpia do ar ambiente (kJ/kg)
ICRS/DS	Método estocástico de pesquisa aleatória e controle integrado para sistemas dinâmicos
j	Limites de projeto
J	Função objetivo
k	Número de parâmetros do modelo
k_F	Coefficiente de transferência de massa convectivo ($kg/m^2 min$)
k_G	Condutividade térmica do ar de secagem ($W/m \text{ } ^\circ C$)
k_I	Coefficiente da equação da taxa de secagem ($kg/m^2 min$)
k_S	Coefficiente interno de transferência de massa (min^{-1})
L	Interface do material com o ar e secagem (m)
l	Comprimento grão (m)

LDF	<i>Linear Driving Force</i>
Le	Número de Lewis
MSU	Michigan State University
m_0	Vazão de entrada de ar de secagem (kg/min)
\dot{m}_G	Vazão de massa de ar por unidade de área (kg/min m ²)
m_M	Vazão de mistura de ar de secagem (kg/s)
m_R	Vazão de reciclo de ar de secagem (kg/s)
m_s	Vazão de saída do ar de secagem (kg/s)
m_{SS}	Massa dos grãos secos (kg)
N	Taxa de evaporação (kg/min)
nexp	Número de dados experimentais
Nu	Números de Nusselt
OBF	Função objetivo
$p_i(x)$	restrições de igualdade
PIB	Produto Interno Bruto
P	Pressão total (Pa)
P_P	Pressão parcial (Pa)
Pr	Número de Prandtl
P_V	Pressão de vapor (Pa)
q	Razão de reciclo (%)
$q_i(x)$	Restrições de desigualdade
Q	Calor adicionado ao ar de secagem (kJ)
\dot{Q}_{COND}	Taxa de calor por condução (W)
\dot{Q}_{CONV}	Taxa de calor por convecção (W)
r	Coordenada radial (m)
R	Raio (m)
R ²	Coefficiente de determinação
Re	Número de Reynolds
RME	Erro médio relativo
RSM	Superfície de resposta
s	Parâmetro das Equações 4.15 e 4.16
Sc	Número de Schmidt
Sh	Número de Sherwood
SQ	Soma de quadrados dos desvios
t	Tempo (min)
T_{G_0}	Temperatura do ar ambiente (°C)
$T_{G_{feed}}$	Temperatura de alimentação do ar de secagem (°C)
T_{GH}	Temperatura do ar na entrada do secador (°C)
T_{GM}	Temperatura de mistura do ar de secagem (°C)
T_{GR}	Temperatura de reciclo do ar de secagem (°C)
T_{GS}	Temperatura do ar na saída do secador (°C)
t_{final}	Tempo total de secagem (min)
T_G	Temperatura do ar de secagem (°C)
T_S	Temperatura do sólido (°C)
U	Coefficiente global de transferência de calor (W/m ² °C)
UR	Umidade relativa (%)
u(t)	Variáveis manipuláveis
v	Velocidade do ar medida na entrada do secador e considerada constante (m/s)
V_G	Volume de ar de secagem (m ³)

$X_{b.s.}$	Umidade em base seca (kg/kg)
$X_{b.u.}$	Umidade em base úmida (kg/kg)
X_C	Umidade crítica (kg/kg)
X_E	Teor de umidade de equilíbrio (b.s.)
x_j	Fração mássica de cada componente puro
x_{vj}	Fração volumétrica de cada componente puro
X	Teor de umidade do sólido (b.s.)
\bar{X}	Teor de umidade médio (b.s.)
X_{CAL}	Teor de umidade calculada (b.s.)
X_{EXP}	Teor de umidade experimental (b.s.)
Y	Teor de umidade no seio do gás (b.s.)
Y_M	Teor de umidade de mistura do ar de secagem (b.s.)
Y_R	Teor de umidade de reciclo do ar de secagem (b.s.)
Y_S	Teor de umidade do ar na saída do secador (b.s.)
Y_0	Umidade do ar ambiente (b.s.)
Y_{feed}	Umidade de alimentação do ar de secagem (b.s.)
Y^*	Teor de umidade de equilíbrio do gás (b.s.)
Y_{SAT}	Teor de umidade de saturação do gás (b.s.)
z	Coordenada espacial (m)
α_S	Difusividade térmica dos grãos (m^2/min)
ΔT	Variação de temperatura ($^{\circ}C$)
β	Coefficiente ajustável da Eq. (3.28)
ε	Porosidade do leito
η	Eficiência energética
η_C	Eficiência energética cumulativa da secagem
η_I	Eficiência energética instantânea da secagem
ψ	Taxa de secagem (kg/min)
w	Largura grão (m)
δ	Espessura do grão (m)
ε_m	Eficiência da transferência de massa
κ_S	Conductividade térmica do grão ($W/m\ ^{\circ}C$)
λ_0	Calor de vaporização da água na temperatura de $0\ ^{\circ}C$ (kJ/kg)
λ_D	Calor de dessorção (kJ/kg)
λ_V	Calor de vaporização (kJ/kg)
μ_G	Viscosidade do ar de secagem (kg m/min)
ρ_G	Massa específica do ar de secagem (kg/m^3)
ρ_S	Massa específica do grão (kg/m^3)

1 INTRODUÇÃO

Segundo Dufour (2006) e Daghigh et al. (2010), a secagem possivelmente é uma das mais antigas operações unitárias da Engenharia Química, sendo seu objetivo retirar a máxima quantidade de água com o mínimo de consumo energético possível. Para Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) a secagem, quando comparada com as demais etapas de produção e comercialização, é a fase em que ocorre o maior consumo de energia, podendo chegar a 60% de toda a cadeia produtiva.

Nesse sentido, mais de 70 milhões de toneladas de água são removidas de grãos anualmente, para garantir o armazenamento adequado dos mesmos (RAGHAVAN; SOSLE, 2007). Isto equivale a evaporar um cubo de água com mais de 400 m de aresta. O consumo de energia na secagem de grãos é essencialmente empregado em três processos: aquecimento do grão, evaporação da água e aquecimento do ar de secagem. Dessa forma, para que o processo seja eficiente, é necessário recuperar a energia de um desses três processos. Entretanto, o desenvolvimento dessas alternativas tem levado muitas décadas. Assim, a otimização de secadores continua a ser essencial na engenharia e na agroindústria.

Por sua vez, de acordo com Karim e Hawlader (2005), os atuais modelos matemáticos desenvolvidos para a modelagem da secagem de materiais biológicos, como os grãos, são simplistas e, portanto, se afastam significativamente dos processos reais, ou, por outro lado, muito complexos para terem qualquer aplicação prática. Dessa forma, com a adequada modelagem do sistema de secagem de grãos, que tanto satisfaça a essencial necessidade de representar significativamente a distribuição de temperatura e umidade durante a secagem, e, também, ser de fácil aplicabilidade, é possível propor sistemas de otimização, minimizando os gastos com energia, removendo a maior quantidade de água possível e necessária, de modo a preservar o produto e maximizar os lucros.

De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro teve, no ano de 2015, participação de 23% devidos às *commodities* agrícolas (CNA, 2016), como grãos. Porém, esses produtos biológicos estão sujeitos às diversas intempéries durante o armazenamento, como a deterioração devido aos microrganismos naturalmente presentes nos grãos, que, são vulneráveis à invasão microbiana desde sua concepção até a germinação. De acordo com Milman (2002), a política brasileira de abertura de mercado é responsável por uma forte concorrência para os grãos brasileiros, que necessitam de maior produtividade e qualidade de produto, para competir com o originário do exterior. Esse fato,

somado ao mercado cada vez mais exigente, obriga os setores de produção e de pesquisa serem cada vez mais eficientes.

Assim, o presente trabalho propõe o estudo numérico do processo de secagem de grãos de uva e de crambe, abrangendo a modelagem, simulação e otimização de secadores em convecção forçada, sem e com recirculação do ar de exaustão. Para que este objetivo geral fosse alcançado, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- modelar matematicamente, em regime transiente, secadores de grãos em camada fina e camada profunda, submetidos à convecção forçada;
- desenvolver e implementar um código computacional com as equações que governam os problemas, condições iniciais e de contorno, visando à solução dos modelos propostos;
- resolver as equações obtidas nos balanços fenomenológicos, a partir do Método das Linhas;
- avaliar a aplicação de diferentes taxas de secagem e condições de contorno na resolução das equações para camada fina e parâmetros distribuídos;
- obter os parâmetros cinéticos a partir da resolução do modelo em camada fina e parâmetros concentrados;
- avaliar, por meio das simulações numéricas, o efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem no teor de umidade e na temperatura nos grãos, durante o processo de secagem;
- comparar os resultados obtidos pelo modelo de secagem em camada fina e parâmetros distribuídos com dados experimentais da literatura;
- verificar a equivalência entre os resultados obtidos nas simulações de secagem, empregando o modelo de parâmetros distribuídos e o de parâmetros concentrados;
- validar o modelo de camada profunda e parâmetros concentrados, por comparação com dados experimentais da literatura;
- determinar equação matemática que avalie a eficiência energética de secadores convectivos de grãos;
- aplicar estratégias de otimização, variando as condições de operação dos secadores, a fim de encontrar as condições em que se obtém um teor de umidade ideal dos grãos com maior eficiência energética;
- avaliar o efeito da recirculação do ar de exaustão do secador na eficiência energética de secadores de camada profunda submetidos a convecção forçada.

A tese foi estruturada como segue.

1. Introdução, em que foi apresentada a problemática de forma sucinta.
2. Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura, que contemplou as principais informações necessárias para o desenvolvimento do estudo, e a descrição das metodologias e técnicas empregadas.
3. Secagem Convectiva de Grãos em Camada Fina, em que foi estudada numericamente a secagem de grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, em camada fina e parâmetros distribuídos, sendo testada a adequação de uma taxa de secagem e duas condições de contorno na descrição do processo. Foi feito, ainda, o estudo da equivalência entre os resultados obtidos nas simulações de secagem de grãos de uva, empregando o modelo de parâmetros distribuídos e o de parâmetros concentrados.
4. Secagem Convectiva de Grãos em Leito Profundo, que compreendeu a propositura e validação do modelo de secagem de grãos de crambe em leito profundo e parâmetros concentrados.
5. Otimização de Secador de Grãos em Leito Profundo, em que foram manipulados os parâmetros velocidade, temperatura e razão de recirculação do ar de secagem, de modo a se determinar as condições de secagem, tanto de grãos de uva, quanto de grãos de crambe, que conduziram a maior eficiência energética.
6. Conclusões Finais.
7. Referências.

No Apêndice A são elencados os trabalhos publicados e apresentados ao longo do desenvolvimento da presente tese.

No Anexo A é apresentada a dedução da relação entre a difusividade mássica efetiva e o coeficiente interno de transferência de massa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem por objetivo abordar os tópicos mais relevantes no desenvolvimento do presente trabalho: a importância dos grãos na economia brasileira; as etapas de processamento dos grãos; o processo de secagem de grãos; os principais tipos de secadores de grãos em convecção forçada; e os modelos fenomenológicos de secagem de grãos.

2.1 Importância dos grãos na economia brasileira

Para Martini, Prichoa e Menegat (2009), o agronegócio brasileiro é responsável por cerca de um terço de tudo que é produzido no país e é o setor mais importante da economia brasileira. Por definição, de acordo com Batalha e Silva (1995), agronegócio ou *agro business*, significa: “o conjunto das empresas produtoras de insumos, propriedades rurais, industriais de processamento, distribuição e comércio nacional e internacional de produtos agropecuários in natura ou processados”.

De acordo com Heim (2013), a palavra agronegócio compreende um universo que engloba tanto as atividades comerciais ligadas à agricultura quanto à pecuária, bem como toda a cadeia de processos necessária para viabilizar a produção. O que se deve aclarar neste momento é que, sempre que este trabalho utilizar as expressões agroempresa, agroindústria ou agropecuária, assim o faz como sinônimo de agronegócio, ou seja, abordando não apenas a efetiva produção agrícola e criação pecuária, mas toda a complexidade de operações que estas atividades envolvem.

O Brasil é um país que tem um grande potencial na produção agrícola, já que em seu território existe a possibilidade de cultivo das grandes culturas do mundo (soja, milho, algodão, cana-de-açúcar, arroz e trigo). É um dos poucos países que ainda tem fronteira agrícola, contém também uma vasta área de pastagens degradadas, áreas essas que com um pouco de tecnologia podem contribuir significativamente com a produção brasileira.

2.2 Etapas do processamento de grãos

Para Soares (1998), o sistema de armazenagem de um país produtor de grãos, como o Brasil, que representa o fluxo natural do produto, desde a colheita até o consumo, é composto das seguintes categorias: armazenagem ao nível da propriedade (sítios, fazendas e pequenos armazéns); armazenagem coletora (armazéns gerais, cooperativas, indústrias e comércio);

armazenagem intermediária (terminais intermodais); e armazenagem terminal (portos, indústria e comércio).

Bortolaia (2011) elenca o sequenciamento convencional para uma unidade de beneficiamento de armazenagem de grãos, que, conforme o autor, é entendida como as atividades destinadas à guarda e conservação em condições inalteradas de quantidade e qualidade (Figura 2.1).



Figura 2.1: Fluxograma convencional para uma unidade de beneficiamento de armazenagem de grãos, adaptado de Bortolaia (2011)

De acordo com Coelho, Andrade e Finch (1979), o objetivo do armazenamento de grãos é manter as características destes durante um determinado período após a colheita e secagem. Assim, as condições do armazenamento devem manter o poder germinativo no caso de grãos destinados a sementes, as qualidades para a indústria se os grãos são destinados à produção de farinhas ou outro processo tecnológico, e o valor nutritivo se os grãos se destinam à alimentação animal e humana. O armazenamento não melhora a qualidade dos grãos, sendo que os defeitos adquiridos durante a colheita e secagem são mantidos.

A produção agrícola se localiza em regiões distantes dos centros consumidores e em épocas definidas pelas condições atmosféricas favoráveis ao ciclo biológico das culturas. Sendo que a função precípua da armazenagem é garantir a oferta contínua das mesmas nos centros consumidores, normalmente distantes das regiões de cultivo. Dessa forma, a prática de armazenamento e as operações associadas, tais como limpeza, secagem e tratamentos profiláticos dos grãos se inserem num contexto de planejamento estratégico, fundamental para garantir a estabilidade social e econômica de qualquer país.

Segundo Jangam (2011), numerosos produtos alimentares são rotineiramente conservados usando a secagem, incluindo grãos, produtos marinhos, produtos cárneos, bem como, frutas e legumes. Produtos alimentícios crus apresentam uma vasta gama de conteúdo de umidade, tão baixos como 25-35% em grãos, até valores de 90% ou mais em algumas frutas, sendo que a umidade deve ser reduzida para um valor suficientemente baixo de modo a evitar o crescimento microbiano.

De acordo com Weber (2005), os grãos, procedentes da lavoura, depois de colhidos são entregues na unidade de armazenamento e beneficiamento com teores de impurezas e umidade

elevados, sendo submetidos a um processo de limpeza, secagem e armazenamento, para ao final serem beneficiados e consumidos. Para a obtenção de grãos de boa qualidade, a recomendação é o armazenamento de 10 a 13% (b.u.), dependendo das condições de clima e do tempo de armazenamento. Assim, evitam-se as diversas perdas por deterioração que podem ocorrer no campo.

Ainda, conforme Dalpasquale, Sperandio e Silva (2012), a produção, preservação e comercialização de grãos vêm recebendo atenção acadêmica devido ao potencial em fornecer alimentos em qualidade e quantidade. Segundo Çakmak e Yıldız (2009), há uma série de métodos aplicados para a conservação de produtos agrícolas, que aumentam a vida útil e econômica dos mesmos, fornecendo qualidade aos alimentos, sendo esses: a pasteurização, arrefecimento, manutenção de atmosfera modificada, aplicações químicas, raios gama e beta, além da secagem.

2.3 Processo de secagem

O termo secagem é empregado para nomear a operação unitária de remoção de uma fase líquida, geralmente umidade, contida em um material sólido, pela transferência de massa do líquido para uma fase gasosa não saturada (MUJUMDAR, 2006). Já a terminologia desidratação refere-se à remoção de umidade de uma fase gasosa. Porém, em se tratando de alimentos, os termos secagem e desidratação são costumeiramente empregados para descrever a mesma operação.

Em geral, a secagem é empregada na remoção de quantidades relativamente pequenas de água de algum material, já a evaporação refere-se à remoção de quantidades muito grandes de água. Em alguns casos, a água pode ser removida mecanicamente do material sólido, usando prensas, centrífugas e outros métodos, mais baratos que a secagem e a evaporação, devido ao não emprego de meios térmicos para a remoção da água. O conteúdo da umidade do produto final seco varia, uma vez que depende do tipo de produto, sendo a secagem normalmente a etapa final do processamento, antes da embalagem.

A secagem de alimentos envolve simultaneamente a aplicação de calor e a remoção de água, sendo que os fatores que controlam a taxas de secagem podem ser agrupados, de acordo com Fellows (2006), entre:

- aqueles relacionados às condições de processamento;
- os relacionados à natureza do alimento;
- os relacionados ao desenho do secador.

A umidade no grão é a quantidade de moléculas de água que se encontra ligada às diversas partes dele. O teor de umidade que pode ser removido é chamado de teor de umidade livre.

A água está presente no grão de várias formas:

a) água na forma líquida ou de constituição: são moléculas individuais de água ligadas a grupos moleculares da matéria biológica. Só pode ser removida mediante rigorosas condições de temperatura e longo período de tempo;

b) água adsorvida: são grupos de moléculas de água que se aderem sobre as camadas de água precedentes. É a água não solvente, fortemente adsorvida;

c) água na forma líquida sob pressão osmótica: é a água que atua como solvente e retém várias substâncias dissolvidas. É retirada do grão com certa dificuldade;

d) água absorvida: é a água livre mantida fracamente por capilaridade nos poros do grão, esta evapora-se facilmente.

O teor de umidade é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca, já que esta permanece constante durante todo o processo de secagem, ao contrário do volume úmido, que pode variar e o qual não é indicado para expressar o teor de umidade. Desta maneira, o teor de umidade em base seca (b.s.) é expresso como sendo a razão entre a massa de água presente no grão e a massa de matéria seca:

$$X_{b.s.} = \frac{\text{massa de H}_2\text{O}}{\text{massa seca}} \quad (2.1)$$

Em que $X_{b.s.}$ é a umidade em base seca (b.s.).

Por sua vez, o teor de umidade em base úmida (b.u.) é determinado pela razão entre a massa de água e a massa de matéria úmida presente no grão:

$$X_{b.u.} = \frac{\text{massa de H}_2\text{O}}{\text{massa total}} \quad (2.2)$$

Em que $X_{b.u.}$ é a umidade em base úmida (b.u.).

Um conceito importante na teoria da secagem e de umidificação de materiais biológicos é a de conteúdo de umidade de equilíbrio, X_E . Resumidamente, este é o teor de umidade mínimo de um material exposto em um ambiente fixo (ou seja, ar ambiente a temperatura e umidade relativa fixas) ao longo de um período suficientemente de tempo. Pode, ainda, ser definido como o teor de umidade correspondente à pressão de vapor de equilíbrio entre o material e o seu ambiente. Por conseguinte, é um dos fatores que determinam o teor de umidade a qual o material pode ser seco ou umedecido em qualquer ambiente e a taxa à qual ocorre a secagem ou umidificação. Assim, é de grande importância na criação de modelos matemáticos para a simulação da secagem de grãos. Neste contexto, também é empregado na determinação dos calores de adsorção e dessorção (PARRY, 1985).

De acordo com Geankoplis (1993), a secagem ou desidratação de materiais biológicos, especialmente alimentos, é, também, usada como técnica de preservação. Os microrganismos que causam a deterioração dos alimentos não podem crescer e multiplicar-se na ausência de água. Além disso, muitas das enzimas que causam alterações químicas nos materiais biológicos são inativadas na insuficiência de umidade. Os microrganismos são inativados quando o teor de água é reduzido abaixo de 10% em peso. No entanto, em alimentos, é normalmente necessário reduzir o teor abaixo de 5% em peso, para preservar o sabor e o valor nutricional. Os alimentos secos podem ser armazenados durante longos períodos.

Conforme Hall (1980), a secagem, quando ineficiente, é a principal causa da perda de qualidade e deterioração dos grãos durante o armazenamento. De modo que, quando se tem o produto devidamente seco, possibilita-se uma maior potencialidade de armazenamento, prolongamento de vida de prateleira dos grãos.

A conservação pela secagem é um processo preventivo e baseia-se no fato de que o mecanismo metabólico, os microrganismos e as enzimas, necessitam de água para suas atividades. Portanto, a redução da quantidade de água disponível no grão, até níveis seguros para armazenagem, reduz a atividade da água, a velocidade das reações químicas no produto, o desenvolvimento de microrganismos e a intensidade do processo natural de desenvolvimento do grão durante o período de armazenamento.

A atividade da água em um sólido é expressa como a razão entre a pressão parcial de vapor d'água na fase gasosa em equilíbrio com a fase sólida úmida, a uma dada temperatura, e a pressão de vapor d'água saturada a mesma temperatura, sendo, também, uma função da umidade relativa do ambiente, conforme:

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (2.3)$$

Em que a_w é a atividade da água, UR é a umidade relativa (%).

O objetivo principal da secagem é prolongar a vida de prateleira dos alimentos por meio da redução da atividade da água. Isso inibe o crescimento microbiano e a atividade enzimática, mas a temperatura de processamento costuma ser insuficiente para provocar a sua inativação. Portanto, qualquer aumento no teor da umidade durante a estocagem, devido, por exemplo, a uma embalagem defeituosa, poderá resultar em uma rápida deterioração. A redução no peso e volume diminui os custos de transporte e armazenamento. Para alguns tipos de alimentos, a desidratação oferece um produto conveniente para o consumidor ou ingredientes mais facilmente manuseados para os processadores. A secagem causa uma deterioração tanto na qualidade sensorial quanto no

valor nutricional de materiais biológicos, sendo que o projeto e a operação de equipamentos de secagem, objetivam minimizar essas alterações por meio da seleção de condições apropriadas de desidratação para cada alimento em particular. Exemplos de alimentos desidratados de importância comercial são café, leite, passas de uvas e outras frutas, massas, farinhas (inclusive misturas para panificação), feijão, leguminosas, nozes, cereais matinais, chás e temperos.

Quando são empregadas superfícies aquecidas para promover a secagem, pastas fluidas de alimentos são colocadas sobre um tambor de aço aquecido, o calor é conduzido desde a superfície quente, através do alimento, e a umidade é evaporada da superfície exposta. A principal resistência à transferência de calor é a condutividade térmica do alimento. Uma resistência adicional surge se o alimento parcialmente seco se eleva, não ficando mais em contato com a superfície quente, formando, assim, uma barreira de ar entre o alimento e o tambor. É necessário, portanto, conhecer as propriedades reológicas do alimento para determinar a espessura da camada e a forma na qual o alimento será aplicado sobre a superfície aquecida. A equação utilizada para calcular a taxa de secagem é:

$$\dot{Q}_{\text{COND}} = UA\Delta T \quad (2.4)$$

Em que \dot{Q}_{COND} é a taxa de calor (W) por condução, U é o coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), A é a área de contato (m^2), ΔT é a variação de temperatura entre o alimento e a superfície ($^\circ\text{C}$).

Quando da aplicação de ar quente para promoção da secagem, existem três fatores que inter-relacionados controlam a capacidade do ar de remover a umidade do alimento:

- 1) quantidade de vapor presente no ar;
- 2) temperatura do ar;
- 3) quantidade de ar que passa pelo alimento.

O alimento absorve calor do ar quente, o que provê o calor latente necessário para evaporar a água da superfície. A temperatura do ar, medida por um termômetro, é chamada de temperatura de bulbo seco. Se o bulbo do termômetro for coberto por um tecido molhado, é retirado calor por evaporação da água no tecido e a temperatura cai. Essa temperatura mais baixa é chamada de temperatura de bulbo úmido. A diferença entre essas temperaturas é utilizada para encontrar a umidade relativa do ar na carta psicrométrica, que inter-relaciona as propriedades dos sistemas ar-vapor d'água. Um aumento na temperatura do ar ou uma redução na umidade relativa faz com que a água evapore mais rapidamente de uma superfície úmida e, portanto, provoca uma queda maior na temperatura.

O terceiro fator que controla a taxa de secagem, além da temperatura e umidade do ar, é a velocidade do ar. Quando o ar quente é soprado sobre um alimento úmido, o vapor se difunde através da camada limite de ar ao redor do alimento e é levado pelo ar em movimento. Um gradiente de pressão de vapor d'água é estabelecido entre o interior do alimento úmido e o ar seco. Esse gradiente provê a força motriz para a remoção de água do alimento (Figura 2.2).

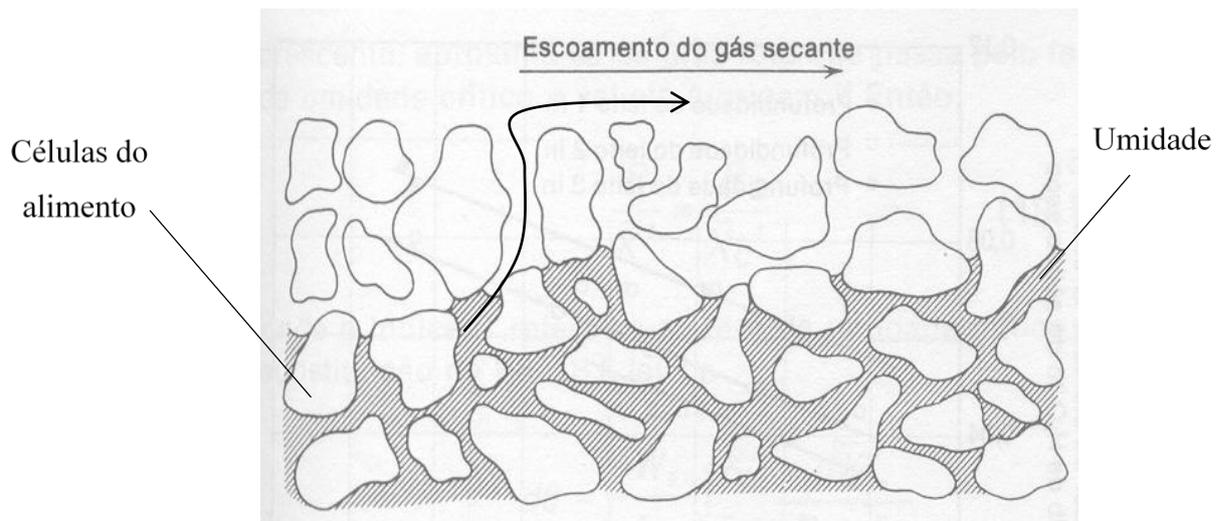


Figura 2.2: Movimento da umidade durante a secagem, adaptada de Foust et al. (1982)

Na Figura 2.2 é possível verificar a movimentação da umidade a partir das células do alimento, até a interface sólido-líquido.

A camada limite atua como uma barreira tanto para a transferência de calor quanto para a remoção de vapor d'água durante a secagem. A espessura é determinada principalmente pela velocidade do ar. Se a velocidade é baixa, a espessura da camada limite é maior, o que reduz tanto o coeficiente de transferência de calor quanto à taxa de remoção de vapor. Este sai da superfície do alimento e aumenta a umidade do ar ao redor dele, causando redução nos gradientes de pressão de vapor e, portanto, na taxa de secagem.

Na secagem conduzida sob convecção, a taxa de transferência de calor é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{CONV}} = h_c A \Delta T \quad (2.5)$$

Em que \dot{Q}_{CONV} é a taxa de calor por convecção (W), h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), A é a superfície de contato (m^2), ΔT é a diferença de temperaturas médias de bulbo seco e bulbo úmido do ar de secagem ($^\circ\text{C}$).

Em um sólido relativamente homogêneo, a umidade movimenta-se provavelmente, de acordo com Foust et al. (1982), para a superfície em virtude da difusão molecular. Ainda, segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), na teoria da difusão líquida, a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração:

$$\frac{dX(x, t)}{dt} = D \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial X(x, t)}{\partial x} \right] \quad (2.6)$$

Em que X é o teor de umidade (b.s.), D é o coeficiente de difusão do líquido aplicável ao movimento através do sólido (m^2/min) e x é a variável espacial (m).

Resumindo, as três características do ar que são necessárias para secar adequadamente um alimento úmido com sucesso são: temperatura de bulbo seco moderadamente alta, baixa umidade relativa e alta velocidade do ar.

Na secagem de um sólido úmido, exposto a um gás, com temperatura e umidade fixas, observa-se um comportamento padrão da umidade do sólido em função do tempo. Imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente. A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições de regime permanente. Neste regime, uma prova da medida da temperatura mostra que a temperatura da superfície do sólido molhado é a temperatura de bulbo-úmido do meio secante. As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à de bulbo-úmido do gás, mas a concordância entre elas é imperfeita em virtude das defasagens entre o movimento de massa e de calor (FOUST et al., 1982). Nas Figuras 2.3 e 2.4 ilustram-se curvas típicas de secagem em condições constantes, uma na base de teor de umidade *versus* o tempo e outra na base da velocidade de secagem *versus* o tempo.

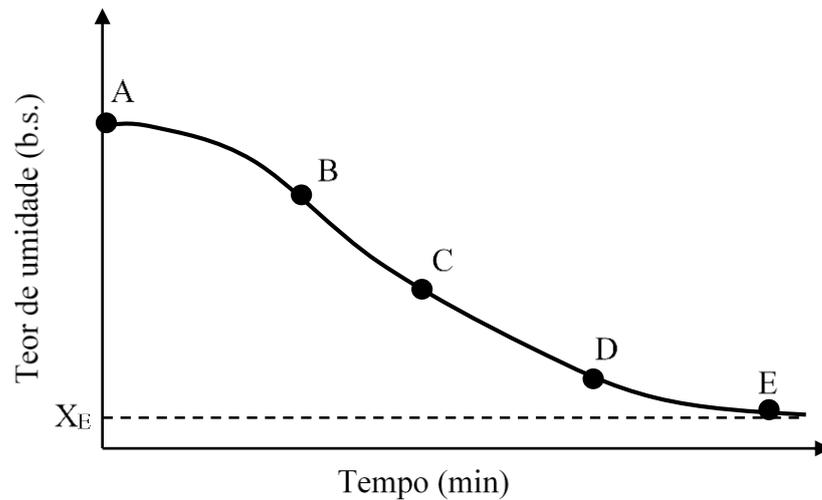


Figura 2.3: Curva de secagem típica em condições constantes de secagem, adaptada de Fellows (2006)

A configuração da Figura 2.3 é a forma que se deve obter com os dados dos ensaios de secagem. Já a forma da Figura 2.4 é obtida quando se deriva os dados na forma da Figura 2.3. Estas curvas típicas de secagem estão relacionadas aos mecanismos de realização da secagem.

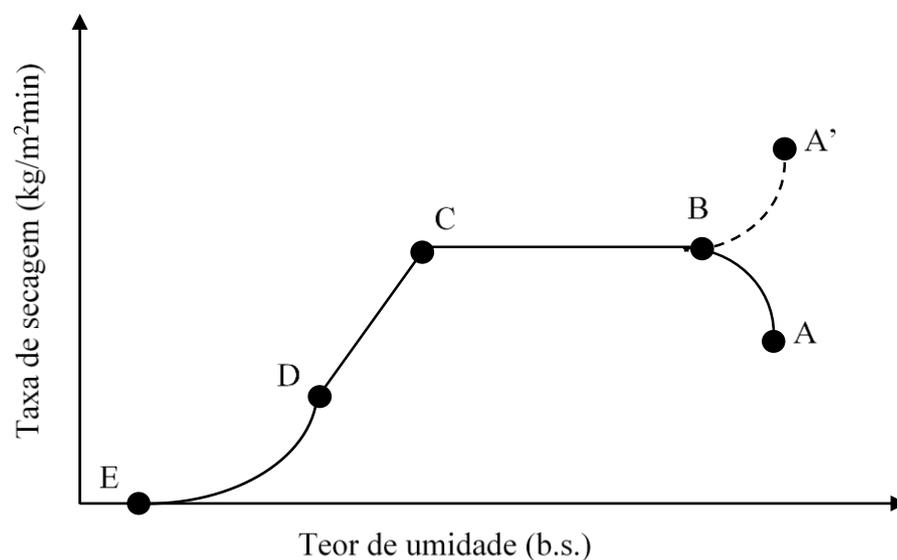


Figura 2.4: Curva da taxa de secagem típica em condições constantes de secagem, adaptada de Treybal (1980)

Quando um alimento é colocado em um secador, existe um curto período de estabilização em que a superfície é aquecida até a temperatura de bulbo úmido (A-B nas Figuras 2.3 e 2.4). Inicia-se, então, a secagem, e enquanto a água movimenta-se no interior do alimento na mesma

taxa em que é evaporada da superfície, esta permanece úmida. Este período é conhecido como período de taxa constante, que continua até que um teor de umidade crítico é alcançado (B-C nas Figuras 2.3 e 2.4) (TREYBAL, 1980).

A temperatura da superfície do alimento permanece próxima a de bulbo úmido do ar de secagem até o fim do período de taxa constante (B-C nas Figuras 2.3 e 2.4), devido ao efeito de resfriamento da evaporação da água. Na prática, diferentes áreas secam à diferentes taxas e, de forma geral, a taxa de secagem diminui gradualmente ao final do período de taxa constante.

Se a umidade inicial é elevada, a superfície poderá estar coberta com um fino filme de líquido (umidade não ligada). Quando este material é exposto a um fluxo de ar seco, a evaporação ocorre na superfície como se fosse a evaporação do líquido puro. A taxa de secagem, ψ , durante esta etapa pode ser escrita em termos de um coeficiente de transferência de massa do gás, k_F , e uma diferença de umidade, neste caso, da umidade de equilíbrio do gás na superfície líquida, Y^* , e no seio do gás, Y , conforme a equação:

$$\psi = k_F(Y - Y^*) \quad (2.7)$$

Em que ψ é a taxa de secagem ($\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$), k_F é o coeficiente de transferência de massa convectivo ($\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$), Y^* é umidade de saturação do gás na superfície líquida (b.s.), e Y é a umidade no seio do gás (b.s.).

O coeficiente k_F permanece constante se a velocidade do gás e a área de transferência de massa não se modificam durante o processo de secagem. O termo Y^* é a umidade de saturação da superfície líquida na temperatura do sólido, T_S .

Quando o teor de umidade do alimento diminui além do teor de umidade crítico (ponto C nas Figuras 2.3 e 2.4), a taxa de secagem decresce lentamente até aproximar-se de zero no teor de umidade de equilíbrio (C-E nas Figuras 2.3 e 2.4). Esse período é conhecido como o período de taxa decrescente. Alimentos não-higroscópicos possuem um único período de taxa decrescente, enquanto alimentos higroscópicos possuem dois ou mais períodos. No primeiro período de taxa de secagem decrescente (C-D nas Figuras 2.3 e 2.4), o plano de evaporação movimenta-se da superfície para o interior do alimento e o vapor d'água difunde-se através dos sólidos secos para o ar de secagem. O segundo período de taxa de secagem decrescente (D-E nas Figuras 2.3 e 2.4) acontece quando a pressão parcial de vapor d'água está abaixo da pressão de vapor saturado, e a secagem acontece por dessorção (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

Durante os períodos de taxa decrescente, a taxa de movimento da água do interior para a superfície do alimento torna-se menor do que a taxa de água que evapora para o ar circundante, portanto, a superfície seca (assumindo que a temperatura, umidade e fluxo de ar permaneçam

constantes). Se a mesma quantidade de calor é fornecida pelo ar, a temperatura da superfície aumenta até alcançar a temperatura de bulbo seco do ar de secagem. A maioria dos danos causados ao alimento pelo calor pode, portanto, acontecer durante o período decrescente, sendo a temperatura controlada para equilibrar a taxa de secagem e o grau dos danos provocados pelo calor (TREYBAL, 1980).

Quando a umidade do sólido alcança o valor X_C (umidade crítica), o filme de umidade na superfície foi reduzido pela evaporação promovida pelo processo de secagem, dando origem a regiões secas na superfície de evaporação. Estas regiões aumentam a medida que o processo de secagem prossegue. Isto origina o denominado primeiro período da taxa decrescente, entre os pontos C e D, a superfície fica paulatinamente mais pobre em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida para a superfície.

No ponto D não há na superfície qualquer área significativamente saturada no líquido. O vapor, nos níveis mais internos da amostra sólida, difunde-se para a superfície que não está saturada e continua a difundir-se para a corrente gasosa. Este mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva que ocorre na superfície saturada. Nos teores de umidade mais baixos que os do ponto D, toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido. À medida que o teor de umidade continua a decrescer, a distância a ser coberta na difusão do calor e da massa aumenta até que, em X_E , o teor de umidade de equilíbrio cessa a secagem, ponto E. Esse período é denominado o segundo período de taxa decrescente.

Para a determinação experimental da taxa de secagem utiliza-se o seguinte procedimento: uma quantidade determinada da amostra de material é colocada em um recipiente isolado termicamente suspenso em uma balança, com ar escoando continuamente pelo recipiente. Em intervalos de tempos tomam-se medidas de peso da amostra e com estes valores pode-se calcular a taxa de secagem:

$$N = - \frac{m_{SS}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2.8)$$

Em que N é a taxa de evaporação (kg/min), t é o tempo (min), m_{SS} é a massa de sólido seco (kg), A é a área de transferência de massa (m^2).

A maior parte da transferência de calor é por convecção do ar de secagem para a superfície do alimento, mas também pode haver transferência de calor por radiação. Se o alimento é seco em bandejas, haverá transferência por condução das bandejas para o alimento. Portanto, o cálculo da

transferência de calor em sistemas de secagem é geralmente complexo (MCCABE; SMITH; HARRIOT, 1993).

O período de taxa decrescente é geralmente a parte mais demorada da operação de secagem. Em alguns alimentos, como grãos, o teor de umidade inicial está abaixo do teor de umidade crítico e o período de taxa decrescente é a única parte da curva que é observada. Durante a taxa de secagem decrescente, a taxa de movimentação da água torna-se fator limitante.

De acordo com Gavrila, Ghiaus e Gruia (2008), atualmente é consenso que, na maioria das situações práticas de secagem convectiva de alimentos, a etapa determinante da velocidade de secagem é a transferência interna de massa. Porém, não há acordo sobre o mecanismo de circulação da umidade. No caso de materiais porosos, tais como frutas e vegetais, o transporte da umidade pode ocorrer por meio de vários mecanismos que atuam em diferentes combinações. Os possíveis mecanismos, propostos por muitos trabalhos, incluem:

- difusão líquida causada por gradientes de concentração;
- transporte de líquidos devido a forças capilares;
- difusão de vapor devido ao encolhimento e gradientes de pressão de vapor parciais (Lei de Stefan);
- transporte de líquido ou de vapor devido às diferenças na pressão total causada pelas pressão e temperatura externas (Lei de Poiseuille);
- evaporação e condensação causada por diferenças de temperatura;
- difusão a partir da superfície na interface com o sólido, devido ao gradiente de concentração na superfície;
- transporte de líquidos devido à gravidade.

Durante a secagem, um ou mais mecanismos citados podem estar acontecendo, e a sua importância relativa pode mudar à medida que ocorre a secagem. Os mecanismos que operam dependem principalmente da temperatura do ar e do tamanho dos pedaços do alimento. Nos períodos a taxa constante, partículas menores têm uma maior área superficial disponível para a evaporação, ao passo que no período de taxa decrescente, pedaços menores têm distâncias menores para a umidade percorrer através do alimento. Se os alimentos encolhem durante a secagem, o cálculo das taxas de secagem é ainda mais complexo, envolvendo problemas de fronteira móvel.

Dentre outros fatores que influenciam na taxa de secagem, pode-se citar a composição, estrutura e a quantidade de alimento colocada no secador.

Em operações comerciais é necessário estimar o quão rapidamente um alimento pode ser desidratado em um secador em particular, para obter-se a quantidade que pode ser produzida. Quando o comportamento de secagem é simples e são conhecidos os dados e teores de umidade

crítica e de equilíbrio ou as propriedades térmicas dos alimentos, os tempos de secagem podem ser calculados. No entanto, esses dados não são conhecidos para muitos alimentos, sendo, então, utilizados os resultados de testes de secagem em escala-piloto para estimar os tempos de secagem.

Todos os produtos sofrem mudanças durante a secagem e a estocagem, quando comparados com os produtos frescos. O objetivo de melhorar as tecnologias de secagem é minimizar essas mudanças e maximizar a eficiência do processo. As principais alterações nos alimentos desidratados são na textura e perdas no sabor ou aroma, mas as mudanças na cor e no valor nutricional são também significativas em alguns alimentos.

2.3.1 Parâmetros do processo de secagem

Strumillo e Kudra (1986), afirmam que a cinética de secagem está relacionada com as mudanças do teor médio de umidade do material e sua temperatura média com o tempo, ao contrário da dinâmica de secagem, que descreve as mudanças nos perfis de temperatura e umidade no seu interior e ao longo das dimensões do material. A cinética de secagem analisa a quantidade de umidade evaporada, tempo de secagem, consumo de energia, entre outros. Na secagem, a mudança do teor de umidade com o tempo é significativamente influenciada pelos parâmetros do processo, como isotermas de equilíbrio, temperatura, umidade, velocidade do ar e pressão total.

O calor de vaporização (por vezes referido como a energia livre) é a energia total necessária para transferir as moléculas de água a partir da superfície de um grão para o estado de vapor ou vice-versa, sendo uma medida do trabalho realizado por um sistema para realizar uma adsorção ou dessorção e, portanto, pode ser usado como um indicador do estado da água absorvida por partículas sólidas (FASINA; AJIBOLA; TYLER, 1999).

Para Azzouz et al. (2002), o conhecimento das curvas de sorção possibilita a identificação dos tipos de umidade presentes no produto, como a umidade livre e a umidade ligada e, assim, fornece informações preliminares sobre os parâmetros relacionados à transferência de calor e massa, sendo que o estado de equilíbrio, resultante de múltiplas interações em escala microscópica, é descrito por uma relação entre o teor de umidade em equilíbrio, X_E , do produto a ser seco e da umidade relativa do ar a uma temperatura constante. Essas curvas podem ser determinadas a partir de um grande número de teorias cinéticas que descrevem o processo de adsorção (PARRY, 1985).

A relação gráfica do conteúdo de umidade *versus* a atividade de água, a uma dada temperatura, é denominada isoterma de sorção, que pode variar dependendo da natureza do grão. Isotermas de sorção de água são ferramentas termodinâmicas úteis para prever a interação entre os componentes dos grãos e da água, e podem ser utilizadas para investigar as características

estruturais de um produto alimentar, tais como a superfície específica, o volume de poro, a distribuição de tamanho de poro, e a cristalinidade dos grãos (PEDRO; TELIS-ROMERO; TELIS, 2010).

Para Cladera-Olivera et al. (2008), as isotermas de sorção são ferramentas extremamente valiosas, uma vez que podem ser utilizadas para prever potenciais alterações na estabilidade dos grãos, para a determinação do método de armazenamento, embalagens e seleção de ingredientes, e para o projeto e otimização do equipamento de secagem. É útil, por exemplo, em modelos preditivos de secagem e no projeto de secadores. O calor isostérico de sorção ou diferencial de entalpia é o calor total de sorção menos o calor latente de vaporização da água, e é uma medida da força de ligação do grão em água. Porém, os métodos de secagem geralmente influenciam o comportamento de sorção dos grãos.

Segundo Treybal (1980), o calor de vaporização da água pura, λ_V , pode ser calculado por:

$$\lambda_V = \lambda_0 + (CP_V - CP_{S,W})T_S \quad (2.9)$$

Em que λ_V é o calor de vaporização (kJ/kg), λ_0 é a energia de vaporização da água na temperatura de 0 °C (kJ/kg), CP_V é a capacidade calorífica a pressão constante do vapor no sólido (kJ/°C), $CP_{S,W}$ é a capacidade calorífica a pressão constante da água no sólido (kJ/°C).

A pressão de vapor da água pode ser calculada de acordo com modelo proposto por Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974), conforme:

$$P_V = c_8 + \exp \frac{\{(c_5 T_S + c_4) T_S + c_3\} T_S + c_2}{(c_6 - c_7 T_S) T_S} T_S + c_1 \quad (2.10)$$

Em que P_V é a pressão de vapor (Pa), c_i são coeficientes da equação, encontrados em Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974).

A umidade relativa é definida como sendo a razão entre a pressão parcial, P_P , e a pressão de vapor, P_V :

$$UR = \frac{P_P}{P_V} \quad (2.11)$$

Em que P_P é a pressão parcial (Pa) e P_V é a pressão de vapor (Pa).

Com o emprego da isoterma de sorção, obtém-se o valor da umidade relativa que, quando substituída na Equação (2.11), fornece o valor da pressão parcial, P_P , que é definida como:

$$P_P = Y_{SAT} P \quad (2.12)$$

Em que Y_{SAT} é a umidade de saturação (b.s.), e P é a pressão total (Pa).

2.3.2 Coeficiente de Transferência de Massa e Calor

O processo de secagem de um material deve-se à transferência simultânea de calor e de massa. Ou seja, a umidade é retirada do sólido pelo fornecimento de calor por um meio secante, normalmente um gás, que apresenta menor concentração de umidade em relação à concentração de equilíbrio. A tendência é o sistema entrar em equilíbrio mássico e térmico, conforme ilustrado na Figura 2.5, adaptada de Geankoplis (1993).

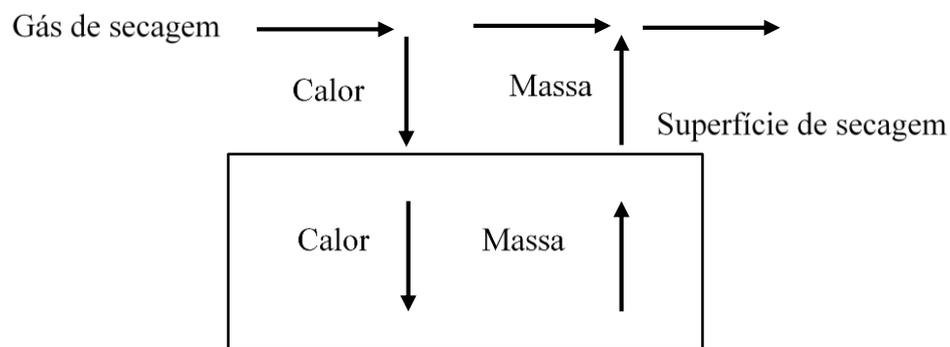


Figura 2.5: Esquema dos processos de transferência de calor e massa durante a secagem, adaptada de Geankoplis (1993)

O coeficiente de transferência de calor convectivo é um parâmetro bastante específico para cada sistema de aquecimento, e modo que, para que o modelo proposto seja efetivo, a determinação do coeficiente de transferência de calor convectivo deve ser efetuada no sistema modelado.

Conforme ElGamal et al. (2014), a maioria dos estudos referentes à secagem de grãos assume coeficientes de transferência convectiva de calor e massa constantes; condição de contorno de Dirichlet, em lugar de uma condição de contorno convectiva; e geometria simplificada (1 ou 2D). Para os autores, adotando coeficientes de transferência convectiva de calor e massa constantes, não se tem uma representação precisa do fenômeno. Na secagem por convecção, as superfícies de contorno são submetidas ao transporte convectivo de calor e massa, devido ao fluxo de ar de secagem. Esse fato implica a necessidade de uma condição de contorno de terceiro tipo (Robin ou Cauchy), em vez de primeiro ou segundo tipo (Dirichlet ou Neumann). A análise computacional da secagem é, sobretudo, um procedimento semi teórico, em que os dados de contorno, como coeficientes de transferência de calor e massa, são especificados a partir de

correlações experimentais. Porém, é altamente desejável que os coeficientes de transferência sejam calculados computacionalmente, em vez de correlacionados a partir de dados experimentais (CHUEAPRASAT; CHITSOMBOON, 2008).

Os coeficientes de transferência por convecção podem ser teoricamente relacionados com alguns números adimensionais que, por sua vez, são definidos a partir de diversas grandezas físicas envolvidas no processo. Os coeficientes de transferência de calor e massa nos processos de secagem dependem das propriedades termo físicas do ar e do material a ser seco, além das características do secador e propriedades do ar de secagem. Para a secagem de materiais esféricos, como grãos, pode-se aplicar correlações empíricas específicas, como a usada por Saravacos e Maroulis (2001) para a determinação do coeficiente de transferência de calor, obtida por Ranz e Marshall (1952):

$$\text{Nu} = 2 + 0,6\text{Re}^{1/2}\text{Pr}^{1/3} \quad (2.13)$$

Em que Nu, Re e Pr são os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl, respectivamente.

A Equação (2.13) é válida para a faixa ($1 < \text{Re} < 105$, $0,6 < \text{Pr} < 380$).

De acordo com Gekas (1992), desde que a transferência de massa e de calor ocorram pelo mesmo mecanismo na secagem dos grãos, a analogia de Chilton-Colburn, que é baseada na análise da camada de limite térmica e de concentração, pode ser empregada na determinação do coeficiente convectivo de transferência de massa, k_F , baseado no próprio coeficiente de transferência de calor, desde que o sentido do fluxo e a velocidade do ar sejam constantes (TREYBAL, 1980):

$$k_S = \frac{h_c}{c_{p_G}\rho_G} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}}\right)^{2/3} \quad (2.14)$$

Em que k_S é o coeficiente interno de transferência de massa (m/min), h_c é o coeficiente de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), c_{p_G} é o calor específico a pressão constante do gás ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$), ρ_G é a massa específica do ar de secagem (kg/m^3), Sc é o número de Schmidt.

A analogia de Chilton-Colburn, válida para números de Prandtl e Schmidt diferentes da unidade, possibilita o cálculo do coeficiente de transferência de massa a partir do coeficiente de transferência de calor. Porém, para sua aplicação deve-se observar algumas características do processo, tais como: propriedades físicas constantes, ausência de reações químicas e de dissipação viscosa de calor. O número de Schmidt caracteriza a transferência de massa do mesmo modo que o número de Prandtl caracteriza a transmissão de calor (KREITH, 1977).

Por sua vez, os números adimensionais podem ser determinados pelas seguintes correlações, de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$Re = \frac{\rho_G v 2R}{\mu_G} \quad (2.15)$$

$$Pr = \frac{c_{pG} \mu_G}{k_G} \quad (2.16)$$

$$Nu = \frac{h_c 2R}{k_G} \quad (2.17)$$

$$Sc = \frac{\mu_G \rho_G}{D_{eff}} \quad (2.18)$$

Em que μ_G é a viscosidade do ar de secagem (kg m/min), k_G é a condutividade térmica do ar de secagem (W/m °C), v é a velocidade do ar de secagem (m/s) medida na entrada do secador e considerada constante, R é o raio (m), e D_{eff} é o coeficiente de difusividade mássica efetiva (m²/min).

Já, para leitos fixos, pode-se empregar a correlação proposta por Gupta e Thodos (1963):

$$Nu = \frac{2,06}{\varepsilon} + Re^{0,425} + Sc^{1/3} \quad (2.19)$$

Em que ε é a porosidade do leito.

A Equação (2.19) é válida para a faixa ($90 \leq Re < 4000$).

2.4 Secagem de grãos

De acordo com Milman (2002), a política brasileira de abertura de mercado é responsável por uma forte concorrência para os grãos brasileiros, que necessitam de maior produtividade e qualidade de produto, para competir com o originário do exterior. Esse fato, somado ao mercado cada vez mais exigente, obriga os setores de produção e de pesquisa serem cada vez mais eficientes. Para Kolling, Trogello e Modolo (2012), nos últimos anos a produção agrícola brasileira vem apresentando expressivas taxas de crescimento, no entanto, esse bom desempenho produtivo não é acompanhado por melhorias nas atividades de pós colheita, tais como secagem, beneficiamento e, principalmente, armazenamento de grãos. Sendo que os principais agentes que causam redução da qualidade e diminuição da quantidade de produtos armazenados são roedores, insetos, pássaros e fungos. A respiração dos grãos pode, em menor escala, contribuir para a perda de matéria seca durante a armazenagem.

Um procedimento prático adotado no estado do Rio Grande do Sul é a realização da colheita do grão com teores de umidade mais elevados, uma vez que, conforme o autor, as perdas de grãos durante o armazenamento e secagem aumentam com a diminuição do teor de umidade. Dhingra (1985) afirma que os grãos são vulneráveis à invasão microbiana desde sua concepção até germinação, sendo que, quando os grãos sofrem secagem para o armazenamento, os fungos de campo permanecem dormentes ou morrem gradualmente. Por sua vez, a taxa de morte depende da temperatura e umidade relativa do armazenamento, do grau de infecção e do teor de umidade dos grãos. Ainda, conforme o autor, uma vez armazenados, os grãos podem ser invadidos por outro grupo de fungos, denominados fungos de armazenamento. Estes fungos não invadem os grãos no campo, pois não sobrevivem à competição com outros fungos que, também, crescem sob altas taxas de teor de umidade. Os fungos que atacam os grãos armazenados são xerofíticos, podendo crescer em umidade relativa de até 70%. Estes fungos são comuns na natureza e podem crescer em qualquer matéria orgânica que possua teor de umidade em equilíbrio com umidade relativa do ambiente de 68 a 90%.

Para Martini, Prichoa e Menegat (2009), temperaturas elevadas também favorecem o crescimento de mofo que se desenvolvem melhor em temperaturas entre 10 e 35 °C e em umidades relativas elevadas. O desenvolvimento prolongado de fungos em grãos de milho com elevado teor de umidade e sob temperaturas na faixa de 2 a 7 °C, pode resultar na formação de potentes micotoxinas. Para Bortolaia (2011), as etapas de limpeza e secagem são indispensáveis para uma boa conservação dos grãos armazenados. Nesse sentido, a etapa de secagem de grãos é a operação unitária crucial, existindo consenso que, quando conduzida de maneira inapropriada, levará à deterioração do produto agrícola na sua cadeia produtiva.

O secador de grãos é um equipamento mecânico destinado à secagem por ação de ar aquecido ou natural. Com a evolução dos sistemas de secagem, encontram-se disponíveis no mercado modelos de secadores diversos, como os de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes, os cilíndricos rotativos e os de camada fixa (leito fixo).

Garcia et al. (2004) classificam os métodos de secagem de acordo com o uso de equipamento (natural ou artificial), a periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente), e a movimentação da massa de grãos (leito fixo ou leito móvel). Por sua vez, a secagem natural é baseada nas ações do vento e do sol para a remoção da umidade dos grãos. Tal processo é limitado pelo clima, quando as condições de umidade relativa do ar e temperatura não permitem, ou quando se trata de maiores volumes de grãos. Apesar de apresentar baixo custo, é um método lento, e os grãos não devem ser dispostos em camadas superiores a 4-6 cm, com revolvimento periódico. O próprio vento e o calor solar se encarregam de promover a secagem,

com a evaporação da umidade. A segunda etapa da secagem natural difere-se da primeira pelo fato de ser executada com os grãos já colhidos e devidamente espalhados em lonas. Verifica-se que a secagem natural está delimitada pelas condições climáticas, já que chuvas podem comprometer o processo, além de ser desvantajosa devido aos grãos estarem vulneráveis a pragas e ocuparem grande espaço do terreno.

Nos métodos de secagem artificial, a fonte térmica pode ser variável. O que caracteriza o método como artificial é o fato de que, praticamente todo o processo é executado com o auxílio de aparelhos mecânicos, elétricos ou eletrônicos e o ar é forçado através da massa de grãos. Este é o tipo de secagem que mais frequentemente se adapta aos esquemas de produção de grãos, tendo em vista a rapidez com que remove quantidades elevadas de água; é a opção mais frequentemente adotada, inclusive, na produção de grãos (MIRANDA; SILVA; CAVARIANI, 1999).

2.4.1 Principais tipos de secadores de grãos em convecção forçada

Para a secagem de grãos, os secadores convectivos são os mais recomendados, uma vez que não dependem de condições climáticas do ambiente e permitem a secagem rápida e em grande escala. O método de secagem a fluxo forçado permite o controle dos parâmetros fundamentais que garantem a eficiência dos processos de secagem: temperatura, vazão e o tempo de exposição do grão ao ar aquecido. Ao mesmo tempo, os secadores convectivos têm seu aproveitamento energético fortemente influenciado pelas variáveis temperatura e velocidade mássica do ar de secagem, uma vez que estas afetam diretamente as taxas de transferência de massa e, conseqüentemente, de energia (CALÇADA; MOTTA LIMA; MANCINI, 1996).

Pabis, Jayas e Cenkowski (1998) apresentam os tipos básicos de secadores convectivos de grãos, cuja classificação varia conforme o tipo de fluxo:

- 1) quanto à mobilidade: móveis e fixos. Sendo os fixos divididos em silos secadores e secadores de torre. Propriedades rurais médias/grandes, cooperativas ou indústrias usam somente secadores ou silos secadores fixos;
- 2) quanto ao sistema de carga: intermitente e contínuo. O sistema chama-se intermitente quando o produto passa mais de uma vez pela torre de secagem. É indicado para iniciar a secagem contínuo ou para produtos com alto teor de umidade. O sistema é contínuo quando o produto passa uma vez pela torre do secador e já sai com as características desejadas para a armazenagem;
- 3) quanto à ventilação: com insuflação ou com aspiração de ar. O ar de secagem pode ser insuflado à montante ou aspirado à jusante da área de secagem. Os secadores tipo torre

possuem exaustores na saída do ar quente, colocados na parte inferior (ventilador) ou na parte superior (exaustor);

- 4) quanto ao fluxo de ar: concorrente, contracorrente, cruzado e misto. Na secagem concorrente, o movimento do ar e dos grãos se dá em um mesmo sentido, ou seja, os grãos caem da parte superior da torre ao mesmo tempo em que o ar desce, juntamente após entrar nos dutos. Na secagem contracorrente, o movimento dos grãos e do ar se dá em sentidos contrários, ou seja, enquanto os grãos descem pela torre, o ar sobe por entre os grãos. Permanecem, neste tipo, ambos os fluxos (grãos e ar) na mesma direção. Na secagem com fluxo cruzado, as direções e sentidos dos fluxos são perpendiculares, ou seja, enquanto os grãos descem pela torre verticalmente, o ar os atravessa horizontalmente. Já, quando se tem fluxo misto, há a presença de dois ou mais fluxos simultaneamente, podendo haver mudança de sentido;
- 5) quanto à torre de secagem: calhas paralelas, calhas cruzadas, de colunas e com câmaras de descanso;
- 6) quanto ao sistema de descarga: descarga de bandejas mecânicas, descarga pneumática, descarga de eclusas rotativas. O sistema de descarga é um dispositivo localizado na parte inferior dos secadores de grãos. Em unidades automatizadas, esse sistema é comandado por computador;
- 7) quanto ao combustível: líquido, sólido e gasoso;
- 8) ar da fornalha: direto e indireto;
- 9) grau de automatização: secagem de controle manual e secagem automatizada.

De acordo com Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974), os secadores de grãos podem ser divididos nas seguintes categorias básicas: leito fixo, em que não há movimentação dos grãos; secador contínuo, em que há movimentação contínua dos grãos. Nesta última classificação incluem-se os secadores de fluxo cruzado, concorrente e contracorrente, conforme Figura 2.6.

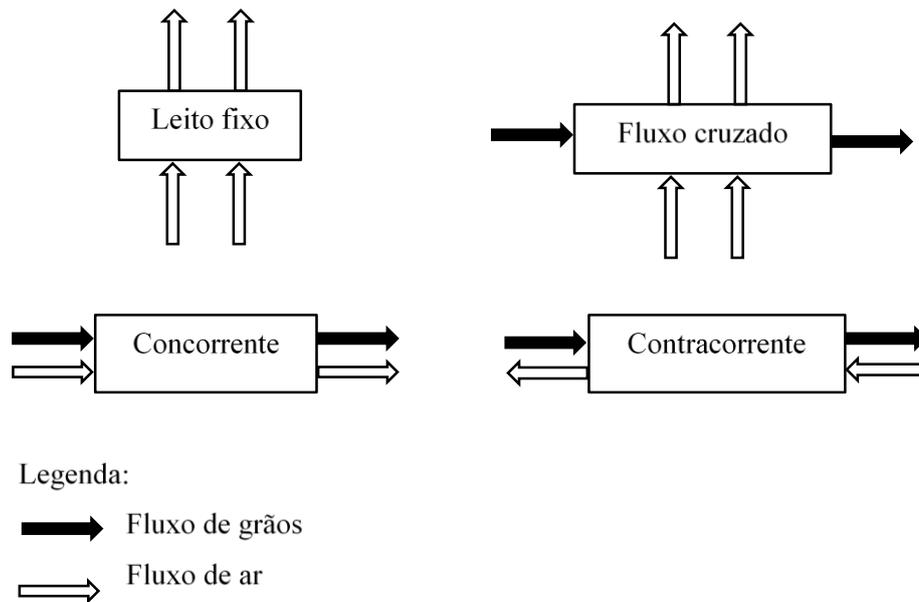


Figura 2.6: Esquema dos quatro tipos básicos de secadores convectivos de grãos, adaptado de Laws e Parry (1983)

Em um secador de camada fixa, a secagem é conduzida por lotes até que o teor de umidade adequado seja atingido. O ar de secagem ascende do fundo para o topo da camada de grãos e a remoção da umidade ocorre em uma região denominada de zona de secagem. Esta região começa no fundo do leito de grãos e, à medida que a secagem prossegue, esta zona move-se para cima. Geralmente, é um silo cilíndrico com fundo de chapa perfurada por onde insufla-se por meio de um ventilador, o ar aquecido por uma fonte qualquer de calor, sendo que após a secagem, o produto pode ser armazenado no interior do próprio secador.

A operação de secadores de leito fixo é simples, porém exige movimentação periódica do leito, a fim de impedir a desuniformidade na umidade final do produto. Segundo Dios (1996), o revolvimento em secadores de camada fixa deve ser conduzido de maneira lenta e durante todo o processo de secagem, evitando-se, assim, diversos problemas que influenciam a qualidade, devendo-se evitar a secagem rápida (temperaturas altas), que ocasiona quebras dos grãos durante o revolvimento (CASTOLDI; CASTOLDI, 2013).

As vantagens dos secadores de camada fixa são: operação relativamente simples, manuseio mínimo dos grãos, alta eficiência energética, não ocorrência de secagem excessiva e baixo índice de quebra de grãos com baixas temperaturas. Por sua vez, as desvantagens são: impossibilidade de uso de grãos com alto teor de umidade e período longo de operação.

Para transformar um secador batelada, em um secador de fluxo contínuo, em que os grãos úmidos entram por um lado e os grãos secos saem por outro, é possível projetar um mecanismo de recirculação, ou leitos móveis (CAMPOS, 1998). Nellist e Bruce (1995) sugerem a

possibilidade de se utilizar uma câmara inclinada, no qual os grãos se moveriam pela ação da gravidade para tal transformação. Os secadores contínuos são constituídos por uma estrutura com pelo menos duas câmaras, uma de secagem propriamente dita e a outra de resfriamento, podendo haver uma outra, intermediária, neutra, colocada entre as duas. Nos secadores de fluxo contínuo os grãos fluem de modo a oferecer pouca resistência à passagem do ar quente. Já, segundo Park et al. (2007a), os secadores de fluxo contínuo se subdividem em vários grupos de acordo com o modo de escoamento, podendo ser de fluxo concorrente, fluxo contracorrente, fluxo cruzado e em cascata (Figura 2.6).

Nos secadores de fluxo cruzado, os grãos são movimentados no interior de colunas compostas de placas perfuradas e submetidos a um fluxo de ar, perpendicular à camada de produto. Esses secadores têm grande capacidade de secagem, entretanto, o seu custo de implantação é alto. Os secadores de fluxo cruzado são mais populares pela simplicidade de construção e baixo custo (STEVENS; THOMPSON, 1976). Sua maior desvantagem é a falta de uniformidade no processo de secagem (PARK et al., 2007a).

Em secadores de fluxo concorrente, ar e grãos fluem na mesma direção ao longo do secador (PARK et al., 2007b). Segundo Walker e Bakker-Arkema (1978), os secadores de fluxo concorrente parecem ter as melhores condições para realizar a secagem com altas temperaturas, sem causar danos aos grãos. Sendo que o ar quente em contato com o grão úmido, provoca alta taxa de evaporação e rápido resfriamento desse ar, o que possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as utilizadas em secadores de fluxos cruzados.

Nos secadores contracorrentes, a secagem é realizada de modo que os grãos movimentam-se em sentido contrário ao ar de secagem. De acordo com Silva (2001), nesses secadores, a frente de secagem permanece sempre próxima ao fundo perfurado, e, à medida que ocorre a secagem, o produto seco é conduzido para o centro. Segundo Nellist (1982), em um fluxo contracorrente, operando em equilíbrio, os grãos deixariam o secador à mesma temperatura do ar de entrada, sendo a aplicação limitada pela sensibilidade dos grãos a altas temperaturas. Assim, na indústria, o mesmo é utilizado como resfriador ao invés de secador (PARK et al., 2007a).

Na área de simulação, segundo Cheng e Fan (2005), desde 1980 vários modelos matemáticos vêm sendo propostos no campo da secagem. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, os pesquisadores encorajaram-se a propor modelos menos restritivos e baseados nos fenômenos de transferência de massa e calor, expressos por sistemas de equações diferenciais parciais. Inicialmente, as pesquisas eram devidas ao alto consumo energético despendido na operação industrial de secagem. Atualmente o foco está, principalmente, na

qualidade final do produto e no impacto ambiental. Assim sendo, é de grande importância o desenvolvimento de modelos que melhor descrevam o processo de secagem.

2.5 Modelos Matemáticos de Secagem de Grãos

De acordo com Pabis, Jayas e Cenkowski (1998), existem diferentes tipos de modelos para processos de secagem, sendo que todos apresentam a variável temporal. Os modelos que não consideram a variável espacial para o sólido são denominados de modelos de camada fina e os modelos que consideram a variação com o espaço, são chamados de modelos de leito profundo, em que os parâmetros variam conforme a posição.

Conforme Jayas et al. (1991), as equações utilizadas para descrever a transferência de massa em camada fina podem ser classificadas em equações de parâmetros concentrados e parâmetros distribuídos, sendo que no primeiro caso há apenas a variação temporal e no segundo caso são consideradas as variações espaciais. Muitos modelos de parâmetros concentrados são obtidos a partir de simplificações de modelos de parâmetros distribuídos.

Os modelos fenomenológicos consideram as etapas elementares de transferência de massa por difusão e/ou convecção, podendo ser de parâmetros concentrados ou distribuídos e, geralmente, representam as principais tendências do processo, mesmo fora das condições experimentais em que foram validados. Os modelos de parâmetros concentrados não contemplam variações espaciais das propriedades físicas no sistema, enquanto que os de parâmetros distribuídos normalmente as representam, podendo, ambos, serem utilizados para simular o comportamento do grão durante a secagem. Entretanto, via de regra, é difícil medir os perfis de umidade no interior dos grãos, o que dificulta a validação dos modelos de parâmetros distribuídos e limita a sua utilização.

Segundo a norma ASAE S448 (1998), uma camada fina é aquela em que o material é totalmente exposto a uma corrente de ar durante a secagem, de modo que a profundidade da camada seja homogênea e não exceda três camadas de grãos. Por sua vez, uma poli camada pode ser considerada camada fina caso a temperatura e umidade relativa do ar de secagem permaneçam constantes quando passam através do leito de grãos. Assim, nos modelos de secagem em camada fina, não há gradientes de umidade e temperatura nos grãos em cada intervalo de tempo.

Modelos de secagem em camada fina que descrevem a secagem de produtos agrícolas, normalmente, são enquadrados em três categorias: empírico, semi-teórico e teórico (AZZOUZ et al., 2002).

Os modelos empíricos são baseados em ajustes matemáticos de dados obtidos experimentalmente e negligenciam a resistência interna à transferência de calor e massa, sendo que a umidade e temperatura possam ser consideradas constantes em todo o grão, de modo que os parâmetros desses modelos não têm significado físico. Dentre os modelos empíricos empregados no estudo de secagem convectiva de grãos, pode-se citar o modelo de Thompson.

Os modelos semi-empíricos oferecem um compromisso entre a teoria e a aplicação, porém não consideram toda a complexidade do fenômeno (BOERI, 2012). Os diversos modelos semi-teóricos existentes, também conhecidos como lei exponenciais de secagem, são baseados na Lei de Newton do resfriamento, e consideram condições isotérmicas e resistência à transferência de massa restrita à superfície do sólido. Nesses modelos, alguns parâmetros são ajustados por meio de cálculos matemáticos a partir dos dados experimentais. Nesta categoria, pode-se citar os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Page Modificado, dentre diversos outros.

Tanto os modelos empíricos como os semi-empíricos oferecem facilidade de uso, sendo válidos apenas dentro das faixas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar nas quais foram obtidos (MOHAPATRA; RAO, 2005).

Por sua vez, os modelos teóricos são baseados em fundamentos de transferência de massa e energia, são modelos mais completos que representam de maneira mais realista os processos de secagem. Os modelos teóricos consistem em sistemas de equações diferenciais ordinárias e/ou parciais, resultantes dos princípios de conservação de massa e energia. Dados experimentais são empregados na validação dos resultados obtidos por essa categoria de modelos de secagem.

Em relação à taxa de secagem, quando o teor de umidade é elevado, de modo que a superfície do grão encontra-se saturada, a evaporação a partir da superfície ocorre pela simples evaporação da água livre. Esta fase, após o arrefecimento ou aquecimento inicial, chamada de taxa de secagem constante, é simplesmente expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k_F a(Y - Y^*) \quad (2.20)$$

Em que k_F é o coeficiente de transferência de massa convectivo ($\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$), a é a área específica (m^{-1}), Y é a umidade do leito de ar de secagem (b.s.), e Y^* é a umidade de equilíbrio do ar de secagem (b.s.).

O coeficiente k_F permanece constante caso a velocidade do gás e a área de transferência de massa não se modifiquem durante o processo de secagem.

A complexidade surge quando a estrutura do sólido começa a influenciar a taxa de remoção de umidade (SABLANI et al., 2007), de modo que a determinação correta da equação da

taxa de secagem influenciará diretamente nos resultados obtidos na modelagem e simulação do processo. Hirschmann et al. (1998) afirmam que a previsão teórica da cinética de secagem é muito difícil, sendo necessária a obtenção de dados experimentais precisos, em pequena escala. Segundo os autores, é possível estimar as taxas de secagem em diferentes condições, por conceitos como curva característica de secagem (VAN MEEL, 1958) ou coeficiente de secagem (LUIKOV, 1968; MILOJEVIĆ; STEFANOVIĆ, 1982, dentre outros).

No trabalho de Lewis (1921), foi proposto um modelo de secagem em camada fina levando em consideração apenas a umidade inicial dos grãos e a umidade de equilíbrio, admitindo que durante o período de taxa decrescente da secagem, predominante em grãos, a variação de umidade, $\partial X / \partial t$, fosse proporcional à diferença entre a umidade instantânea e a de equilíbrio:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k_S(X - X_E) \quad (2.21)$$

Em que k_S é a constante da equação de taxa de secagem (min^{-1}).

De acordo com Van Belleghem et al. (2012), dependendo do problema físico, podem ser empregados como condições de contorno valores fixos conhecidos da variável dependente, como umidade e temperatura, condição de Dirichlet (primeiro tipo); valores fixos de fluxo, como massa e calor, condição de Neumann (segundo tipo); ou uma combinação linear dos dois primeiros tipos, condição de Robin ou Cauchy (terceiro tipo).

Nesse sentido, Newman (1931) assumiu, como Lewis (1921), que durante o período de taxa decrescente da secagem, a evaporação é proporcional à umidade livre da superfície do material. Conforme Parti (1994), essa consideração tem sido extensamente empregada em estudos de secagem de materiais biológicos como grãos. O modelo sugere a seguinte expressão para a condição de contorno na interface ar-sólido:

$$-D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial X(x, t)}{\partial t} \right|_{x=L} = k_S[X(x, t) - X_E(t)] \quad (2.22)$$

Em que L é a interface do material com o ar e secagem (m).

O trabalho de Luikov (1966) foi um dos precursores nos estudos de transferência de massa em meios porosos, não isotérmicos, desprezando os efeitos gravitacionais, reações químicas e variações geométricas na matriz porosa, sugerindo que essa transferência deve-se tanto ao gradiente de concentração do líquido quanto ao gradiente de temperatura, de modo a originar um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas, descrevendo o processo simultâneo de transferência de massa e energia:

$$\frac{\partial X(x, t)}{\partial t} = \nabla[D_M(x, t)X(x, t)] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial T_S(x, t)}{\partial t} = \nabla[D_T(x, t)T_S(x, t)] \quad (2.24)$$

Em que D_M é a difusividade mássica (m^2/min), D_T é a difusividade térmica (m^2/min).

As equações do modelo de Luikov são aplicáveis a qualquer sistema de coordenadas (domínio da integração), e a solução das mesmas pode ser obtida por métodos numéricos, como o desenvolvido por Chu e Hustrulid (1968), ou analíticos, como a extensivamente utilizada na série de Crank (1975), para o coeficiente de difusividade mássica constante.

O trabalho de Parti (1993) apresentou um modelo de secagem com parâmetros distribuídos, em coordenadas esféricas, que considera tanto a resistência interna quanto a externa para a transferência de massa e energia, o que conduz a melhores resultados:

$$\frac{\partial X(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_M(r, t) r^2 \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right] \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial T_S(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_T(r, t) r^2 \frac{\partial T_S(r, t)}{\partial r} \right] \quad (2.26)$$

Em que r é a coordenada radial (m).

Os modelos de camada fina são empregados nos modelos de leito profundo para caracterizar as mudanças nos teores de umidade e temperatura, sendo que a qualidade dos modelos de leito profundo dependem fortemente dos modelos de camada.

Uma série de várias camadas finas compõem um leito profundo (GUNASEKARAN; THOMPSON, 1986; MISRA; BROOKER, 1980), sendo que em um modelo de leito profundo, cada camada fina modifica o ar de secagem, e apenas a primeira camada fina recebe um fluxo de ar invariável que reduz a umidade mais rapidamente do que as camadas subsequentes.

O objetivo principal dos modelos de camada fina é descrever o processo difusivo da umidade no interior do grão ou entre a superfície deste e o ar ambiente, porém, segundo o autor, os modelos de leito profundo vão além, tendo como interesse, também, descrever os fenômenos de transferência de massa e energia nos volumes de vazio, que são fenômenos marcadamente convectivos.

Os modelos de camada espessa podem ser classificados em três tipos: modelos logarítmicos, modelos de balanço de energia e massa e modelos de equações diferenciais parciais.

O modelo logarítmico foi apresentado por Hukill (1974), que desenvolveu uma expressão analítica para o comportamento da umidade presente em grãos, relacionada com a altura

do leito e com o tempo de operação do secador, desprezando o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos. Embora o modelo não considere o aquecimento dos grãos pelo ar de secagem, pode, ainda assim, ser considerado uma ferramenta para a simulação da secagem. A equação é expressa por:

$$\dot{m}_G c_{pG} \frac{\partial T_G(x, t)}{\partial x} = \rho_G \lambda_D \frac{\partial X(x, t)}{\partial t} \quad (2.27)$$

Em que \dot{m}_G é a vazão de massa de ar por unidade de área ($\text{kg}/\text{min m}^2$), c_{pG} é o calor específico do ar ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$), e ρ_G é a massa específica do ar (kg/m^3).

Por sua vez, Thompson, Peart e Foster (1968) propuseram um modelo semi empírico de simulação de secagem, originalmente de milho, em secadores contínuos, a partir de balanços de massa e energia e de uma equação analítica para a taxa de secagem, considerando que a temperatura do grão está em equilíbrio com a do ar adjacente.

Os modelos compostos por equações diferenciais parciais, podem ser considerados mais precisos, pois apresentam menos condições simplificadoras, como o modelo de Michigan, hoje denominado de modelo da Michigan State University (MSU), desenvolvido por Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974). O modelo é composto por quatro equações diferenciais que descrevem o comportamento da umidade e da temperatura do ar de secagem e dos grãos em um volume diferencial (DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010). O modelo MSU é composto das seguintes equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial Y(x, t)}{\partial x} = - \frac{\rho_G}{\dot{m}_G} \frac{\partial X(x, t)}{\partial t} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial T_G(x, t)}{\partial x} = \frac{h_c}{\dot{m}_G c_{pG} + \dot{m}_G c_{pW,G} Y(x, t)} [T_S(x, t) - T_G(x, t)] \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial X(x, t)}{\partial t} = \Psi \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial x} = & \frac{h_c}{\rho_G c_{pG} + \rho_G c_{pW} X(x, t)} [T_G(x, t) - T_S(x, t)] \\ & + \frac{\lambda_D + c_{pW,G} [T_G(x, t) - T_S(x, t)]}{\rho_G c_{pG} + \rho_G c_{pW} X(x, t)} \dot{m}_G \frac{\partial Y(x, t)}{\partial x(x, t)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Em que $c_{pW,G}$ é o calor específico da água no gás ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$), e c_{pW} é o calor específico da água pura ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$).

2.6 Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem de Grãos em Convecção Forçada

De acordo com Pabis, Jayas e Cenkowski (1998), um modelo matemático é uma representação de um sistema real, focada sobre um conjunto de propriedades e as características pré-selecionadas. Os modelos são os componentes essenciais de modernos métodos de engenharia de processos, ou seja: simulação, otimização e controle, e são, geralmente, classificados em três categorias:

- modelos de primeiros princípios (ou caixa-branca), que são derivados de relações físicas e químicas conhecidas, refletindo os princípios que regem o comportamento do processo;
- modelos orientados por dados (caixa-preta), que são de natureza empírica (por exemplo, redes neurais artificiais);
- modelos híbridos (caixa-cinza): uma combinação das opções acima.

Ainda, conforme os autores, modelos de primeiros princípios são geralmente compostos por balanços macroscópicos e/ou microscópicos de energia, massa e quantidade de movimento, além de outras relações de cinética, propriedades físicas, entre outros. Rigorosamente falando, modelos puramente de primeiros princípios são muito raros, uma vez que há sempre algum tipo de relação empírica (por exemplo, para propriedades físicas) presente. Os modelos de caixa-preta e caixa-cinza podem ser uma alternativa, sendo mais populares para aplicações reais.

Para Huambo (2002), a primeira etapa das ferramentas de otimização é o conhecimento do comportamento físico do sistema, resultando em um modelo matemático, cuja definição tornará possível elaborar os procedimentos seguintes usados na determinação de uma política operacional ótima.

A análise teórica e a modelagem de secadores é complexa, devido ao número de fatores envolvidos, sendo que a simulação para a secagem de grãos é obtida a partir da solução de modelos de transferência, oriundos dos balanços de calor, quantidade de movimento e de massa no produto agrícola e no ar de secagem. Já a cinética da secagem pode ser descrita pelas curvas de taxa de secagem, as quais diferem de acordo com a natureza dos sólidos e as condições de secagem. Estas curvas apresentam períodos de taxas de secagem constante e decrescente. A obtenção de modelos generalizados que descrevam o processo é de grande interesse, uma vez que podem ser utilizados para a predição do tempo de secagem, nas diversas condições de operação do secador, diretamente pela solução do modelo desenvolvido.

Em geral, a otimização de um processo pode ser obtida a partir de uma série de dados experimentais, em diversas condições de operação. A coletânea de dados é analisada, sendo

selecionados os valores ótimos para os parâmetros, de modo a minimizar ou maximizar a função objetivo (SMITABHINDU; JANJAI; CHANKONG, 2008). Em contrapartida, o uso de simuladores no desenvolvimento de processos químicos é uma ferramenta versátil, que sana os problemas limitantes de custo, relativos à construção de protótipos para a elaboração de rotinas de experimentação. No entanto, a eficiência dos simuladores é dependente do grau de representatividade do simulador em relação ao processo. A falta de representatividade é causada pelo acúmulo de erros durante a elaboração, assim como, por possíveis simplificações nas representações dos fenômenos (VASCONCELOS, 1997).

Todo o processo de secagem convectiva envolve fluxos mássicos para dentro ou para fora de equipamentos de secagem. Dessa forma, a equação de conservação de massa estabelece um procedimento de análise de tais fluxos, para que esses possam ser analisados e contabilizados. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial do vapor d'água existente entre o ar e a superfície do grão determina uma transferência de vapor para o ar, a qual é chamada de potencial de secagem. Uma parte do calor que chega ao produto vegetal é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura do conjunto (grão + água) ao ponto do calor latente de vaporização.

Os métodos empregados na secagem de grãos devem considerar a sensibilidade dos mesmos, especialmente em relação às altas temperaturas, de modo que a secagem não pode ser conduzida apenas de acordo com experiências práticas, uma vez que qualquer alteração nas condições climáticas acarretará em resultados diversos. Ainda, de acordo com os autores, uma maneira de se trabalhar com essas intempéries é fazer uso da simulação de processos, reduzindo etapas de operação em desacordo com as necessidades práticas, evitando danos aos equipamentos e produtos, desperdícios de tempo e energia, levando a operações seguras e mais eficientes.

De acordo com Karim e Hawlader (2005), os atuais modelos matemáticos desenvolvidos para a modelagem da secagem de materiais biológicos, como os grãos, são simplistas e, portanto, afastam-se significativamente dos processos reais, ou, por outro lado, muito complexos para terem qualquer aplicação prática. Dessa forma, com a adequada modelagem do sistema dinâmico de secagem de grãos, que tanto satisfaça a essencial necessidade de representar significativamente a distribuição de temperatura e umidade durante a secagem, e, também, ser de fácil aplicabilidade, é possível propor sistemas de otimização, minimizando os gastos com energia, removendo a maior quantidade de água possível, de modo a preservar o produto, sem causar desnaturação e maximizando os lucros, uma vez que o desenvolvimento e a validação de modelos de simulação contribuem significativamente para o entendimento dos mecanismos dos processos, sendo fundamentais para melhorar o projeto e operação de secadores.

Secadores de leito profundo, também conhecidos como secadores de leito fixo, são um dos tipos mais comuns de secadores agrícolas, concebidos para a secagem dos grãos em camada profunda (mais de 20 cm de profundidade), em que a secagem é mais rápida na extremidade de entrada do secador do que na saída (LOPEZ; PIQUE; ROMERO, 1998). Modelos de camada profunda para a simulação da secagem de grãos podem ser classificados como logarítmico, balanço de calor e massa e de equação diferencial parcial (EDP). O modelo EDP é mais detalhado, preciso e válido para a secagem de cereais, enquanto os outros, são menos precisos devido às simplificações.

O comportamento de um secador em leito profundo é traduzido em um modelo matemático transiente que represente adequadamente o sistema modelado. Essa modelagem é obtida por meio de balanços de massa e energia, realizados tanto no ar de secagem, quanto no grão. Dentre os trabalhos de simulação de secadores convectivos de grãos, realizados a partir da modelagem fenomenológica, que são menos restritivos e simplificados, a partir dos quais são obtidas equações diferenciais parciais, pode-se citar o trabalho precursor de Laws e Parry (1983), que obteve uma modelagem generalizada para secadores de grãos.

Segundo Prado, Alonso e Park (2000), a remoção de água durante a secagem dos produtos biológicos gera a redução da tensão existente no interior das células, promovendo, assim, a sua contração volumétrica. De acordo com Esmaili et al. (2007a), Karim e Hawlader (2005), Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) e Costa et al. (2011), os modelos de secagem atualmente propostos na literatura têm hipóteses simplificadoras, ignorando, assim, importantes fenômenos como a contração volumétrica e mesmo as alterações das propriedades de transporte durante a operação de secagem, como a difusividade. Na contramão, existem poderosas ferramentas matemáticas para a solução de problemas complexos, que poderiam incluir os mecanismos complicadores presentes nos processos de secagem, tais como: os métodos dos elementos finitos, diferenças finitas e da quadratura diferencial.

Com uma adequada modelagem do sistema dinâmico de secagem de grãos, é possível propor sistemas de otimização, minimizando os gastos com energia, removendo a maior quantidade de água possível sem causar desnaturação do produto e maximizando os lucros.

Conforme Vasconcelos (1997), as variáveis envolvidas no processo de secagem são classificadas da seguinte maneira:

- variáveis controladas: a temperatura do gás, a umidade absoluta do gás, a temperatura do sólido, e o conteúdo de umidade do sólido;
- variáveis manipuladas: o fornecimento de calor para o aquecimento do gás na entrada do secador, a vazão mássica do gás e a vazão mássica do grão;

- variáveis fixadas durante o projeto: o número, os tamanhos e as configurações das seções do secador;
- perturbações: a temperatura ambiente, a umidade ambiente, a temperatura do sólido na entrada do secador, a umidade do grão na entrada do secador e demanda de produção;
- restrições: a umidade relativa do gás e a umidade de equilíbrio ao longo do secador.

Existe uma grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, sendo que, o primeiro passo para simplificar o trabalho é a escolha de um menor número de variáveis e que cada variável escolhida represente o máximo possível os critérios de desempenho definidos. No trabalho de Maciel Filho, Wolf e Vasconcelos (1997), foi desenvolvida uma estratégia de controle para secadores de grãos industriais, baseada na otimização de uma função objetivo para minimizar o consumo de energia, inverso da umidade removida do grão e tempo de residência, umidade na saída do secador, temperatura do grão na saída do secador, temperatura e umidade máximas do grão e temperatura mínima do grão. De acordo com os autores, após a escolha da função objetivo, para completar a definição do problema de otimização, é necessário escolher as variáveis manipuláveis mais adequadas, sendo que há grandes diferenças entre termos de custos e como essas variáveis influenciam o comportamento do sistema. Assim, as variáveis que apresentam maior adequação para serem manipuladas durante a otimização operacional de secagem são: vazão, temperatura e umidade do gás de entrada.

2.7 Eficiência energética de secadores

Considera-se, geralmente, que, em secadores convencionais, o calor fornecido ao secador é utilizado para o aquecimento tanto do material úmido quanto do equipamento de secagem, para a evaporação da umidade, e uma compensação das perdas de calor. No entanto, segundo os autores, a secagem de um grande número de materiais envolve energia, não só para a evaporação da água livre, mas, também, para a remoção da água ligada pelo fenômeno da capilaridade. Portanto, a eficiência energética, definida como a razão entre o calor necessário para a evaporação da umidade e o calor total fornecido ao secador é uma função das propriedades do material (porosidade, propriedades de sorção, tamanho e forma, umidade ligada, entre outros), do projeto do secador (tipo, configuração, modo de aquecimento, entre outros), dos parâmetros operacionais (temperatura de secagem, vazão de gás, entre outros), e dos teores de umidade final e inicial.

Normalmente, a eficiência energética relatada na literatura técnica é calculada como um valor médio ao longo do tempo de secagem para processos batelada ou ao longo da altura/comprimento do secador no caso de processos contínuos:

$$\eta = \frac{\text{Energia requerida pela evaporação}}{\text{Energia requerida para aquecer o ar de secagem}} \quad (2.32)$$

Em que η é a eficiência energética.

Nos trabalhos de Vasconcelos (1997) e Huambo (2002), as funções objetivo foram, respectivamente, minimizar a energia consumida, inverso da taxa de secagem e tempo de residência; e energia consumida, tempo do ciclo e temperatura máxima do sólido na saída do secador. Essas são variáveis que não atingem valores nulos durante a operação.

No estudo de Smitabhindu, Janjai e Chankong (2008), foi otimizado um secador solar, cuja função objetivo era minimizar o custo por quilograma de banana seca. No trabalho, baseado nos estudos de Bala e Woods (1995), a otimização, tendo em vista uma função objetivo não-linear, sujeita as condições limitadoras de geometria e parâmetros operacionais do secador, foi denominada pelo autor como otimização não-linear restrita. As equações diferenciais parciais foram resolvidas pelo método das diferenças finitas e a otimização conduzida por uma técnica de pesquisa exploratória com restrições.

De acordo com Luz (2010), a avaliação do consumo de energia na secagem, tendo-se como volume de controle todo o secador, objetiva averiguar a condição de temperatura do vapor de aquecimento que leve ao menor consumo energético, confiando àquela a manutenção da qualidade final e o menor custo de produção.

O consumo energético, E_Q , é a energia necessária para aquecer o ar de secagem da temperatura ambiente até a temperatura de operação do secador:

$$E_Q = t_{\text{final}} v A \varepsilon \int_{T_{G_0}}^{T_{G_{\text{feed}}}} \rho_G H_G dT_G \quad (2.33)$$

Em que E_Q é a energia total consumida para aquecer o ar de secagem por unidade de tempo (kJ/min), t_{final} é o tempo total de secagem (min), v é a velocidade do ar de secagem (m/s) medida na entrada do secador e considerada constante, A é a área transversal ao fluxo de ar (m²), ε é a porosidade do leito, ρ_G é a massa específica do ar de secagem (kg/m³), H_G é a entalpia do ar de secagem (kJ/kg), T_{G_0} é a temperatura inicial do ar de secagem (°C), $T_{G_{\text{feed}}}$ é a temperatura de alimentação do ar de secagem (°C), e cp_G é o calor específico do ar de secagem (kJ/kg °C).

Para Ratti (2009), é difícil estimar a quantidade de energia demandada pelos processos de secagem de alimentos, devido à variedade de gêneros das diferentes fontes de energia que podem ser usadas para a promoção da remoção da umidade.

A quantidade de energia necessária para dessorver a umidade presente no leito de grãos, E_D , é calculada por:

$$E_D = -m_{SS}\lambda_D \frac{dX}{dt} \quad (2.34)$$

Em que E_D é a energia consumida para dessorver a umidade (kJ/min), m_{SS} é a massa dos grãos secos (kg), e λ_D é o calor de dessorção (kJ/kg) considerado igual ao calor de vaporização da água pura e é função da temperatura.

Diante disso, pode-se, então, definir uma função objetivo, que é maximizar a eficiência energética instantânea da secagem, η_I , ou seja, maximizar a razão entre a quantidade de energia efetivamente empregada na remoção da umidade e a aquela adicionada ao ar de secagem, para aquecê-lo.

Kudra (1998) define como eficiência energética instantânea da secagem:

$$\eta_I = \max \frac{E_D}{E_Q} \quad (2.35)$$

Em que η_I é a eficiência energética instantânea da secagem.

Assim sendo, o problema de otimização torna-se:

$$\max_{u(t), t_{\text{final}}} J = \eta_I \quad (2.36)$$

Em que J é a função objetivo e $u(t)$ são as variáveis manipuláveis.

Integrando-se a eficiência energética instantânea, obtém-se a eficiência energética cumulativa:

$$\eta_C = \max \frac{1}{t} \int_0^{t_{\text{final}}} \eta_I(t) dt \quad (2.37)$$

Em que η_C é a eficiência energética cumulativa da secagem.

A performance da secagem depende de diversos fatores, alguns deles podem ser controlados, outros não. Temperatura e velocidade do ar de secagem, e dimensões do secador podem ser alteradas (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; RAGHAVAN; SOSLE, 2007; SAUER, 1992), entretanto, as condições ambientais e mesmo a condição natural dos grãos (umidade inicial) somente pode ser prevista.

Para Courtois (1995), a evaporação é responsável por cerca de 90% da energia consumida na secagem. Por sua vez, Nellist (1982) afirma que a energia térmica constitui 95% do total da

energia consumida na secagem. Assim, poderia se pensar em usar o consumo de combustível por tonelada de grãos como indicador de eficiência do secador, entretanto, este consumo está relacionado a uma determinada condição inicial dos grãos e a uma dada remoção de umidade. Desse modo, em geral, opta-se por definir a eficiência como a energia gasta para evaporar uma unidade de massa de água (MJ/kg).

De acordo com Jokiniemi e Ahokas (2014), secadores convectivos operados com ar quente apresentam consumo energético típico de 4-8 MJ/kg de água evaporada, mas existem na literatura relatos de secadores que demandam menor quantidade de energia, chegando a 2,5 MJ/kg. De acordo com os autores, muitos estudos indicam que um possível método para redução do consumo energético total do processo de secagem pode ser obtido operando o secador em temperaturas elevadas. Ainda, as equações de equilíbrio indicam que, com o aumento da temperatura, a capacidade de retenção de umidade pelo ar de secagem aumenta mais rápido que a entalpia do ar, o que permite uma maior capacidade de retenção de umidade em temperaturas mais elevadas. Para Giner e Mascheroni (1996), secadores com recirculação não apresentam facilmente valores inferiores a 3,5 MJ/kg, já nos secadores sem recirculação os valores da energia específica podem ser em torno de 4,5 MJ/kg.

No trabalho de Zare e Chen (2009), que estudaram a secagem de grãos de arroz com casca, em leito profundo, foi relatado um menor consumo de energia específica quando o secador operou com menor temperatura e fluxo do ar de secagem. No estudo, para condições de 35 °C e 0,01 kg/m²s, foi relatado o menor consumo de energia específica, 2 MJ/kg, já no outro extremo, em condições de temperatura e fluxo mais elevados, 50 °C e 0,22 kg/m²s, o consumo foi de 16,80 MJ/kg. Os autores observaram que, aumentando a temperatura e o fluxo do ar de secagem, conseqüentemente, o tempo de secagem é reduzido, tendo em vista o aumento dos coeficientes de transferência de calor e massa e o coeficiente de difusão, resultando em uma evaporação mais rápida.

Stakic e Tsotsas (2005) estudaram a secagem contracorrente de grãos de milho, sendo que, para a secagem conduzida em leito fixo e com alimentação do ar de secagem em dois estágios, a 100 °C e 12,5 m³/s, o consumo de calor específico foi de aproximadamente 3 MJ/kg, já a 100 °C em apenas um estágio e a 130 °C e 16,76 m³/s foi de aproximadamente 6 MJ/kg. Para os autores a operação em condições de temperatura e fluxo de ar mais elevados implicam no aumento do consumo de calor específico.

Menshutina et al. (2004) observaram que no período decrescente de taxa de secagem, os sólidos são rapidamente aquecidos e a energia fornecida pelo ar de secagem pode ser gradualmente reduzida, de modo economizá-la, ou mesmo, pode-se operar com regimes de temperatura

diferentes, ao longo do processo. Do ponto de vista de otimização, é necessário tomar uma decisão entre as condições de operação do secador, operando na maior capacidade possível e obtendo o produto seco mais rapidamente, e, arcando com o elevado consumo do calor específico. Ou, ainda, operando com baixo consumo de energia e utilizando muito mais tempo para processar a mesma quantidade de sólidos. Considerando os problemas operacionais que envolvem a secagem e os possíveis problemas que podem ocorrer caso nem todo o material seja adequadamente seco, pode-se justificar facilmente a escolha do aumento do consumo de calor específico.

A temperatura do ar de secagem é o parâmetro de maior flexibilidade num sistema de secagem em altas temperaturas, sendo que a temperatura do ar conjugada com o fluxo do ar de secagem são os fatores responsáveis pela quantidade de água removida no processo de secagem dos produtos agropecuários. Ambos influenciam significativamente a eficiência de secagem e na qualidade do produto final, de modo que o aumento da temperatura implica em menor gasto de energia por unidade de água removida, maior velocidade na taxa de secagem e maior gradiente de temperatura e umidade, enquanto que um aumento no fluxo de ar reduz a eficiência energética mas, também, aumenta a velocidade de secagem (BAKKER-ARKEMA; BROOK; LEREW, 1978, LASSERAN, 1978; LACERDA, QUEIROZ; ROA, 1982, BAKER; PAULSEN; ZWEDEN, 1993).

Assim, a função objetivo estará sujeita às restrições, que, conforme Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974) e Trelea, Trystram e Courtois (1997), no caso de secagem de grãos em convecção forçada, podem ser:

$$50^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Gfeed}} \leq 80^{\circ}\text{C} \quad (2.38)$$

$$1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s} \quad (2.39)$$

Uma das alternativas que tem sido utilizada para aumentar a eficiência energética de secadores convectivos em geral, é o uso do ar de saída do equipamento, redirecionando-o para a entrada do secador. Esse reciclo do ar de secagem possibilita o aproveitamento da energia térmica e, muitas vezes, uma baixa umidade do ar de secagem.

2.7.1 Eficiência energética de secadores convectivos com recirculação do ar de exaustão

Durante a secagem clássica por ar aquecido, o ar é soprado por um aquecedor para a unidade de secagem, onde transfere calor para os grãos e leva consigo a água liberada. Então, o ar que deixa o equipamento está a alta temperatura, porém não saturado, o que significa uma clara

ineficiência no aproveitamento energético (PELEGRINA; ELUSTONDO; URBICAIN, 1999). Dados de Flink (1977) indicam que valores entre 70 e 90 kcal/kg de água removida são perdidas usando esse método clássico. Dados de Thompson et al. (1981) demonstram perdas ainda maiores, 150 e 174 kcal/kg, respectivamente. Uma maneira de reduzir essa perda é reciclar o ar até que ele se torne saturado. Porém, isso significa um aumento de tempo de secagem, uma vez que a força motriz de transferência de massa diminui, além, é claro de novos custos, devido à recirculação.

Bahu, Baker e Reay (1983) elencam as técnicas utilizadas para reduzir o consumo de energia em secadores: regimes que impliquem pouco ou nenhuma despesa de capital: incluem a redução de vazamentos de ar, mudança de temperatura e velocidade do ar de secagem, melhoria do isolamento, regimes que impliquem em despesas de capital significativo que incluem recuperação de calor a partir do ar de exaustão, recirculação de ar e utilização do calor residual.

O ciclo de ar é uma das técnicas mais utilizadas para economia de energia em secadores. Nele, uma fração de ar de ciclo é misturada com ar fresco, aquecida e introduzida novamente no secador (IGUAZ; LÓPEZ; VÍRSEDA, 2002).

Na literatura, encontram-se alguns trabalhos cujo objetivo foi a análise da influência da recirculação na eficiência energética.

Giner e De Michelis (1988) pesquisaram a eficiência térmica da secagem de trigo em leito fluidizado, obtendo um aumento acentuado da eficiência, atingindo o valor de cerca de 53%, sendo que na secagem sem recirculação do ar esse valor era de 28%.

Schoenau et al. (1996) avaliaram experimentalmente o potencial de conservação de energia por meio da recirculação do ar de exaustão, em um secador convectivo de feno. Os pesquisadores verificaram que a máxima economia de energia, obtida experimentalmente, foi de 27%, operando com 30% de recirculação do ar de exaustão.

Pelegrina, Elustondo e Urbicain (1999) estudaram o efeito da recirculação do ar de exaustão em secadores rotatórios semi-contínuos de vegetais. Os autores concluíram que a reciclagem parcial do ar de exaustão e posterior mistura com ar fresco representa uma redução significativa na economia de energia, quando todos os outros parâmetros de funcionamento são mantidos constantes.

Iguaz, López e Vírseda (2002) analisaram a influência da recirculação do ar de exaustão na performance de secadores rotatórios de subprodutos vegetais de atacado. Nas condições estudadas, os resultados simulados indicaram que a reciclagem do ar significou uma economia de energia entre 21-38,5% e elevação da eficiência térmica entre 28-63%.

Wiriyumpaiwong, Soponronnarit e Prachayawarakorn (2006), estudaram a secagem de soja em leito de jorro, concluindo que o consumo de energia decresce substancialmente com o aumento da razão de reciclo.

Tippayawong, Tantakitti e Thavornun (2008), avaliaram métodos de melhoria na utilização da energia e redução do custo de energia na secagem convectiva de frutos de longan. Os resultados mostraram que o secador modificado produziu uma eficiência térmica média de 0,35, comparada com 0,29 para o secador já existente. A utilização da energia e o custo do combustível foram reduzidos em mais de 16% e 80%, respectivamente. A melhoria foi atribuída à troca do gás por madeira, à recuperação de calor através de recirculação de ar quente, ao melhor controle de temperatura e umidade, e ao isolamento térmico. As alterações impostas para construção do novo secador, com *design* melhorado e maior eficiência energética, tiveram um período de retorno financeiro inferior a 3 anos. Em trabalho similar, Tippayawong et al. (2009) verificaram uma eficiência térmica média de 0,29, comparada com 0,19 para o secador já existente. A utilização da energia e o custo do combustível foram reduzidos em 42% e 45%, respectivamente.

Amantéa, Fortes e Santos (2012) estudaram a secagem de grãos de milho em secador de leito fixo com recirculação do ar de secagem, e verificaram que o aumento da razão de recirculação e da temperatura de secagem, combinado com a redução da velocidade do ar, implicam em uma maior eficiência energética.

Toneli et al. (2013) analisaram a influência da recirculação do ar de exaustão na eficiência térmica de secador *spray drying* de biomassa de banana verde, aplicando a modelagem de superfície de resposta (RSM). Foi constatado que quanto maior a razão de recirculação, maior a eficiência térmica.

Golman e Julklang (2014) estudaram a secagem de materiais cerâmicos em *spray drying*, variando a razão de recirculação, a temperatura e a velocidade de ar de secagem, a velocidade de alimentação e a concentração da pasta. Como resultado, ganhos significativos em eficiência energética e economia de energia foram obtidos para elevadas razões de recirculação do ar de exaustão.

Tanto em estudos com ou sem recirculação do ar de exaustão, os balanços de massa e de energia envolvidos nos modelos de secagem podem resultar em equações diferenciais ordinárias ou parciais, a depender do modelo e simplificações propostas. Modelos físicos mais elaborados, como a secagem de apenas um grão e quando considerado um secador convectivo em regime transiente, originam sistema de EDP's, com duas ou mais variáveis independentes. EDP's com suas condições auxiliares, formam tanto problemas de valor inicial quanto problemas de valor de contorno.

2.8 Métodos de otimização de problemas não lineares

A mensuração da eficiência energética pode ser realizada por meio de dois caminhos distintos. O primeiro, e mais dispendioso, é a obtenção de dados experimentais na própria planta ou em uma unidade experimental. Outro caminho é o emprego de ferramentas computacionais, em que modelos matemáticos e técnicas numéricas de simulação e otimização são utilizadas, a fim de se determinar as melhores condições operacionais, de acordo com a função objetivo previamente proposta.

A otimização, de acordo com Silva, Borsato e Silva (2000) e Bona et al. (2000), é o processo de descoberta de uma série de condições requeridas para a obtenção do melhor resultado em determinada situação. Já para Eiras e Andrade (1995), os processos de otimização são divididos em etapas, caracterizadas por decisões sobre a função objetivo a ser observada, pela determinação dos fatores que influenciam significativamente a resposta e, por fim, a otimização propriamente dita das variáveis selecionadas

Para Banga et al. (2003), a maioria dos modelos de operações de processamento de alimentos têm uma natureza dinâmica inerente. Portanto, devem-se empregar métodos concebidos para a otimização de sistemas dinâmicos, a fim de chegar a decisões ótimas. Conforme os autores, existem três tipos de problemas de otimização, que são especialmente relevantes:

- 1) ferramentas operacionais de ótimo, isto é, dado um modelo dinâmico do processo e um conjunto de especificações, o objetivo é calcular as condições de operação ideais que levam ao máximo desempenho, medido por alguns critérios pré-definidos;
- 2) calibração de modelos, ou seja, o conhecido problema de estimativa de parâmetro: encontrar os parâmetros de um modelo dinâmico não-linear que fornecem o melhor ajuste para um conjunto de dados experimentais;
- 3) projeto de processo integrado, sendo que, para encontrar simultaneamente as variáveis estáticas de projeto (como o tamanho e o número de unidades), as condições de funcionamento (como os fluxos) e outras questões de *design* (como os controladores), que minimizem os custos de capital e de operação, otimizando certas características da dinâmica do processo (por exemplo, maximizar a capacidade de controle).

Otimizar significa encontrar a melhor solução, que, em geral, implica encontrar o melhor ajuste entre as diversas exigências conflitantes. Uma definição mais formal seria a de encontrar a melhor solução, a partir do conjunto de todas as possíveis, de uma forma eficiente e sistemática. Qualquer procedimento de otimização implica mudar determinadas condições, chamadas de

variáveis de decisão, a fim de maximizar ou minimizar critérios pré-definidos, que são, normalmente, chamados de funções objetivo. Possíveis soluções são aquelas em que se reúnem um determinado conjunto de requisitos, chamados restrições. Assim, otimizar um processo significa encontrar o conjunto de variáveis de decisão, respeitando um conjunto de restrições.

Matematicamente, o problema geral de otimização pode ser definido como:

$$\text{Otimizar } f(x) \tag{2.40}$$

Sujeita a:

$$p_i(x) = 0, i = 0, \dots, h$$

$$q_i(x) \leq 0, i = 0, \dots, j$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \in \mathfrak{R}^n$$

Em que $f(x)$ é a função objetivo, $p_i(x)$ e $q_i(x)$ são as restrições de igualdade e desigualdade, h e j são os limites de projeto.

Tanto a função objetivo como o conjunto de restrições do problema em questão podem ser lineares ou não lineares. Em otimização numérica, as variáveis de controle podem assumir qualquer valor (inteiro ou real) que minimize ou maximize o valor da função objetivo (OLIVEIRA; LORENA, 2001), respeitadas as restrições.

Conforme Galski (2006), a resolução de problemas de otimização relacionado a uma função objetivo engloba os seguintes passos:

- 1) modelar e simular o processo associado ao problema;
- 2) definir matematicamente o problema de otimização e suas restrições;
- 3) escolher o otimizador mais apropriado ao problema e implementá-lo;
- 4) aplicar o otimizador ao problema e obter a solução ou soluções ótimas.

Muito embora a otimização ocorra de fato apenas no último passo, os demais passos acabam sendo igualmente importantes na solução do problema de otimização. Se, por exemplo, o modelo resultar em uma simulação muito custosa computacionalmente, provavelmente inviabilizará a otimização, na qual muitas simulações se farão necessárias. O oposto também é verdadeiro, pois se o modelo resultar em uma simulação muito grosseira do processo real, a solução obtida na otimização possivelmente não será a solução ótima do problema de otimização real.

A Figura 2.7 apresenta a taxonomia simplificada das diferentes técnicas de otimização encontradas na literatura. A descrição completa de cada uma é encontrada em Martínez (2013).

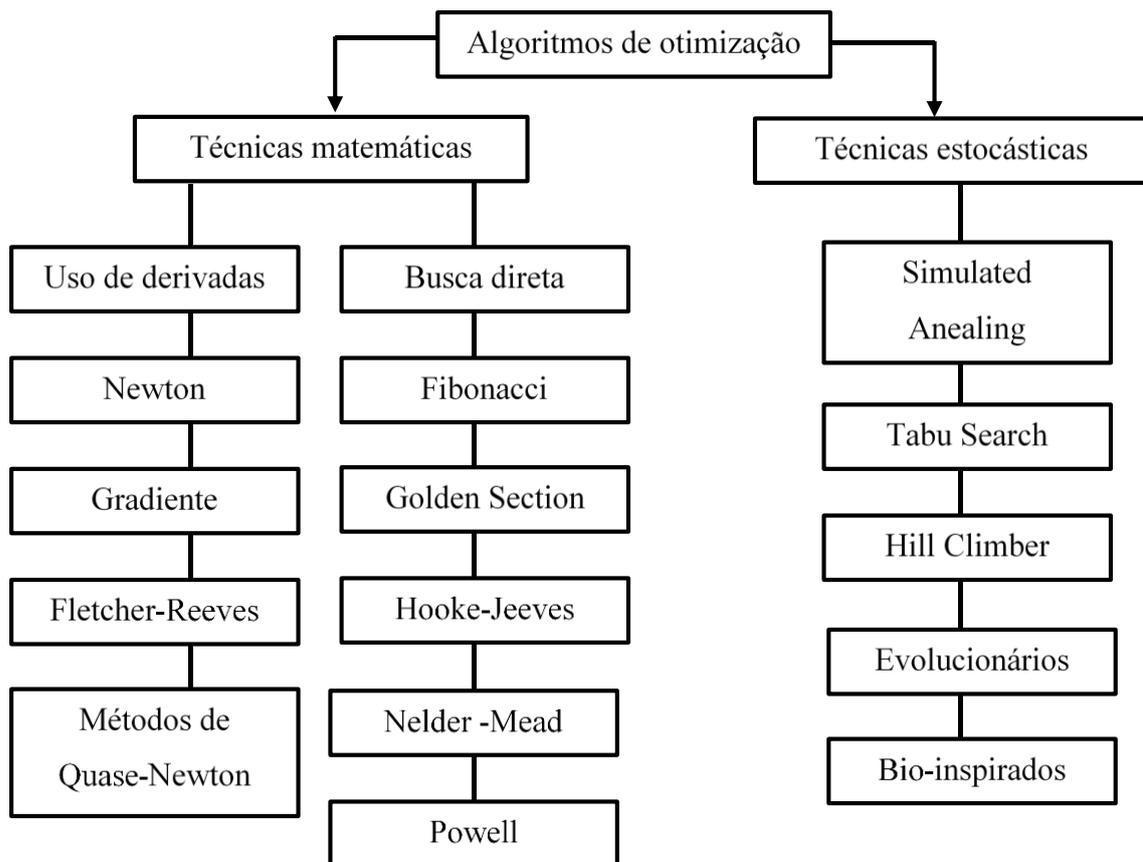


Figura 2.7: Taxonomia das técnicas de otimização, adaptado de Martínez (2013)

Tendo em vista o grande número de métodos de otimização, este texto abordará, rapidamente, apenas alguns dos métodos mais comuns de otimização encontrados na literatura técnica.

A otimização utilizando o método da superfície de resposta (RSM) tem sido uma das abordagens mais comuns de otimização encontrada em textos científicos. Tal técnica foi introduzida na década de 1950, associada à concepção de métodos experimentais. Nesta técnica, modelos empíricos muito simples são derivados de conjuntos de experimentos. Embora a utilidade da RSM em determinadas condições deva ser reconhecida, esta abordagem tem um certo número de inconvenientes importantes, devido à natureza empírica, local e estacionária dos modelos algébricos usados (BANGA et al., 2003).

Assim, quando da construção de um modelo matemático para representar um fenômeno físico, dois conjuntos de informações podem ser previamente conhecidos: dados teóricos e dados experimentais (WERNHOLT; MOBERG, 2011). Em modelagem matemática, é comum codificar os modelos em cores, associando-os ao nível de informação que apresentam. Os modelos do tipo

caixa-branca são o resultado de extensa modelagem fenomenológica, baseada em pressupostos teóricos e em leis da conservação; os modelos caixa-preta são apenas um veículo para descrever dados experimentais, sem quaisquer interpretações físicas; e os modelos caixa-cinza ficam entre estes dois extremos, são baseados em aspectos fenomenológicos e, também, descritos a partir de dados experimentais (GOLDMAN; PUNCH, 2015).

Em se tratando da aplicação de dados calculados, os algoritmos numéricos chamados de algoritmos de programação não linear dividem-se em três grandes grupos: enumerativos, estocásticos e determinísticos.

Os métodos enumerativos verificam todos os pontos que representem soluções, e tornam-se, portanto, inviáveis para problemas com grandes regiões de busca. Por outro lado, os métodos estocásticos têm como principal característica a busca pelo ponto ótimo, por meio de regras de probabilidade, trabalhando de maneira “aleatória orientada” (VILANOVA; CARRIJO, 2012).

De acordo com Rangaiah (1985), os métodos determinísticos de otimização podem ser convenientemente divididos em métodos de busca direta e métodos de gradiente. Esta última categoria usa derivadas das funções envolvidas no problema de otimização, enquanto a primeira categoria não. É possível agrupar os métodos de busca direta em duas classes, dependendo da metodologia: métodos de pesquisa padrão e métodos de busca aleatória. Os métodos de busca direta são de fácil entendimento e aplicação, já os métodos de gradiente, são, frequentemente, mais eficientes. Entretanto, a indisponibilidade de derivadas analíticas e a presença de funções descontínuas podem, em alguns casos, tornar os métodos de busca direta mais atraentes que os métodos de busca de gradiente.

O método do gradiente conjugado faz uso do mesmo princípio do método do gradiente. No método do gradiente, a direção é dada pelo oposto do gradiente da função, enquanto que, no método do gradiente conjugado, esta é determinada por direções conjugadas sucessivas (BEZ, 2005). De fato, pode ser demonstrado que, se a função for quadrática, uma busca ao longo das direções conjugadas convergirá em um número finito de passos, independentemente do ponto de partida. Uma vez que uma função não-linear, em geral, pode ser razoavelmente aproximada por uma função quadrática, métodos baseados nas direções conjugadas são geralmente bastante eficientes e são, de fato, convergentes quando se aproximam do ponto ótimo (CHAPRA; CANALE, 2011).

Já, os métodos de busca local caracterizam-se por apresentar altas taxas de convergência quando o ponto inicial está suficientemente próximo da solução. Os algoritmos baseados em métodos locais são usualmente modificados incorporando propriedades de convergência global (KOZAKEVICH, 1995). Estes, por sua vez, abordam o problema de encontrar a melhor solução

ao longo de todo a região viável. Abordagens típicas incluem técnicas metaheurísticas (como os algoritmos evolucionários) e técnicas de enxame de partículas (MORALES-ENCISO; BRANKE, 2015).

Entre os métodos de busca direta para funções não-lineares, destacam o método Simplex de Nelder-Mead. Um simplex é uma figura geométrica de volume não nulo composta por $K+1$ vértices, em um espaço K -dimensional, com cada dimensão do espaço sendo definida pelos valores de um parâmetro a otimizar. Cada vértice do simplex é formado por um conjunto de valores dos parâmetros a otimizar e tem associado um valor da função objetivo (NETO; GUETTER; MINE, 2007). Nelder e Mead (1965) propuseram um simplex modificado, em que o simplex básico é alterado em tamanho e forma, de modo a adaptar-se melhor à superfície de resposta. Neste método, o vértice que fornece o melhor valor da função objetivo é projetado pelo centro de gravidade dos vértices remanescentes. Melhores valores da função objetivo são obtidos substituindo, sucessivamente, o ponto com maior valor da função por pontos melhores, até alcançar o valor extremo, de modo que a ideia básica é deformar o poliedro, até que ele caminhe no sentido desejado (PAMBOUKIAN, 2012).

Dentre os diversos métodos de otimização global, propostos na literatura, pode-se citar o algoritmo genético, o *simulated annealing* e o algoritmo de busca direta. Neste último, base do procedimento de minimização é a comparação dos valores da função objetivo, calculadas sobre um subconjunto de pontos do conjunto viável.

Outro método empregado com frequência em estudos científicos é o chamado método de busca padrão, que apresenta como principal característica a evolução da função objetivo sobre um padrão geométrico. Neste método, o primeiro tipo de busca explora o comportamento local da função objetivo e o segundo consiste em aproveitar a direção padrão, dentro do intervalo de restrições. A busca de padrões é um procedimento para variar sistematicamente as variáveis independentes de uma função de objetivo, na tentativa de localizar o valor ótimo da função.

Os métodos de busca padrão têm origem na década de 1960 e são utilizados até hoje devido à sua praticidade e simplicidade, pois não implicam no uso de derivadas da função objetivo, apenas os valores da função (WU, 2008). O comportamento da função é inferida a partir do sucesso ou fracasso da evolução da função objetivo, para cada mudança de coordenada. O vetor gradiente não é calculado nem apresenta qualquer significado sobre o valor absoluto de cada sucesso ou fracasso. Apenas a informação do sucesso/insucesso é usada para ajustar os tamanhos de passo para futuras pesquisas exploratórias e formar um padrão que indica o sentido provável ou outro movimento bem sucedido.

Já no método de busca em linha, a busca é feita com base em métodos de minimização, usando o gradiente, e o seu desempenho é dado pela minimização unidimensional. O método pode, com precisão, obter uma amostra da função objetivo na vizinhança do ponto ótimo e, então, identificar uma direção adequada, ao longo da qual a função objetivo decai significativamente. Neste método são definidos passos largos ao longo da direção de busca, fornecida por uma direção que se comporta como o gradiente e, então, realizada uma exploração da possível direção ótima. Neste caso, explora-se todas as possíveis direções (CAVALCANTE et al., 2004).

Existem algoritmos formais que utilizam a ideia das direções padrão para encontrar o valor ótimo eficientemente. O mais conhecido deles é chamado método de Powell (POWELL, 1964). Neste método, o processo de minimização inicia-se pela procura da solução, ao longo de cada direção ortogonal, variando, então, apenas um parâmetro por etapa. Os resultados de uma iteração anterior são usados para melhorar a eficiência da investigação durante a próxima iteração. Se algumas condições pré-estabelecidas são satisfeitas, a direção anterior, é descartada em favor de uma nova direção (AZEVEDO; MERKLEY; WALKER, 1997). Brent (1973) desenvolveu uma modificação do método de Powell, em que a otimização é feita por escalonamento e interpolação quadrática.

Em se tratando do estudo energético de processos, a seguir são elencados, cronologicamente, alguns trabalhos em foram aplicados métodos de otimização.

Banga et al. (1991) e Banga e Singh (1994) estudaram respectivamente a minimização do tempo de aquecimento de alimentos enlatados, e a maximização da eficiência energética da secagem convectiva de uma placa de celulose. Em ambos os trabalhos, os autores empregaram o método estocástico de pesquisa aleatória e controle integrado para sistemas dinâmicos (ICRS/DS), com restrição em relação a qualidade do produto.

Lee e Pyun (1993) otimizaram as condições operacionais (temperatura e vazão de ar de entrada, e razão de recirculação do ar de exaustão), com a finalidade de reduzir o consumo de energia na secagem em túnel de rabanete, tendo como restrição a qualidade do produto final. Para tal, utilizaram o método de otimização Box complex (BOX, 1965). Aplicando o mesmo método, no trabalho de Islam, Marks e Bakker-Arkema (2004), valores ideais de profundidade do leito, fluxos e teor de umidade do ar foram calculados, para maximizar a capacidade e para minimizar o custo de energia de secagem de milho.

Zhihuai e Chongwen (1999) aplicaram o método do polígono complexo na otimização de secadores de grãos em fluxo cruzado, com e sem recirculação de ar de secagem. Foram manipuladas as dimensões do secador, temperatura, velocidade do ar e razão de recirculação, de modo a reduzir o consumo energético.

Bon e Kudra (2007) utilizaram a técnica sequencial quadrática, que é um método indireto, para maximizar a qualidade do milho seco e minimizar o consumo de energia em um secador intermitente, manipulando o tempo de aquecimento, a umidade, a temperatura e a velocidade do ar.

Golmohammadi et al. (2015) otimizaram o consumo de energia na secagem intermitente de arroz em leito fluidizado pelo método de aproximação pelo controle do vetor de parametrização (GOH; TEO, 1988)

Já a técnica RSM foi utilizada em alguns trabalhos como o de Madamba e Liboon (2001), que estudaram a otimização da qualidade do aipo durante a secagem a vácuo, manipulando a temperatura, tempo e temperatura de secagem. Madamba e Lopez (2002) em estudo da otimização da qualidade de fatias de manga na desidratação osmótica, manipulando o tempo de tratamento, temperatura, concentração e espessura das fatias. Corzo et al. (2008), que utilizaram a RSM para otimizar as condições de operação da secagem convectiva em camada fina de coroba, sujeitas à restrições de velocidade e temperatura do ar de secagem e qualidade do produto final. Hernández-Díaz et al. (2013), em otimização da eficiência térmica, definida tanto pela primeira como pela segunda lei da termodinâmica, de um secador rotatório de grãos de café, sendo manipuladas a temperatura, a atividade e a umidade final dos grãos. E Cortés-Rojas et al. (2015), que estudaram a secagem de picão-preto em *spray drying*, de modo a determinar a condição de secagem que mais favorece a qualidade do produto final.

A técnica do algoritmo genético aplicada a processos de secagem, pode ser encontrada em trabalhos como Yüzgeç, Becerikli e Türker (2006) e Yüzgeç, Becerikli e Türker (2008), que estudaram a secagem convectiva de levedura, aplicando uma técnica de pesquisa probabilística que tem raízes em princípios da genética. O objetivo do estudo foi reduzir o consumo de energia e maximizar a qualidade do produto, mantendo para tal, restrições de temperatura e umidade do ar de secagem. Já, Curvelo Santana et al. (2010), utilizaram a técnica de algoritmo genético para otimizar a atividade específica de grãos de malte, manipulando a temperatura e o tempo de secagem em convecção forçada.

Por sua vez, Hernández (2009) estudou a secagem convectiva de mandioca e manga, aplicando o método de otimização não linear Simplex, com a temperatura do ar de secagem e tempo de secagem como variáveis manipuláveis. Jin et al. (2014) estudaram a secagem convectiva de brócolis, empregando método de parametrização de vetores, com objetivo de maximizar a qualidade e a eficiência energética do processo.

Uma técnica de otimização recentemente desenvolvida é o método da direção conjugada com deslocamento ortogonal (CDOS) de Moiseev (2011). Esta técnica é baseada nos métodos de

Powell e Brent, sendo um algoritmo de otimização global com busca em linha, que não implica na derivação da função objetivo. Algumas das características mais importantes do método CDOS incluem convergência quadrática para funções quadráticas e aproximadamente quadráticas; possibilidade de resolver problemas de otimização com dimensões elevadas; e manipulação direta de restrições de desigualdade. Este método manipula restrições de desigualdade diretamente, ou seja, não transforma uma função objetivo, nem usa valores numéricos de restrições de desigualdade. O método apenas usa o fato de violação de restrição, assim, o método CDOS não calcula os valores da função que não satisfaçam restrições de desigualdade, em vez disso, procura o ponto viável.

Na literatura, o emprego do algoritmo CDOS aparece em poucos trabalhos. A relação das pesquisas que fizeram uso do mesmo é apresentada a seguir.

Kutscher et al. (2013) aplicaram a rotina CDOS na estimativa do parâmetro de trocas gasosas pulmonares em ratos, em estudo da tóxica dinâmica de micropartículas rígidas de poliestireno e das implicações para os sistemas de entrega de medicamentos à base de microembolias.

Parlar e Sharafali (2014), aplicando método CDOS, otimizaram o lucro total, considerando o processo de chegada e duração de atendimento dos clientes em um sistema de filas de espera. No estudo, foram modelados e resolvidos problemas de *design* realistas, baseados em funções de custo polinomiais. Ainda, os autores otimizaram, simultaneamente, a quantidade de funcionários, a taxa de chegada de clientes e a taxa de prestação de serviço.

Chakraborty et al. (2014), em estudo de otimização de remoção de cromo (VI) de solução aquosa por ultra filtração com polímero, utilizaram o método CDOS para determinar as melhores condições de taxa de fluxo cruzado, pressão transmembranar, pH e razão polímero/metálico, a fim de maximizar o índice de desempenho para a remoção do cromo tóxico.

Curcio et al. (2015) utilizaram a técnica CDOS para otimizar a performance de secadores convectivos de vegetais, aliada a qualidade e segurança alimentar do produto seco. As restrições impostas foram a inativação microbiana, a coloração e a umidade do produto, manipulando a umidade relativa e a temperatura do ar de secagem e o tempo total do processo.

Dumond e Baddour (2015) aplicaram a técnica CDOS na otimização das dimensões da amarração e forma das cordas, a fim de atingir determinado sistema de frequências sonoras em uma placa retangular de madeira. O modelo utilizado na análise baseou-se numa seção típica de um tampo de guitarra.

Basile et al. (2015) empregaram o método CDOS em um processo de reação troca água-gás (*water gas shift reaction*) em um reator de membrana seletiva a hidrogênio. O objetivo da

otimização foi estudar a performance da troca água-gás (em termos de conversão de CO, recuperação de hidrogênio e pureza do hidrogênio permeado). Para tal, os parâmetros pressão e temperatura de reação, velocidade do gás, razão molar de alimentação, e configuração de alimentação foram manipulados.

Por sua vez, para a verificação da adequação dos dados calculados pela modelagem, simulação e otimização do processo de secagem de grãos, é necessário o uso de métodos estatísticos apropriados.

2.9 Adequação do modelo aos dados experimentais

A adequação do modelo matemático aos dados experimentais pode ser estudada por meio de testes estatísticos, como, por exemplo, o coeficiente de determinação, o erro médio relativo e o critério de informação de Akaike (AIC).

O teste do coeficiente de determinação, também conhecido como teste do R^2 , é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. É uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra (BARROS NETO et al., 1995).

O erro médio relativo é definido por:

$$E = \frac{X_{\text{EXP}} - X_{\text{CAL}}}{X_{\text{EXP}}} \quad (2.41)$$

Em que E é o erro relativo, X_{EXP} é o valor experimental da umidade (b.s.), e X_{CAL} é o valor calculado da umidade (b.s.).

O AIC, que pode ser entendido como um critério que dá uma pontuação para o modelo, e é baseado na adequação do modelos aos dados experimentais e na ordem do modelo (AKAIKE, 1973), é definido como:

$$\text{AIC} = n_{\text{exp}} \cdot \ln(\text{SQ}/n_{\text{exp}}) + 2k \quad (2.42)$$

Em que n_{exp} é o número de observações, SQ é a soma de quadrados dos desvios e k é o número de parâmetros do modelo.

O AIC é uma medida da qualidade do ajuste do modelo estimado, fornecendo uma medida relativa da perda de informações quando um determinado modelo é usado para descrever dados experimentais, assim, o objetivo é minimizar essa perda.

Na sequência, são apresentados os grãos cuja secagem foi objeto de estudo no presente trabalho.

2.10 Secagem de grãos de uva

As uvas são uma das frutas mais populares e saborosas do mundo e uma rica fonte de compostos polifenólicos, especialmente ácidos fenólicos, flavan-3-ols, como a catequina e seus isômeros e proantocianidinas (MAKRIS; BOSKOU; ANDRIKOPOULOS, 2007), com propriedades antioxidantes, que neutralizam radicais livres (KRISHNASWAMY et al., 2013). A produção mundial de uvas foi de 67 milhões de toneladas, a partir de 7,3 milhões de hectares plantados, somente em 2007 (KILIÇKAN; ÜÇER; YALÇIN, 2010). E, de acordo com o estudo de Jiang, Simonsen e Zhao (2011), uvas frescas *Vitis vinifera* cultivar Cabernet Sauvignon são compostas de aproximadamente 20,91% de grãos.

Quanto à estrutura, de acordo com Rizzon, Zanuz e Manfredini (1994), o cacho de uva é formado de duas partes distintas: o engaço e a baga, também chamada de grão. A baga é formada por três partes distintas: a película, a polpa e a semente. A película ou casca é o envoltório protetor da baga. É revestida externamente por uma substância cerosa, denominada pruína, que diminui as perdas de água e retém leveduras e outros microrganismos. Na película se encontram as substâncias aromáticas e a matéria corante das uvas. A polpa é a parte mais importante da baga, sendo formada quase que exclusivamente de mosto. Este, por sua vez, é constituído principalmente pelos açúcares, ácidos, minerais, compostos nitrogenados, matéria pécica, enzimas, vitaminas, além da água. As sementes se encontram no centro da baga. O número é variável de 0 a 4, conforme a variedade.

Para fins de nomenclatura, o presente texto emprega o termo “grãos” ao se referir às “sementes” de uva.

O bagaço de uva, composto de grãos, pele e restos do caule, é um dos subprodutos gerados pela indústria de vinhos, e é usado principalmente para a produção de álcool. Entretanto, segundo os autores, o álcool é produzido muito mais eficazmente por destilação dos excedentes de vinho. Os grãos de uvas podem, também, ser utilizados para a extração de óleo, que de acordo com Davidov-Pardo e McClements (2015), é rico em ácidos graxos insaturados, que representam mais de 89% da composição oleica total, sendo que muitos destes ácidos são ácidos graxos essenciais.

A extração de óleo envolve várias operações preliminares, tais como a limpeza, descasque, secagem e moagem. Diferentes métodos de secagem são usados na secagem de frutos e legumes, e a secagem convectiva é atualmente o método mais amplamente utilizado na tecnologia pós-colheita de produtos agrícolas. Entretanto, essa técnica pode consumir até 15% de toda a energia empregada em todo o processamento (PERUSSELLO et al., 2014).

Existem poucos estudos na literatura relacionados a secagem de uva sem sementes, tais como o estudo da Bennamoun e Belhamri (2006), que estudaram a secagem solar de uvas cultivar Maiorcan; Esmaili et al. (2007b) e Esmaili et al. (2007a), que estudaram a secagem em camada fina de uvas *Vitis vinifera* L.; Çakmak e Yıldız (2009), que desenvolveram um secador solar de uvas de Elazig/Turquia; e Azzouz et al. (2002), que investigaram a cinética da secagem em camada fina, e as isotermas de equilíbrio dos cultivares Chasselas e Sultanin. Na área de reutilização de resíduos, recentemente, Cruz et al. (2016), avaliaram o efeito da aplicação de ultrassom na secagem de casca de uva, por convecção forçada; e Torres et al. (2015) estudaram os efeitos do processo de crio-secagem sobre o aroma e potencial polifenólico de cascas de uvas brancas.

No entanto, existem apenas quatro trabalhos que estudaram a secagem de grãos de uva.

Roberts, Kidd e Padilla-Zakour (2008), estudaram a secagem convectiva em camada fina de grãos de uva *Vitis vinifera* cultivares Riesling e Cabernet Franc, e *Vitis labrusca* cultivar Concord, sob condições de ar de secagem iguais a 40, 50 e 60 °C e 1,5 m/s. No trabalho, os autores aplicaram modelos empíricos para o ajuste da cinética de secagem.

Menezes (2014), avaliou modelos empíricos no estudo da cinética de secagem e grãos de uva das variedades Cabernet Sauvignon e Bordô em camada fina. Com a finalidade de determinar a influência das condições de secagem na obtenção de óleo, a autora utilizou o ar de secagem em velocidades de 0,8; 1,2 e 1,6 m/s e temperaturas de 30, 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Bracht (2012), estudou a secagem de grãos de uva das variedades Cabernet Sauvignon e Bordô em leito de jorro. A autora avaliou a influência da temperatura do ar de entrada do secador, 50, 60 e 70 °C, e altura do leito de jorro, 9,0; 12,0 e 15,0 cm, ajustando modelos matemáticos empíricos aos dados experimentais obtidos.

Mais recentemente, Clemente et al. (2014) estudaram a secagem de grãos de *Vitis vinifera* cultivar Bobal, avaliando a influência das condições do ar de secagem e da aplicação de ultrassom, na cinética da secagem convectiva. Os autores ajustaram as equações de Peleg e resolveram o modelo difusivo, com condição de equilíbrio na superfície, pelo método de separação de variáveis. Foram estudadas as condições de 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 m/s e 40, 50, 60 e 70 °C, com e sem a aplicação de ultrassom.

Face às características de interesse industrial que o óleo de grãos de uva apresenta, e, considerando a escassez de estudos relativos à secagem desse tipo de grão, fica clara a necessidade de se aprofundar os conhecimentos referentes à cinética da secagem desses grãos, assim como se analisar a eficiência energética do processo de secagem.

2.11 Secagem de grãos de crambe

Os grãos de crambe, *Crambe abyssinica* Hochst, são grãos não comestíveis e seu óleo é rico em ácido erúico, cuja característica marcante é a diversidade de aplicações, como em fluídos hidráulicos, lubrificantes, aditivos, fibras, resinas, plásticos, lacas, dentre outros (LAZZERI et al, 1994). É uma matéria-prima cujo teor de óleo varia entre 28-60% (BRANDÃO et al, 2016), alternativa para a produção de biodiesel (SILVA; REIS; MACIEL, 2012), uma vez que apresenta alta tolerância às condições de seca e ciclo produtivo rápido, girando em torno de 90 dias (ROSA et al, 2014). O potencial de produtividade do crambe varia em torno de 1428,98 kg/ha (BRANDÃO et al., 2013) a 1507,05 kg/ha (JASPER, 2010).

Embora na literatura sejam encontrados alguns trabalhos que estudaram técnicas de extração e qualidade do óleo dos grãos de crambe, poucos estudos investigaram a secagem, e estes se restringem ao ajuste de modelos empíricos a dados experimentais.

Costa et al. (2011) avaliaram a secagem de grãos de crambe em estufa com ventilação forçada, com a temperatura do ar de secagem variando entre 30 e 70 °C. A cinética de secagem foi utilizada no ajuste de equações empíricas.

Faria et al. (2012) utilizaram um secador convectivo em camada fina, para analisar a influência da temperatura no processo de secagem de grãos de crambe. Os autores variaram a temperatura entre 30 e 70 °C e mantiveram a velocidade do ar de secagem em 1 m/s e ajustaram modelos empíricos aos dados experimentais obtidos.

Recentemente, Butarelli (2016) estudou experimentalmente a secagem em convecção forçada de grãos de crambe em leito profundo, variando as condições de operação de ar de secagem a 40, 50 e 60 °C e 1,5, 2,0 e 2,5 m/s.

Entretanto, para a consolidação da cultura de crambe no Brasil, estudos aprofundados sobre a secagem e armazenagem desses grãos são essenciais, para possibilitar que estruturas pós-colheita sejam construídas com base em parâmetros técnicos apropriados (BIAGGIONI; PIZA; FERREIRA, 2005).

2.12 Conclusões da Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura

Como conclusões do capítulo da Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura, pode ser verificado que os processos de secagem de grãos em convecção forçada são essenciais para a manutenção da qualidade dos produtos durante o armazenamento e para processamentos consequentes. Por sua vez, a secagem demanda considerável consumo energético, principalmente

no que tange ao aquecimento e movimentação do ar de secagem. Deste modo, a modelagem, simulação e otimização de secadores de grãos em convecção forçada pode ser utilizada como uma poderosa ferramenta para a determinação dos parâmetros de secagem, como tempo de processamento e características do ar de secagem.

Na literatura, é possível encontrar trabalhos que tratam do estudo da modelagem, simulação e otimização de secadores de grãos de forma específica, ou seja, trabalhos em que o alvo dos estudos é um tipo ou uma variedade determinada de grão. Isoladamente, foi verificado um único trabalho que estudou a cinética de secagem de grãos de crambe em leito profundo. E, por sua vez, a cinética de secagem de grãos de uva foi, até o momento, somente estudada em camada fina e em leito de jorro. Assim, a presente tese propôs o estudo da modelagem, simulação, e otimização sem e com recirculação do ar de exaustão, de secadores de grãos de uva e de crambe em leito profundo, a fim de preencher essa lacuna nos estudos relativos à secagem de grãos e à eficiência energética de tais processos.

3. SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS EM CAMADA FINA

O presente capítulo tem como objetivo a investigação da cinética de secagem de grãos em camada fina. Para a avaliação do modelo e a estimativa dos parâmetros de transferência de massa, foram empregados dados experimentais, obtidos por Menezes (2014), para a secagem de grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, nas condições de ar de secagem a 60, 70 e 80 °C e 0,8, 1,2 e 1,6 m/s. Foi utilizado um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos em coordenadas esféricas, descrito por duas EDP's, definidas a partir do balanço de massa e energia nos grãos de uva.

A partir do modelo, foram desenvolvidos dois estudos paralelos. Primeiramente, foram ajustados o coeficiente de difusividade mássica efetiva, D_{eff} , e o parâmetro k_I , chamado de constante de secagem, aplicando uma equação de taxa de secagem. No segundo estudo, foram ajustados os valores do coeficiente de difusividade mássica efetiva, D_{eff} , e o coeficiente de transferência convectiva de massa, k_F , aplicando uma equação de taxa de secagem diferente daquela do primeiro estudo, sendo, também, testadas duas condições de contorno distintas na superfície do grão (Dirichlet e Cauchy).

3.1 Modelagem da Secagem de Grãos em Camada Fina

Para a modelagem da secagem convectiva, considerou-se um leito fixo de grãos em camada fina. Para a realização dos balanços do modelo fenomenológico, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- os grãos, aproximadamente esféricos, formam um leito fino;
- as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- a umidade e temperatura iniciais dos grãos são uniformes;
- transporte unidimensional de calor e massa nos grãos;
- distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador;
- na transferência de calor entre o ar de secagem e os grãos, predomina o fenômeno da convecção;
- o ar de secagem comporta-se como gás ideal, nas condições de modelagem;
- não existem macro poros nos grãos, sendo que a difusão da umidade ocorre nos micro poros dos grãos;

- as variações de temperatura e umidade no ar de secagem são desprezíveis, portanto as propriedades termodinâmicas do ar permanecem constantes ao longo do processo de secagem.

Conforme observado experimentalmente por Menezes (2014), as curvas de taxa de secagem dos grãos de uva não apresentam o período inicial de acondicionamento nem de taxa de secagem constante, apresentando somente o período de taxa decrescente, indicando que a difusão é o mecanismo físico dominante que rege o movimento da umidade nos grãos de uva. É provável que, em temperaturas elevadas, toda a água livre presente na superfície dos grãos evapore rapidamente, impossibilitando a formação do período de taxa constante.

Dessa forma, já que não foi observado o período de taxa de secagem constante, os teores de umidade inicial e crítico foram considerados iguais, apenas foi considerado o período de taxa decrescente de secagem no modelo de taxa, sendo que as mesmas considerações foram utilizadas por Clemente et al. (2014), que estudou a secagem de grãos de uva variedade Bobal.

Quando da aplicação de modelos difusionais à secagem, em geral, são consideradas muitas suposições simplificadoras, como difusividade invariável com o teor de umidade, e resistência externa à transferência de massa desprezível, ou seja, a umidade na superfície do sólido instantaneamente alcança o valor da umidade de equilíbrio dos grãos. Sendo que o processo de transferência de massa entre um sólido e um fluido é influenciado pela resistência interna e/ou externa ao transporte de massa. A resistência à transferência de massa interna depende principalmente das características do sólido e da temperatura, enquanto a resistência externa está ligada ao coeficiente de transferência de massa externa, relacionado à espessura da camada limite. Uma dessas resistências frequentemente prevalece, embora a verificação da importância relativa seja necessária para o estabelecimento das condições de processo. Como regra geral, a resistência à transferência de massa em sólidos é elevada, sendo possível estabelecer que uma característica geral da cinética do processo de transferência de massa é a sua relativa.

Nesse sentido, quando a resistência externa à transferência de massa é considerada negligenciável, pode-se assumir o equilíbrio termodinâmico na superfície, $X(R, t) = X_E$. Porém, em alguns processos de secagem, a resistência externa não pode ser desconsiderada, devido principalmente à baixa velocidade do ar de secagem. Neste caso, a umidade na superfície do sólido é determinada considerando-se um coeficiente de transferência de massa entre o sólido e fluido.

O período de taxa de secagem decrescente é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios, de modo que a complexidade dos fenômenos conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para prever a taxa de secagem. Assim, foi analisado o emprego de duas equações de taxa de secagem distintas.

Uma das possibilidades de se calcular a taxa de secagem é fazer o ajuste da relação $dX/dt = \text{constante}$, a partir das curvas cinéticas experimentais. Entretanto, o presente estudo buscou modelos alternativos, encontrados na literatura, com a finalidade de compará-los entre si.

A equação de taxa de secagem testada é comumente empregada em trabalhos que estudam a secagem de grãos, como, por exemplo, os trabalhos de Yang et al (2002) e Chueaprasat e Chitsomboon (2008), que estudaram a secagem de arroz; Barrozo et al. (2006), em estudo de secagem de soja; Ciro-Velásquez, Abud-Cano e Pérez-Alegría (2010) em estudo de secagem de grãos de café; e Jingyun, Huiling e Xiaoguang (2012), que estudaram a secagem de trigo. A taxa considera a variação de acordo com a diferença entre a umidade superficial e a umidade de equilíbrio:

$$\psi_I = k_I[X(r, t) - X_E(r, t)]m_{SS} \quad (3.1)$$

Em que ψ_I é a taxa de secagem (kg/min), k_I é o coeficiente da equação da taxa (min^{-1}), e m_{SS} é a massa do sólido seco (kg).

A partir das hipóteses simplificadoras, foram obtidos os seguintes balanços mássicos e energéticos, considerando que a secagem ocorre somente na superfície dos grãos:

Balanço de massa nos grãos

Em coordenadas esféricas, com variação de umidade radial, o balanço de massa em cada grão é:

$$\frac{\partial X(r, t)}{\partial t} = D_{\text{eff}}(t) \frac{\partial^2 X(r, t)}{\partial r^2} + D_{\text{eff}}(t) \frac{2}{r} \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \quad (3.2)$$

Em que X é a umidade do grão em base seca (kg de água/kg seco), t é o tempo (min), r é a coordenada radial (m) e D_{eff} é o coeficiente de difusividade mássica efetiva (m^2/min).

No instante imediatamente inicial à secagem, a umidade é uniforme e igual à umidade inicial. No centro da esfera não existe fluxo de umidade. Por sua vez, na superfície da esfera, houve a imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) no contorno da esfera e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno. Assim, as condições inicial e de contorno são:

$$t = 0, X(r, t) = X_0, 0 \leq r \leq R \quad (3.3)$$

$$\left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.4)$$

Sendo:

$$-D_{\text{eff}}(t) \left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = k_1 [X(r, t) - X_E(r, t)], t > 0 \quad (3.5)$$

Em que R é o raio do grão (m).

Para a resolução da equação da difusão mássica, é necessário o conhecimento prévio da relação entre a umidade de equilíbrio e a atividade da água, que é fornecida pela isoterma de equilíbrio. Para o caso dos grãos de uva, Menezes (2014) determinou experimentalmente que, para ambas as variedades estudadas, o Modelo de Henderson (1952) representa adequadamente a relação atividade da água *versus* umidade de equilíbrio:

$$X_E(r, t) = d \left[\frac{1}{T_S(r, t)} \ln \left(\frac{1}{1 - a_w(t)} \right) \right]^{-b} \quad (3.6)$$

Em que X_E é a umidade de equilíbrio (b.s.), T_S é a temperatura do grão ($^{\circ}\text{C}$), a_w é a atividade da água, d e b são parâmetros do modelo. Os parâmetros do modelo são apresentados na sequência do presente texto.

Balanco de energia nos grãos

Na secagem por convecção, a superfície do grão troca calor com o ambiente, como resultado da convecção e por condução interna, existindo, ainda, fluxo de energia saindo dos grãos devido à dessorção. Tem-se, portanto, o balanço de energia no grão:

$$\frac{\partial T_S(r, t)}{\partial t} = \alpha_S \frac{\partial^2 T_S(r, t)}{\partial r^2} + \alpha_S \frac{2}{r} \frac{\partial T_S(r, t)}{\partial r} \quad (3.7)$$

Em que T_S é a temperatura do grão ($^{\circ}\text{C}$), t é o tempo (min), r é a coordenada radial (m), α_S é a difusividade térmica dos grãos (m^2/min).

No instante imediatamente inicial à secagem, a temperatura é uniforme e igual à temperatura ambiente inicial. No centro da esfera não existe fluxo de calor, por sua vez, na superfície da esfera, a energia que sai é igual à soma da energia que entra no ar de secagem devido à convecção e devido à evaporação. Assim, as condições inicial e de contorno são:

$$t = 0, T_S(r, t) = T_{S_0}, 0 \leq r \leq R \quad (3.8)$$

$$\left. \frac{\partial T_S(r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.9)$$

Assim:

$$\kappa_S \left. \frac{\partial T_S(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = h_c(T_G(t) - T_S(r, t)) - k_I(X(r, t) - X_E(t))\rho_S\lambda_D(T_S), t > 0 \quad (3.10)$$

Em que T_G é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), κ_S é a condutividade térmica do grão ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$), e λ_D é o calor de dessorção (kJ/kg).

A umidade média dos grãos em função do tempo, $\bar{X}(t)$, necessária para a comparação com os dados experimentais e validação do modelo, foi calculada pela seguinte expressão:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{V} \int X(r, t) dV \quad (3.11)$$

3.2 Propriedades Termo Físicas necessárias para a Solução dos Modelos de Secagem Convectiva em Camada Fina

As propriedades termo físicas necessárias para a solução dos modelos propostos nos dois casos estudados são listadas e discutidas a seguir.

O diâmetro equivalente dos grãos, que é o diâmetro que teria a esfera de igual volume, foi calculado a partir dos dados experimentais de Menezes (2014), de acordo com expressão proposta por Mohsenin (1965), que emprega as dimensões dos grãos no cálculo:

$$de = (wl\delta)^{1/3} \quad (3.12)$$

Em que de é o diâmetro equivalente do grão (m), w é a largura do grão (m), l é o comprimento do grão (m) e δ é a espessura do grão (m).

As propriedades diâmetro equivalente, massa específica, calor específico e parâmetros da isoterma de equilíbrio, dos grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon são elencadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades termo físicas dos grãos de uva

Propriedade	Valor
Diâmetro equivalente (m) ⁽¹⁾	$4,169 \times 10^{-3}$
Massa específica (kg/m^3) ⁽²⁾	1260
Calor específico ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$) ⁽²⁾	1,50
Parâmetros da isoterma, Eq. (3.6) ⁽²⁾	$d=3,0280; b=0,9838$

⁽¹⁾ Calculado, ⁽²⁾ Menezes (2014)

De acordo com Giner e Mascheroni (2001), grãos não apresentam condutividade térmica elevada, sendo que alguns valores encontrados na literatura, para grãos e grãos oleaginosos, em W/m °C, são 0,6404 para o cacau (HIL, 2010), 0,28 para a borragem (YANG et al., 2002), 0,155 para a colza (MOHSENIN, 1980), 0,250 para os grãos de canola (YU; SHRESTHA; BAIK, 2015), 0,203 para as avelãs (DEMIR et al., 2003), e 0,180 para os amendoins (BITRA et al., 2010).

Assim, a condutividade térmica dos grãos de uva, κ_S , foi igualada à do milho, 0,315 W/m °C (ISTADI; SITOMPUL, 2002), por apresentar um valor intermediário àqueles encontrados na literatura.

A difusividade térmica foi calculada pela expressão:

$$\alpha_S = \frac{\kappa_S}{\rho_S c_{p_S}} \quad (3.13)$$

Em que c_{p_S} é o calor específico do grão (kJ/kg °C).

O valor do calor de dessorção dos grãos, λ_D , foi igualado ao calor de vaporização da água pura, conforme Treybal (1980):

$$\lambda_D(T_S) = 2,162 \times 10^3 + 2,3T_S(r, t) \quad (3.14)$$

Por se tratar de camada fina, as propriedades físicas do ar de secagem não são alteradas durante o processo. Assim, a massa específica do ar de secagem foi calculada como a de gás ideal, a condutividade térmica e a viscosidade do ar de secagem foram obtidas a partir de correlações propostas por Geankoplis (1993).

As propriedades termodinâmicas empregadas nas simulações incluem a constante dos gases ideais do ar de secagem, $R_G = 287$ J/kg °C, o calor específico do ar de secagem seco, $c_{p_{G,D}} = 1005$ J/kg °C, o calor específico da umidade presente no ar de secagem úmido, $c_{p_{G,W}} = 1880$ J/kg °C, e o calor específico da água presente no grão, $c_{p_{S,W}} = 4187$ J/kg °C, todas obtidas em Amantéa et al. (2013).

3.3 Procedimento de Resolução do Modelo e Estimativa de Parâmetros

Na resolução do sistema de equações diferenciais, foi empregado o método das Linhas. Neste método, as derivadas espaciais foram aproximadas por diferenças finitas. Esta metodologia simples transforma o sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações

ordinárias. Inicialmente, foram realizados testes para avaliação do número de elementos de discretização, com 10 e 50 elementos. Verificou-se que os resultados foram muito próximos, com diferença na ordem de 10^{-8} em relação ao valor da umidade média do leito. Optou-se, portanto, em utilizar 10 elementos de discretização, de modo a reduzir o esforço computacional. Para a resolução do sistema de equações, obtidas após a discretização, foi empregado o *software* Maple 13[®], comando *dsolve*, e método numérico de *Rosenbrock* (ROSENBROCK, 1963). Neste, o valor do passo de integração, se não especificado, como no presente caso, é determinado automaticamente, considerando o comportamento local do sistema. No problema de secagem investigado, a temperatura e a umidade inicial é a ambiente (T_{G_0}, Y_0), que repentinamente são aumentadas para $T_{G_{feed}}$ e Y_{feed} , na alimentação do secador, e mantida neste valor. Esta condição de contorno foi modificada com o intuito de torná-la contínua na variável tempo, de acordo com:

$$T_G(t) = T_{G_{feed}} + (T_{G_0} - T_{G_{feed}})e^{-st} \quad (3.15)$$

$$Y(t) = Y_{feed} + (Y_0 - Y_{feed})e^{-st} \quad (3.16)$$

Em que $s=10^5 \text{ min}^{-1}$.

As formas das funções para o cálculo dos coeficientes de transferência e também a exatidão dos valores numéricos dos parâmetros envolvidos nestas duas funções é vital para o sucesso da simulação. Desta forma, os coeficientes de transferência foram estimados empregando o método de otimização não linear Simplex, utilizando o comando *NLPSolve* do *software* Maple 13[®]. Sendo que os parâmetros foram determinados após minimização do erro quadrático dos desvios da umidade do leito (valor calculado e valor experimental). A função objetivo utilizada foi a seguinte:

$$OBF = \sum_{i=1}^{n_{exp}} (X_{EXP} - X_{CAL})^2 \quad (3.17)$$

Em que OBF é a função objetivo, n_{exp} é o número de dados experimentais, $\overline{X_{EXP}}$ é a umidade experimental média do leito (b.s.) e $\overline{X_{CAL}}$ é a umidade média do leito calculada pela resolução do modelo (b.s.). Os cálculos foram realizados para cada conjunto de dados experimentais, em cada tempo experimental disponível. A umidade média foi calculada com o emprego da Eq. (3.11).

3.4 Coeficiente de Transferência de Calor e Eficiência da Transferência de Massa

Tanto o coeficiente de transferência de calor, h_c , quanto o coeficiente de transferência de massa, k_F , são parâmetros difíceis de serem determinados com precisão a partir de correlações, porém, são essenciais para a modelagem de processos de secagem, sendo que ambos podem ser estimados a partir de dados experimentais, pelo uso de correlações empíricas e por meio de simulações.

O coeficiente de transferência de calor pode ser obtido pela chamada relação de Lewis, que relaciona ambos os coeficientes de transferência de massa e calor (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002):

$$\frac{h_c}{k_F} = c_p Le^{2/3} \quad (3.18)$$

Em que Le é o número de Lewis.

De acordo com os autores, para gases, os números de Prandtl e Schmidt são próximos, levando a razão entre eles à unidade, indicando que a espessura das camadas limite mássica e energética são equivalentes. A relação de Lewis é aplicável aos sistemas ar-vapor que apresentam taxas de transferência de massa reduzidas. A relação de Lewis não é aplicável para outras misturas de gás, uma vez que a proporção de Lewis difere da unidade.

O estudo da eficiência da transferência de massa foi feito com base no método utilizado por Aregba, Sebastian e Nadeau (2006), que definiu essa eficiência como a razão entre a diferença da umidade inicial e a umidade pela diferença entre a umidade inicial e a de equilíbrio:

$$\varepsilon_m(r, t) = \frac{X_0 - X(r, t)}{X_0 - X_E(t)} \quad (3.19)$$

Em que ε_m é a eficiência da transferência de massa.

3.5 Estudo da Secagem de Grãos de Uva em Camada Fina, Estimando os Coeficientes de Difusividade Mássica Efetiva e a Constante da Equação de Taxa de Secagem

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos para a resolução do modelo proposto, considerando a secagem em camada fina de grãos de uva e a taxa de secagem ψ_1 , Eq. (3.1). Foram estimados a difusividade mássica efetiva, D_{eff} , e a constante de taxa de secagem k_1 .

Para as simulações conduzidas considerando a primeira equação de taxa de secagem, ψ_1 , conforme Equação (3.1), os resultados obtidos estimando os parâmetros de difusividade mássica efetiva e a constante da equação de taxa de secagem, são elencados na Tabela 3.2. Na estimativa dos parâmetros, a função objetivo, Eq. (3.17), foi manipulada, de forma que os coeficientes D_{eff} e k_1 fossem constante com a velocidade, variando apenas com temperatura do ar de secagem:

$$\text{OBF} = \sum_{T_{\text{Gfeed}}=\text{tg1}}^{\text{tg3}} \sum_{v=0,8;1,2 \text{ e } 1,6}^{\text{nexp}} (X_{\text{EXP}} - X_{\text{CAL}})^2 \quad (3.20)$$

Em que $\text{tg1} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{tg2} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\text{tg3} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 3.2: Valores de k_1 e D_{eff} estimados pelo modelo aplicando a primeira equação de taxa, ψ_1

Condição de Secagem		k_1 (min^{-1})	D_{eff} (m^2/min) $\times 10^9$
60 °C	0,8 m/s	0,353 ± 0,058	3,141 ± 0,161
	1,2 m/s		
	1,6 m/s		
70 °C	0,8 m/s	6,724 ± 0,960	4,353 ± 0,245
	1,2 m/s		
	1,6 m/s		
80 °C	0,8 m/s	26,350 ± 3,205	6,256 ± 0,571
	1,2 m/s		
	1,6 m/s		

Da Tabela 3.2, observa-se que os valores dos coeficientes da equação de taxa de secagem, k_1 , em m/min, obtidos por meio das simulações estão próximos às ordens de grandeza encontrados em trabalhos da literatura. Como o de *Ciro-Velásquez, Abud-Cano e Pérez-Alegría (2010)*, cujos valores ajustados pelo modelo de secagem de grãos de café em camada fina, variaram entre $2,622 \times 10^{-6}$ e $1,168 \times 10^{-5}$ m/min, respectivamente, para a secagem conduzida a 0,2 m/s e 40 e 60 °C, e *Silva et al. (2010)*, que ajustaram o valor de $2,279 \times 10^{-5}$ m/min, para a secagem de grãos de arroz a 1,5 m/s e 60 °C. Já, os valores calculados pela Eq. (2.14), para k_1 , variaram entre $9,7 \times 10^{-3}$ e $1,343 \times 10^{-6}$ m/min.

A variação do coeficiente da equação de taxa de secagem, k_1 , com a temperatura é reportado em trabalhos da literatura, como na secagem de mandioca (*CHÁVEZ-MÉNDEZ et al., 1998*), em que o valor variou entre 2,784 e 13,122 m/min, para temperaturas entre 55 e 70 °C e

velocidade mássica entre 0,09 e 1,04 kg/m²s; e na secagem de folhas de erva mate (ZANOELO; DI CELSO; KASKANTZIS, 2007), em que o valor variou entre 2,784 e 13,122 m/min, para temperaturas entre 55 e 70 °C e Reynolds entre $4,416 \times 10^{-5}$ e $3,882 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, respectivamente.

Em relação à difusividade mássica efetiva, D_{eff} , no trabalho de Menezes (2014), a ordem do valor determinado para a difusividade mássica efetiva dos grãos de uva, variedade Cabernet Sauvignon, foi de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{min}$, próxima à estimada nas simulações realizadas no presente estudo, Tabela 3.2. Também da Tabela 3.2, verificou-se que a difusividade mássica efetiva estimada apresentou uma dependência do tipo Arrhenius com a temperatura.

Ainda, da Tabela 3.2, verifica-se que não houve sobreposição das bandas definidas pelos intervalos de confiança da constante da equação de taxa de secagem, k_1 , e da difusividade efetiva, D_{eff} , obtidas para 95% de confiança. Assim, é possível afirmar que as variações observadas na estimativa do parâmetro k_1 e D_{eff} foram significativas nas condições de secagem estudadas.

A influência do parâmetros D_{eff} na umidade média dos grãos foi analisada por meio do estudo de sensibilidade paramétrica. Para tal, esse parâmetro foi variado em 50%, para mais e para menos. A Figura 3.1 apresenta os resultados obtidos para a umidade média do leite, na condição de secagem de 60 °C e 0,8 m/s, condição escolhida para a análise de sensibilidade paramétrica.

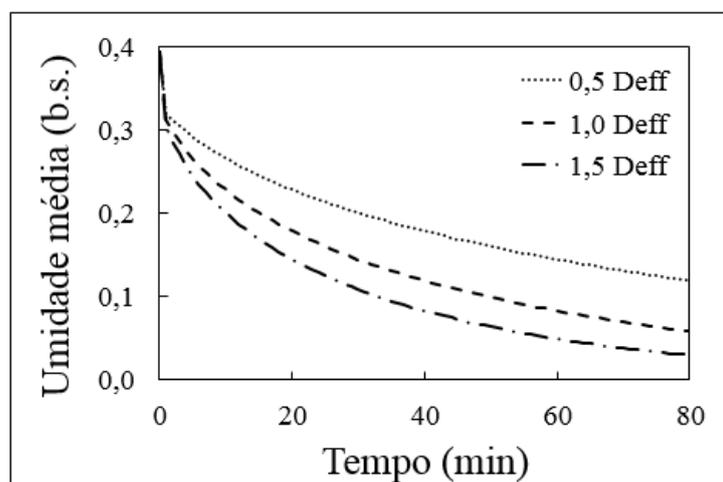


Figura 3 1: Sensibilidade do modelo ao parâmetro D_{eff}

Da Figura 3.1 é possível verificar que o parâmetro D_{eff} influenciou significativamente no modelo, quando variado em 50%. Este comportamento, somado ao fato de não ter sido observada a sobreposição das bandas de intervalo de confiança, indica que parâmetro D_{eff} não é constante para cada temperatura de secagem.

Nas Figuras 3.2 a 3.4, são apresentadas as curvas de secagem convectiva e aquecimento em camada fina, conduzidas a 1,6, 1,2 e 0,8 m/s e 60, 70 e 80 °C, todas obtidas com o emprego da primeira equação de taxa de secagem, Eq. (3.1).

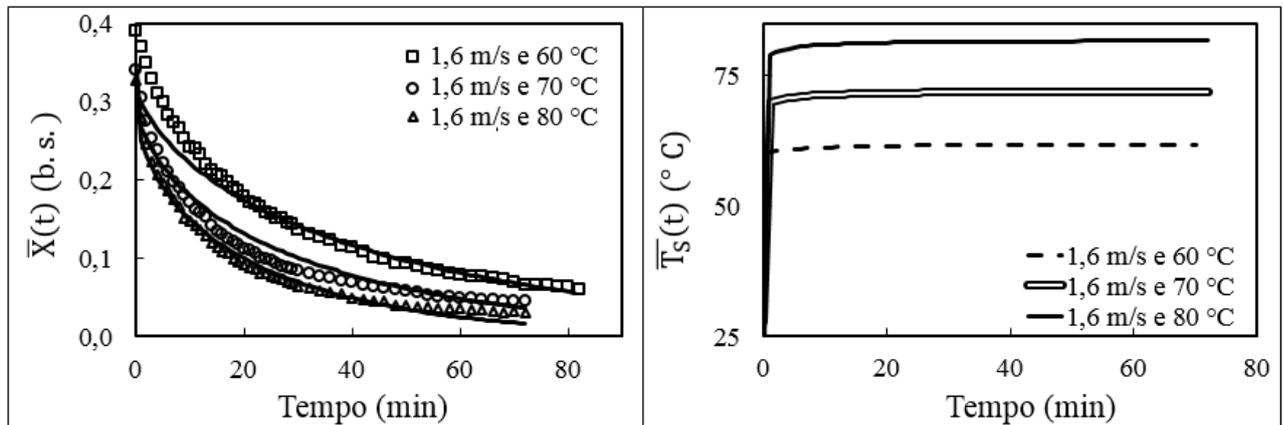


Figura 3.2: Curvas de secagem convectiva e aquecimento em camada fina para grãos de uva, conduzida a 1,6 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1)

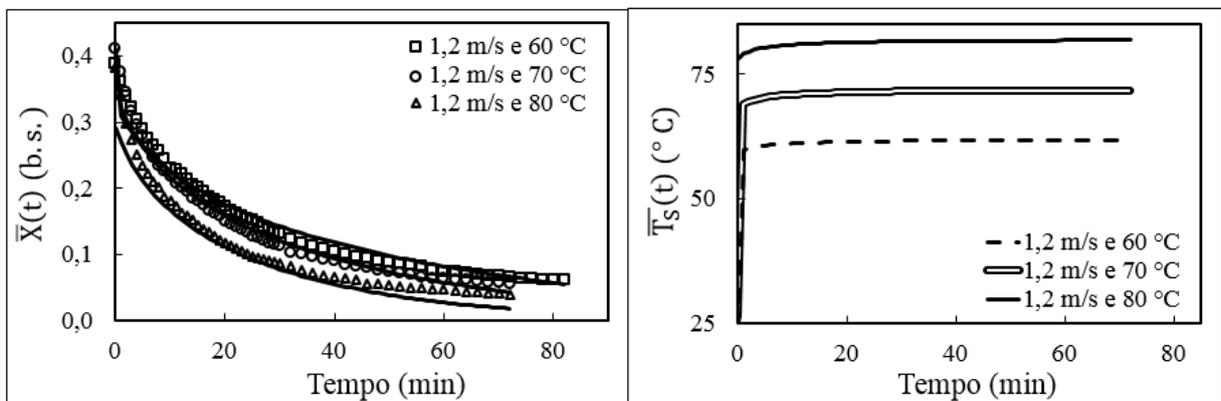


Figura 3.3: Curvas de secagem convectiva e aquecimento em camada fina para grãos de uva, conduzida a 1,2 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1)

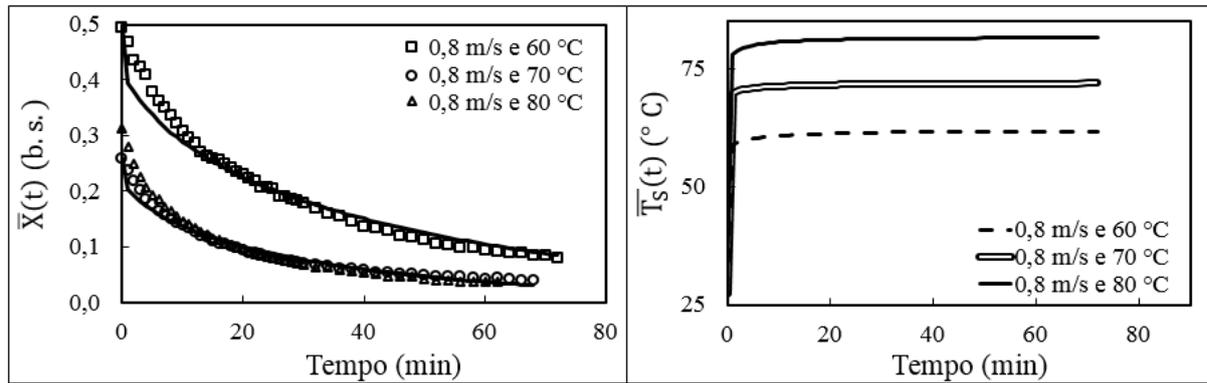


Figura 3.4: Curvas de secagem convectiva e aquecimento em camada fina para grãos de uva, conduzida a 0,8 m/s e taxa de secagem igual à Equação (3.1)

Das Figuras de 3.2 a 3.4 e Tabela 3.2, pode-se observar a que o aumento da temperatura do ar de secagem não só aumenta a taxa de secagem, mas, também, aumenta o coeficiente de difusividade mássica efetiva dos grãos e, portanto, facilita a transferência de massa a partir da camadas interiores para a superfície exterior (GOLMOHAMMADI; ASSAR; RAJABI-HAMANE, 2012). Nesse sentido, mantendo a velocidade constante e aumentando a temperatura do ar de secagem, obtém-se tempos de equilíbrio distintos. Quanto maior a temperatura, menor o tempo necessário para se alcançar o equilíbrio entre a umidade dos grãos e o ar de secagem. É possível, ainda observar a influência pouco pronunciada da velocidade do ar de secagem na curva de secagem. Essas características, influência acentuada da temperatura e modesta da velocidade, pode ser atribuída ao mecanismo cinético da secagem ocorrido nos grãos, em que se observa apenas o período de taxa decrescente, em que a difusão interna de umidade controla o movimento desta. Nesse mecanismo, a diferença de temperatura entre o interior do grão e sua superfície é determinante, e não a influência provocada pela velocidade do ar de secagem, que implica na evaporação do filme superficial.

Esse mesmo resultado foi observado em outros trabalhos que estudaram a secagem de grãos, sendo provável que a singular influência da velocidade na curva de secagem se dá devido à limitação da migração da umidade do interior do grão até a superfície, em velocidades elevadas. Pode-se imaginar que, quanto maior a velocidade do ar de secagem, a influência desta ficará menos relevante, até seu desaparecimento, momento a partir do qual somente a difusão terá influência na cinética. Para os autores, espera-se, então, que, partindo-se do mesmo ponto inicial, e operando na mesma temperatura e diferentes velocidades, as curvas se distanciem e cheguem ao mesmo ponto de equilíbrio.

Resultado semelhante foi encontrado por Barrozo et al. (2006), que estudando a secagem convectiva de grãos de soja, verificaram que velocidades diferentes resultaram em teores de umidade bastante próximo. No trabalho, os autores concluíram que, nas condições estudadas, a resistência à transferência de massa convectiva foi desprezível. Como a velocidade do ar não apresentou efeito nas curvas de secagem, em todos os casos estudados, a resistência ao movimento da umidade na superfície dos grãos (resistência externa) pode ser considerada insignificante. Dessa forma, o movimento interno da umidade (resistência interna) foi a principal resistência à taxa de perda de umidade. Essa resistência interna é evidenciada pela presença do período de taxa decrescente de secagem, característica de grãos e sementes.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva em camada fina, aplicando a Equação (3.1).

Tabela 3.3: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva em camada fina, nas simulações conduzidas com a segunda equação de taxa, Equação (3.1)

Condições de secagem		Erro médio (%)	F	valor-p	F crítico	R ²
0,8 m/s	60 °C	5,79	3732,82	0,8013	3,9258	0,985
	70 °C	6,48	2161,68	0,8914	3,9342	0,977
	80 °C	5,13	3283,04	0,5764	3,9342	0,985
1,2 m/s	60 °C	6,54	3342,45	0,9708	3,9258	0,984
	70 °C	5,38	2770,37	0,9162	3,9342	0,982
	80 °C	10,42	1951,52	0,2824	3,9342	0,975
1,6 m/s	60 °C	4,23	3546,97	0,4847	3,9273	0,985
	70 °C	11,22	1884,04	0,6532	3,9342	0,974
	80 °C	7,01	3697,10	0,9086	3,9342	0,987

Observa-se na Tabela 3.3 que, em relação ao comportamento normativo, para todas as condições testadas, nas simulações conduzidas com a primeira equação de taxa, Equação (3.1), o p-valor apresentou-se maior que 0,05, indicando que a diferença existente entre os valores experimentais e os obtidos pelo modelo não foi significativa. O valor médio do erro, Eq. (2.41), indica que o modelo foi apropriado para descrever a cinética da secagem convectiva em camada fina, uma vez que ficou em torno de 6,19%.

Ainda, da Tabela 3.3, os valores do coeficiente de determinação, R², para todas condições de secagem simuladas, foram superiores a 97%, indicando boa relação entre os dados experimentais da literatura e os resultados obtidos nas simulações.

Na análise do teste F, ao nível de 95% de confiança, todas as razões de $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$ foram superiores a 5, sendo que, em todas as condições simuladas, o modelo descreveu satisfatoriamente os casos investigados, e, portanto, a hipótese de que a transferência de massa seja controlada pela difusão mostrou-se apropriada para o caso estudado, assim o modelo desenvolvido para a secagem convectiva em camada fina pode ser utilizado para fins preditivos.

Dentre todos os dados simulados, do ponto de vista estatístico, os melhores resultados foram aqueles obtidos nas condições de secagem de 60 °C e 1,6 m/s, com R^2 de 0,985 e erro médio de 4,23%. Nessas condições, a Figura 3.5 apresenta o perfil de umidade dos grãos em diferentes tempos de secagem.

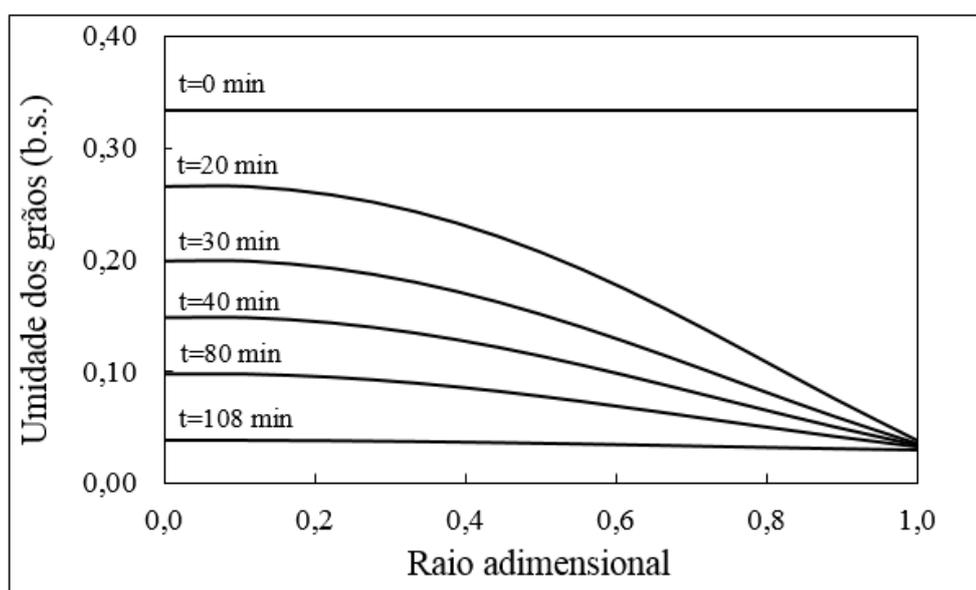


Figura 3.5: Perfil de umidade dos grãos em diferentes tempos de secagem, para o ar de secagem a 1,6 m/s e 60 °C, conduzida com a primeira equação de taxa, Equação (3.1)

Da Figura 3.5 é possível identificar que a transferência de massa é reduzida à medida que a secagem atinge os estágios finais, ou seja, com o decorrer do tempo, o perfil torna-se mais suave, devido à difusão da umidade de camadas interiores para a superfície (GOLMOHAMMADI; ASSAR; RAJABI-HAMANE, 2012). Em relação aos raios adimensionais, os perfis de umidade dos grãos apresentam valores diferenciados a partir do raio adimensional igual a 0,20, o que pode indicar que é a partir desse ponto que existe a resistência à transferência de massa dentro dos grãos.

Para a obtenção da temperatura superficial, Menezes (2014) confeccionou um calorímetro de isopor, composto de um termopar e um indicador de temperatura, para a determinação experimental da temperatura de superfície dos grãos de uva durante o processo de secagem. A Figura 3.6 compara as temperaturas superficiais calculadas e experimentais dos grãos durante a

secagem conduzida a (a) 0,8 m/s e 60 °C; (b) 0,8 m/s e 70 °C; e (c) 1,2 m/s e 80 °C, aplicando a primeira equação de taxa, Equação (3.1). Essas condições foram escolhidas para comparação com os dados experimentais uma vez que, dentre todo o conjunto de experimentações de Menezes (2014), apenas esses três testes apresentaram as mesmas condições de secagem, daquelas em que foram obtidas as curvas da cinética de secagem.

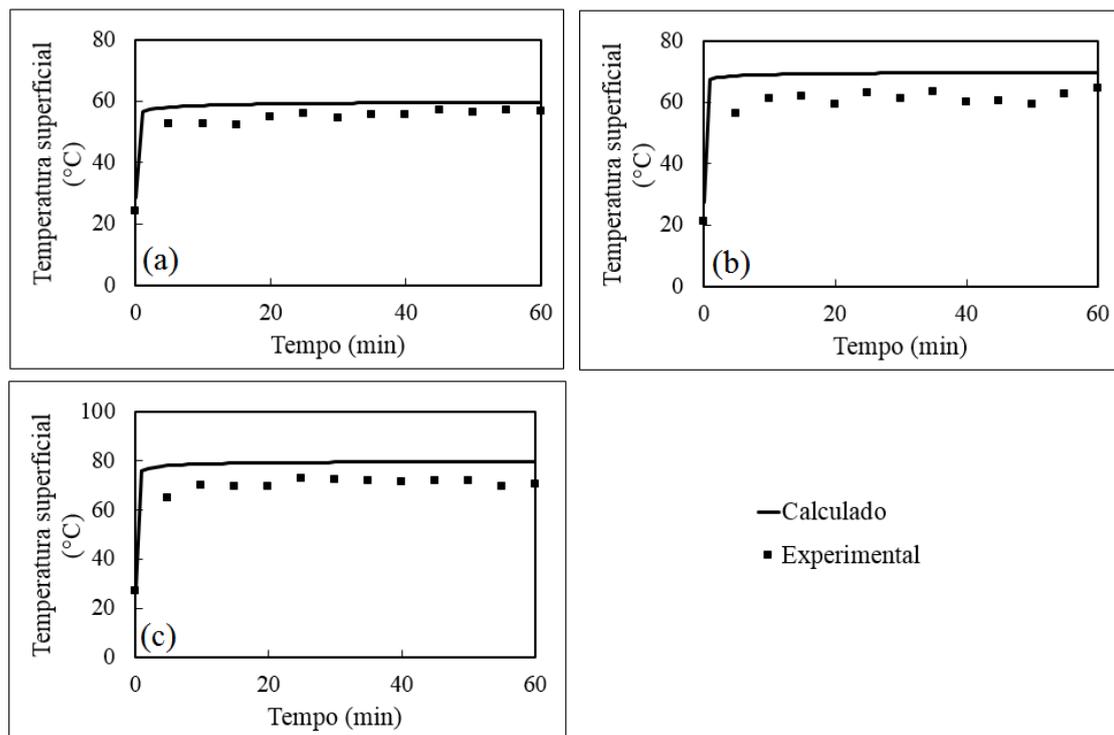


Figura 3.6: Temperatura superficial atingida pelos grãos para o ar de secagem a (a) 0,8 m/s e 60 °C; (b) 0,8 m/s e 70 °C; e (c) 1,2 m/s e 80 °C

Observa-se da Figura 3.6 que a temperatura é abruptamente elevada e, logo após, tende a permanecer constante (igual a temperatura de alimentação do ar de secagem). Isso ocorre uma vez que, logo após o início da secagem, a umidade é transferida rapidamente para o ar de secagem, carregando consigo energia e, em seguida, a temperatura dos grãos tende a permanecer constante. Após essa fase de adaptação, a quantidade de energia que deixa os grãos, devido ao fluxo de massa, é recompensada pela quantidade de energia que é transferida do ar de secagem. No período de taxa decrescente de secagem, típico da secagem de grãos e sementes, a taxa interna de transporte de água é menor do que a taxa de transporte a partir da superfície. Desta forma, a transferência de calor do ar para os grãos não é compensada pela transferência do vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura dos grãos aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem.

Ainda da Figura 3.6, verifica-se que existe uma pequena diferença entre a temperatura dos grãos e do ar de secagem. O leito sofreu um rápido aquecimento, uma vez que em torno de 20 minutos a temperatura da superfície dos grãos está próxima à temperatura do ar de secagem. Observou-se que a temperatura da superfície dos grãos foi sempre menor que a temperatura do ar de secagem. Já a velocidade do ar de secagem, não exerceu influência significativa sobre os perfis de temperatura, indicando que a transferência de massa no interior dos grãos corresponde à etapa limitante durante o processo de secagem.

A Figura 3.7 apresenta o perfil de temperatura dos grãos de uva, para a secagem modelada com o emprego da primeira equação de taxa de secagem, Equação (3.1), para a secagem conduzida a 80 °C e 1,6 m/s.

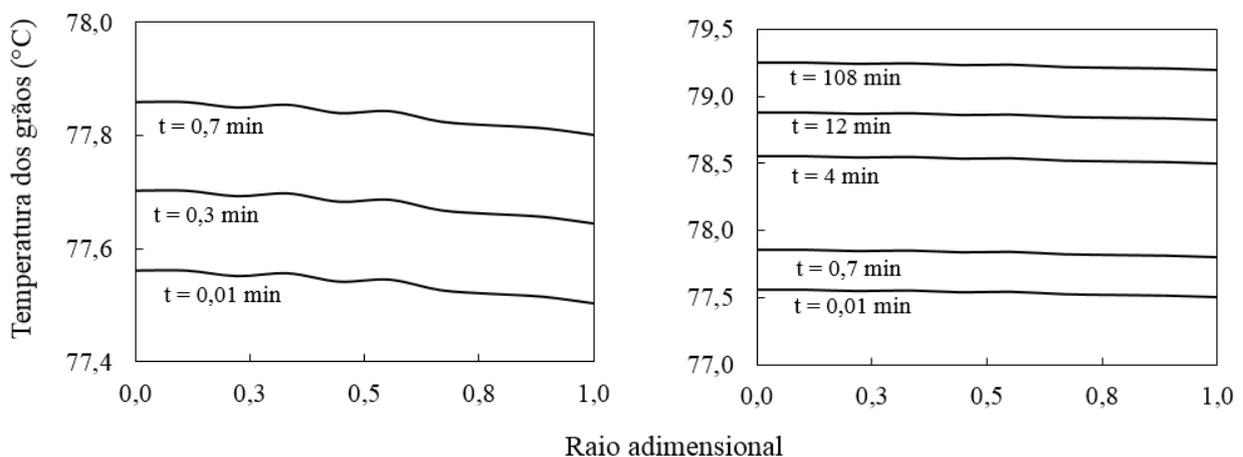


Figura 3.7: Perfil de temperatura dos grãos

Das Figuras 3.5 e 3.7, verifica-se que o teor de umidade, cuja nitidez dos perfis diminuíram gradualmente com o tempo, variou de forma mais acentuada com o raio adimensional que a temperatura. Esse comportamento acontece em virtude do elevado número de Lewis, que pode ser entendido como a relação entre as resistências internas de transferência de massa e calor. Isso significa que a taxa de transferência de calor interna é rápida, quando comparada com a transferência de massa interna.

A Figura 3.7 mostra que o perfil de temperatura dentro da partícula lineariza-se após o período de aquecimento, e, com o decorrer do processo, a inclinação do perfil de temperatura diminui, e as temperaturas do centro e da superfície da esfera se aproximam, de modo que o perfil permanece praticamente plano. Nesse sentido, o número de Biot da transferência de calor, B_{ih} , que relaciona a medida da taxa de condução de calor interna com a taxa de convecção externa, $h_c R / \kappa_s$, para as condições de secagem estudadas, variou entre 0,41 a 0,54. Esses valores reduzidos

indicam que a resistência na interface sólido-fluido é maior que a resistência interna de condução de calor e, por conseguinte, o gradiente de temperatura é pequeno (JURNAH; MUJUMDAR; RAGHAVAN, 1996). Assim, devido ao perfil achatado da temperatura, o uso de um modelo de parâmetros concentrados para a temperatura poderia ser utilizado, reduzindo o esforço computacional.

3.6 Estudo da Secagem de Grãos de Uva em Camada Fina, Estimando a Difusividade Mássica Efetiva e o Coeficiente de Transferência Convectiva de Massa

Um ponto controverso dos modelos difusionais, aplicados aos materiais biológicos, são as condições de contorno adotadas na superfície do material. Tanto condições de contorno de equilíbrio (primeiro tipo ou condição de Dirichlet), quanto condições de contorno convectivas (terceiro tipo ou condição de Robin), têm sido utilizadas para a descrição da secagem convectiva.

Dentre os trabalhos mais recentes, pode-se citar o emprego da condição de contorno de equilíbrio na secagem em leito fluidizado de arroz (GOLMOHAMMADI et al., 2015), soja (TORREZ IRIGOYEN; GOÑI; GINER, 2014), rami (SRINIVASAKANNAN; BALASUBRAMANIAN, 2008) e painço (SRINIVASAKANNAN; BALASUBRAMANIAN, 2009), secagem em forno de pimenta vermelha (YESILATA; AKTACIR, 2009) e cacau (HII et al., 2009), secagem de resíduos industriais de processamento de uva com infravermelho (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; CUADROS BLÁZQUEZ, 2009), e secagem em convecção forçada de feijão (SILVA et al., 2009a, SILVA et al., 2009b), arroz (STEFFE; SINGH, 1982; BUNYAWANICHAKUL et al., 2007) e soja (TORREZ IRIGOYEN; GOÑI; GINER, 2014).

Já o uso da condição de contorno convectiva, pode ser encontrado em pesquisas como de secagem convectiva de tomate cereja (BENNAMOUN; KHAMA; LÉONARD, 2015) e arroz (SILVA et al., 2010), secagem de cacau com bomba de calor (HII; LAW; LAW, 2013), e secagem de avelãs em leito fluidizado (TOPUZ; GUR; GUL, 2004).

As condições de contorno na superfície dos grãos são resultado da relação entre as condições de transferência de massa, no interior e na superfície dos grãos, e através da camada limite, δ_v . Por sua vez, o número de Biot de massa, B_{i_m} , através da camada limite é inversamente proporcional à espessura da camada limite, de modo que quanto mais espessa for esta, menor é o gradiente de concentração e menor é o fluxo de umidade a partir do sólido.

Assim, a condição de contorno de equilíbrio na superfície é baseada na consideração de que $\delta_v \rightarrow 0$, de modo que $B_{i_m} \rightarrow \infty$, e o coeficiente de transferência de massa na superfície

aproxima-se de um valor infinito, $k_F \rightarrow \infty$. Dessa forma, a umidade na superfície assume instantaneamente o valor de equilíbrio, após início da secagem.

A princípio, ambas as condições de contorno devem ser testadas no estudo numérico, de modo a verificar qual delas resulta na melhor descrição do comportamento da cinética de secagem. Com a finalidade de testar as duas diferentes possibilidades de associação de condição de contorno, nesta seção foram considerados dois modelos distintos de associação da condição de contorno do segundo tipo, de modo a avaliá-las na modelagem e simulação da secagem convectiva de grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon.

Para o segundo tipo de condição de contorno, foi pressuposto que no centro do grão não existem fluxos de massa e energia, conforme Equações 3.5 e 3.11.

Foram, então, considerados dois modelos distintos.

3.6.1 Estudo II.I: Condição de equilíbrio na superfície do grão

Para o primeiro tipo de condição de contorno, uma condição de equilíbrio na superfície dos grãos foi pressuposta (Figura 3.8), de modo que a umidade e a temperatura superficiais são iguais à umidade de equilíbrio e à temperatura de alimentação do ar de secagem, $T_{G_{feed}}$:

$$X(r, t)|_{r=R} = X_E(t), t > 0 \quad (3.21)$$

$$T_S(r, t)|_{r=R} = T_{G_{feed}}(t), t > 0 \quad (3.22)$$

Em que R é o raio do grão (m).

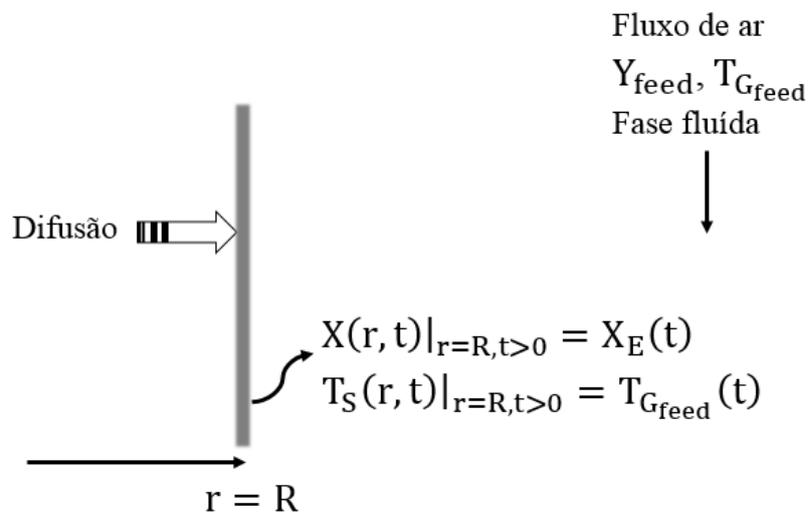


Figura 3.8: Condição de equilíbrio na superfície

3.6.2 Estudo II.II: Condição convectiva na superfície do grão

Para o terceiro tipo de condição de contorno (Figura 3.9), considerou-se que, no instante imediatamente inicial à secagem, na superfície do grão, a massa que sai por difusão é igual à massa que entra no ar de secagem e a energia que sai é igual à soma da energia que entra no ar de secagem devido à convecção e devido à evaporação.

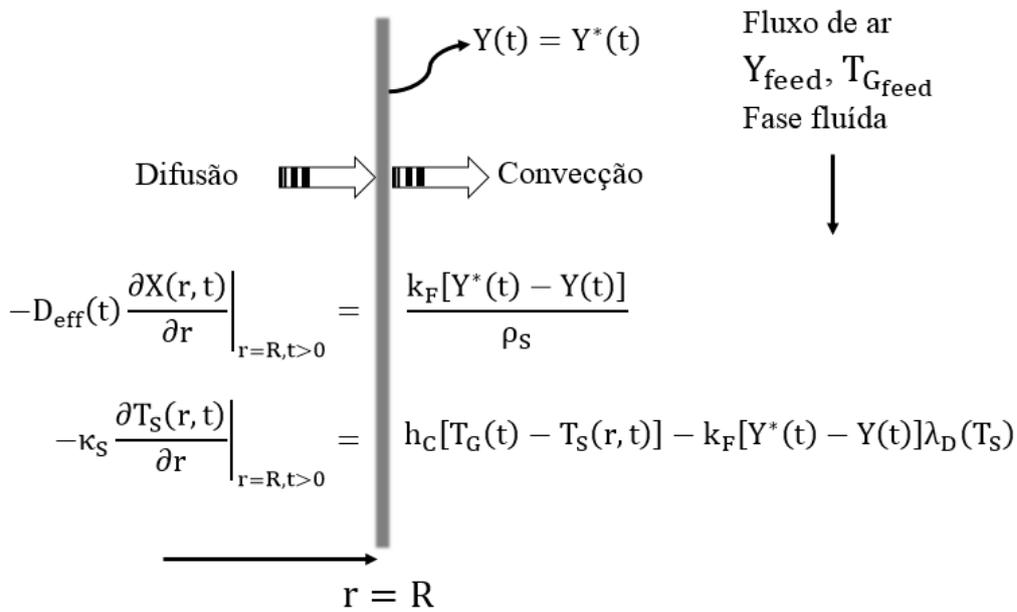


Figura 3.9: Condição convectiva na superfície

3.6.3 Comparação entre os resultados obtidos pelos Estudos II.I e II.II

A Tabela 3.4 apresenta os resultados do ajuste do coeficiente de difusividade mássica efetiva (modelos II.I e II.II) e do coeficiente convectivo de transferência de massa, empregando-se a Equação (3.2). Essa equação de taxa de secagem foi utilizada em trabalhos como Sitompul e Istadi (2000), Johnner et al. (2001) e Istadi e Sitompul (2002) que estudaram a secagem de grãos de milho, e Jumah e Raghavan (2001), em estudo de secagem de grãos de trigo.

Tabela 3.4: Coeficiente de difusividade mássica efetiva (modelos II.I e II.II) e coeficiente convectivo de transferência de massa ajustados

Condição de Secagem		Coeficiente de difusividade mássica efetiva (m^2/min) $\times 10^9$		Coeficiente convectivo de transferência de massa ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{ min}$)
		Modelo II.I	Modelo II.II	Modelo II.II
60 °C	0,8 m/s	3,127 \pm 0,169	3,698 \pm 0,114	0,355 \pm 0,008
	1,2 m/s			0,360 \pm 0,011
	1,6 m/s			0,360 \pm 0,015
70 °C	0,8 m/s	4,522 \pm 0,206	4,800 \pm 0,241	0,355 \pm 0,041
	1,2 m/s			0,401 \pm 0,028
	1,6 m/s			2,646 \pm 0,303
80 °C	0,8 m/s	6,225 \pm 0,296	6,146 \pm 0,257	0,391 \pm 0,037
	1,2 m/s			0,406 \pm 0,034
	1,6 m/s			13,934 \pm 1,272

Os valores do coeficiente de difusividade mássica efetiva para os modelos II.I e II.II (Tabela 3.4), resultaram na ordem de $10^{-9} \text{ m}^2/\text{min}$, apresentando uma dependência do tipo Arrhenius com a temperatura em ambos os casos. Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), os valores do coeficiente de difusividade mássica efetiva de materiais alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, conforme verificado em todas as condições de secagem estudadas. A diferença entre os valores obtidos para os coeficientes de difusividade pode ser explicada pelas diferentes condições de contorno de cada modelo (Dirichlet e Cauchy).

Os valores estimados para o coeficiente de transferência de massa variam entre $0,355 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ min}$ para 60 °C e $0,8 \text{ m s}^{-1}$ e $13,934 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ min}$ para 80 °C e $1,6 \text{ m/s}$. Essa variação acentuada entre os valores de k_F pode ser atribuída ao fato de que os parâmetros estimados, D_{eff} e k_F têm grandezas bastantes distintas.

Os pesquisadores Sfredo, Finzer e Limaverde (2005), que estudaram a secagem de grãos de café, estimaram o coeficiente convectivo de transferência de massa em torno de $0,06 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ min}$, para a secagem em leito vibratório, a 45 °C , já Sitompul e Istadi (2000), que estudaram a secagem convectiva de grãos de milho a $0,09 \text{ m/s}$ e 60 °C , obtiveram valor igual a $1,662 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ min}$. Portanto, os valores do coeficiente de transferência de massa estimados nas simulações resultaram em grandeza intermediária dos coeficientes encontrados na literatura para outros tipos de grãos.

Ainda, da Tabela 3.4, verifica-se que, para ambos os modelos, não houve sobreposição das bandas definidas pelos intervalos de confiança da difusividade efetiva, obtidas para 95% de confiança. Ou seja, é possível afirmar que as variações observadas na estimativa do parâmetro D_{eff} foi significativa. Não obstante, considerando os valores estimados para o coeficiente convectivo de transferência de massa, houve sobreposição das bandas definidas pelos intervalos de confiança, obtidas para 95% de confiança, para 60 e 80 °C. Para esta última, apenas o coeficiente estimado para 1,6 m/s não se sobrepôs àqueles obtidos para as demais velocidades do ar de secagem. Assim, não é possível afirmar que as variações observadas na estimativa do parâmetro k_F sejam significativas para 60 °C, e para 80 °C a 0,8 e 1,2 m/s.

Embora tenha sido observada a sobreposição dos valores do parâmetro k_F , em algumas velocidades do ar de secagem estudadas, a tentativa de ajuste único deste parâmetro cinético para uma mesma temperatura, independentemente da velocidade do ar de secagem, não resultou em bom ajuste aos dados experimentais. Dessa forma, optou-se por ajustar uma equação empírica única para o coeficiente convectivo de transferência de massa, k_F , ao conjunto de valores obtidos na estimativa deste parâmetro. Para tal, foi empregada uma função logística do tipo $k_F = f(v, T_{G_{\text{feed}}})$. A equação resultante foi obtida com o auxílio *software* OriginPro 8[®], obteve-se valor de $R^2 = 0,999$ e soma dos quadrados dos resíduos igual a $9,5128 \times 10^{-4}$.

$$k_F = 0,36455 + \frac{23,95312}{\left[1 + \exp\left(\frac{344,1391 - T_{G_{\text{feed}}} + 273,15}{0,61866}\right)\right] \left[1 + \exp\left(\frac{95,02961 - 60v}{3,62601}\right)\right]} \quad (3.23)$$

A influência do parâmetro D_{eff} na umidade média dos grãos foi analisada por meio do estudo de sensibilidade paramétrica. As Figuras 3.10 e 3.11 apresenta os resultados obtidos para a umidade média do leito, na condição de secagem de 60 °C e 0,8 m/s.

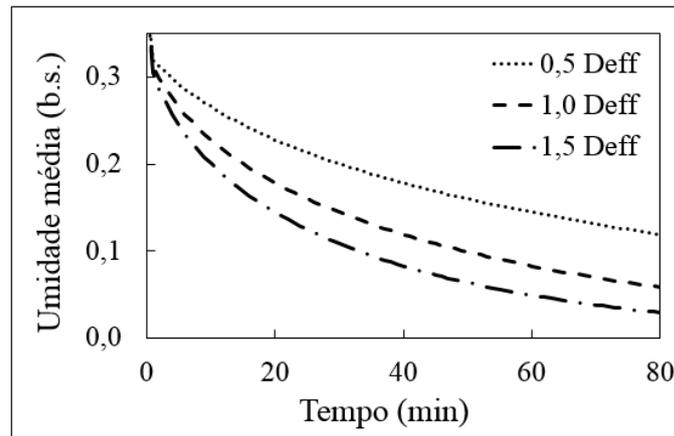


Figura 3.10: Sensibilidade do modelo II.I ao parâmetro D_{eff}

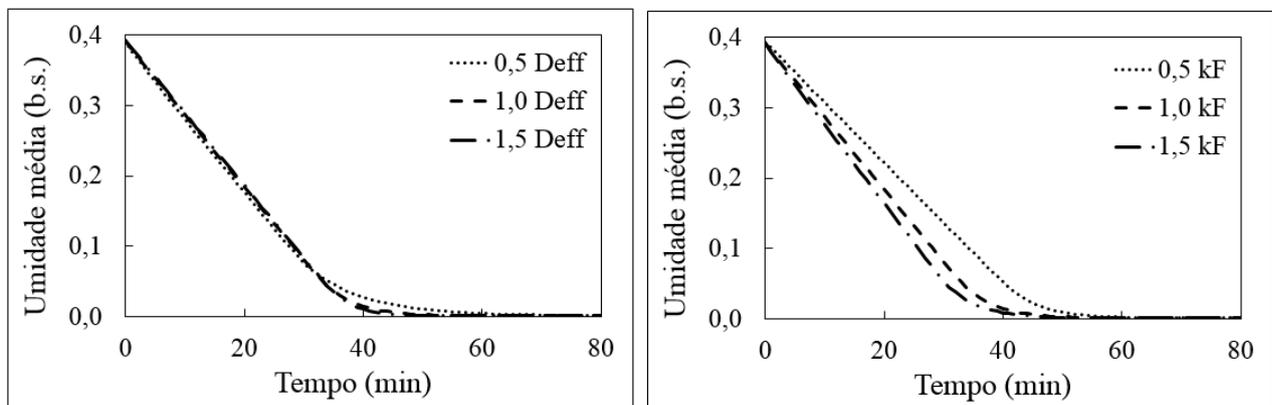


Figura 3.11: Sensibilidade do modelo II.II aos parâmetros D_{eff} e k_F

Das Figuras 3.10 e 3.11 é possível verificar que o parâmetro D_{eff} influenciou significativamente no modelo II.I e II.II, quando variado em 50%, assim como o parâmetro k_F apresentou forte influência no modelo II.II. Este comportamento sugere que apenas o parâmetro D_{eff} não é constante para cada temperatura e vazão de ar de secagem.

A Tabela 3.5 apresenta os valores obtidos pela relação de Lewis, Equação (3.18), para o coeficiente convectivo de transferência de calor.

Tabela 3.5: Coeficientes convectivos de transferência de calor calculados pela relação de Lewis no modelo II.II

Condição de secagem		Coeficiente convectivo de transferência de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)
60 $^\circ C$	0,8 m/s	5,9773
	1,2 m/s	6,0541
	1,6 m/s	6,0560
70 $^\circ C$	0,8 m/s	5,9787
	1,2 m/s	6,7467
	1,6 m/s	44,5049
80 $^\circ C$	0,8 m/s	6,5912
	1,2 m/s	6,8317
	1,6 m/s	234,3273

Da Tabela 3.5, verifica-se que os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor, variaram entre 5,9773 e 234,3273 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, tendo seu módulo acrescido à medida que se aumenta a temperatura e a velocidade do ar de secagem. Esses resultados condizem com resultados de trabalhos encontrados na literatura, como Pang (1996), que, utilizando a relação de Chilton-Colburn, determinou os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, observando que os mesmos aumentam com o acréscimo da velocidade do ar, sendo esse efeito mais marcante que o da temperatura; Sokhansanj (1987), para a secagem de trigo e cevada, conduzida a 0,6 m/s e 75 $^\circ C$, que obteve valores na faixa de 40 a 120 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, Sitompul e Istadi (2000), estudando a secagem convectiva de grãos de milho a 0,09 m/s e 60 $^\circ C$, obtiveram valor igual a 28 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$; Anwar e Tiwari (2001), para a secagem de ervilha e feijão sob convecção forçada, a 80 $^\circ C$ e 0,4 m/s, obtiveram valores respectivos de 1,31 e 3,95 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ e Jingyun, Huiling e Xiaoguang (2012) que analisaram a secagem de trigo a 30 $^\circ C$ e 0,04 m/s, obtendo valor de 34,4 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$. De acordo com Avramidis, Hatzikiriakos e Siau (1994), sistemas em que as propriedades do sistema ar-vapor são alteradas apenas em fases muito precoces do processo de dessorção, em que a temperatura e umidade da superfície exposta dos grãos rapidamente atingem o estado estacionário, o uso de coeficientes convectivos médios de transferência de calor e massa é considerado uma boa aproximação.

Para as simulações, o coeficiente de difusividade mássica efetiva foi ajustado como único para cada temperatura em cada modelo, sendo que para o modelo II.II, o ajuste do coeficiente de transferência de massa ocorreu simultaneamente com o de difusividade mássica efetiva. Nos dois

casos estudados, foi considerada a condição de contorno de segundo tipo, Equações 3.4 e 3.9, e testadas as associações desta com a condição de equilíbrio e convectiva na superfície do grão.

As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam os resultados estatísticos das simulações conduzidas para o modelo II.I e modelo II.II, respectivamente.

Das Tabelas 3.6 e 3.7 verifica-se que, no cálculo do erro médio entre a umidade calculada e a experimental, os valores médios, considerando todas as condições de secagem, foi de 5,99%, para o modelo II.I, e de 4,51%, para o modelo II.II.

Tabela 3.6: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva para o modelo II.I

Condições de secagem		Erro médio (%)	F	valor-p	F crítico	R ²	AIC
0,8 m/s	60 °C	5,57	3715,67	0,804	3,925	0,985	-285,188
	70 °C	5,46	2304,36	0,732	3,934	0,978	-424,068
	80 °C	5,08	3957,88	0,576	3,934	0,987	-163,730
1,2 m/s	60 °C	5,77	3322,90	0,968	3,925	0,983	-288,105
	70 °C	4,00	2966,48	0,760	3,934	0,983	-266,762
	80 °C	5,49	3957,50	0,536	3,934	0,987	-164,818
1,6 m/s	60 °C	4,82	3603,03	0,729	3,925	0,984	-348,818
	70 °C	10,73	2010,41	0,806	3,934	0,975	-221,977
	80 °C	7,07	3642,39	0,908	3,934	0,986	-194,137

Tabela 3.7: Resultados estatísticos da simulação da secagem convectiva para o modelo II.II

Condições de secagem		Erro médio (%)	F	valor-p	F crítico	R ²	AIC
0,8 m/s	60 °C	1,56	20586,40	0,971	3,925	0,997	-502,27
	70 °C	3,76	3128,53	0,698	3,934	0,983	-204,61
	80 °C	4,40	4338,22	0,807	3,934	0,988	-177,02
1,2 m/s	60 °C	2,66	12220,20	0,855	3,925	0,995	-448,37
	70 °C	3,98	7016,13	0,962	3,934	0,992	-257,62
	80 °C	4,07	6670,38	0,874	3,934	0,992	-181,60
1,6 m/s	60 °C	3,46	16303,59	0,658	3,925	0,996	-513,34
	70 °C	8,64	2240,51	0,999	3,934	0,977	-221,58
	80 °C	8,06	3502,09	0,966	3,934	0,985	-200,31

Na análise de R^2 , observa-se que para o modelo II.II, todas as condições simuladas apresentaram valores de correlação acima de 98%, exceto para 1,6 m/s e 70 °C, já para o modelo II.I, todas foram superiores a 97%. Portanto, a melhor associação de condições de contorno foi a proposta pelo modelo II.II, associando a condição de contorno do terceiro com o segundo tipo. Na análise do teste F, observa-se que, em todas as condições simuladas, o modelo descreveu satisfatoriamente os casos investigados, apresentando razões de $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$, ao nível de 95% de confiança, superiores a 5.

Nesse sentido, o número de Biot (Bi) representa a razão entre a resistência à difusão no interior do sólido (resistência interna) e a resistência a difusão na interface sólido/ar (resistência externa). Valores de Bi superiores à 40 indicam que a resistência interna é o mecanismo predominante, de modo que o teor de umidade na superfície do material pode atingir o equilíbrio com o ambiente instantaneamente. O número de Biot calculado para a secagem dos grãos de uva, durante todo o processo de secagem, foi da ordem de 10^6 , característico de processos de secagem de materiais alimentícios. Esses valores sugerem que a resistência interna à transferência de massa é o fator predominante no processo de secagem dos grãos de uva.

No modelo II.I, foi ajustado o coeficiente de difusividade mássica efetiva, D_{eff} , e no modelo II.II, foram ajustados simultaneamente D_{eff} e o coeficiente convectivo de transferência de massa, k_F , de modo que o D_{eff} tanto no modelo II.I, quanto no modelo II.II tem o mesmo significado físico.

A diferença dos D_{eff} observada entre os dois modelos, pode ser atribuída às diferentes condições de contorno aplicadas em cada modelo, uma vez que a metodologia utilizada para estimação dos parâmetros, D_{eff} e k_F , vincula a condição de contorno. O desvio de aproximadamente 9% entre D_{eff} do modelo II.I e do modelo II.II indica a consistência física de ambos os modelos.

Observou-se que maiores valores de D_{eff} foram estimados pelo modelo II.II (condição convectiva). Esse fato aponta que a presença da condição de contorno convectiva contribui para a obtenção de um valor mais elevado de D_{eff} ajustado, pois, ao se considerar o efeito convectivo, obtêm-se menores gradientes teóricos de concentração de umidade entre a superfície e o centro dos grãos, para as mesmas condições experimentais.

Quando são negligenciados os efeitos da resistência externa, implicitamente esses efeitos são embutidos no D_{eff} , resultando em valores estimados menores, ou seja: maior resistência interna à transferência de massa.

As Figuras de 3.12 a 3.14 ilustram o comportamento dos dados experimentais e dos resultados obtidos a partir das simulações numéricas considerando condição de equilíbrio na superfície do grão.

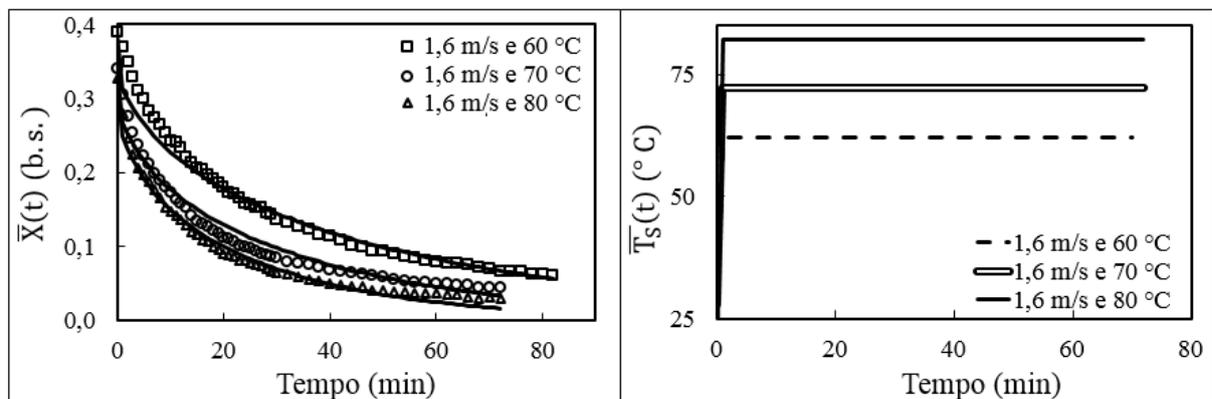


Figura 3.12: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,6 m/s e considerando condição de equilíbrio

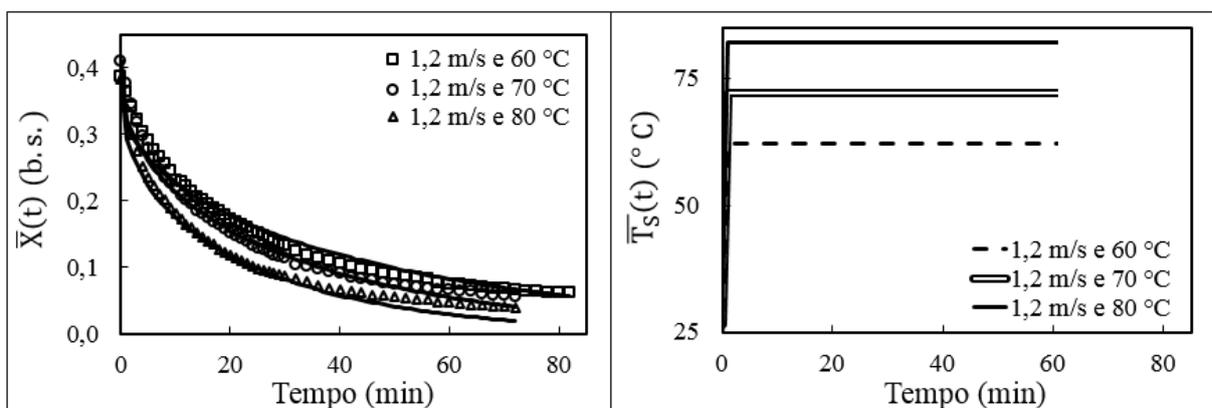


Figura 3.13: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,2 m/s e considerando condição de equilíbrio

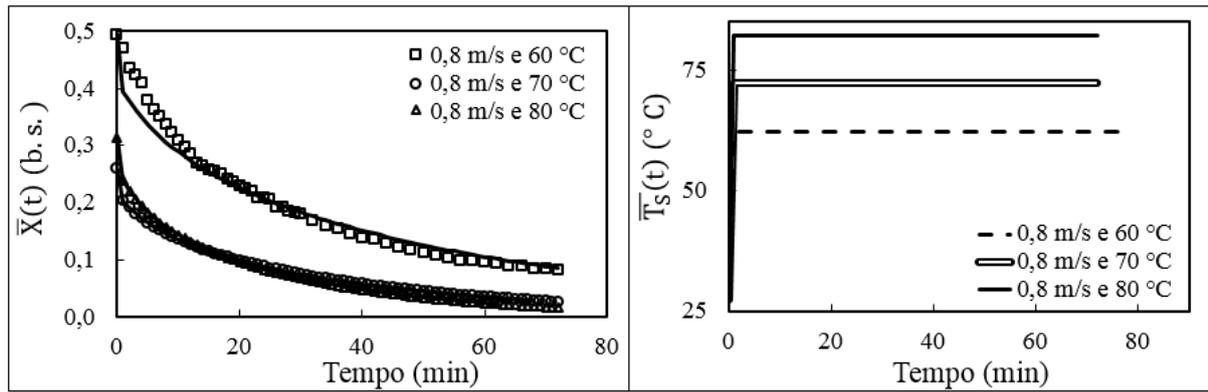


Figura 3.14: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 0,8 m/s e considerando condição de equilíbrio

Por sua vez, as Figuras de 3.15 a 3.17 ilustram o comportamento dos resultados obtidos a partir das simulações numéricas considerando a condição convectiva na superfície do grão.

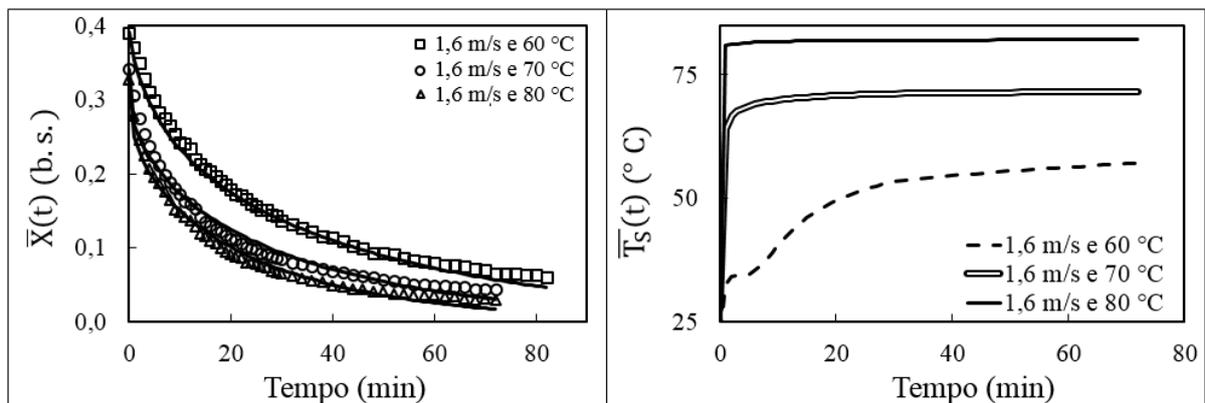


Figura 3.15: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,6 m/s e considerando condição convectiva

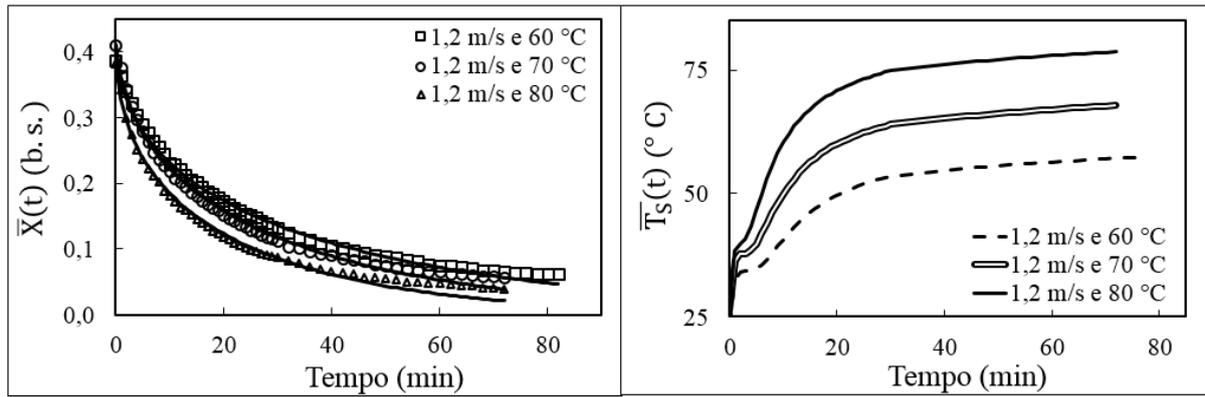


Figura 3.16: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 1,2 m/s e considerando condição convectiva

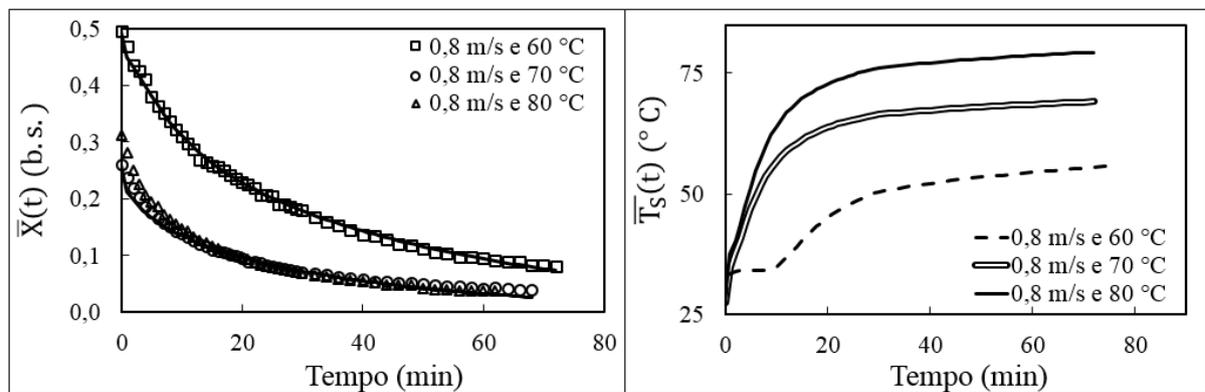


Figura 3.17: Curvas de secagem convectiva e de aquecimento em camada fina para grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon, conduzida a 0,8 m/s e considerando condição convectiva

Das Figuras 3.12 a 3.17, é possível verificar que o melhor ajuste é apresentado pelo modelo II.II, e que o parâmetro k_F não pode ser desprezado nas etapas iniciais da secagem, em que é observado o maior afastamento entre os valores calculados pelo modelo II.I e os dados experimentais.

O melhor ajuste do modelo II.II pode ser associado ao fato dele estar mais próximo da representação do fenômeno real e, também, devido ao fato de nele terem sido ajustados dois parâmetros.

Nesse sentido, de acordo com Labus, Bruno e Coronas (2013), a comparação entre modelos e a seleção daquele que melhor representa determinado conjunto de dados experimentais, pode não ser aquela indicada por critérios estatísticos, já que o entendimento de “melhor” é controverso. Akaike (1973) desenvolveu uma forma de comparar diferentes modelos, de acordo

com os resultados oriundos de cada um, a técnica é denominada de AIC. Nessa técnica, a qualidade dos modelos é medida não apenas pelo ajuste aos dados experimentais, mas, também, pela simplicidade do modelo.

Embora o AIC seja uma ferramenta poderosa para comparação de modelos, permaneceu praticamente desconhecida no Ocidente, devido ao fato de muitos dos artigos originais sobre ela terem sido escritos em japonês (SNIPES; TAYLOR, 2013). Na análise pelo AIC, modelos com menores valores de escore são aqueles que melhor representam os dados experimentais. Assim, embora os coeficientes usados nos modelos II.I e II.II sejam diferentes, os autores optaram por utilizar critérios estatísticos usuais e o AIC, para comparar os modelos.

Ainda, as Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam os valores de AIC, em que é possível verificar que o modelo II.II (condição convectiva), apresenta menores escores de AIC, sendo, portanto, mais representativo.

Assim, em todas as condições simuladas, o modelo descreveu satisfatoriamente os casos investigados. Os modelos desenvolvidos para a secagem convectiva de grãos de uva, associando ambos os conjuntos de condições de contorno podem ser utilizados para fins preditivos, porém a condição convectiva, cujas condições de contorno levam em conta os dois fenômenos de transferência de massa, interno e externo, mostrou-se mais eficiente, nos casos estudados.

A Figura 3.18 ilustra a diferença entre a umidade média experimental dos grãos de uva e os valores calculados pelas duas combinações de condição de contorno (II.I e II.II), para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s, condição em que houve maior erro relativo.

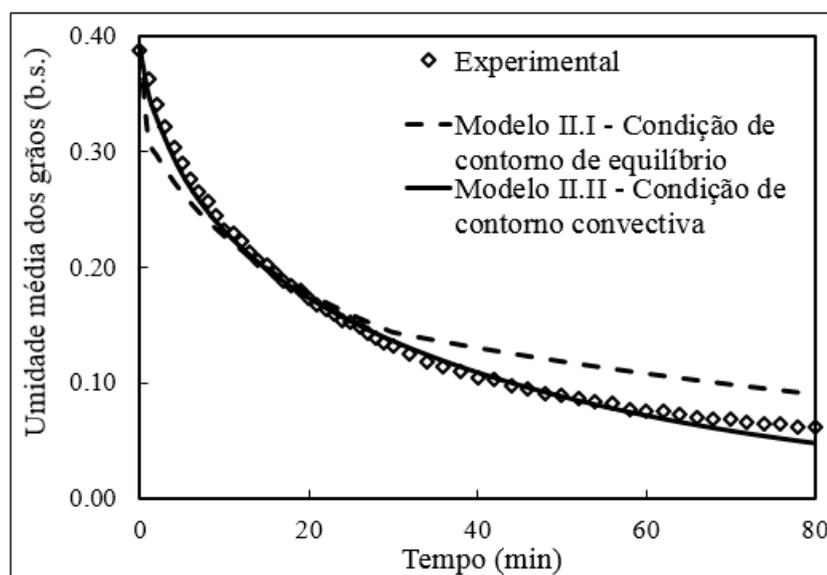


Figura 3.18: Comparação entre os resultados experimentais e os calculados pelos dois modelos, para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s

Os resultados estatísticos, Tabelas 3.6 e 3.7, juntamente com a Figura 3.18, indicam que a melhor combinação de condições de contorno é aquela que utiliza a condição convectiva na superfície do grão. Resultados semelhantes são encontrados na literatura, para a secagem de arroz com casca (SILVA et al., 2010), uvas sem sementes (SILVA et al., 2012), e trigo vermelho (BARBOSA DE LIMA et al., 2014), em que o terceiro tipo de condição de contorno apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, quando comparada aos resultados obtidos com o primeiro tipo de condição de contorno. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que condições de contorno de equilíbrio, muitas vezes, são apenas descrições simplificadas do processo, de modo que condições convectivas fornecem resultados mais adequados para a secagem de alguns produtos agrícolas.

Por sua vez, as Figuras 3.19 e 3.20 apresentam, respectivamente, os valores obtidos para a umidade média e umidade interfacial, e temperatura média e temperatura interfacial dos grãos, no emprego das duas combinações de condição de contorno, para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s.

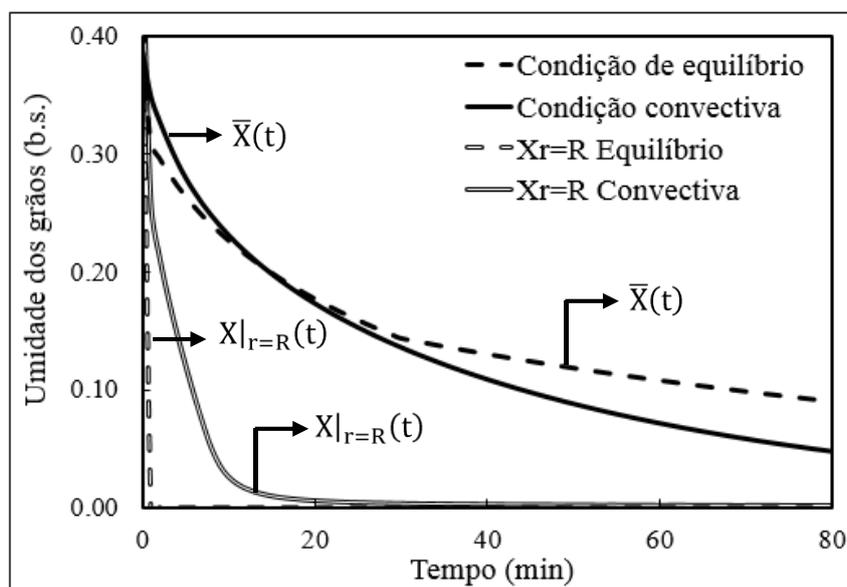


Figura 3.19: Umidades média e interfacial dos grãos obtidas pelos modelos II.I e II.II

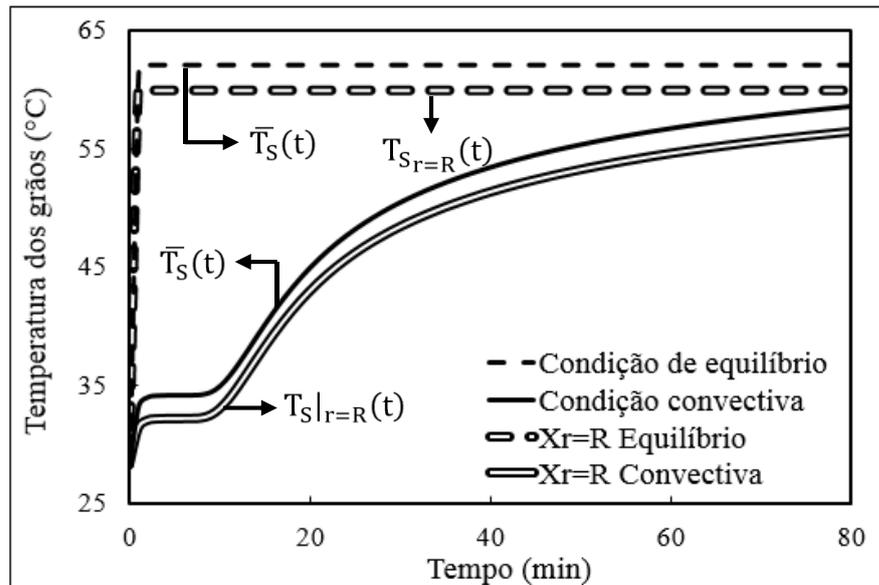


Figura 3.20: Temperaturas média e interfacial dos grãos obtidas pelos modelos II.I e II.II

Da Figura 3.19 é possível observar que, empregando a condição de contorno de equilíbrio, nos instantes imediatamente posteriores ao início da secagem, a umidade superficial decai até a umidade de equilíbrio, conforme condição de contorno. Quando aplicada a condição de contorno convectiva, a umidade superficial decai mais sutilmente. Em se tratando da umidade média, como observado, também, na Figura 3.18, a condição de equilíbrio subestima a umidade nos instantes iniciais e superestima-a com o decorrer do processo.

Por sua vez, observa-se na Figura 3.20 que a temperatura superficial, assim como a umidade superficial, atinge o equilíbrio instantaneamente. Já, a temperatura média do grão foi ligeiramente inferior àquela obtida pela condição de contorno de equilíbrio.

A Figura 3.21 compara a eficiência da transferência de massa, para o modelo II.II, na secagem conduzida a 0,8 m/s, nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C.

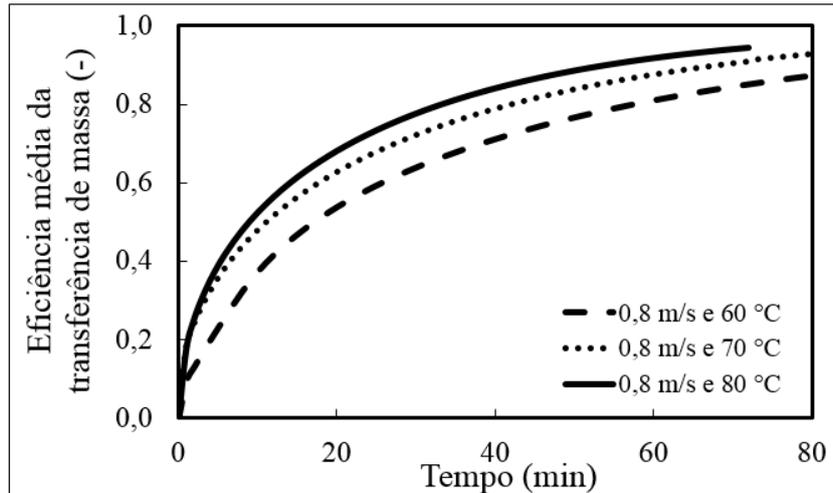


Figura 3.21: Comparação entre a eficiência média da transferência de massa para a secagem conduzida a 0,8 m/s, para o modelo II.II

Verifica-se da Figura 3.21 que, mantendo a velocidade e elevando-se a temperatura do ar de secagem, a eficiência média da transferência de massa aumenta, fato condizente com a suposição de que a difusão interna seja a etapa controladora da cinética de secagem. Na velocidade de 0,8 m/s, a eficiência média da transferência alcança valores máximos de 87,8; 91,9 e 94,5% e médias globais de 64,9; 70,1 e 74,67%, respectivamente para 60, 70 e 80 °C.

A Figura 3.22 apresenta o perfil da eficiência da transferência de massa, para o modelo II.II, para a secagem conduzida a 0,8 m/s e 60 °C.

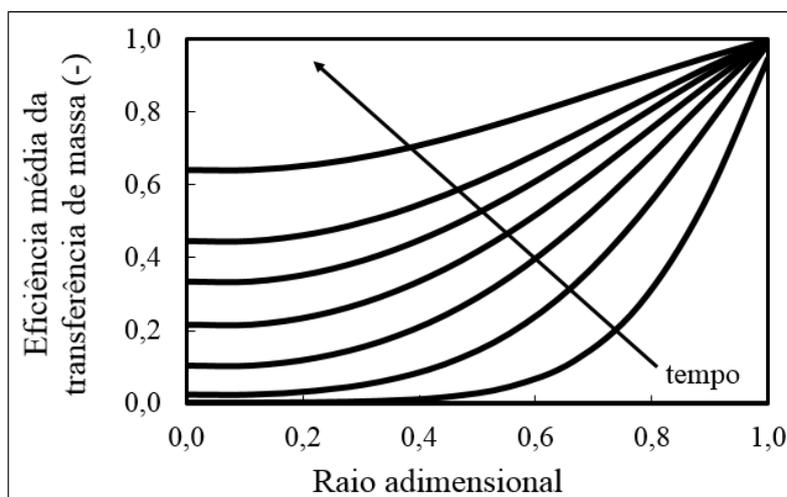


Figura 3.22: Perfil da eficiência da transferência de massa para a secagem conduzida a 60 °C e 0,8 m/s, para o modelo II.II

Da Figura 3.22, observa-se que a eficiência da transferência de massa sofre maior variação nos períodos iniciais de secagem, uma vez que a diferença entre a umidade inicial e a umidade em determinado tempo, $X(r, t)$, é reduzida à medida que a secagem evolui.

3.7 Escolha do Melhor Modelo para Descrever a Secagem de Grãos em Camada Fina

Para a determinação do melhor modelo para descrever a cinética de secagem de grãos de uva em camada fina, dentre aqueles estudados no presente trabalho, foi elaborada a Tabela 3.8, que apresenta um resumo dos estudos realizados, de acordo com a equação de taxa de secagem e parâmetros estimados.

Tabela 3.8: Resumo dos estudos realizados para camada fina

Equação de taxa/Condição	Parâmetro(s) Estimado(s)	Resultados Estatísticos Médios
$\psi_I = k_I(X - X_E)$	$3,141 \times 10^{-9} \leq D_{\text{eff}} \text{ (m}^2\text{/min)} \leq 6,256 \times 10^{-9}$ $0,353 \leq k_I \text{ (min}^{-1}\text{)} \leq 26,350$	$\bar{E} = 6,19\%$ $\bar{R}^2 = 98\%$
Condição de Equilíbrio	$3,127 \times 10^{-9} \leq D_{\text{eff}} \leq 6,225 \times 10^{-9}$	$\bar{E} = 5,99\%$ $\bar{R}^2 = 98\%$
Condição Convectiva	$3,698 \times 10^{-9} \leq D_{\text{eff}} \text{ (m}^2\text{/min)} \leq 6,146 \times 10^{-9}$ $0,355 \leq k_F \text{ (kg/m}^2\text{min)} \leq 13,934$	$\bar{E} = 4,51\%$ $\bar{R}^2 = 98\%$

Dos resultados da Tabela 3.8, comparando-se os modelos de taxa ψ_I , condição de equilíbrio e de convectiva, verifica-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo com condição convectiva. Neste, foram ajustados os coeficientes D_{eff} e k_F .

3.8 Equivalência Entre o Modelo de Parâmetros Concentrados e Distribuídos Para Descrever a Secagem em Camada Fina

Um dos objetivos específicos da presente tese é a obtenção dos parâmetros cinéticos de secagem em camada fina, para aplicação no modelo de leito profundo, considerando que esses parâmetros foram obtidos por meio de modelo de parâmetros distribuídos, e que, o modelo de leito profundo proposto é um modelo de parâmetros concentrados para a umidade. É importante mostrar

que existe uma equivalência entre os modelos de parâmetros concentrados e de parâmetros distribuídos.

Para tal, foram realizadas simulações empregando o modelo de parâmetros concentrados para camada fina, e aplicados os parâmetros difusividade efetiva, D_{eff} , e coeficiente convectivo de transferência de massa, k_F , ajustados no modelo de parâmetros distribuídos para camada fina.

Como na descrição dos processos de secagem é de fundamental importância o emprego de uma equação que descreva a taxa de transferência de massa ou taxa de secagem. Entretanto, considerar todos os mecanismos atuantes no interior dos grãos torna a resolução e a aplicação do modelo muitas vezes impraticável. A utilização de modelos matemáticos de parâmetros concentrados, aliados ao emprego de expressões simplificadas para descrever a cinética de secagem, é uma alternativa atraente.

Embora a utilização de modelos de dupla resistência seja mais comum em trabalhos relativos à adsorção, alguns pesquisadores os têm empregado para descrever processos de secagem. Pode-se citar, por exemplo, os estudos de secagem de cubos de cenoura (HERMAN; RODRÍGUEZ; GARCÍA, 2001), carvão industrial (STAKIĆ; TSOTSAS, 2004), e cubos de batata (STAKIĆ; BANJAC; UROSEVIC, 2011).

A Figura 3.23 ilustra o mecanismo de secagem utilizado no modelo de dupla resistência à transferência de massa, considerado no presente estudo.

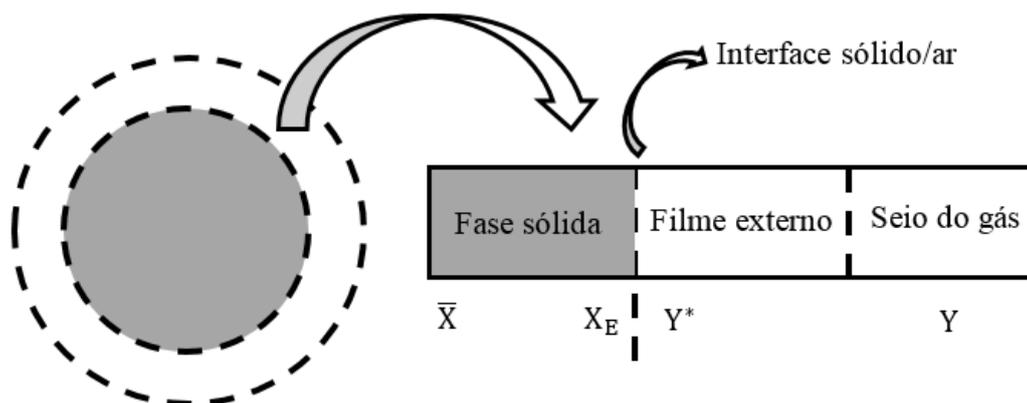


Figura 3.23: Representação do mecanismo de secagem envolvendo dupla resistência à transferência de massa

Conforme a Figura 3.23, no interior dos grãos existe a resistência à difusão da água, cujo movimento é proporcional à diferença entre a umidade média da fase sólida, \bar{X} , e a umidade de equilíbrio da fase sólida, X^* , com o ar de secagem, ou seja o gradiente $\bar{X} - X^*$. Por sua vez, na interface sólido/ar, está presente a resistência externa à transferência de massa. Nesta interface, o

movimento da umidade é proporcional à diferença entre a umidade de equilíbrio da fase gasosa, Y^* , e a umidade do seio do gás, Y , ou seja o gradiente $Y^* - Y$. As respectivas taxas de secagem são representadas por:

$$\Psi_S = k_S [\bar{X}(z, t) - X^*(z, t)] m_{SS} \quad (3.24)$$

$$\Psi_F = k_F a V_G [Y^*(z, t) - Y(z, t)] \quad (3.25)$$

Em que Ψ é a taxa de secagem (kg/min), k_S é o coeficiente interno de transferência de massa (min^{-1}), \bar{X} é a umidade média dos grãos (b.s.), X^* é a umidade de equilíbrio dos grãos (b.s.), m_{SS} é a massa do sólido seco (kg), ε é a porosidade do leito, k_F é o coeficiente externo de transferência de massa ($\text{kg}/\text{m}^2\text{min}$), a é a área específica (m^{-1}), V_G é o volume de ar (m^3), Y^* é a umidade de equilíbrio do ar de secagem (b.s.), Y é a umidade do ar de secagem (b.s.). Os índices S e F indicam as fases sólida e fluída, respectivamente.

Considerando que não existe acúmulo na interface sólido/ar, o fluxo de água que atinge a superfície externa do sólido, devido ao movimento ao longo do interior deste, é igual ao fluxo de água que sai da interface em direção ao seio do gás. Este processo é expresso matematicamente por:

$$\Psi_S = \Psi_F \quad (3.26)$$

No modelo de parâmetros concentrados para a umidade, inicialmente foi utilizado a simplificação proposta por Glueckauf e Coates (1947) que propuseram que a Lei de Fick pode ser aproximada pelo modelo LDF (do inglês *Linear Driving Force*), descrita pela equação (3.24).

Assim, nas simulações do modelo de parâmetros concentrados também foi utilizado o modelo de dupla resistência, que possui dois parâmetros de transferência de massa: k_F e k_S . Os valores dos parâmetros de transferência no filme externo, k_F , foram idênticos aos calculados no modelo de parâmetros distribuídos. Inicialmente foram feitas simulações utilizando o parâmetro k_S estimado pela aproximação proposta por Glueckauf e Coates (1947), descrita pela seguinte equação:

$$k_S = 15 \frac{D_{\text{eff}}}{r_p^2} \quad (3.27)$$

Em que D_{eff} é a difusividade mássica efetiva (m^2/min), e r_p é o raio dos grãos (m).

Glueckauf e Coates (1947) foram pioneiros na obtenção da relação entre os coeficientes k_S e D_{eff} para partículas esféricas. No desenvolvimento dessa relação, os autores admitiram o perfil

de concentração parabólico e a condição de contorno de equilíbrio na superfície da esfera ($X|_{r=R} = X_E$).

Posteriormente, essa mesma relação foi obtida por Liaw et al. (1979) e Rice (1986). Estes últimos assumiram perfil interno parabólico de distribuição de umidade, independente da relação de equilíbrio entre as fases. O Anexo A da presente tese apresenta a dedução proposta por Rice (1980) para relação entre os coeficientes k_S e D_{eff} .

Adicionalmente ao modelo de Glueckauf e Coates (1947), foi também testada uma alteração da Eq. (3.27):

$$k_S = \beta \frac{D_{eff}}{r_p^2} \quad (3.28)$$

Em que β é o coeficiente ajustável.

A estimativa de β foi conduzida de modo que o parâmetro fosse constante em cada temperatura, ou seja, independente da velocidade, o valor de β foi invariante para cada temperatura do ar de secagem. Assim, aplicou-se a seguinte função objetivo:

$$OBF = \sum_{\substack{i=1 \\ v=0,8; 1,2 \text{ e } 1,6 \text{ m/s} \\ T_{G_{feed}}=60; 70,80 \text{ } ^\circ\text{C}}}^{n_{exp}} \left(\frac{X_{EXP_{i,v,T_{G_{feed}}}} - X_{CAL_{i,v,T_{G_{feed}}}}}{X_{EXP_{i,v,T_{G_{feed}}}}} \right)^2 \quad (3.29)$$

Esses parâmetros foram aplicados no modelo de camada fina com parâmetros concentrados.

A Figura 3.24 apresenta a comparação entre os dados experimentais e aqueles obtidos quando empregado o modelo de leito profundo, aplicando a equação proposta por Glueckauf e Coates (1947), Eq. (3.27), e sua alteração, Eq. (3.28), para a secagem conduzida a 60 °C e 1,6 m/s.

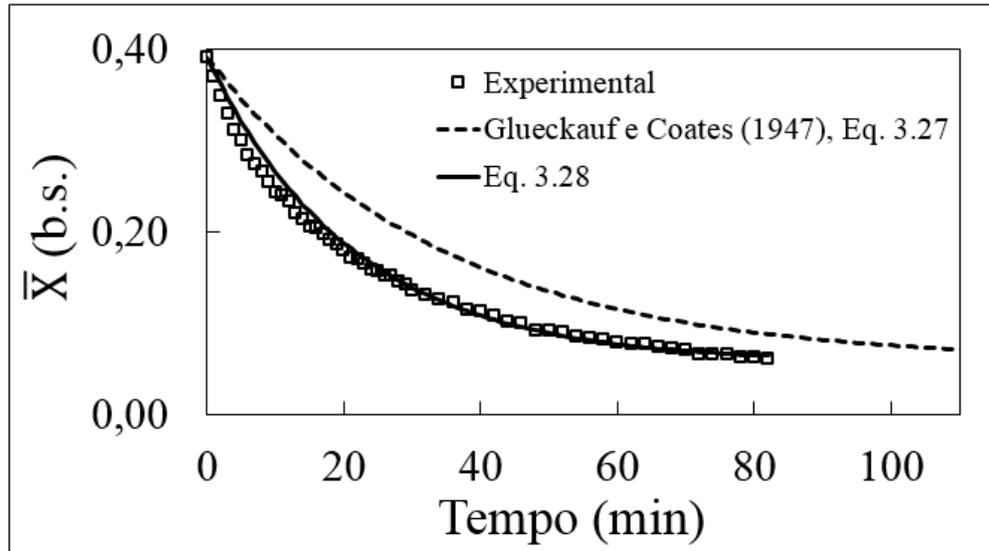


Figura 3.24: Comparação entre os dados experimentais, Modelo de Glueckauf e Coates (1947), Eq. (3.27), e Eq. (3.28), para a secagem conduzida a 60 °C e 1,6 m/s

Na Figura 3.24 observa-se que é evidente a diferença entre os dados experimentais e aqueles obtidos com o emprego do Modelo de Glueckauf e Coates (1947). Foi verificado que a equação de Glueckauf e Coates (1947) superestimou a umidade média do leito no decorrer do processo de secagem. Situações análogas são encontradas na literatura, como nos trabalhos de Raghavan, Hassan e Ruthven (1986), Yang (1987), e Ryu et al. (2001), que estudaram a adsorção por modulação de pressão (do inglês *Pressure Swing Adsorption*).

Essa diferença é plenamente justificável, uma vez que para obtenção da relação 3.27, os autores assumiram condição de equilíbrio na superfície do grão e esta hipótese, conforme discutido na Seção 3.6, não é apropriada para descrever a cinética de secagem e não é obedecida no modelo de dupla resistência. Por sua vez, quando essa mesma equação foi obtida por Rice (1986), foi considerado um perfil parabólico de distribuição de umidade, independente da relação de equilíbrio entre as fases. Nesse sentido, a aproximação do coeficiente interno de transferência de massa, obtida por Glueckauf e Coates (1947) para a LDF, é representativa quando os perfis internos de concentração são razoavelmente parabólicos. Dessa forma, para que a validade da relação de Glueckauf e Coates (1947) seja verificada, uma avaliação abrangente deve ser feita para diferentes tipos de materiais.

Considerando os resultados obtidos quando empregada a Eq. (3.28), a Tabela 3.9 apresenta os valores estimados para o coeficiente ajustável β .

Tabela 3.9: Valores estimados para o coeficiente ajustável β

Condições de secagem		β
60 °C	0,8 m/s	23,98
	1,2 m/s	
	1,6 m/s	
70 °C	0,8 m/s	22,46
	1,2 m/s	
	1,6 m/s	
80 °C	0,8 m/s	20,59
	1,2 m/s	
	1,6 m/s	

Aos valores da Tabela 3.9, foi ajustado um polinômio de ordem 2, obtendo-se:

$$\beta = -0,00175T_{G_{feed}}^2 + 0,0755T_{G_{feed}} + 25,750 \quad (3.30)$$

As Figuras de 3.25 a 3.27 apresentam a comparação entre a cinética da secagem obtida utilizando o modelo de parâmetros distribuídos (modelo II.II) e o modelo de parâmetros concentrados, considerando a Eq. (3.28) e os dados da Tabela 3.9 nas Figuras, os dados experimentais são representados pelos pontos discretos.

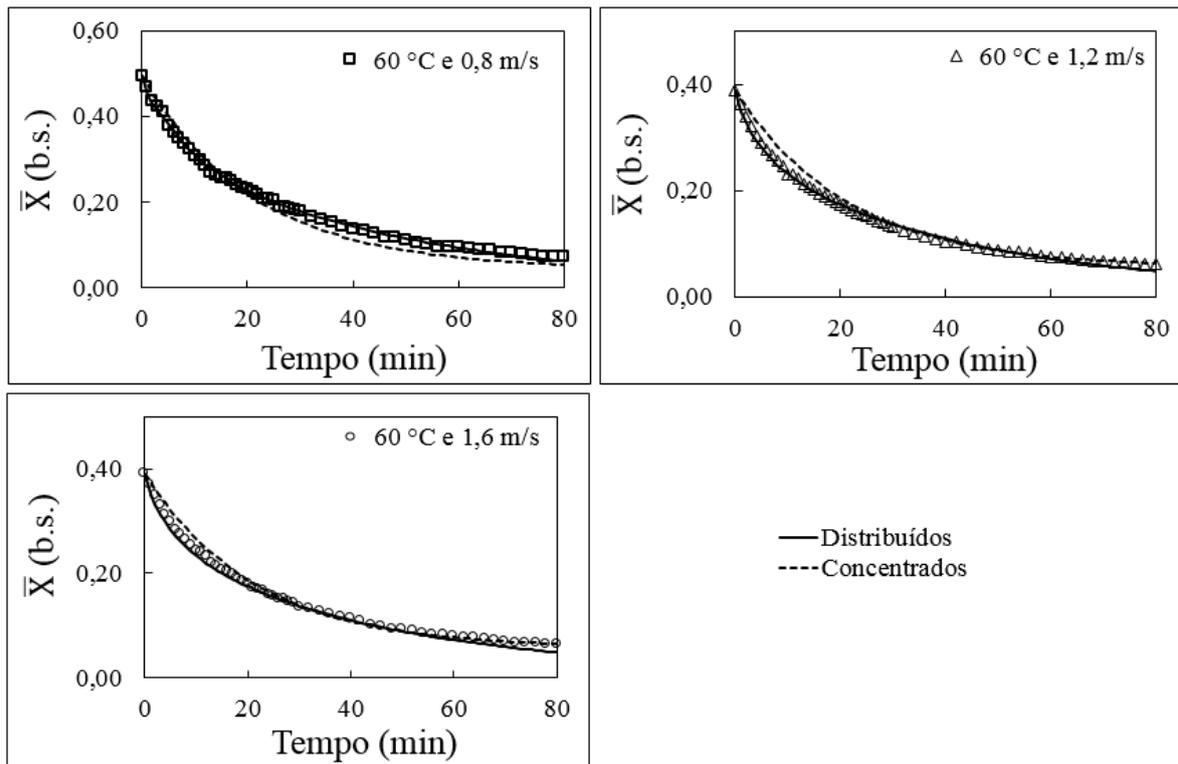


Figura 3.25: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 60 °C

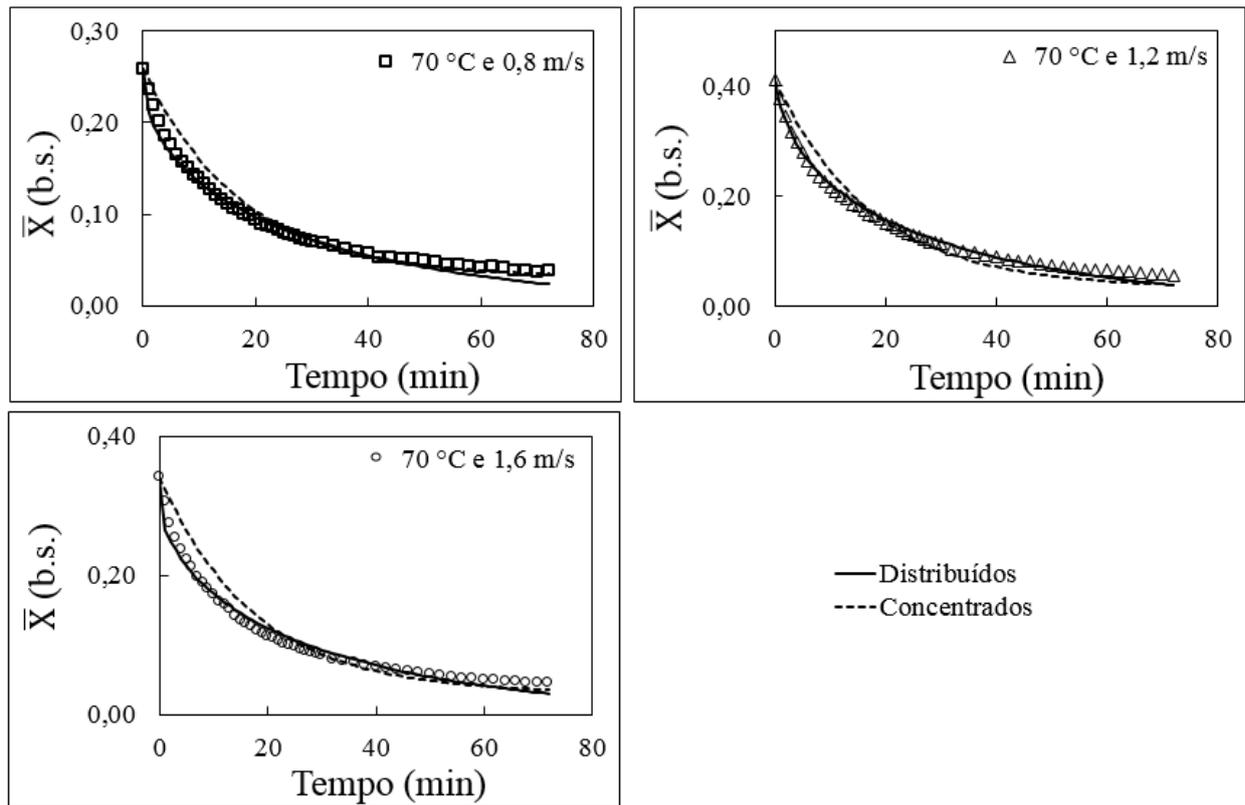


Figura 3.26: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 70 °C

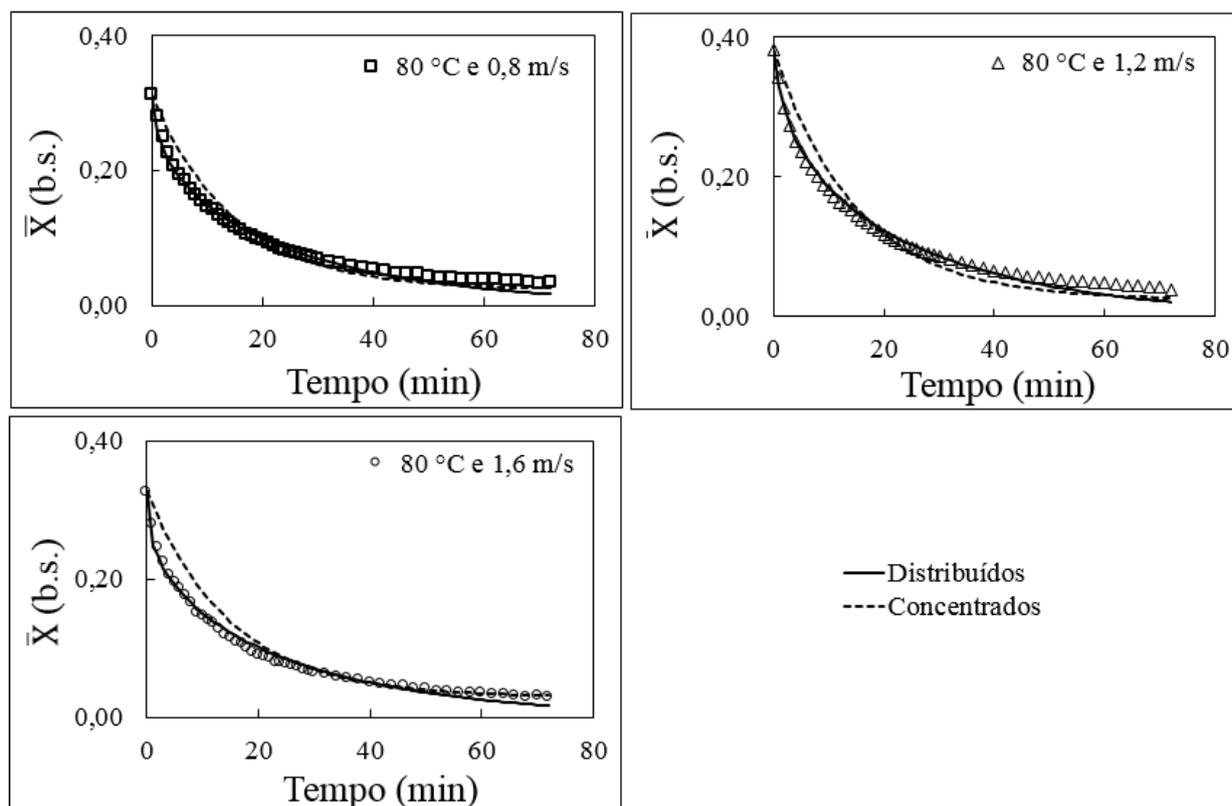


Figura 3.27: Comparação entre a cinética obtida pelos modelos de parâmetros distribuídos e concentrados, a 80 °C

A partir das cinéticas apresentadas nas Figuras 3.25 a 3.27, foi calculado o erro médio relativo, considerando todas as condições de secagem estudadas no caso do modelo de parâmetros concentrados, resultando no valor de 11,50%. Constatou-se, portanto, que os parâmetros cinéticos, ajustados no modelo de parâmetros distribuídos, podem ser empregados no modelo de parâmetros concentrados, para descrever a cinética de secagem de grãos de uva em camada fina, empregando a modificação do modelo de Glueckauf e Coates (1947). Assim sendo, os valores estimados para os parâmetros difusividade efetiva, D_{eff} , e coeficiente convectivo de transferência de massa, k_F , ambos da Tabela 3.6 (modelo II.II), e o parâmetro ajustável β , da Tabela 3.9, foram utilizados para o estudo teórico da secagem de grãos de uva em leito profundo.

3.9 Conclusões Parciais

A secagem convectiva em camada fina de grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon foi estudada com base em duas diferentes taxas de secagem e na condição de equilíbrio.

No primeiro estudo, foram estimados os parâmetros difusividade mássica efetiva, D_{eff} , e coeficiente da equação de taxa de secagem, k_I . As duas últimas análises avaliaram o emprego das

condições de contorno de equilíbrio e convectiva na superfície dos grãos. No estudo em que foi empregada a condição de contorno de equilíbrio, foi estimado o parâmetro D_{eff} , e na análise em que foi empregada a condição de contorno convectiva, foram estimados os parâmetros D_{eff} e coeficiente de transferência de massa, k_F .

Dentre os modelos estudados, aquele que melhor descreveu a cinética da secagem convectiva de grãos de uva foi o modelo de taxa ψ_{II} com condição de contorno convectiva. Neste, os parâmetros estimados, D_{eff} e k_F , apresentaram uma influência significativa na umidade média do leito de grãos.

Assim, os resultados indicaram que, para a secagem em camada fina, as modelagens matemáticas e as simplificações propostas, somadas ao método numérico utilizado para resolver o sistema de equações, foram eficientes na descrição do fenômeno de secagem convectiva dos grãos de uva em camada fina, nas condições de operação simuladas, sendo, portanto, possível a utilização dos coeficientes obtidos em modelagem e otimização de secadores em convecção forçada e leito profundo.

Foi verificada a equivalência entre os resultados obtidos empregando o modelo de parâmetros distribuídos para camada fina, e o modelo de parâmetros concentrados. Essa equivalência permite a utilização dos parâmetros cinéticos ajustados no modelo de camada fina no modelo de leito profundo.

4 SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS EM LEITO PROFUNDO

O presente capítulo tem como objetivo a investigação numérica da cinética de secagem de grãos em leito profundo. Para a validação do modelo foram empregados dados experimentais, obtidos por Butarelli (2016), na secagem de grãos de crambe em leito profundo, sob as condições de ar de secagem a 40, 50 e 60 °C e 1,5, 2,0 e 2,5 m/s.

4.1 Modelagem da Secagem de Grãos em Leito Profundo

Para a realização da simulação do processo de secagem de grãos em leito profundo, considerou-se o leito ilustrado na Figura 4.1.

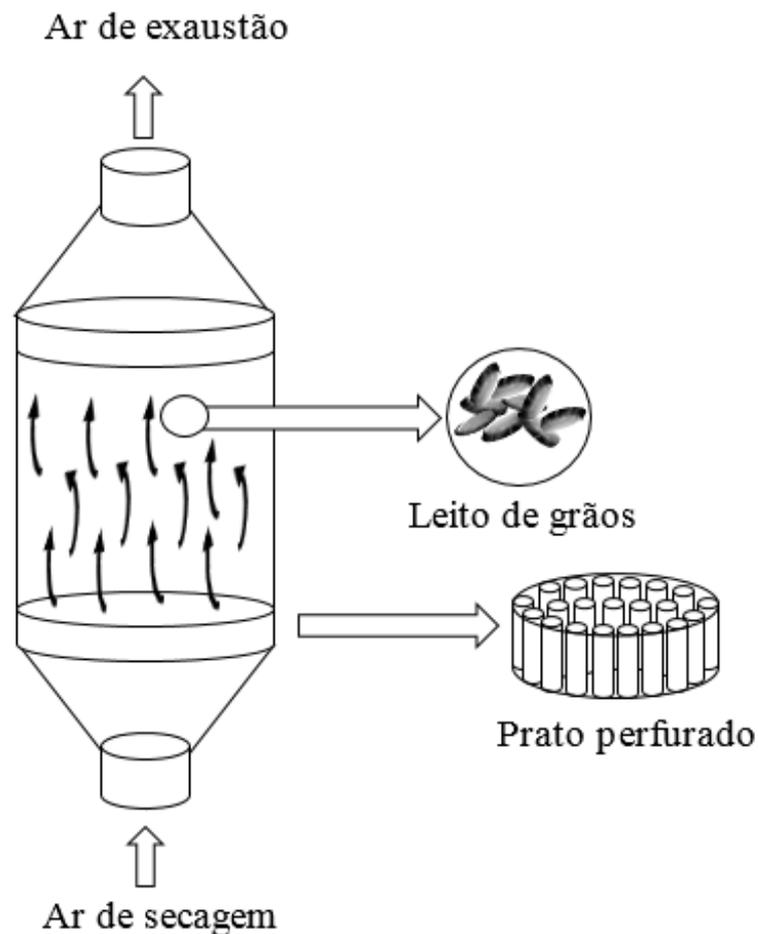


Figura 4.1: Representação simplificada de um secador de grãos em leito fixo

O secador de grãos considerado foi constituído, basicamente, de um leito de grãos com uma entrada para o ar de secagem e uma saída para o ar de exaustão e foi considerado o modelo de dupla resistência, cuja taxa de secagem é descrita pelas Eq. (3.24) e (3.25).

O coeficiente externo de transferência de massa, k_F , pode ser estimado pela correlação empírica proposta por Ranz (1952), para leito fixo, quando $Re > 80$:

$$Sh = \frac{k_F 2R}{D} = 2 + 1,8Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (4.1)$$

Em que Sh , Re e Sc são os números adimensionais de Sherwood, Reynolds e Schimdt, e D é a difusividade do líquido no ar (m^2/min).

A modelagem do processo de secagem de grãos em camada fixa pode foi realizada a partir de balanços de massa e energia, conforme os princípios da conservação. As seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas

- os grãos formam um leito fixo e com distribuição homogênea;
- as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- a umidade e temperatura iniciais do leito são uniformes;
- transporte unidimensional (axial) de calor e massa no leito;
- distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador;
- o ar de secagem comporta-se como um gás ideal, nas condições de modelagem.

A partir das hipóteses simplificadoras, de balanços de massa e energia no leito de grãos e no ar de secagem, as seguintes equações foram obtidas para representar a cinética da secagem de grãos em leito fixo:

$$\rho_S(1 - \varepsilon)V_L \frac{\partial X}{\partial t} = \Psi \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [Y(z, t)\rho_G(z, t)]\varepsilon = -v\varepsilon \frac{\partial}{\partial z} [Y(z, t)\rho_G(z, t)] - \rho_S \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} (1 - \varepsilon) \quad (4.3)$$

$$\rho_S \frac{\partial H_S(z, t)}{\partial t} (1 - \varepsilon) = \lambda \rho_S \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} (1 - \varepsilon) + h_c [T_G(z, t) - T_S(z, t)] \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_G(z, t)U_G(z, t)]\varepsilon = \quad (4.5)$$

$$-\lambda \rho_S \frac{\partial X(z, t)}{\partial t} (1 - \varepsilon) + h_c [T_S(z, t) - T_G(z, t)] - v\varepsilon \frac{\partial}{\partial z} [\rho_G(z, t)H_G(z, t)]$$

Em que ρ_S é a massa específica dos grãos (kg/m^3), ε é a porosidade do leito, V_L é o volume do leito (m^3), Ψ é a taxa de secagem (kg/min), ρ_G é a massa específica do ar de secagem (kg/m^3),

v é a velocidade do ar medida na entrada do secador e considerada constante (m/s), z é a coordenada espacial, paralela ao fluxo de ar (m), h_c é o coeficiente volumétrico de transferência de calor ($\text{kJ}/\text{min m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$), H_S é a entalpia dos grãos (kJ/kg), λ é o calor de vaporização da água pura (kJ/kg), T_G é a temperatura do ar de secagem ($^\circ\text{C}$), T_S é a temperatura dos grãos ($^\circ\text{C}$), U_G é a energia interna do ar de secagem (kJ/kg), e H_G é a entalpia do ar de secagem (kJ/kg).

4.2 Validação do Modelo e Técnica de Resolução

Com a finalidade de validar o modelo de secagem em leito profundo, a ser utilizado para descrever a secagem de grão de uva, a partir dos parâmetros de transferência estimados no Capítulo 3, foram utilizados dados experimentais de secagem de grãos de crambe em leito profundo (BUTARELLI, 2016). As subseções seguintes apresentam os cálculos realizados para tal validação.

De acordo com Ashrae (2002), devido às propriedades termo físicas dos alimentos serem fortemente dependentes da temperatura e da composição química, é quase impossível determinar experimentalmente e tabular as propriedades termo físicas de alimentos e bebidas para todas as possíveis condições e composições. Entretanto, pode-se determinar, a partir da literatura, as propriedades termo físicas dos componentes puros dos alimentos, como proteínas, carboidratos, lipídios, cinzas e água, obtendo as propriedades termo físicas do alimento com base nas frações mássicas dos constituintes do produto. Uma vez que, durante a secagem, o teor de umidade do grão varia em relação ao tempo, conseqüentemente as propriedades termo físicas, como massa específica, calor específico, difusividade e condutividade térmica variam ao longo da operação, de modo que a resolução do modelo obtido a partir dos balanços de massa e energia tende a ser mais precisa considerando essas variações.

Os parâmetros massa específica, calor específico, condutividade e difusividade térmica dos grãos de crambe foram calculados com base nas propriedades de cada componente puro. A composição química dos grãos de crambe, obtidas por Butarelli (2016), são elencadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição centesimal dos grãos de crambe, adaptado de Butarelli (2016)

Propriedade	%
Umidade e Substâncias Voláteis	8,69
Resíduo Mineral fixo	7,31
Proteína Bruta	24,43
Lipídeos Totais	20,05
Fibra Bruta	33,07
Carboidratos	6,45

As Eq. (4.6) a (4.10), de Singh e Heldman (1993), possibilitam a determinação das propriedades termo físicas necessárias à simulação do processo de secagem, com base nos valores da composição centesimal dos grãos:

$$\rho_s = \frac{1 - \varepsilon}{\sum \left(\frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad (4.6)$$

$$cp_s = \sum x_j \times cp_j \quad (4.7)$$

$$\kappa_s = \frac{1}{2} \left[\sum x_{vj} \times \kappa_j + \frac{1}{\sum \left(\frac{x_{vj}}{k_j} \right)} \right] \quad (4.8)$$

$$\alpha_s = \sum x_j \times \alpha_j \quad (4.9)$$

$$x_{vj} = \frac{\frac{x_j}{\rho_j}}{\sum \left(\frac{x_j}{\rho_j} \right)} \quad (4.10)$$

Em que ε é a porosidade, x_j é a fração mássica de cada componente puro, cp_s é o calor específico (J/kg °C), x_{vj} é a fração volumétrica de cada componente puro e κ_s é a condutividade térmica do sólido (W/m °C), α_s é a difusividade térmica do sólido (m²/s).

Para o caso dos grãos de crambe, Butarelli (2016) determinou experimentalmente que o Modelo de Smith Modificado representou adequadamente a relação atividade da água *versus* umidade de equilíbrio:

$$X_E = \left| -0,1565 + 1,54 \times 10^{-4} T_S - (-0,2047 + 8,04 \times 10^{-4} T_S) (a_w)^{1,54 \times 10^{-4}} \right| \quad (4.11)$$

Em que X_E é a umidade de equilíbrio (b.s.), T_S é a temperatura do grão ($^{\circ}\text{C}$), e a_w é a atividade da água.

Os demais dados do leito e dos grãos de crambe são elencados na Tabela 4.2, todos obtidos por Butarelli (2016).

Tabela 4.2: Propriedades termo físicas dos grãos de crambe e do leito de secagem

Propriedade	Valor
Diâmetro médio dos grãos (m)	$2,76 \times 10^{-3}$
Porosidade do leito	0,429
Comprimento do leito empacotado (m)	0,15
Área do leito transversal ao fluxo de ar (m^2)	$8,8 \times 10^{-4}$

Fonte: Butarelli (2016)

O sistema de equações diferenciais, Eq. (4.2) a (4.5), foi discretizado por diferenças finitas, em relação ao comprimento do secador (Figura 4.2), resultando em um sistema de equações diferenciais ordinárias. Para resolver este sistema, foi empregado a rotina *dsolve*, do *software* Maple 13.

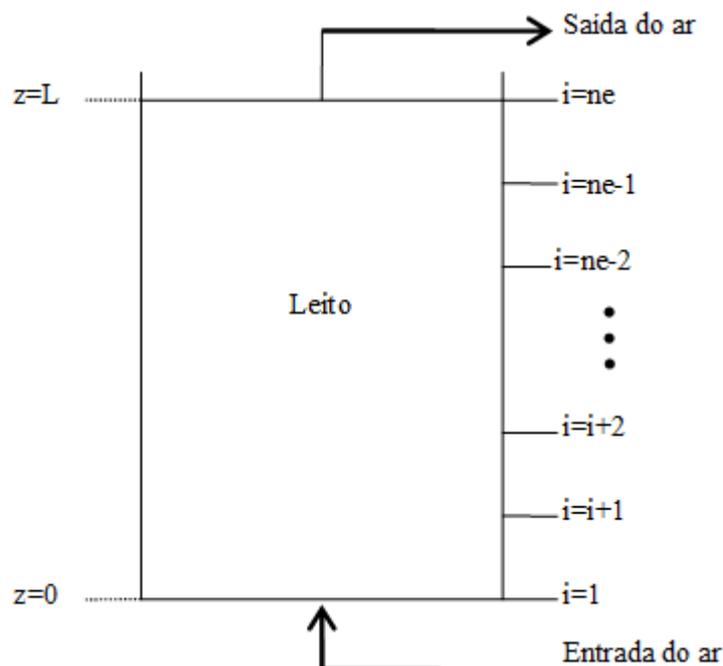


Figura 4.2: Discretização do leito de grãos

No presente estudo, os coeficientes interno de transferência de massa, k_S , e de transferência de calor, h_c , foram ajustados. O valor do coeficiente externo de transferência de massa, k_F , foi calculado pela Eq. (4.1).

Com o intuito de validar o modelo proposto, foram estimados apenas os valores dos coeficientes h_c e k_S , nas condições de secagem de 40 e 60 °C e 1,5 e 2,5 m/s. Sendo que os respectivos valores dos coeficientes nos pontos centrais de operação do secador, 50 °C e 2,0 m/s, foram calculados a partir de equações ajustadas.

A estimativa dos parâmetros foi realizada simultaneamente com a resolução do modelo matemático. Foi utilizada a estratégia *Global Search*, da rotina *Search*, no ambiente do *software* Maple 13. A função objetivo a ser minimizada foi o erro médio relativo à umidade experimental, em cada tempo.

Para verificação da adequação dos resultados simulados aos dados experimentais, foram utilizados os testes estatísticos de erro médio relativo, RME, coeficiente de determinação, R^2 , e soma do quadrado dos resíduos, SQ.

Os valores de h_c , estimados para as condições de secagem de 40 e 60 °C e 1,5 e 2,5 m/s, foram ajustados à equação proposta por Boyce (1965), em que $h_c = f(v, T_{G_{feed}})$. A relação obtida, com R^2 igual a 0,94, foi:

$$h_c = 2,489 \times 10^7 v^{0,095} T_{G_{feed}}^{0,208} \quad (4.12)$$

Por sua vez, os valores do parâmetro k_S , estimados para as condições de secagem de 40 e 60 °C e 1,5 e 2,5 m/s, foram ajustados ao modelo linear. A relação obtida, com R^2 igual a 0,96, foi:

$$k_S = 0,0015 T_{G_{feed}} - 0,0063 \quad (4.13)$$

No ponto central de operação do secador, 50 °C e 2,0 m/s, os valores de k_S e h_c foram calculados pelas Eq. (4.12) e (4.13).

A Tabela 4.3 apresenta a análise estatística realizada, quando comparados os valores experimentais e os calculados pelo modelo, para umidade média do leito de grãos de crambe.

Tabela 4.3: Análise estatística dos resultados simulados

Condição de Secagem		RME (%)	SQ	R ²
1,5 m/s	40 °C	10,48	$1,722 \times 10^{-3}$	0,982
	60 °C	16,73	$1,414 \times 10^{-3}$	0,991
2,0 m/s	50 °C	14,43	$2,316 \times 10^{-3}$	0,994
2,5 m/s	40 °C	14,86	$2,914 \times 10^{-3}$	0,993
	60 °C	17,54	$2,039 \times 10^{-3}$	0,991

Verifica-se, da Tabela 4.3, que o erro médio relativo apresentou um valor médio de 14,81%. Todos os valores do coeficiente de determinação indicam que mais de 98% da variação da umidade média do leito de grãos de crambe foi explicada pelo modelo, quando comparada aos dados experimentais. Esses resultados indicam que o modelo proposto pode ser utilizado na predição da umidade média do leito de grãos de crambe, submetido à secagem convectiva, nas condições estudadas.

A Figura 4.3 apresenta a cinética calculada da secagem do leito de grãos de crambe, para as condições experimentais estudadas.

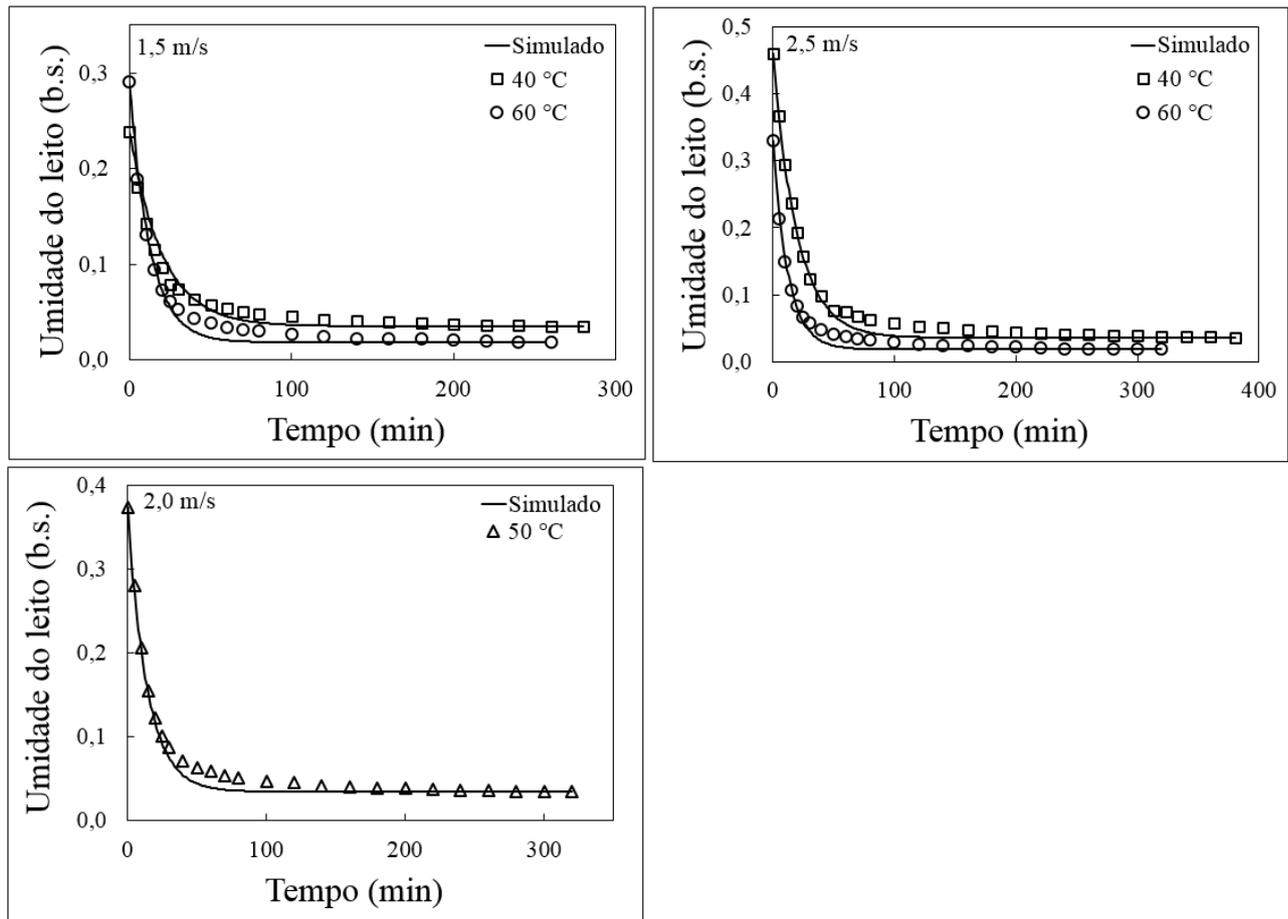


Figura 4.3: Cinética de secagem de grãos de crambe em leito fixo, conduzida a 1,5; 2,5 e 2,0 m/s

Da Figura 4.3, é possível verificar que quanto mais elevada a temperatura de secagem, menor foi o tempo necessário para se alcançar o equilíbrio entre a umidade do leito e o ar de secagem, já que o potencial de transferência de calor e massa foi incrementado. Foi observado, também, a influência pouco pronunciada da velocidade do ar na curva de secagem. Este comportamento pode ser atribuído ao mecanismo cinético típico da secagem de grãos, em que existe apenas o período de taxa de secagem decrescente. Nesse caso, a medida que a velocidade do ar de secagem é incrementada, menor é a influência desta, até seu desaparecimento, momento a partir do qual somente a difusão tem influência na cinética.

Como conclusões da validação do modelo matemático fenomenológico para descrever a cinética de secagem de grãos em leito profundo, empregando dados experimentais obtidos para grãos de crambe, observou-se que, para todas as condições de secagem simuladas, os testes estatísticos indicaram que o modelo proposto resultou em valores significativamente representativos dos dados experimentais da umidade média do leito de grãos.

Assim, o modelo matemático fenomenológico de dupla resistência proposto pode ser utilizado na predição da umidade média do leito de grãos de crambe, submetido à secagem convectiva nas condições estudadas.

4.3 Conclusões Parciais

Foi desenvolvido um modelo matemático de dupla resistência para descrever a cinética da secagem de grãos em leito profundo. O modelo e técnica de resolução foram validados, empregando dados experimentais da secagem de grãos de crambe em leito profundo, obtidos na literatura. Os parâmetros termo físicos massa específica, calor específico, condutividade e difusividade térmica dos grãos de crambe foram calculados pelo método da composição centesimal. Os coeficientes interno de transferência de massa e de calor foram estimados apenas nas condições limítrofes de secagem, nos pontos centrais os coeficientes foram calculados a partir de equações ajustadas. Para verificação da adequação dos resultados simulados aos dados experimentais, foram utilizados os testes estatísticos de erro médio relativo, coeficiente de determinação e soma do quadrado dos resíduos.

O erro médio relativo apresentou um valor médio de 14,81%. Todos os valores do coeficiente de determinação indicam que mais de 98% da variação da umidade média do leito de grãos de crambe foi explicada pelo modelo, quando comparada aos dados experimentais. Esses resultados indicam que o modelo proposto pode ser utilizado na predição da umidade média do leito de grãos de crambe, submetido à secagem convectiva, nas condições estudadas.

5 OTIMIZAÇÃO DE SECADOR CONVECTIVO DE GRÃOS EM LEITO PROFUNDO

O presente capítulo tem como objetivo a aplicação do modelo de secagem de grãos em leito profundo, validado no Capítulo 4, na otimização numérica de secadores de grãos em convecção forçada. Para o estudo, serão considerados grãos de uva da variedade Cabernet Sauvignon e grãos de crambe, secos em secadores fictícios sem e com recirculação do ar de exaustão, a fim de se determinar a eficiência energética de cada processo, para cada tipo de grão.

O emprego do modelo de parâmetros concentrados é justificado pelo elevado tempo computacional, requerido na solução do modelo de parâmetros distribuídos, quando este é aplicado nos estudos de otimização. Devido ao tempo demasiado para resolução e determinação das condições ótimas, e a possibilidade do emprego do modelo de parâmetros concentrados, o uso do modelo de parâmetros distribuídos foi inviável, considerando a metodologia proposta.

As simulações numéricas realizadas para a secagem de grãos de uva e de crambe em leito profundo fictício consideraram o processo ocorrendo nas condições descritas na Tabela 5.1, que são as condições operacionais propostas por Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974).

Tabela 5.1: Condições operacionais de secagem empregadas nas simulações em leito profundo

Parâmetro	Valor
Umidade inicial dos grãos	$X_0 = 0,33$ b. s.
Temperatura inicial dos grãos e do ar de secagem	$T_{S_0} = T_{G_0} = 25$ °C
Altura do leito	$L = 0,6096$ m
Área transversal do leito	$A = 0,1090$ m ²

Adaptado de Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974)

A porosidade do leito de grãos de uva foi tomada como aquela determinada experimentalmente por Oliveira et al. (2015), 0,47.

Nas simulações para a otimização, empregou-se como função objetivo a maximização da razão entre a quantidade de energia efetivamente empregada na remoção da umidade e a aquela adicionada ao ar de secagem, Eq. (2.35):

$$\eta_I = \max \frac{E_D}{E_Q} \quad (2.35)$$

Em que E_D é a energia consumida para dessorver a umidade (kJ/min), e E_Q é a energia total consumida para aquecer o ar de secagem por unidade de tempo (kJ/min).

Foram consideradas como variáveis manipuláveis a velocidade e a temperatura do ar de secagem. Assim, a função objetivo, Eq. (2.35), foi sujeita às restrições:

$$50^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Gfeed}} \leq 80^{\circ}\text{C} \quad (2.38)$$

$$1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s} \quad (2.39)$$

Todas as simulações foram realizadas até que fosse atingida a umidade média do leito de grãos igual a 13%, conforme Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974).

A Figura 5.1 ilustra o algoritmo desenvolvido para a otimização do processo de secagem.

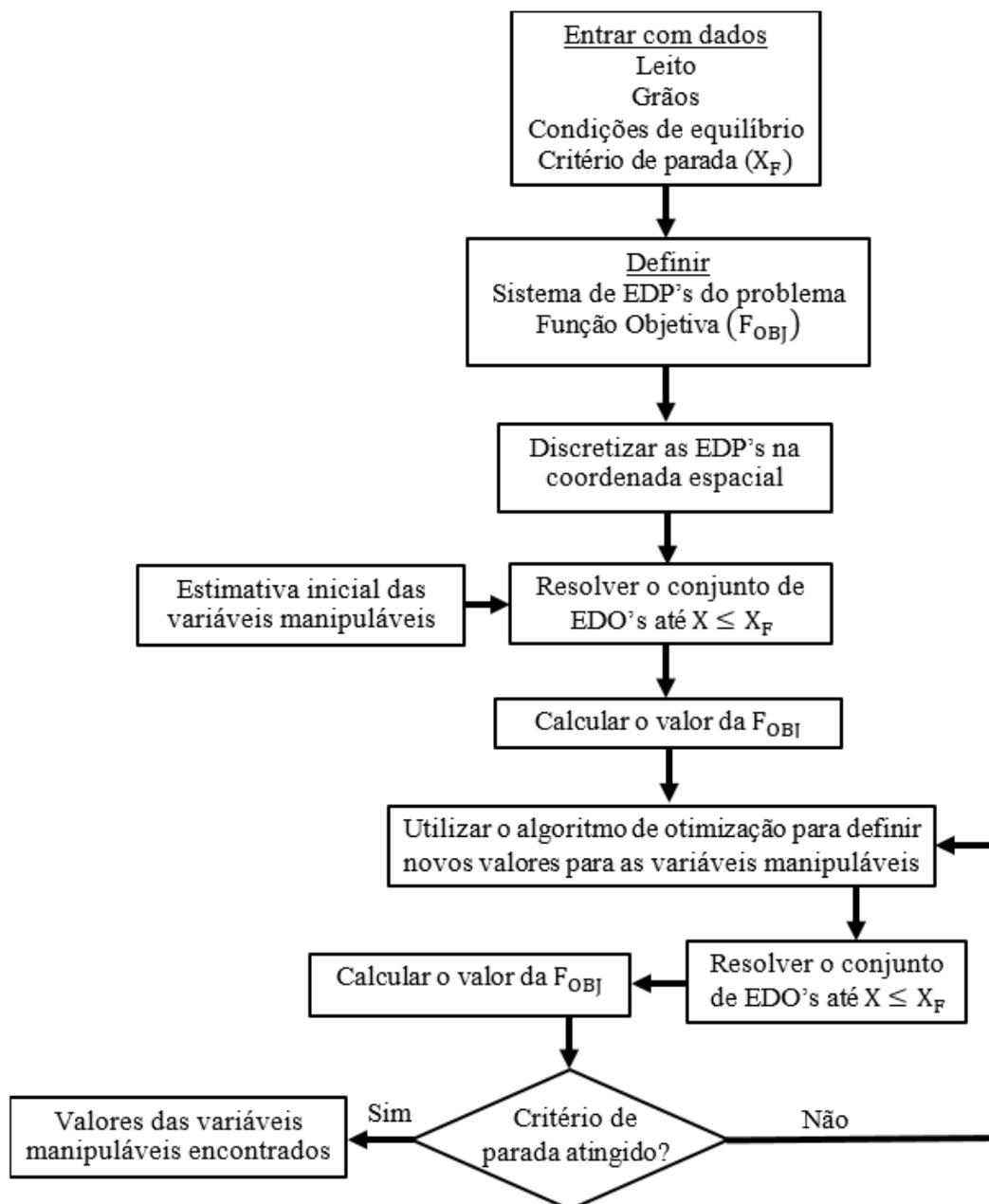


Figura 5.1: Algoritmo de resolução para a otimização do processo de secagem

Para a resolução do conjunto de equações diferenciais, Eq. (4.2) a (4.5), foi utilizado o método das linhas, após discretização do domínio espacial (leito de grãos), por diferenças finitas, aplicando 10 elementos de discretização. Após a obtenção de um conjunto de equações diferenciais ordinárias, aplicou-se o método numérico de Rosenbrock, por meio do comando `dsolve` do *software* Maple 13[®]. Para a otimização da Eq. (2.35), sujeita ao conjunto de restrições Eq. (2.38) e (2.39), empregou-se o comando `Search` do *software* Maple 13[®], adotando-se a estratégia *globalsearch*, que permite a inclusão de restrições no processo de definição do ponto ótimo da função objetivo.

5.1. Otimização da Secagem de Grãos de Uva em Leito Profundo

A Tabela 5.2 apresenta o resumo dos resultados da análise energética da secagem em leito profundo de grãos de uva: o tempo de secagem (t_D), a eficiência energética (η_D), e a energia específica da secagem (razão entre o consumo energético pela quantidade de água evaporada).

Tabela 5.2: Resultados da análise energética da secagem de grãos de uva em leito profundo

Condições de secagem	t_D (min)	η_D (%)	Energia específica (MJ/kg)
1 m/s e 50 °C	32	2,27	17,65
1 m/s e 60 °C	24	2,16	24,31
1 m/s e 70 °C	19	2,14	30,75
1 m/s e 80 °C	16	2,11	36,99

Por sua vez, a Figura 5.2 ilustra a cinética da secagem dos grãos de uva, em algumas condições de secagem analisadas no processo de otimização, até que a umidade média do leito de grãos atingisse 13%, assim como a eficiência do processo.

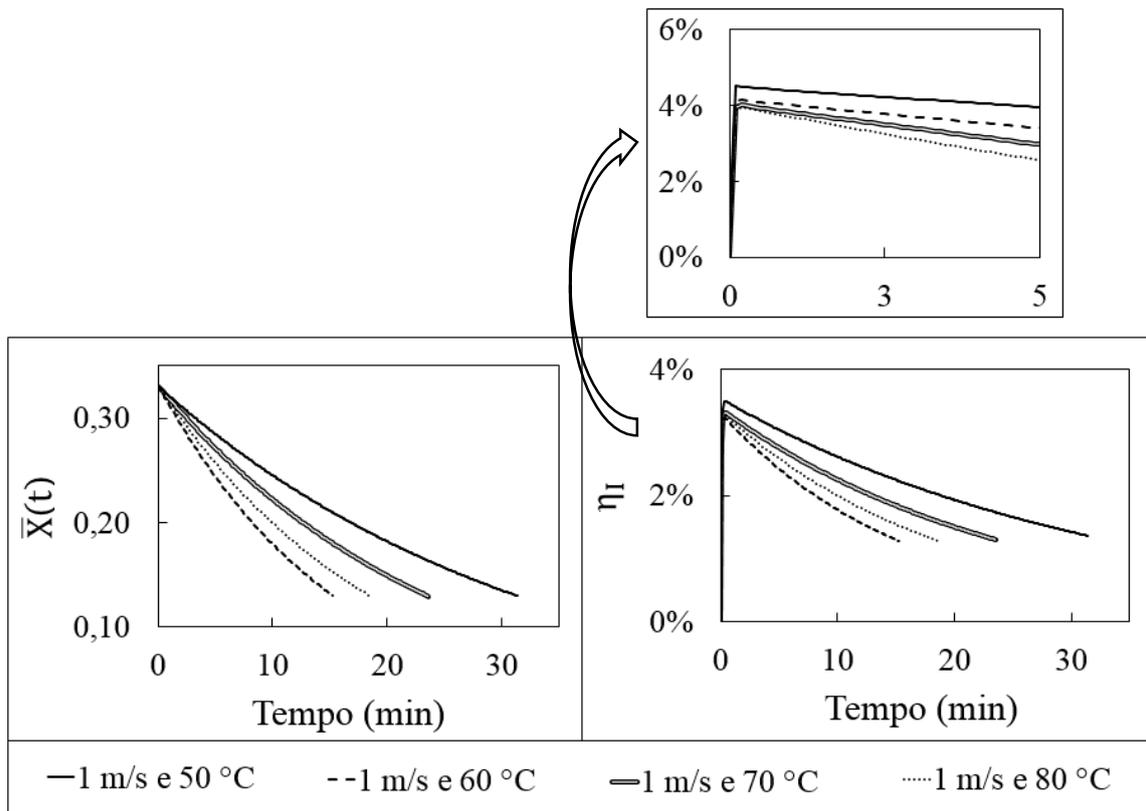


Figura 5.2: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de uva sem reciclo

Da Tabela 5.2 e Figura 5.2, observa-se que quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor foi o tempo de processamento, e que os maiores valores de eficiência energética foram alcançados na secagem conduzida a fluxos de ar menores.

De acordo com Mulet et al. (1987), um das técnicas de redução do consumo energético nos processos de secagem conduzidos a ar quente é diminuir o fluxo de ar no secador. Conforme os autores, essa redução é benéfica sob dois pontos de vista. O primeiro é a economia de energia e investimentos necessários para circular o ar, e o segundo é a redução na energia demandada para o aquecimento do ar. Este comportamento é facilmente explicado pelo fato de que, quando o fluxo de ar é aumentado, a energia térmica necessária ao aquecimento do ar também sofre incremento. E, de acordo com a Eq. (2.35), a energia térmica para aquecimento do ar de secagem é inversamente proporcional à eficiência. A maior eficiência energética, foi alcançada nas simulações operando o secador a 1 m/s e 50 °C, que resultou em valor de 2,27%.

Resultados similares são encontrados na literatura, como no trabalho conduzido por Hernández-Dias et al. (2013), que estudaram a secagem de grãos de café em secador rotatório. Os autores avaliaram a eficiência energética do processo de secagem conduzida a 60, 70 e 80 °C, e 5000, 7200 e 14000 kg de ar/hora, sendo que a maior eficiência energética foi obtida na condição

de 60 °C e 5000 kg de ar/hora. Por sua vez, Amantéa et al. (2013), em estudo da secagem de grãos de milho em leito fixo, variando a temperatura de secagem entre 43 e 70 °C e a velocidade entre 0,1 e 0,2 m/s, obtiveram maior eficiência energética, 48,3%, operando o secador em menores temperatura e velocidade do ar de secagem.

Dos resultados simulados, o menor consumo específico de energia foi 17,65 MJ/kg, quando o secador foi operado nas condições ótimas de secagem, 50 °C e 1 m/s, ou seja, quanto maior a temperatura de secagem, maior foi o consumo de energia para aquecer o ar da temperatura ambiente até a temperatura do operação do secador.

Na literatura são encontrados resultados similares, em que há relato de menor consumo de energia específica quando o secador operou com menor temperatura e fluxo do ar de secagem. Pode-se citar, por exemplo, o estudo de Zare e Chen (2009), na secagem de grãos de arroz com casca. No trabalho, os autores obtiveram um menor consumo de energia específica, 2 MJ/kg, operando o secador a 35 °C e 0,01 kg/m²s. Em condições de temperatura e fluxo mais elevados, 50 °C e 0,22 kg/m²s, o consumo foi de 16,80 MJ/kg. Por sua vez, Stakic e Tsotsas (2005), que analisaram a secagem de grãos de milho, com ar a 100 °C e 12,5 m³/s o consumo de energia específica foi de, aproximadamente, 3 MJ/kg, a 100 °C em um estágio e 130 °C noutro, a 16,76 m³/s foi de, aproximadamente, 6 MJ/kg, e a 26,36 m³/s foi de aproximadamente 6,5 MJ/kg. Ou seja, a operação de secadores em condições de temperatura e fluxo de ar mais elevados implicam no aumento do consumo de calor específico.

5.1.1 Otimização da Secagem de Grãos de Uva em Leito Profundo com Recirculação do Ar de Exaustão

Com o intuito de averiguar a influência da recirculação do ar de secagem na eficiência energética do secador, foram realizados estudos numéricos considerando tal situação. Para isso, foi considerando o processo de secagem em leito fixo, Figura 5.3.

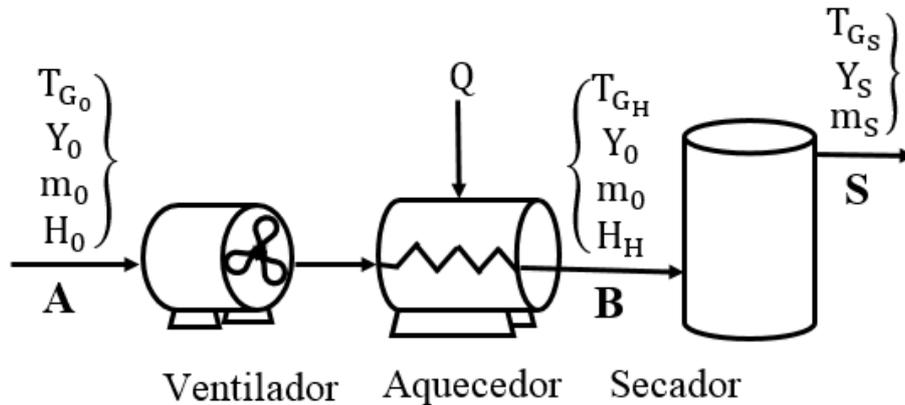


Figura 5.3: Esquema do secador de grãos em leito fixo

Na Figura 5.3, T_{G_0} é a temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), Y_0 é a umidade ambiente do ar de secagem (b.s.), m_0 é a vazão de entrada de ar de secagem (kg/min), H_0 é a entalpia do ar ambiente (kJ/kg), Q é o calor adicionado ao ar de secagem (kJ), T_{G_H} é a temperatura do ar na entrada do secador ($^{\circ}\text{C}$), H_H é a entalpia do ar na entrada do secador (kJ/kg), T_{G_S} é a temperatura do ar na saída do secador ($^{\circ}\text{C}$), Y_S é a umidade do ar na saída do secador (b.s.), m_S é a vazão de saída do ar de secagem (kg/s).

Da Figura 5.3, verifica-se que o processo inicia-se com a entrada de ar ambiente, T_{G_0} e Y_0 , ponto A, o ar ambiente é, então, comprimido e aquecido, mantendo a umidade absoluta constante, após o aquecimento e compressão, o ar entra na câmara de secagem, ponto B, e sai do secador carregando a umidade removida do leito de grãos.

De acordo com Anderson, Elfgren e Westerlund (2014), caso o ar de secagem que sai do secador ainda esteja aquecido, uma forma de aproveitamento dessa energia térmica é recircular o ar e misturá-lo com o ar ambiente, Figura 5.4.

A quantidade de ar que pode ser recirculada depende da umidade e temperatura do próprio ar de secagem, de modo que balanços de energia e massa devem ser realizados para obtenção das propriedades de mistura entre o ar recirculado e o ambiente, ponto B da Figura 5.4. A mistura pode ser feita antes ou após o aquecimento, dependendo das características do processo.

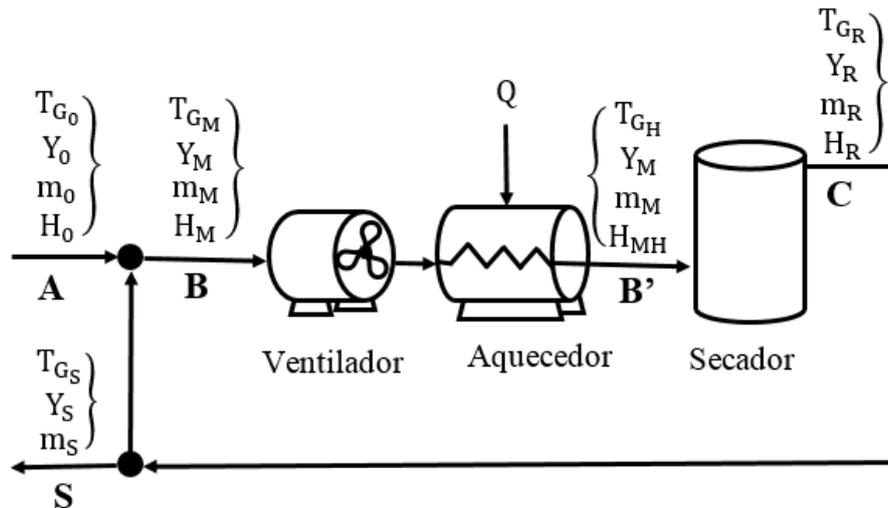


Figura 5.4: Desenho esquemático de um processo de secagem de grãos em leito fixo com recirculação do ar de secagem

Na Figura 5.4, T_{G_M} é a temperatura de mistura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), Y_M é a umidade de mistura do ar de secagem (b.s.), m_M é a vazão de mistura de ar de secagem (kg/s), H_M é a entalpia de mistura do ar de secagem (kJ/kg), H_{MH} é a entalpia de mistura do ar de secagem aquecido (kJ/kg), T_{G_R} é a temperatura de reciclo do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), Y_R é a umidade de reciclo do ar de secagem (b.s.), m_R é a vazão de reciclo de ar de secagem (kg/s), H_R é a entalpia de reciclo do ar de secagem (kJ/kg).

De acordo com Anderson, Elfgren e Westerlund (2014), a umidade teórica máxima no ponto C da Figura 5.4, é de $UR=100\%$, que seria ideal do ponto de vista energético. Porém, se a umidade do ar de secagem aumenta, a pressão parcial de vapor de água no ar também aumenta, de modo que a taxa de secagem é reduzida e essa redução implica no aumento do tempo de secagem. Obviamente, secadores longos e velocidades menores do ar de secagem podem coexistir com umidades relativas maiores.

Na Figura 5.4, o ponto A é a entrada do ar ambiente no sistema, B é o ponto de mistura do ar de recirculação com o ar ambiente, que entrarão no ventilador, B' é a saída do ar de mistura do aquecedor, que entrará no secador, C é o ponto em que se divide a corrente de saída do secador, formando a corrente de recirculação e a de exaustão do sistema (ponto S).

Para a resolução do sistema de equações diferenciais parciais e das equações algébricas resultantes do modelo com recirculação, a corrente de mistura do ar de recirculação e o ar ambiente foi considerada como uma mistura perfeita, sem gradientes de umidade e temperatura. O secador foi dividido em N_N compartimentos (Figura 5.5), sendo que o interior de cada um apresentava

propriedades dos grãos e do ar constantes, ou seja, sem gradiente em cada passo de tempo. Os compartimentos foram numerados em sentido ascendente, de modo que o compartimento N_1 recebia o ar de mistura, o compartimento genérico N_n recebia ar do compartimento N_{n-1} , e o compartimento N_N cedia parte do ar de exaustão para mistura com ar ambiente, que por sua vez era alimentado em N_1 . As derivadas espaciais foram discretizadas pelo método das diferenças finitas, em cada passo de tempo as propriedades de alimentação eram alteradas devido à entrada do ar de secagem do compartimento imediatamente anterior, de modo que o primeiro compartimento recebia o ar de mistura.

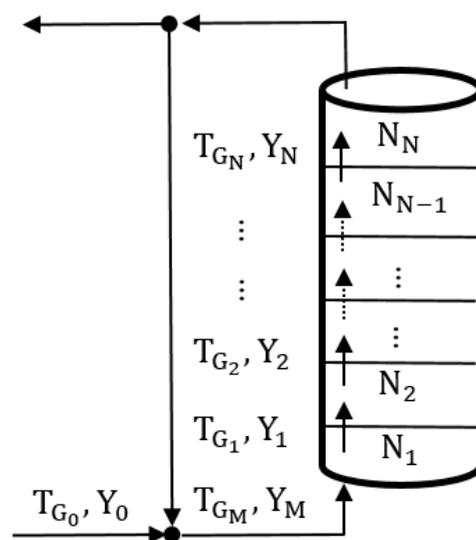


Figura 5.5: Detalhe da recirculação nos compartimentos do secador

Aplicando a técnica de recirculação do ar de exaustão, na secagem de grãos de uva, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.3, para algumas das condições simuladas.

Tabela 5.3: Resultados da análise energética da secagem de grãos de uva em leito profundo com recirculação do ar de exaustão

Condições de secagem	t_D (min)	η_D (%)	Energia específica (MJ/kg)
1 m/s e 80 °C, 0% de razão de reciclo	16	2,11	36,99
1 m/s e 80 °C, 85% de razão de reciclo	27	6,64	6,23
1 m/s e 80 °C, 95% de razão de reciclo	52	9,98	2,17
1 m/s e 80 °C, 97% de razão de reciclo	78	11,03	1,32
1 m/s e 80 °C, 99% de razão de reciclo	206	12,07	0,45

Por sua vez, a Figura 5.6 apresenta a cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de uva com reciclo, para o secador operando a 80 °C e 1 m/s.

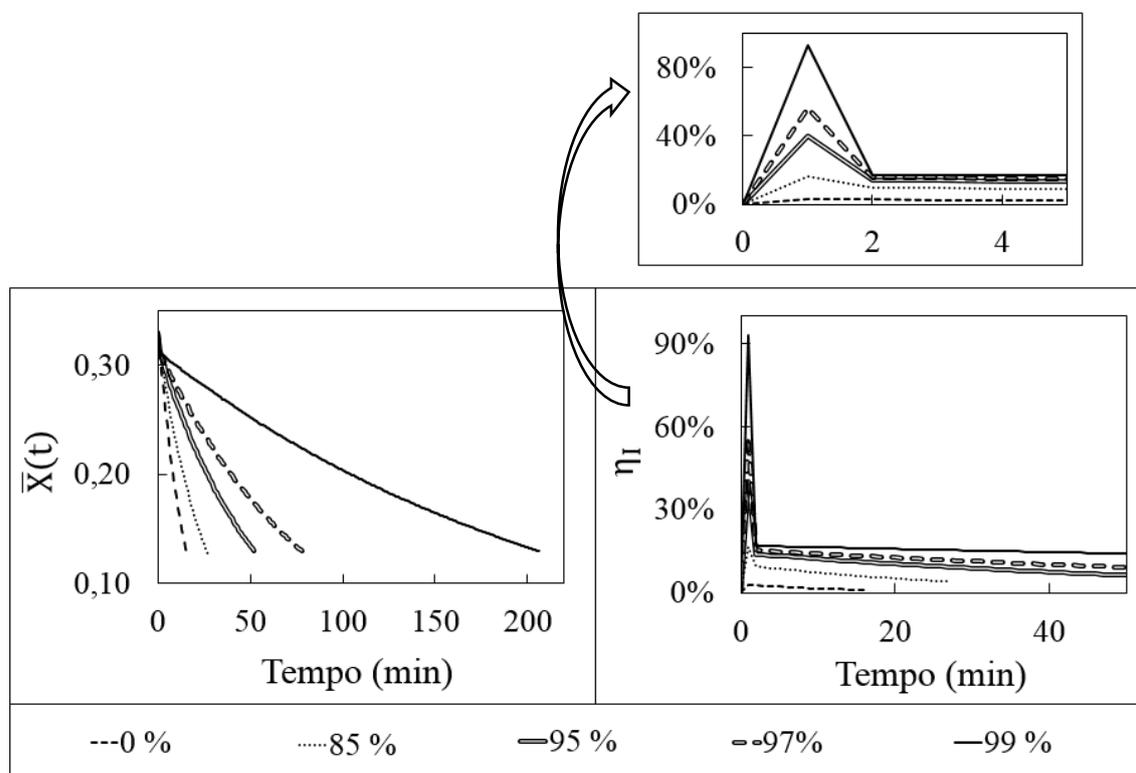


Figura 5.6: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de uva com reciclo, para 80 °C e 1 m/s

Tanto da Tabela 5.3, quanto da Figura 5.6, é possível verificar que o comportamento da eficiência energética da secagem, operada com ar de recirculação, mostrou uma melhoria substancial sobre secagem sem recirculação do ar de exaustão. As curvas ilustradas na Figura 5.6 (com recirculação) são significativamente díspares daquelas da Figura 5.2 (sem recirculação).

A Figura 5.7 apresenta o comportamento médio da umidade do ar de secagem e da temperatura do leito de grãos de uva ao longo do processo operado com recirculação.

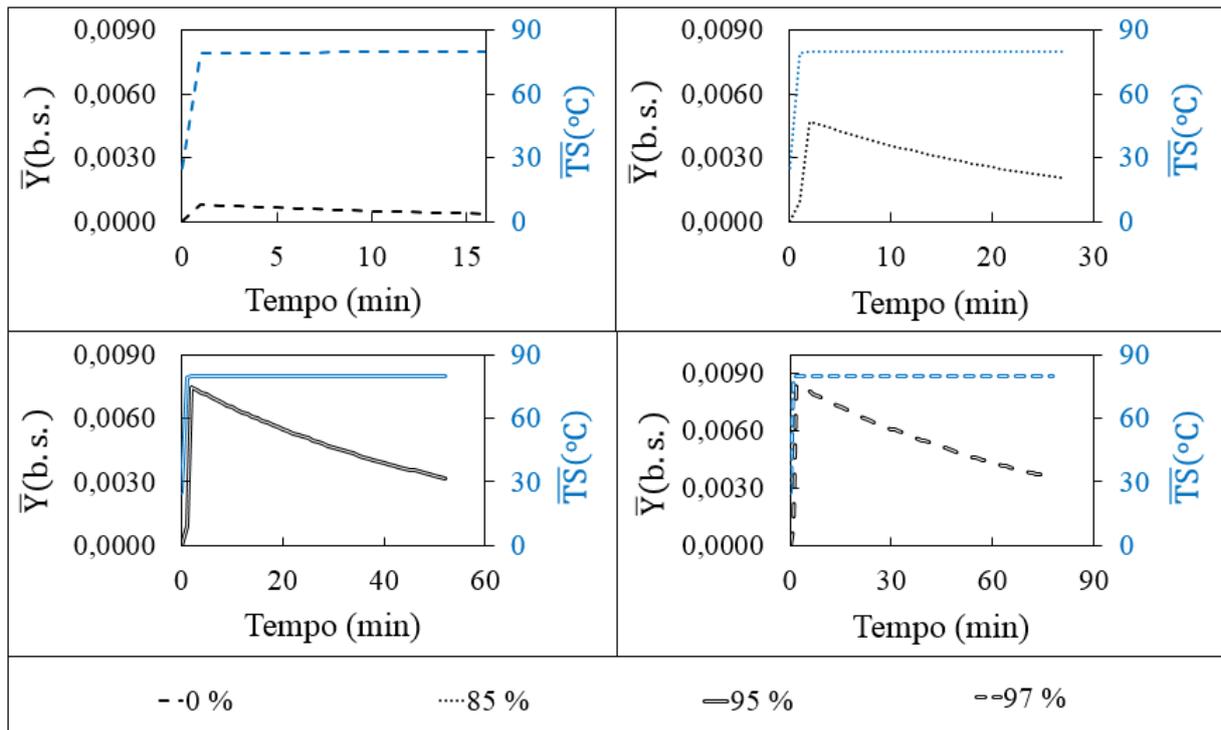


Figura 5.7: Cinéticas de mistura do ar de secagem e de aquecimento do leito de grãos de uva ao longo da operação com recirculação

Observa-se da Figura 5.7, que a temperatura média do leito de grãos, independente da razão de recirculação operada, atinge rapidamente valores próximos àqueles da temperatura do ar de secagem. Por sua vez, a umidade média do ar de secagem foi maior quanto maior foi a razão de recirculação. Esse fato era esperado, já que, com a recirculação, parte da umidade removida do leito de grãos, recirculava juntamente com o fluxo de ar, aumentando a umidade deste.

A Figura 5.8 apresenta a superfície gerada pelos resultados da otimização energética da secagem de grãos de uva, operando o secador com 99 e 85% de razão de reciclo do ar de exaustão. Para o desenho desta figura, os valores numéricos foram obtidos no programa desenvolvido ao longo da presente tese, as superfícies foram geradas no *Software Statistica*, e a plotagem em um única época foi feita no *Software OriginPro*.

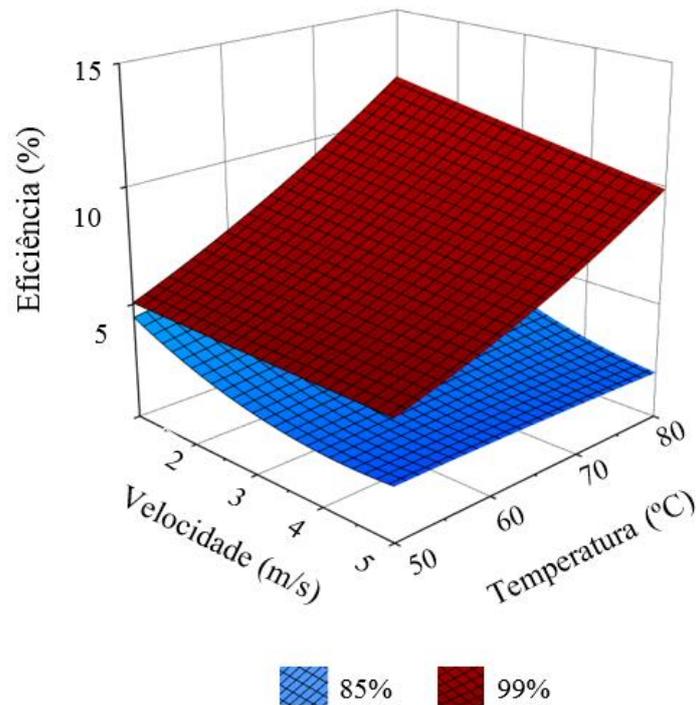


Figura 5.8: Superfícies geradas pela otimização energética da secagem de grãos de uva com recirculação do ar de exaustão

A partir da Figura 5.8 e considerando o conjunto de restrições impostas ao processo, $50^{\circ}\text{C} \geq T_{\text{Gfeed}} \leq 80^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ m/s} \geq v \leq 5 \text{ m/s}$, $0\% \geq q \leq 100\%$, e a condição de 99% de saturação do ar de secagem, a maior eficiência energética, 12,07%, foi obtida na condição de 1 m/s, 80°C e 99% de razão de reciclo, com consumo específico de energia igual a 0,45 MJ/kg.

Resultados análogos aos encontrados no presente estudo foram obtidos no trabalho conduzido por Achariyaviriya, Tiansuwan e Soponronnarit (2002), em secagem de frutas nomeadas de longans, em velocidade de ar fixada em 1 m/s, sendo que variando a vazão de recirculação entre 0 e 95%, e temperatura de 65, 75 e 85°C , os autores concluíram que o menor consumo específico de energia foi obtido nas condições de 75°C e 90% de razão de recirculação, resultando em 4,2 MJ/kg de consumo específico de energia. Já, Tippayawong et al. (2009), em estudo da secagem em bandejas de frutos de longan descascados, sob convecção forçada a 65°C e 2 m/s, concluíram que a eficiência de secagem foi aumentada de 19 para 29%, quando 70% do ar de secagem foi recirculado, já o consumo específico de energia variou de 81,1 para 46,4 MJ/kg.

No trabalho de Stahl e Berghel (2008), na secagem de serragem em um secador rotatório, conduzida a 8,56–12,41 kg/s e $423\text{--}800^{\circ}\text{C}$, os autores verificaram que, sem recirculação do ar de secagem, a eficiência do secador foi de 73,9%, para 30% de razão de recirculação, o valor da eficiência subiu para 78%, para 50% de recirculação, 78,3%, e, para 65%, a eficiência calculada resultou em 78,4%.

Amantéa, Fortes e Santos (2012), estudaram o efeito da recirculação do ar de exaustão na secagem de grãos de milho em secador convectivo. Os autores avaliaram a eficiência energética do processo fixando a velocidade do ar de secagem em 0,2 m/s, variando a temperatura entre 30 e 40 °C e a razão de recirculação entre 0 e 75%. Nos estudos, a maior eficiência energética, 44%, foi obtida na condição de 40 °C e 75% de razão de reciclo.

Por sua vez, Amantéa et al. (2014), também em estudo de secagem de grãos de milho em leito fixo, com recirculação do ar de secagem, analisaram o efeito da velocidade e temperatura do ar de secagem sobre a eficiência energética. Os autores concluíram que, ao aumentar a temperatura e reduzir a velocidade do ar de secagem, a eficiência energética aumenta.

5.2. Otimização da Secagem de Grãos de Crambe em Leito Profundo Sem e Com Recirculação do Ar de Exaustão

Da mesma forma que foram conduzidas as simulações da otimização energética do processo de secagem de grãos de uva na Seção 5.1 e 5.1.1, foram, também, procedidas as otimizações sem e com recirculação do ar de exaustão, para grãos de crambe em leito fixo.

A Tabela 5.4 apresenta o resumo dos resultados da análise energética da secagem em leito profundo de grãos de crambe e Figura 5.9 ilustra a cinética da secagem dos grãos de crambe, em algumas condições de secagem analisadas no processo de otimização sem recirculação do ar de exaustão, até que a umidade média do leito de grãos atingisse 13%.

Tabela 5.4: Resultados da análise energética da secagem de grãos de crambe em leito profundo

Condições de secagem	t_D (min)	η_D (%)	Energia específica (MJ/kg)
1 m/s e 50 °C	27	3,06	16,13
1 m/s e 60 °C	18	2,81	22,19
1 m/s e 70 °C	13	2,7	28,04
1 m/s e 80 °C	10	2,64	34,04

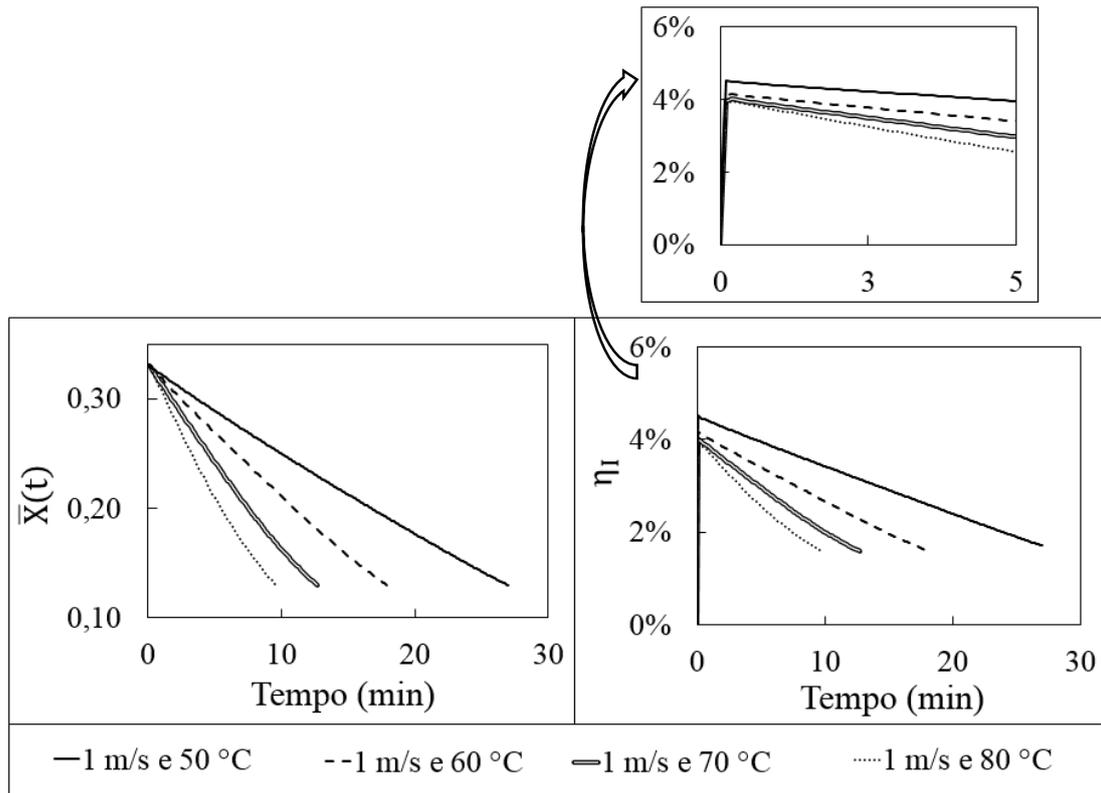


Figura 5.9: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de crumbe sem reciclo

Da Tabela 5.4 e Figura 5.9, é possível verificar que a maior eficiência energética do processo de secagem de grãos de crumbe em leito fixo, 3,06%, foi obtida operando o secador a 1 m/s e 50 °C, assim como no caso do leito de grãos de uva. Nessas condições, foi observado o menor consumo específico de energia, 16,13 MJ/kg.

Uma vez considerada a técnica de recirculação do ar de exaustão, na secagem de grãos de crumbe em leito fixo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.5 e Figuras 5.10 a 5.12, para algumas das condições simuladas.

Tabela 5.5: Resultados da análise energética da secagem de grãos de crumbe em leito profundo com recirculação do ar de exaustão

Condições de secagem	t_D (min)	η_D (%)	Energia específica (MJ/kg)
1 m/s e 80 °C, 0% de razão de reciclo	10	2,06	34,04
1 m/s e 80 °C, 85% de razão de reciclo	46	7,85	5,64
1 m/s e 80 °C, 95% de razão de reciclo	137	12,22	1,91
1 m/s e 80 °C, 97% de razão de reciclo	228	13,26	1,15
1 m/s e 80 °C, 98% de razão de reciclo	343	13,13	0,77

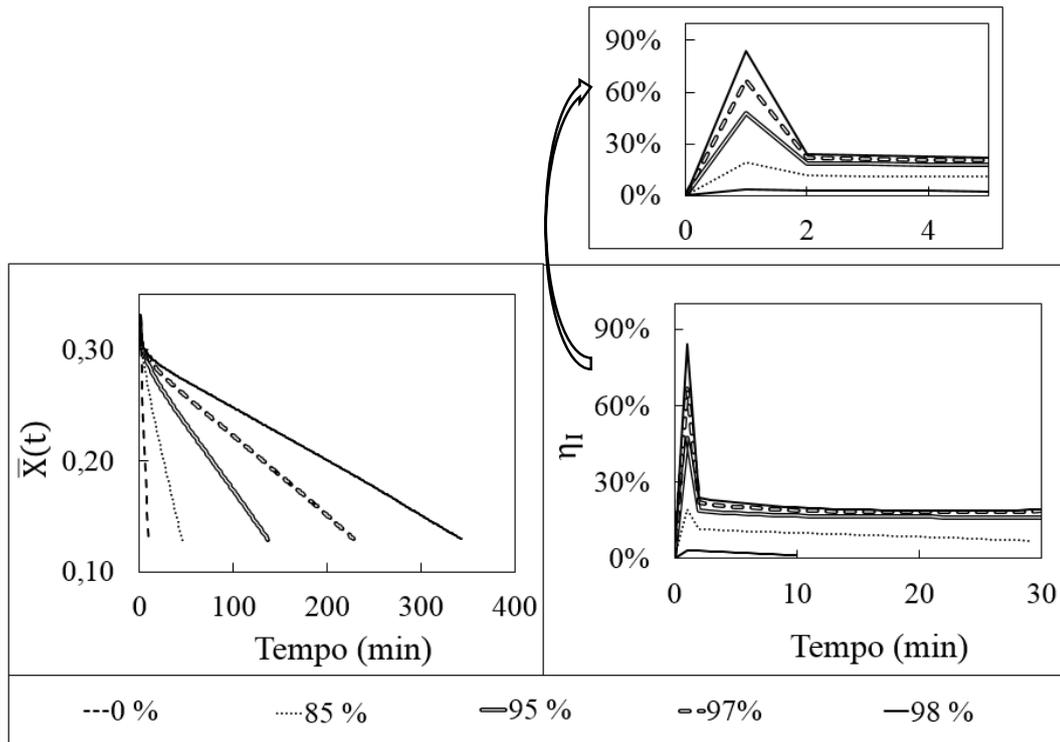


Figura 5.10: Cinética e eficiência do processo de secagem de grãos de crame com reciclo, para 80 °C e 1 m/s

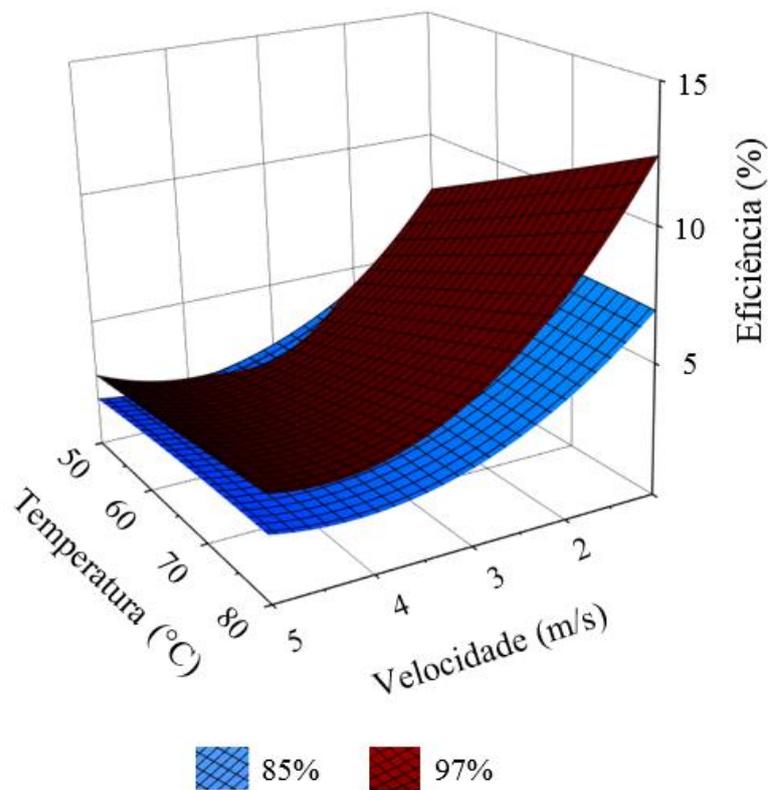


Figura 5.11: Superfícies geradas pela otimização energética da secagem de grãos de crame com recirculação do ar de exaustão

Das Figuras 5.10 e 5.11, e da Tabela 5.6, considerando todo o universo empregado na otimização da secagem de grãos de crambe em leito fixo, a maior eficiência energética, 13,26%, foi obtida na condição de 1 m/s, 80 °C e 97% de razão de reciclo, com consumo específico de energia igual a 0,77 MJ/kg.

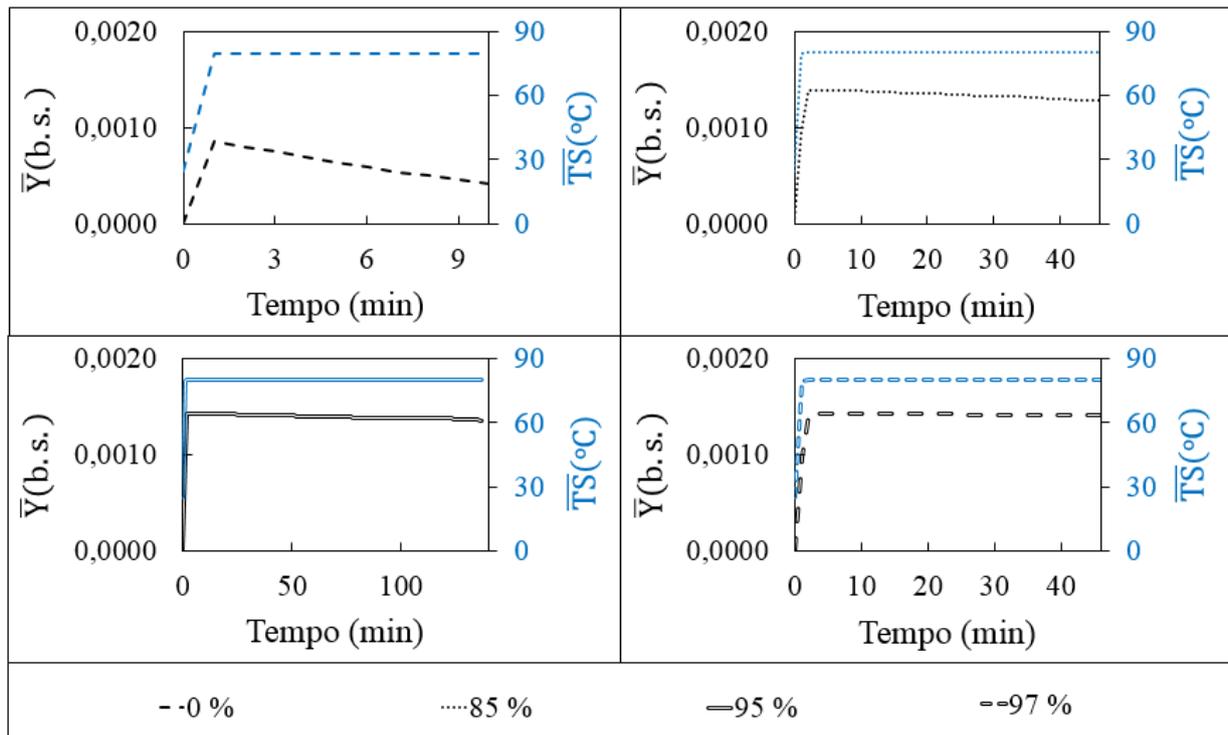


Figura 5.12: Cinéticas de mistura do ar de secagem e de aquecimento do leito de grãos de crambe ao longo da operação com recirculação

Observa-se, da Figura 5.12, que a cinética de hidratação do ar de secagem, assim como de aquecimento do leito de grãos de crambe, foi similar àqueles observados para o leito de grãos de uva (Figura 5.7).

Ainda, da Tabela 5.5, verificou-se que, conforme esperado, o tempo de residência dos grãos de crambe no secador, até que fosse atingida a umidade média de 13%, diminuiu acentuadamente com o aumento da temperatura do ar e aumentou com um aumento da fração de ar que foi reutilizado. Entretanto, quando se analisa, paralelamente, os tempos de secagem sem reciclo, para os grãos de uva, Tabela 5.2, e para os grãos de crambe, Tabela 5.4; e com reciclo, para os grãos de uva, Tabela 5.3, e para grãos de crambe, Tabela 5.5, observa-se que houve uma inversão do comportamento em relação ao tempo de secagem. Nesse contexto, a Figura 5.13

compara os valores de k_S calculados para os grãos de uva, a partir dos dados da Tabela 3.4, Eq. (3.28) e (3.30), e para os grãos de crambe, calculados pela Eq. (4.13).

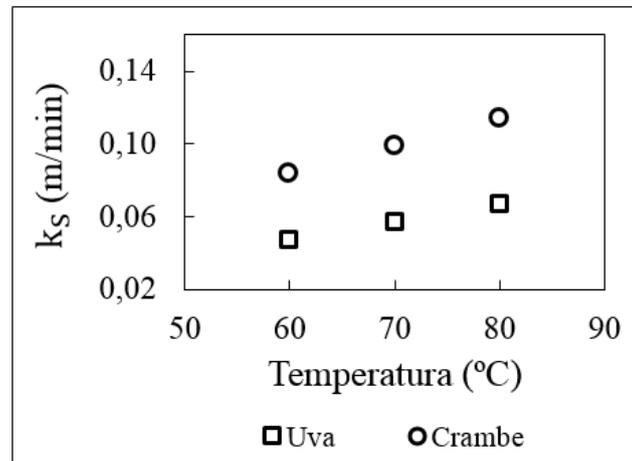


Figura 5.13: Valores do coeficiente interno de transferência de massa para os grãos de uva e de crambe

Considerando as mesmas condições de secagem, Tabela 5.1, quando o secador foi operado sem recirculação do ar de secagem, o leito de grãos de crambe secou mais rapidamente que o leito de grãos de uva. Isso devido aos valores do coeficiente interno de transferência de massa, k_S , dos grãos de crambe ser maior que o dos grãos de uva (Figura 5.13). Porém, quando iniciou-se a operação com o reciclo do ar de secagem, o leito de grãos de uva passou a secar com maior rapidez que o leito de grãos de crambe. Esse comportamento pode ser explicado pelas respectivas isotermas de secagem dos grãos de uva, Eq. (3.6), e de crambe, Eq. (4.11), plotadas no mesmo eixo cartesiano (Figura 5.14).

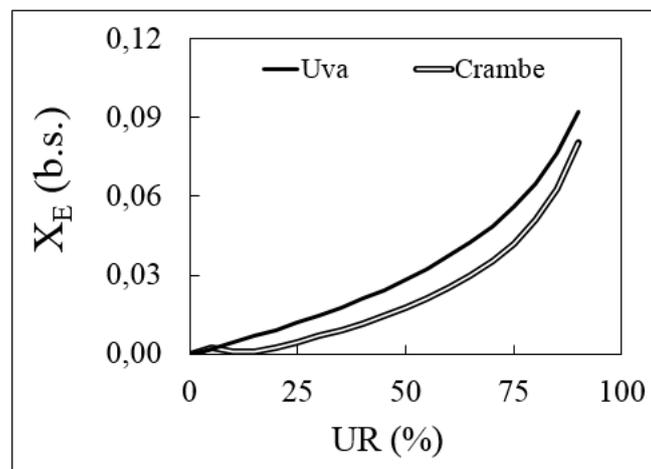


Figura 5.14: Isotermas de desorção dos grãos de uva e de crambe, a 80 °C

Da Figura 5.14, observa-se que, para a mesma temperatura e umidade relativa do ar de secagem, a umidade de equilíbrio dos grãos de uva é superior àquela obtida para os grãos de crambe. Assim, considerando que, para o caso de secagem de grãos, a transferência de massa é controlada pela resistência interna, o fato de os grãos de uva secarem mais rapidamente, quando o secador operar com recirculação do ar de exaustão, indica que o gradiente $\bar{X}-X_E$ é maior para o leito de grãos de uva do que para o leito de grãos de crambe. E que esse gradiente supera o fato de o coeficiente interno de transferência de massa dos grãos de crambe serem superiores aos dos grãos de uva. Além disso, a temperatura média do leito de grãos de crambe foi inferior à do leito de grãos de uva.

Diante do exposto, considerando que os estudos realizados no presente trabalho contemplam apenas gastos relacionados ao consumo energético, é importante que, para decisão final do processo a ser adotado, sejam contempladas as diferentes formas de energia que podem ser empregadas para realização da secagem de cada tipo de grãos, assim como a agilidade esperada para o processamento.

5.3. Conclusões Parciais

Foi estudada a secagem de grãos de uva e crambe em leito fixo, com a finalidade de se determinar a eficiência energética do processo de secagem de ambos os grãos, sem e com a recirculação do ar de exaustão do secador convectivo. As simulações foram conduzidas até que o leito de grãos atingisse 13% de umidade média, e o conjunto de restrições impostas ao processo foi $50^{\circ}\text{C} \leq T_{G_{\text{feed}}} \leq 80^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s}$, $0\% \leq q \leq 100\%$.

O comportamento da eficiência energética, definida como sendo a razão entre a quantidade de energia empregada na remoção da umidade, pela energia requerida para aquecer o ar de secagem, da temperatura ambiente até a temperatura de operação do secador foi similar. Em ambos os secadores simulados (de grãos de uva e de grãos de crambe), a maior eficiência energética, desconsiderando o reciclo do ar de secagem, foi obtida em 50°C e 1 m/s . Essas foram as condições mais amenas de secagem impostas pelo conjunto de restrições considerado. Para os grãos de uva, a eficiência máxima foi de 2,27% e para os grãos de crambe 3,06%. O consumo específico de energia foi tão menor quanto menor foi o fluxo de ar no secador.

A eficiência energética do processo de secagem, considerando a recirculação do ar foram significativamente superiores àquelas obtidas para o secador operando sem a recirculação. Para o caso dos grãos de uva, a eficiência máxima calculada foi 12,07%, e para o leito de grãos de crambe

foi de 13,26%, respectivamente, para razões de 99% e 97%, ambas para o secador operando a 80 °C e 1 m/s.

Dessa forma, pode-se concluir que o emprego de menores vazão de ar de secagem são recomendadas, para a secagem convectiva de ambos os grãos, tanto em secadores convencionais, quanto naqueles operados com recirculação do ar de saída do leito. Já, também para ambos os grãos, quando o secador foi operado de forma convencional, sem reaproveitamento do ar de exaustão, maiores eficiências foram alcançadas com menores temperaturas. Entretanto, quando o equipamento foi provido de recirculação do ar de exaustão, quanto maior foi a temperatura de operação do processo, maior foi a eficiência.

6 CONCLUSÕES FINAIS

Foi estudado o processo de secagem convectiva de grãos de uva em camada fina, considerando quatro diferentes taxas de secagem. Os resultados indicam que as modelagens matemáticas e as simplificações propostas, somadas ao método numérico utilizado para resolver o sistema de equações, foram eficientes na descrição do fenômeno de secagem convectiva dos grãos de uva em camada fina, nas condições de operação simuladas. Sendo, portanto, possível a utilização dos coeficientes obtidos em modelagem e otimização de secadores em convecção forçada e leito profundo.

Foi desenvolvido um modelo matemático de dupla resistência para descrever a cinética da secagem de grãos em leito profundo. O modelo e técnica de resolução foram validados, empregando dados experimentais da literatura, mostrando-se eficiente para o propósito da presente tese. Foi verificada a equivalência entre os resultados obtidos empregando o modelo de parâmetros distribuídos para camada fina, e o modelo proposto de leito profundo de parâmetros concentrados.

Foi estudada a otimização energética do processo de secagem de grãos de uva e de crambe em leito fixo, sem e com a recirculação do ar de exaustão do secador convectivo. O comportamento da eficiência energética, definida como sendo a razão entre a quantidade de energia empregada na remoção da umidade, pela energia requerida para aquecer o ar de secagem, da temperatura ambiente até a temperatura de operação do secador foi similar para ambos os grãos. As simulações foram conduzidas até que o leito de grãos atingisse 13% de umidade média, e conjunto de restrições impostas ao processo foi $50^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Gfeed}} \leq 80^{\circ}\text{C}$, $1 \text{ m/s} \leq v \leq 5 \text{ m/s}$, $0\% \leq q \leq 100\%$.

A maior eficiência energética, desconsiderando o reciclo do ar de secagem, foi obtida em 50°C e 1 m/s . Essas foram as condições mais amenas de secagem impostas pelo conjunto de restrições considerado. Para os grãos de uva, a eficiência máxima foi de 2,27% e para os grãos de crambe 3,06%. O consumo específico de energia foi tão menor quanto menor foi o fluxo de ar no secador. Para o caso dos grãos de uva, a eficiência energética, gerada pelo reaproveitamento do ar de exaustão foi de 12,07%, e para os grãos de crambe 13,26%, ambos para o secador operando a 80°C e 1 m/s , e 99 e 97% de razão de recirculação, respectivamente.

Assim, concluiu-se que o emprego de menores vazão de ar de secagem são recomendadas, para a secagem convectiva de ambos os grãos, tanto em secadores convencionais, quanto naqueles operados com recirculação do ar de saída do leito. Já, também para ambos os grãos, quando o secador foi operado de forma convencional, sem reaproveitamento do ar de exaustão, maiores eficiências foram alcançadas com menores temperaturas. Entretanto, quando o equipamento foi

provido de recirculação do ar de exaustão, quanto maior foi a temperatura de operação do processo, maior foi a eficiência.

Entretanto, como os estudos realizados no presente trabalho contemplam apenas gastos relacionados ao consumo energético, é imprescindível que os diferentes tipos de energias disponíveis, equipamentos e tempo de processamento sejam avaliados para decisão final da técnica a ser empregada.

7 REFERÊNCIAS

- ACHARIYAVIRIYA, A.; TIANSUWAN, J.; SOPONRONNARIT, S. Energy optimisation of whole longan drying: simulation results, *International Journal of Ambient Energy*, v.23, p. 212-220, 2002.
- AKAIKE, H. **Information theory and an extension of the maximum likelihood principle**. In Petrov, B.N.; Csaki, F. (Eds.), *Second International Symposium on Information Theory* (pp. 267-281). Budapest: Akademiai Kiado, 1973.
- AMANTEÁ, R.P.; FORTES, M.; MARTINS, J.H.; FERREIRA, W.R. Numerical Simulation Techniques for Optimizing Thermodynamic Efficiencies of Cereal Grain Dryers. *Drying Technology*, v.31, p. 672-683, 2013.
- AMANTÉA, R.P.; FORTES, M.; MARTINS, J.H.; SANTOS, G.T. Energy and exergy analysis of two-dimensional grain dryers. In: *International Drying Symposium, 19., 2014, Lyon. Anais...* Lyon: IDS, 2014.
- AMANTÉA, R.P.; FORTES, M.; SANTOS, G.T. Exergy Analysis applied to the design of grain dryers with air flow recirculation. In: *American Society of Agricultural & Biological Engineers Annual International Meeting, 2012. Anais...* Dallas: ASABE Annual International Meeting, 2012.
- ANDERSSON, J.O.; ELFGREN, E.; WESTERLUND, L. Improved energy efficiency in juice production through waste heat recycling. *Applied Energy*, v 130, p. 757-763, 2014.
- ANWAR, S.I.; TIWARI, G.N. Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying - an experimental study. *Energy Conversion and Management*, v.42, p. 1687-1698, 2001.
- AREGBA, A.W.; SEBASTIAN, P.; NADEAU, J.P. Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model. *Journal of Food Engineering*, v.77, p. 27-40, 2006.
- ASAE STANDARDES – S448. **Thin-Layer drying of grains and crops**, p. 581-583, 1998.
- ASHRAE. **Measurement of Energy and Demand Savings**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2002.
- ASHTIANI, A.M. **Otimização global determinística no espaço-imagem: problemas multiplicativos e fracionários**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- AVRAMIDIS, S.; HATZIKIRIAKOS, S.G.; SIAU, J.F. An irreversible thermodynamics model for unsteady-state nonisothermal moisture diffusion in wood. *Wood Science and Technology*, v.28, p. 349-358, 1994.
- AZEVEDO, C.A.V.; MERKLEY, G.P.; WALKER, W.R. Otimização não-linear na solução do problema inverso da irrigação por sulcos em tempo real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.1, p. 43-49, 1997.

- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W., BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v.55, p. 323-330, 2002.
- BAHU, R.E.; BAKER, C.G.J.; REAY, D. Energy balances on industrial dryers – a route to fuel conservation. **Journal of Separation Process Technology**, v.4, p. 23-28, 1983.
- BALA, B.K.; WOODS, J.L. Optimization of the natural-convection solar drying system. **Energy**, v.20, p. 285-294, 1995.
- BAKER, K.D.; PAULSEN, M.R.; ZWEDEN, J. van. Temperature effects on seed corn dryer performance. **Applied Engineer in Agriculture**, v.9, n.1, p.79-83, 1993.
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOK, R.C.; LEREW, L. E. Cereal grain drying. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Advances in Cereal Science and Technology**, v.2, p1-45, 1978.
- BANGA, J.R.; BALSACANTO, E.; MOLES, C.G.; ALONSO, A.A. Improving food processing using modern optimization methods. **Trends in Food Science & Technology**, v.14, p. 131-144, 2003.
- BANGA, J.R.; PEREZ-MARTIN, R.I.; GAHRDO, J.M.; CASARES, J.J. Optimization of the Thermal Processing of Conduction-Heated Canned Foods: Study of Several Objective Functions. **Journal of Food Engineering**, v.14, p. 25-51, 1991.
- BANGA, J.R.; SINGH, R.P. Optimization of Air Drying of Foods. **Journal of Food Engineering**, v.23, p. 189-211, 1994.
- BARBOSA DE LIMA, A.G.; DELGADO, J.M.P.Q.; OLIVEIRA, V.A.B.; MELO, J.C.S.; JOAQUINA E SILVA, C. Porous Materials Drying Model Based on the Thermodynamics of Irreversible Processes: Background and Application. *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. **Advanced Structured Materials**, v.48, p. 1-23, 2014.
- BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.
- BARROZO, M.A.S.; HENRIQUE, H.M.; SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T. The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. **Journal of Stored Products Research**, v.42, p. 348-356, 2006.
- BASILE, A.; CURCIO, S.; BAGNATO, G.; LIGUORI, S.; JOKAR, S.M.; IULIANELLI, A. Water gas shift reaction in membrane reactors: Theoretical investigation by artificial neural networks model and experimental validation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.40, p. 5897-5906, 2015.
- BATALHA, M.O.; SILVA, A. L. Marketing & Agribusiness: um enfoque estratégico. **Revista de Administração de Empresas**, v.35, 1995.
- BENAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Numerical simulation of drying under variable external conditions: application to solar drying of seedless grapes. **Journal of Food Engineering**, v.76, 179-187, 2006.

- BENAMOUN, L.; KHAMA, R.; LÉONARD, A. Convective drying of a single cherry tomato: Modeling and experimental study. **Food and Bioproducts Processing**, v.94, p. 114-123, 2015.
- BEZ, E.T. **Procedimento de representação de soluções em otimização global: aplicação em modelos de interação**. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- BIAGGIONI, M.A.M.; PIZA, P.L.B.T.; FERREIRA, W.A. Queda de pressão estática por meio de uma coluna de noz de macadâmia. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 499-507, 2005.
- BIRD, B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**, Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- BITRA, V.S.P.; BANU, S.; RAMAKRISHNA, P.; NARENDER, G.; WOMAC, A.R. Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. **Biosystems Engineering**, v.106, p. 503-512, 2010.
- BOERI, C.N. **Secagem convectiva de produtos alimentares**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.
- BON, J.; KUDRA, T. Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. **Drying Technology**, v.25, p. 523-532, 2007.
- BONA, E.; BORSATO, D.; SILVA, R.S.S.F.; HERRERA, R.P. Aplicativo para otimização empregando o método simplex sequencial. **Acta Scientiarum**, v.22, p.1201-1206, 2000.
- BORTOLAIA, L.A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 2011. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BOX, M.J. A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods. **Computer Journal**, v.8, p. 42-52, 1965.
- BOYCE, D.S. Grain Moisture and Temperature Changes with Position and Time During Through Drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.10, p. 333-341, 1965.
- BRACHT, C.K. **Estudo da secagem de sementes de uva em leito de jorro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.
- BRANDÃO, F.J.B.; SILVA, A.R.B.; SILVA, M.A.P.; SPEROTTO, F.C.S. **Desempenho operacional e produtividade agrícola do crambe nos preparos convencional e reduzido de solo**. In: ENCICLOPÉDIA BIOSFERA. Goiânia: Centro Científico Conhecer, v. 9, 2013.
- BRANDÃO, F.J.B.; SILVA, M.A.P.; SPEROTTO, F.C.S.; JASPER, S.P.; BEZERRA, P.H.S.; BIAGGIONI, M.A.M. Variation of static pressure in a crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) grains column. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 16-22, 2016.
- BRENT, R.P. **Algorithms for Minimization Without Derivatives**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. 3^a Ed., New York: AVI Publishing Company, 1992.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. New York: AVI Publishing Company, 1974.

BUNYAWANICHAKUL, P.; WALKER, G.J.; SARGISON, J.E.; DOE, P.E. Modelling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying in a Simple Pneumatic Dryer. **Biosystems Engineering**, v.96, p. 335-344, 2007.

BUTARELLI, F.P. **Estudo, Modelagem Matemática e Controle do Processo de Secagem de Crambe (*Crambe Abyssinica*) em Secador de Leito Fixo de Bancada**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.36, p. 984-990, 2009.

CALÇADA, L.A.; MOTTA LIMA, O.C.; MANCINI, M.C. Otimização Energética de Secadores de Grãos: “Estudo de Casos”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 25., 96, Bauru. **Anais eletrônicos...** Bauru: CONBEA, 1996.

CAMPOS, A.T. **Desenvolvimento e Análise de um Protótipo de secador em Camada Fixa para Café (*Coffea arabica* L.)**, com Sistema de Revolvimento Mecânico. 1998. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

CASTOLDI, G.; CASTOLDI, G. Pré-Processamento e Secagem de Café. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v.3, p. 175-193, 2013.

CAVALCANTE, A.M.; ANDRADE, NETO, R.F.O.; CAVALCANTI, J.R.R.; CAVALCANTE, C.A.V.; SOUZA, F.M.C. Algoritmo de Otimização Global Irrestrita Utilizando Nuvens Controladas. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 34., 2004, São José Del Rei. **Anais eletrônicos...** São José Del Rei: SBPO, 2004.

CELMA, A.R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; CUADROS BLÁZQUEZ, F. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. **Food and Bioproducts Processing**, v.87, p. 247-253, 2009.

CHAKRABORTY, S.; DASGUPTA, J.; FAROOQ, U.; SIKDER, J.; DRIOLI, E.; CURCIO, S. Experimental analysis, modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solutions by polymer-enhanced ultrafiltration. **Journal of Membrane Science**, v.456, 139-154, 2014.

CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. **Métodos numéricos para engenharia**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

CHÁVEZ-MÉNDEZ, C.; SALGADO-CERVANTES, M.A.; WALISZEWSKI-KUBIAK, K.N.; GARCIA-ALVARADO, M.A. Fitting Cassava Drying Kinetic With A High Order Equation. **Drying Technology**, v.16, p. 323-331, 1998.

CHENG, X.; Y., FAN. J. Heat and Moisture Transfer with Sorption and Phase Change Through Clothing Assemblies Part II: Theoretical Modeling, Simulation, and Comparison with Experimental Results. **Textile Resource Journal**, n.75, p. 187-196, 2005.

CHU, S.; HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equations. **Transactions of the ASAE**, v.11, p. 705-708, 1968.

CHUEAPRASAT, C.; CHITSOMBOON, T. Numerical Analysis of Heat and Moisture Transfers in a Rice Grain. In: Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 22., 2008, Pathum Thani. **Anais...** Thammasat University: ME-NETT, 2008.

CIRO-VELÁSQUEZ, H.J.; ABUD-CANO, L.C., PÉREZ-ALEGRÍA, L.R. Numerical simulation of thin layer coffee drying by control volumes. **Dyna**, v.163, p. 270-278, 2010.

CLADERA-OLIVERA, F.; PETTERMANN, A.C.; NOREN, C.P.Z.; WADA, K.; MARCZAK, L.D.F. Thermodynamic properties of moisture desorption of raw pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds). **International Journal of Food Science and Technology**, v.43, p. 900-907, 2008.

CLEMENTE, G.; SANJUÁN, N.; CÁRCEL, J.A.; MULET, A. Influence of Temperature, Air Velocity, and Ultrasound Application on Drying Kinetics of Grape Seeds. **Drying Technology**, v.32, p. 68-76, 2014.

COELHO, A.M.; ANDRADE, L.A.B.; FINCH, E.O. Secagem e armazenamento de grãos e sementes. **Informativo Agropecuário**, v.5, 1979.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Balanco 2015, Perspectivas 2016**. Brasília: Instituto CNA, 2016.

CORTÉS-ROJAS, D.F.; SOUZA, C.R.; PEREIRA; OLIVEIRA, W.P. Optimization of spray drying conditions for production of *Bidens pilosa* L. dried extract. **Chemical Engineering Research and Design**, v.93, p. 366-376, 2015.

CORZO, O.; BRACHO, N.; VÁSQUEZ, A.; PEREIRA, A. Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. **Journal of Food Engineering**, v.85, p. 372-380, 2008.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p. 1089-1096, 2011.

COURTOIS, F. Non-conventional Grain Drying Technology. In: International Conference held at the FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 70., 1995, Bangkok. **Anais...** Bangkok: ACIAR, 1995.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2ª Ed., Oxford: Clarendon Press, 1975.

- CRUZ, L., CLEMENTE, G., MULET, A., AHMAD-QASEM, M.H., BARRAJÓN-CATALÁN, E., GARCÍA-PÉREZ, J.V. Air-borne ultrasonic application in the drying of grape skin: Kinetic and quality considerations. **Journal of Food Engineering**, v.168, p.251-258, 2016.
- CURCIO, S.; AVERSA, M.; CALABRÒ, V.; IORIO, G. Modeling of microbial spoilage and color degradation occurring in convective drying of vegetables: a route to process optimization. **Journal of Food Process Engineering**, v.38, p. 76-92, 2015.
- CURVELO SANTANA, J.C.; ARAÚJO, S.A.; LIBRANTZ, A.F.H.; TAMBOURGI, E.B. Optimization of Corn Malt Drying by Use of a Genetic Algorithm. **Drying Technology**, v.28, p. 1236-1244, 2010.
- DAGHIGH, R.; RUSLAN, M.H.; ZAHARIM, A.; SOPIAN, K. Air source heat pump system for drying application. In: International Conference on System Science and Simulation in Engineering, 9., 2010, Iwate. **Anais...** Iwate: WSEAS, 2010.
- DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.726-731, 2010.
- DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D.; SILVA, L.H.M. Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model. **Acta Scientiarum Technology**, v.34, p. 137-140, 2012.
- DAVIDOV-PARDO, G., MCCLEMENTS, D. J. Nutraceutical delivery systems: Resveratrol encapsulation in grape seed oil nanoemulsions formed by spontaneous emulsification. **Food Chemistry**, v.167, p.205-212, 2015.
- DEMIR, A.D.; BAUCOUR, P.; CRONIN, K.; ABODAYEH, K. Analysis of temperature variability during the thermal processing of hazelnuts. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.4, p. 69-84, 2003.
- DHINGRA, O.O. Prejuízos causados por microrganismos durante o armazenamento de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v.7, p. 139-146, 1985.
- DIOS, C.A. **Secado de granos y secadoras**. Santiago: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1996.
- DUFOUR, P. Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends. **Drying Technology**, n.24, p. 889-904, 2006.
- DUMOND, P.; BADDOUR, N. A structured method for the design-for-frequency of a brace-soundboard system using a scalloped brace. **Applied Acoustics**, v. 88, p. 96-103, 2015.
- EIRAS, S.; ANDRADE, J.C. O uso do simplex modificado como estratégia de otimização em química analítica. **Química Nova**, v.19, p. 25-29, 1996.
- ELGAMAL, R.; RONSSE, F.; RADWAN, S.M.; PIETERS, J.G. Coupling CFD and Diffusion Models for Analyzing the Convective Drying Behavior of a Single Rice Kernel. **Drying Technology**, v.32, p. 311-320, 2014.

- ESMAILLI, M.; REZAZADEH, G.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; TAHMASEBI, A. Modeling of the Seedless Grape Drying Process using the Generalized Differential Quadrature Method. **Chemical Engineering Technology**, v.30, p. 168-175, 2007b.
- ESMAILLI, M.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R.; MOUSAVIC, M. A. E.; REZAZADEH, G. Influence of dipping on thin-layer drying characteristics of seedless grapes. **Biosystems Engineering**, v.98, p. 411- 421, 2007a.
- FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 573-583, 2012.
- FASINA, O.O.; AJIBOLA, O.O.; TYLER R.T. Thermodynamics of moisture sorption in winged bean seed and gari. **Journal of Food Process Engineering**, v.22, p. 405-418, 1999.
- FELLOWS, P.J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: teoria e prática**. 2ª Ed., Rio de Janeiro: Artmed, 2006.
- FLINK, J.M. Energy analysis in dehydration process. **Food Technology**, v.31, p. 76-83, 1977.
- FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª Ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.
- GALSKI, R.L. **Desenvolvimento de versões aprimoradas, híbridas, paralela e multiobjetivo do método da otimização extrema generalizada e sua aplicação no projeto de sistemas espaciais**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.L.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, p. 603-608, 2004.
- GAVRILA, C.; GHIAUS, A.G.; GRUIA, I. Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes. In: COMSOL Conference, 4., 2008, Hannover. **Anais...** Hannover: COMSOL Conference, 2008.
- GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3ª Ed., Boston: Prentice-Hall, 1993.
- GEKAS, V. **Transport Phenomena of Foods and Biological Materials**. Boca Raton: CRC Press Inc., 1992.
- GINER, S.A.; DE MICHELIS, A. Evaluation of the Thermal Efficiency of Wheat Drying in Fluidized Beds: Influence of Air Temperature and Heat Recovery. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.41, p. 11-23, 1988.
- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Cross-Flow Drying of Wheat. A Simulation Program with a Diffusion-Based Deep-Bed Model and a Kinetic Equation for Viability Loss Estimations. **Drying Technology**, v.14, p. 1625-1671, 1996.

- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive Drying Kinetics in Wheat, Part 1: Potential for a Simplified Analytical Solution. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.80, p. 351-364, 2001.
- GLUECKAUF, E.; COATES, J.I. Theory of chromatography part iv: the influence of incomplete equilibrium on the front boundary of chromatograms and on the effectiveness of separation. **Journal of the Chemical Society**, v.1, p. 1315-1321, 1947.
- GOH, C.J.; TEO, K.L. Control parameterization: a unified approach to optimal control problems with general constraints. **Automatica**, v.24, p. 3-18, 1988.
- GOLDMAN, B.W.; PUNCH, W.F. Gray-Box Optimization using the Parameter-less Population Pyramid. In: Genetic and Evolutionary Computation Conference, 15., 2015, New York. **Anais...** New York: GECCO, p. 855-862, 2015.
- GOLMAN, B.; JULKLANG, W. Analysis of heat recovery from a spray dryer by recirculation of exhaust air. **Energy Conversion and Management**, v.88, p. 641-649, 2014.
- GOLMOHAMMADI, M.; ASSAR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.; HASHEMI, S.J. Energy Efficiency Investigation of Intermittent Paddy Rice Dryer: Modeling and Experimental Study. **Food and Bioproducts Processing**, v.94, p. 275-283, 2015.
- GOLMOHAMMADI, M.; ASSAR, M.; RAJABI-HAMANE, M. Experimental and Theoretical Investigation of Moisture Dynamics in Intermittent Drying of Rough Rice. **Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v.46, p. 87-96, 2012.
- GUNASEKARAN, S.; THOMPSON, T.L. Optimal energy management in grain drying. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.25, 1-48, 1986.
- GUPTA, A.S.; THODOS, G. Direct Analogy Between Mass And Heat Transfer to Beds of Spheres. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v.9, p. 751-754, 1963.
- HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publ. Co., 1980.
- HEIM, J.G. HEDGE – Ferramenta do mercado de futuros para cobrir os riscos do agronegócio: uma análise do direito empresarial. **Revista Gestão & Desenvolvimento**. v.1, 2013.
- HENDERSON, S.M. A Basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, v.33, p. 29-32, 1952.
- HERMAN, E.; RODRÍGUEZ, G. C.; GARCÍA, M. A. Mathematical modeling for fixed-bed drying considering heat and mass transfer and interfacial phenomena. **Drying Technology**, v.19, p. 2343-2362, 2001.
- HERNÁNDEZ, J.A. Optimum operating conditions for heat and mass transfer in foodstuffs drying by means of neural network inverse. **Food Control**, v.20, p. 435-438, 2009.
- HERNÁNDEZ-DÍAZ, W.N.; HERNÁNDEZ-CAMPOS, F.J.; VARGAS-GALARZA, Z.; RODRÍGUEZ-JIMENES, G.C.; GARCÍA-ALVARADO, M.A. Coffee grain rotary drying optimization. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v.12, p. 315-325, 2013.

- HII, C.L. **Investigation of Drying and Quality Changes of Cocoa Beans Under Conditions in a Heat Pump Dryer**. 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Processamento de Alimentos e Bioprodutos, University of Nottingham, Malaysia, 2010.
- HII, C.L.; LAW, C.L., CLOKE, M.; SUZANNAH, S. Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. **Biosystems Engineering**, v.102, p. 153-161, 2009.
- HII, C.L.; LAW, C.L.; LAW, M.C. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. **Applied Thermal Engineering**, v.54, p. 264-271, 2013.
- HIRSCHMANN, C.; FYHR, C.; TSOTSAS, E.; KEMP, I. C. Comparison of two basic methods for measuring drying curves: Thin layer method and drying channel. In: International Drying Symposium, 11., 1998, Halkidiki. **Anais...** Halkidiki: IDS, 1998.
- HUAMBO, B.N.C. **Simulação e otimização de um secador industrial de túnel de frutas**. 2002. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- HUKILL, W.V. **Drying of grain**. In: Crisensen, C.M. (ed.). Storage of cereal grains and their products. 2ª Ed., Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974.
- IGUAZ, A.; LÓPEZ, A.; VÍRSEDA, P. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. **Journal of Food Engineering**, v.54, p. 289-297, 2002.
- ISLAM, M.T.; MARKS, B.P.; BAKKER-ARKEMA, F.W. Optimization of Commercial Ear-Corn Dryers. **CIGR Journal of Scientific Research and Development**. FP 04 007, VI, 2004.
- ISTADI, I.; SITOMPUL, J.P. A Comprehensive Mathematical Modeling of Deep-Bed Grain Drying. **Drying Technology**, v.2, p. 1123-1142, 2002.
- JANGAM, S.V. An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods. **Drying Technology**, v.29, p. 1343-1357, 2011.
- JASPER, S.P. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 395-403, 2010.
- JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S.; PABIS, S.; MUIR, W.E. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v.9, p. 551-588, 1991.
- JIANG, Y., SIMONSEN, J., ZHAO, Y. Compression-Molded Biocomposite Boards from Red and White Wine Grape Pomaces. **Journal of Applied Polymer Science**, v.119, p. 2834-2846, 2011.
- JIN, X.; VAN DER SMAN, R.G.M.; VAN STRATEN, G.; BOOM, R.M.; VAN BOXTEL, A.J.B. Energy efficient drying strategies to retain nutritional components in broccoli (*Brassica oleracea* var. italica). **Journal of Food Engineering**, v.123, p. 172-178, 2014.
- JINGYUN, L.; HUILING, Z.; XIAO GUANG, Z. Application and Comparison of Two Mathematical Models for Simulating Grain Heat and Mass Transfer During In-Bin Drying.

International Journal of Digital Content Technology and its Applications, v.6, p. 200-208, 2012.

JOHNNER, P.; SITOMPUL, J.P.; ISTADI, I.; WIDIASA, I.N. Modeling and Simulation of Deep-bed Grain Dryers. **Drying Technology**, v.19, p. 269-280, 2001.

JOKINIEMI, H.T.; AHOKAS, J.M. Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. **Biosystems Engineering**, v.121, p. 209-220, 2014.

JUMAH, R.Y.; RAGHAVAN, G.S.V. Analysis of heat and mass transfer during combined microwave convective spouted-bed drying, **Drying Technology**, v.19, p. 485-506, 2001.

JURNAH, R.Y.; MUJUMDAR, A.S.; RAGHAVAN, G.S.V. A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted bed. **Drying Technology**, v.14, p. 765-802, 1996.

KARIM, A.M; HAWLADER, M.N.A. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, v.70, p. 35-45, 2005.

KILIÇKAN, A., ÜÇER, N., YALÇIN, I. Moisture-dependent physical properties of black grape (*Vitis vinifera* L.) seed. **Scientific Research and Essays**, v.5, p. 2226-2233, 2010.

KOLLING, E.M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A.J. Perdas econômicas vinculadas às etapas de beneficiamento de milho e trigo, em unidade cooperativa do norte do Paraná. **Revista Agro@mbiente On-line**, v.6, p. 268-274, 2012.

KOZAKEVICH, D.N. **Sistemas Não Lineares da Física e da Engenharia**. 1995. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: E. Blücher, 1977.

KRISHNASWAMY, K., ORSAT, V., GARIÉPY, Y., THANGAVEL, K. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Antioxidants from Grape Seeds (*Vitis vinifera*). **Food Bioprocess Technology**, v.6, p. 441-455, 2013.

KUDRA, T. Instantaneous dryer indices for energy performance analysis. **Inzynieria Chemiczna I Processowa**, v.19, p. 163-172, 1998.

KUTSCHER, H.L.; GAO, D.; LI, S.; MASSA, C.B.; CERVELLI, J.; DESHMUKH, M.; JOSEPH, L.B.; LASKIN, D.L.; SINKO, P.J. Toxicodynamics of rigid polystyrenemicroparticles on pulmonary gas exchange in mice: Implications for microemboli-based drug delivery systems. **Toxicology and Applied Pharmacology**, v. 266, p. 214-223, 2013.

LABUS, J.; BRUNO, J.C.; CORONAS, A. Performance analysis of small capacity absorption chillers by using different modeling methods. **Applied Thermal Engineering**, v.58, p. 305-313, 2013.

LACERDA, A.F.; QUEIROZ, D.M.; ROA, G. Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.7, p. 24-34, 1982.

- LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 3, 1978.
- LAWS, N.; PARRY, J.L. Mathematical modeling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Proc. R. Soc. Lond. A**, n.1788, p. 169-187, 1983.
- LAZZERI, L.; LEONI, O.; CONTE, L.S.; PALMIERI, S. Some technological characteristics and potential uses of *Crambe abyssinica* products. **Industrial Crops and Products**, v. 3, p. 103-112, 1994.
- LEE, D.S.; PYUN, Y.R. Optimization of operating conditions in tunnel drying of food. **Drying Technology**, v.5, p. 1025-1052, 1993.
- LEWIS, W. The rate of drying of solid materials. **Industrial & Engineering Chemistry**, v.13, p. 427-432, 1921.
- LIAW, C.H.; WANG, J.S.P.; GREENKORN, R.H.; CHAO, K.C. Kinetics of fixed-bed adsorption: A new solution, **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v.54, p. 376-381, 1979.
- LOPEZ, A.; PIQUE, M.T.; ROMERO, A. Simulation on deep bed drying of hazelnuts. **Drying Technology**, v.16, p. 651-665, 1998.
- LUIKOV, A.V. **Drying theory**. Energy: Moscow, 1968.
- LUIKOV, A.V. **Theory of Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies**. New York: Pergamon, 1966.
- LUZ, G.R. **Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial de farelo de soja**. 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- MACIEL FILHO, R.; WOLF, M.R.M.; VASCONCELOS, L.G.S. **Development of a Suitable Optimal Operating Control Strategy for Large Scale Dryers**. Computers & Chemical Engineering, v. 21, Supplement to Computers and Chemical Engineering 6th International Symposium on Process Systems Engineering and 30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, p. 589-594, 1997.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p. 75-97, 1996.
- MADAMBA, P.S.; LIBOON, F.A. Optimization of the vacuum dehydration of celery (*Apium graveolens*) using the response surface methodology. **Drying Technology**, v.19, p. 611-626, 2001.
- MADAMBA, P.S.; LOPEZ, R.I. Optimization the osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L.) slices. **Drying Technology**, v. 20, p. 1227-1242, 2002.
- MAKRIS, D.P., BOSKOU, G., ANDRIKOPOULOS, N.K. Recovery of antioxidant phenolics from white vinification solid by-products employing water/ethanol mixtures. **Bioresource Technology**, v.98, p. 2963-2967, 2007.

- MARTÍNEZ, S.Z. **Use of Gradient-Free Mathematical Programming Techniques to Improve the Performance of Multi-Objective Evolutionary Algorithms**. 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação, Instituto Politécnico Nacional, Cidade do México, 2013.
- MARTINI, R.E.; PRICHOA, V.P.; MENEGAT, C.R. Vantagens e desvantagens da implantação se silo de armazenagem de grãos na Granja De Martini. **Revista de administração e ciências contábeis de Ideau**. v. 4, 2009.
- MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5ª Ed., New York: McGraw-Hill, 1993.
- MENEZES, M.L. **Estudo dos processos de secagem e extração para produção de óleo bruto de semente de uva**. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.
- MENSHUTINA, N.V.; GORDIENKO, M.G.; VOYNOVSKIY, A.A.; KUDRA, T. Dynamic Analysis of Drying Energy Consumption. **Drying Technology**, v.22, p. 2281-2290, 2004.
- MILMAN, M.J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002.
- MILOJEVIĆ, D.; STEFANOVIĆ, M. Convective drying of thin and deep beds of grain. **Chemical Engineering Communications**, v.13, p. 261-269, 1982.
- MIRANDA, L.C.; SILVA, W.R.; CAVARIANI, C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p. 2097-2108, 1999.
- MISRA, M.K.; BROOKER, D.B. Thin-Layer Drying and Rewetting Equations for Shelled Yellow Corn. **Transactions of the ASAE**, v.23, p. 1254-1260, 1980.
- MOHAPATRA, D.; RAO, S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, p. 513-518, 2005.
- MOHSENIN, N.N. Physical properties of agricultural products. **Transactions of ASAE**, v.8, p. 25-9, 1965.
- MOHSENIN, N.N. **Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials**. New York: Gordon and Breach, 1980.
- MOISEEV, S.N. Universal derivative-free optimization method with quadratic convergence. **arXiv e-print**, 1102.1347, 2011.
- MORALES-ENCISO, S.; BRANKE, J. racking global optima in dynamic environments with efficient global optimization. **European Journal of Operational Research**, v.242, p. 744-755, 2015.
- MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª Ed., New York: CRC Press, 2006.

- MULET, A.; BERNA, A.; BORR, M.; PINAGA, F. Effect of air flow rate on carrot drying. **Drying Technology**, v.5, p. 245-258, 1987.
- NELDER, J.A.; MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, v.7, p. 308-313, 1965.
- NELLIST, M.E. Developments in continuous-flow grain driers. **The Agricultural Engineer**, v.37, p.74-80, 1982.
- NELLIST, M.E.; BRUCE, D.M. **Heated-air grain drying**. In: Jayas, D.S.; White, N.D.G.; Muir, W.E. (ed.). *Stored-grain ecosystems*, New York: Marcel Dekker, 1995.
- NETO, R.K.; GUETTER, A.K.; MINE, M.R.M. Modelo Hidrológico com Atualização de Estado Parte I: Modelagem Hidrológica. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, p. 93-103, 2007.
- NEWMAN, A.B. The drying of porous solids: diffusion and surface emission equation. **Transactions of the AIChE**, v.27, p. 203-216, 1931.
- OLIVEIRA, A.C.M.; LORENA, L A.N. Algoritmos Evolutivos para Problemas de Otimização Numérica com Restrições. In: Workshop dos Cursos de Computação Aplicada, 1., 2001, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: WorCAP, 2001.
- OLIVEIRA, F.M.; BRUNI, G.P.; MORAIS, M.M.; SANTOS, R.B.; CREXI, V.T. Caracterização Físico-Química da Semente de Uva da Variedade Cabernet Sauvignon. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20., 2014, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Blucher, p. 3867-3874, 2015.
- PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, S. **Grain Drying Theory and Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- PAMBOUKIAN, M.M. **Modelagem metabólica e matemática do comportamento cinético de células S₂ de *Drosophila melanogaster* adequada à sua flexibilidade metabólica**. 2012. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- PANG, S. External heat and mass transfer coefficients for kiln drying of timber. **Drying Technology**, v.14, p. 859-871, 1996.
- PARK, K.J.B.; ALONSO, L.F.T.; CORNEJO, F.E.P.; DAL FABRO, I.M.; PARK, K.J. Review Seleção de Secadores: Fluxograma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, p. 179-202, 2007a.
- PARLAR, M.; SHARAFALI, M. Optimal design of multi-server Markovian queues with polynomial waiting and service costs. **Applied Stochastic Models in Business and Industry**, v. 30, p. 429-443, 2014.
- PARRY, J.L. A review of mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, p. 1-29, 1985.

- PARTI, M. Mass Transfer Biot Numbers. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v.38, p. 109-122, 1994.
- PARTI, M. Selection of Mathematical Models for Drying Grain in Thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.54, p. 339-352, 1993.
- PEDRO, M.A.M.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N. Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp poder. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, p. 993-1000, 2010.
- PELEGRINA, A.H.; ELUSTONDO, M.P.; URBICAIN, M.J. Rotary semi-continuous drier for vegetables: effect of air recycling. **Journal of Food Engineering**, v.41, p. 215-219, 1999.
- PERUSSELLO, C. A., KUMAR, C., CASTILHOS, F., KARIM, M. A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). **Applied Thermal Engineering**, v.63, p. 23-32, 2014.
- POWELL, M.J.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. **Computer Journal**, v.7, p. 155-162, 1964.
- PRADO, M.E.T.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Shrinkage of dates (Phoenix Dacyilyferal) during drying. **Drying Technology**, v.18, p. 295-310, 2000.
- RAGHAVAN, N.S.; HASSAN, M.M.; RUTHVEN, D.M. Numerical simulation of a PSA system using a pore diffusion model Author links open the overlay panel. Numbers correspond to the affiliation list which can be exposed by using the show more link. **Chemical Engineering Science**, v. 41, p. 2787-2793, 1986.
- RAGHAVAN, V.G.S.; SOSLE, V. **Grain Drying**. In A. S. Mujumdar (Ed.), Handbook of industrial drying (pp. 563-573). Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007.
- RANGAIAH, G.P. Studies in constrained optimization of chemical process problems. **Computers & Chemical Engineering**, v.9, p. 395-404, 1985.
- RANZ, W.E.; MARSHALL, W.R. JR. Evaporation from drops. Parts I & II. **Chemical Engineering Progress**. v.48, p. 173-180, 1952.
- RATTI, C. **Advances in Food Dehydration**. Broken Sound Parkway NW: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009.
- RICE, R.G. Approximate solutions for batch packed tube and radial flow adsorbers, **Chemical Engineering Science**, v. 37, p. 83-91, 1982.
- RYU, Y.K.; LEE, S.J.; KIM, J.W.; LEE, C.H. Adsorption Equilibrium and Kinetics of H₂O on Zeolite 13X. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v.18, p. 525-530, 2001.
- RIZZON, L.A., ZANUZ, M.C., MANFREDINI, S. **Como elaborar vinho de qualidade na pequena propriedade**. Bento Gonçalves: EMBRAPACNPUV, 1994.
- ROBERTS, J.S., KIDD, D.R., PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v.89, 460-465, 2008.

- ROSA, H.A.; WAZILEWSKI, W.T.; SECCO, D.; CHAVES, L.I.; VELOSO, G.; SOUZA, S.N. M.; SILVA, M.J.; SANTOS, R.F. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil - A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 651-655, 2014.
- ROSENBROCK, H.H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations. **Computer Journal**, v.5, p. 329-330, 1963.
- SABLANI, S.S.; DATTA, A.K.; RAHMAN, M.S.; MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Food and Bioprocess Modeling**. Taylor and Francis: Boca Raton, 2007.
- SARAVACOS, G.D.; MAROULIS, Z.B. **Transport Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker, 2001.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemistry, 1992.
- SCHOENAU, G.J.; ARINZE, E.A.; SOKHANSANJ, S.; TRAUTTMANSDORFF, F.G. Evaluation of energy conservation potential by exhaust air recirculation for a commercial-type heated-air batch hay dryer. **Renewable Energy**, v.9, p. 676-681, 1996.
- SFREDO, M.A.; FINZER, J.R.D.; LIMAVERDE, J.R. Heat and mass transfer in coffee fruits drying. **Journal of Food Engineering**, v.70, p. 15-25, 2005.
- SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de Café: Tecnologias e custos**. Viçosa: Jard, 2001.
- SILVA, R.A.; BORSATO, D.; SILVA, R.S.F. Método simplex supermodificado como estratégia de otimização para respostas combinadas em sistemas alimentares. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.20, 2000.
- SILVA, T.R.B.; REIS, A.C. S.; MACIEL, C.D.G. Relationship between chlorophyll meter readings and total N in crambe leaves as affected by nitrogen topdressing. **Industrial Crops and Products**, v. 39, p. 135-138, 2012.
- SILVA, W. P.; PRECKER, J.W.; SILVA, D.D.P.S.; SILVA, C.D.P.S.; BARBOSA DE LIMA, A.G. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.52, p. 4976-4985, 2009a.
- SILVA, W.P., PRECKER, J.W., SILVA, C.M.D.P.S., GOMES, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 98, p. 302-308, 2010.
- SILVA, W.P.; PRECKER, J.W.; SILVA, C.M.D.P.S.; SILVA, D.D.P.S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v.95, p. 298-304, 2009b.

- SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S. PRECKER, J.W.; GOMES, J.P.; NASCIMENTO, P.L.; SILVA, L.D. Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions. **Agricultural Sciences**, v.3, p. 545-556, 2012.
- SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; SILVA, D.P.S.; NEVES, G.A.; LIMA, A.G.B. Mass and heat transfer study in solids of revolution via numerical simulations using finite volume method and generalized coordinates for the Cauchy boundary condition. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.53, p. 1183-1194, 2010.
- SINGH, P. R.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. 2. ed. USA: Editora Acadêmica, 1993.
- SNIPES, M.; TAYLOR, D.C. Model selection and Akaike Information Criteria: An example from wine ratings and prices. **Wine Economics and Policy**, v.3, p. 3-9, 2014.
- STÅHL, M.; BERGHEL, J. Validation of a Mathematical Model by Studying the Effects of Recirculation of Drying Gases. **Drying Technology**, v.26, p. 786-792, 2008.
- SITOMPUL, J.P.; ISTADI, I. Alternating direction implicit method for solving equations of 2-D heterogeneous model of deep-bed grain drying. **Lembaga Penelitian**, v.32, p. 425-433, 2000.
- SMITABHINDU, R.; JANJAI, S.; CHANKONG, V. Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. **Renewable Energy**, n.33, p. 1523-1531, 2008.
- SOARES, J.B. **Otimização da secagem de grãos a baixas temperaturas**. 1999. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- SOKHANSANJ, S. Improved heat and mass transfer models to predict grain quality. **Drying Technology**, v.5, p. 511-525, 1987.
- SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. An Analysis on Modeling of Fluidized Bed Drying of Granular Material. **Advanced Powder Technology**, v.19, p. 73-82, 2008.
- SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. An investigation on drying of millet in fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, v.20, p. 298-302, 2009.
- STÅHL, M.; BERGHEL, J. Validation of a Mathematical Model by Studying the Effects of Recirculation of Drying Gases, **Drying Technology**, v.26, p. 786-792, 2008.
- STAKIĆ, M.; TSOTSAS, E. Model-Based Analysis of Convective Grain Drying Processes. **Drying Technology**, v.23, p. 1895-1908, 2005.
- STAKIĆ, M.; TSOTSAS, E. Modeling and numerical analysis of an atypical convective coal drying process. **Drying Technology**, v.22, p. 2351-2373, 2004.
- STAKIĆ, M.; BANJAC, M.; UROSEVIC, T. Numerical study on hygroscopic material drying in packed bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.28, p. 273-384, 2011.
- STEFFE, J.F.; SINGH, R.P. Diffusion Coefficients for Predicting Rice Drying Behavior. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.27, p. 489-493, 1982.

STEVENS, G.R.; THOMPSON, T.L. Improving cross-flow grain dryer design using simulation. **Transaction of the ASAE**, v.19, p. 778-781, 1976.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design, topics in chemical engineering**. v. 3, Montreux: Gordon and Breach Science Publishers S. A., 1986.

THOMPSON, J.F.; CHHINNAN, M.S.; MILLER, M.M.; KNUTSON, G.D. Energy conservation in drying of fruits in tunnel dehydrators. **Journal of Food Process Engineering**, v.4, p. 155–169, 1981.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical Simulation of Corn Drying: a New Model. **Transaction of the ASAE**, v.11, p. 582-586, 1968.

TIPPAYAWONG, N.; TANTAKITTI, C.; THAVORNUN, S. Energy efficiency improvements in longan drying practice. **Energy**, v.33, p. 1137-1143, 2008.

TIPPAYAWONG, N.; TANTAKITTI, C.; THAVORNUN, S.; PEERAWANITKUL, V. Energy conservation in drying of peeled longan by forced convection and hot air recirculation. **Biosystems Engineering**, v.104, p. 199-204, 2009.

TONELI, J.T.C.L.; MONTEIRO, L.B.; BRISO, M.A.J., MORAES JR, D. Effect of the Outlet Air Reuse on Thermal Efficiency of a Pilot Plant Spray Dryer with Rotary Atomizer. **Chemical Engineering Transactions**, v.32, p. 241-246, 2013.

TOPUZ, A.; GUR, M.; GUL, M.Z. An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts. **Applied Thermal Engineering**, v.24, p. 1535-1547, 2004.

TORRES, C., SCHUMACHER, R., ALAÑÓN, M.E., PÉREZ-COELLO, M.S., DÍAZ-MAROTO, M.C. Freeze-dried grape skins by-products to enhance the quality of white wines from neutral grape varieties. **Food Research International**, v.69, p. 97-105, 2015.

TORREZ IRIGOYEN, R.M.; GOÑI, S.M.; GINER, S.A. Drying–toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. **Journal of Food Engineering**, v.142, p. 70-79, 2014.

TRELEA, I.C.; TRYSTRAM, G.; COURTOIS, F. Optimal Constrained Non-linear Control of Batch Processes: Application to Corn Drying. **Journal of Food Engineering**, v.31, p. 403-421, 1997.

TREYBAL, R.E. **Mass-transfer operations**. New York: McGraw Hill, 1980.

VAN BELLEGHEM, M.; DE BACKER, L.; JANSSENS, A.; DE PAEPE, M. Conjugate modelling of convective drying phenomena in porous building materials. In: European Thermal Sciences Conference, 6., 2012, Poitiers. **Journal of Physics: Eurotherm**, 2012.

VAN MEEL, D.A. Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air, In: **Chemical Engineering Science**, v.9, p. 36-44, 1958.

- VASCONCELOS, L.G.S. **Procedimentos de simulação, otimização e controle de secadores em leite móvel**. 1997. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- VILANOVA, A.C.; CARRIJO, G.A. Otimização usando algoritmo genético de um modelo de propagação baseado em equações parabólicas. **Holos**, v.6, p. 131-146, 2012.
- WALKER, L.P.; BAKKER-ARKEMA, F.W. Energy efficiency in concurrent flow rice drying. **Transactions of the ASAE**, v.78, p. 3540, 1978.
- WEBER, E.A. **Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos**. Canoas: Editora Salles, 2005.
- WERNHOLT, E.; MOBERG, S. Nonlinear Gray-Box Identification Using Local Models Applied to Industrial Robots. **Automatica**, v.47, p. 650-660, 2011.
- WIRIYAUMPAIWONG, S.; SOPONRONNARIT, S.; PRACHAYAWARAKORN, S. Drying and Urease Inactivation Models of Soybean Using Two-dimensional Spouted Bed Technique. **Drying Technology**, v.24, p. 1673-1681, 2006
- WU, T. Solving unconstrained optimization problem with a filter-based nonmonotone pattern search algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v.203, p. 380-386, 2008.
- YANG, R.T. **Gas Separation by Adsorption Processes**. Boston: Butterworth, 1987.
- YANG, W.; SOKHANSANJ, S.; TANG, J.; WINTER, P. Determination of Thermal Conductivity, Specific Heat and Thermal Diffusivity of Borage Seeds. **Biosystems Engineering**, v.82, p. 169-176, 2002.
- YESILATA, B.; AKTACIR, M.A. A simple moisture transfer model for drying of sliced foods. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 748-752, 2009.
- YÜZGEC, U.; BECERIKLI, Y.; TURKERC, M. Nonlinear predictive control of a drying process using genetic algorithms. **ISA Transactions**, v.45, p. 589-602, 2006.
- YÜZGEC, U.; BECERIKLI, Y.; TURKERC, M. Dynamic Neural-Network-Based Model-Predictive Control of an Industrial Baker's Yeast Drying Process. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v.19, p. 1231-1242, 2008.
- ZANOELO, E.F.; DI CELSO, G.M.; KASKANTZIS, G. Drying Kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. **Biosystems Engineering**, v.96, p. 487-494, 2007.
- ZARE, D.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.68, p. 78-87, 2009.
- ZHIHUI, M.; CHONGWEN, C. Simulation and Optimization of Cross Flow Grain Dryers. **Drying Technology**, v.17, p. 1767-1777, 1998.

APÊNDICE A – Trabalhos publicados e apresentados

1. JOHANN, G., E. A. SILVA, PEREIRA, N. C. Aplicação da condição de contorno de Dirichlet no estudo da secagem de grão de uva. In: VI Simpósio de Engenharia Química, 2015, Maringá-PR. Anais do VI Simpósio de Engenharia Química, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
2. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., E. A. SILVA. Determinação das Condições Ótimas de Operação para a Secagem de Grãos de Café em leito Fixo em Função da Eficiência Energética In: V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2015, Ponta Grossa. Anais do V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2015 (PUBLICADO NOS ANAIS).
3. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., E. A. SIVA. Aplicação da Condição de Contorno de Cauchy no Cálculo da Eficiência da Transferência de Massa Durante a Secagem de Sementes de Uva Cabernet Sauvignon. In: V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2015, Ponta Grossa. Anais do V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2015 (PUBLICADO NOS ANAIS).
4. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Avaliação de modelo matemático de parâmetros distribuídos aplicado à secagem de grãos de uva em camada fina. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2015, São Carlos. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. p.521, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
5. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Comportamento dinâmico das propriedades termo físicas de Grãos de *Jatropha curcas* L. durante o processo de secagem. In: V Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, 2015, Londrina. Anais do V Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
6. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Comportamento termodinâmico de grãos de uva durante o processo de secagem. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. p.531, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
7. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Determinação do coeficiente convectivo de transferência de massa de grãos de abóbora. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015. p.666, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).

8. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Estimativa da energia teórica necessária para secagem de grãos de uva cultivar Bordô In: V Encontro Paranaense de Engenharia de Alimentos, 2015, Guarapuava-PR. Anais do V Encontro Paranaense de Engenharia de Alimentos, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
9. JOHANN, G., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Investigação de Modelo Fenomenológico Aplicado à Secagem de Grãos de *Jatropha curcas* L. In: V Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, 2015, Londrina. Anais do V Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
10. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Abordagem Numérica da Secagem de Grãos de Café. In: I Mostra Científica de Alimentos, 2015, Medianeira-PR (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
11. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Aplicação das Condições de Contorno de Dirichlet e Neumann no Estudo da Secagem de Grãos de Uva. In: VI Simpósio de Engenharia Química, 2015, Maringá-PR (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
12. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Aplicação do método centesimal no cálculo do calor específico, condutividade e difusividade térmica de grãos de uva. In: I Mostra Científica de Alimentos, 2015, Medianeira-PR (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
13. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Estimativa da energia teórica necessária para secagem de grãos de uva cultivar Bordô. In: V Encontro Paranaense de Engenharia de Alimentos, 2015, Guarapuava-PR. Anais do V Encontro Paranaense de Engenharia de Alimentos, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
14. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Índice de Performance de Avaliação de Secador em uma Unidade Piloto de Secagem Convectiva de Grãos de Café. In: 5º Simpósio de Biotecnologia na Agroindústria, 2015, Palotina-PR. Anais do 5º Simpósio de Biotecnologia na Agroindústria, 2015 (APRESENTADO E PUBLICADO NOS ANAIS).
15. JOHANN, G., MENEZES, M. L., PEREIRA, N. C., SILVA, E. A. Comparing models to Neumann and Dirichlet conditions in grape seed drying. *Applied Thermal Engineering*, v.93, p.865-871, 2016 (PUBLICADO).
16. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Estudo da Cinética da Secagem em Leito Fixo de Grãos de Cevada Germinados Empregando Condição de Contorno Convectiva. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016 (ACEITO PARA APRESENTAÇÃO E PUBLICAÇÃO NOS ANAIS).
17. JOHANN, G.; PEREIRA, N. C.; E. A. SILVA. Modelagem e Otimização da Secagem de Sementes de Uva em Leito fixo. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza. Anais do

XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2016 (ACEITO PARA APRESENTAÇÃO E PUBLICAÇÃO NOS ANAIS).

ANEXO A – Dedução da relação entre a difusividade mássica efetiva e o coeficiente interno de transferência de massa

A relação entre o coeficiente interno de transferência de massa, k_s , e a difusividade efetiva, D_{eff} , desenvolvida por Rice (1982), é apresentada a seguir.

Em coordenadas esféricas, a equação da difusão é:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (01)$$

A umidade média na esfera é expressa por:

$$\bar{X} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 X \, dr \quad (02)$$

Diferenciando a Eq. (02), em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \frac{\partial X}{\partial t} \, dr \quad (03)$$

Inserindo a Eq. (01) na Eq. (03):

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{3}{R^3} \int_0^R D_{\text{eff}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \, dr \quad (04)$$

Que fica:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{3}{R} \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (05)$$

Considerando o perfil de concentração parabólico em relação à coordenada radial:

$$X|_{r=R} = a_0 + a_2 r^2 \quad (06)$$

Logo:

$$\frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=R} = 2a_2 R \quad (07)$$

Substituindo Eq. (06) na Eq. (02):

$$\bar{X} = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 (a_0 + a_2 r^2) \, dr = a_0 + \frac{3}{5} a_2 R^2 \quad (08)$$

Substituindo a Eq. (07) e isolando o termo $\frac{\partial X}{\partial r}\Big|_{r=R}$ na Eq. (08):

$$\frac{\partial X}{\partial r}\Big|_{r=R} = \frac{5}{R}(X|_{r=R} - \bar{X}) \quad (09)$$

Substituindo a Eq. (08) na Eq. (04):

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{15}{R^2}(X|_{r=R} - \bar{X}) \quad (10)$$

Se a taxa de secagem é expressa por:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = k_S(X|_{r=R} - \bar{X}) \quad (11)$$

Então:

$$k_S = D_{\text{eff}} \frac{15}{R^2} \quad (12)$$