

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

OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO

Rafael Oliveira Defendi

Engenheiro Químico, UEM-PR, 2011

Orientador: Prof. Dr. Luiz Mario M. Jorge

Coorientador: Prof. Dr. Paulo R. Paraíso

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

Maringá – PR – Brasil

Setembro 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

Defendi, Rafael Oliveira
D313o Otimização da secagem periódica de soja em leito fixo
/ Rafael Oliveira Defendi. -- Maringá, 2015.
192 f.: il., figs., color., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Mario M. Jorge
Coorientador: Prof. Dr. Paulo R. Paraíso

Tese (Doutorado em Engenharia Química) -
Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Química, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Otimização. 2. Modelagem e simulação. 3. Secagem
de soja. 4. Leito fixo. 5. Secagem Intermitente.
6. Secagem Periodica. I. Jorge, Luiz Mario M., orient.
II. Paraíso, Paulo, coorient. II. Universidade Estadual
de Maringá. Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química.

660.2842 21.ed.

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 Rafael Oliveira Defendi perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 04 de setembro de 2015.

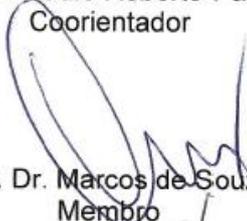
COMISSÃO JULGADORA



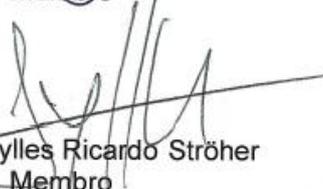
Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso
Coorientador



Prof. Dr. Marcos de Souza
Membro



Prof. Dr. Gylles Ricardo Ströher
Membro



Prof. Dr. Oswaldo Curty da Mota Lima
Membro



Profª Drª Regina Maria Matos Jorge
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese a todas as pessoas que possam se beneficiar com este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos professores e amigos Luiz Mário e Paulo por toda orientação, sugestão, ajuda e conselho.

A todos os professores, funcionários do DEQ/PEQ, amigos e alunos que me ajudaram de alguma forma.

À COCAMAR por ter disponibilizado a soja.

Ao Governo Brasileiro e à Sociedade por ter me oferecido a oportunidade de estudar numa Universidade tão excelente.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, às minhas irmãs, ao meu sobrinho e a toda minha família.

A todos os meus amigos.

OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO

AUTOR: RAFAEL OLIVEIRA DEFENDI

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ MARIO DE MATOS JORGE

COORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

Tese de Doutorado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL. E46 – 09; CEP 87020-900, Maringá – PR, Brasil, defendida em 04 de Setembro de 2015.

RESUMO

A produção e exportação brasileira de grãos de soja ocupam uma posição de destaque no cenário mundial. Um dos principais gastos inerentes a produção desses produtos está concentrado no processo de secagem. Uma alternativa para redução dos gastos energéticos deste processo está na aplicação da operação intermitente que pode levar a maiores rendimentos e potencializar os transportes de massa e de energia. Neste contexto, objetiva-se nesse trabalho estudar a operação periódica de secagem de soja (variedade EMBRAPA 48) em leito fixo, visando encontrar as melhores condições de modulação da temperatura e da vazão do ar a fim de se reduzir o máximo possível o consumo energético do processo. Para cumprir este objetivo central, estabeleceram-se cinco objetivos inerentes a este estudo: estudar o processo de aquecimento do ar por resistências elétricas em regime transiente; determinar o levantamento da cinética de secagem de soja em camada delgada e a estimativa dos coeficientes de transferência de massa do processo; comparar o estudo experimental entre as secagens convencional e periódica em termos de rendimento; modelar, validar e simular a secagem de soja em leito fixo operando periódica e convencionalmente; otimizar o processo de secagem de

soja em leito fixo por meio dos modelos ajustados visando minimizar os gastos energéticos do processo.

Dos resultados obtidos, observou-se que o modelo do aquecedor em regime transiente ajustado se mostrou ideal para estimar a voltagem necessária a fim de se atingir a temperatura desejada nos experimentos de secagem em leito fixo de acordo com as condições ambientes. No estudo da cinética de secagem de soja, observou-se que a velocidade do ar pouco interferiu nas cinéticas de secagem, enquanto que a temperatura do ar e a umidade inicial do grão impactaram significativamente nas taxas de secagem. Os estudos experimentais de secagem de soja em leito fixo indicaram que as porcentagens de água evaporada foram significativamente maiores em operação periódica caracterizando uma melhora no desempenho do secador nos casos em que ambas as operações foram conduzidas com o mesmo gasto energético, mesma demanda de ar, mesmas condições climáticas e mesmo tempo de secagem. Com as simulações por meio dos modelos ajustados, foi possível atingir em alguns casos uma redução de 21% no consumo energético com a operação periódica. Quanto aos estudos de otimização, observou-se que pode ser mais vantajoso operar de forma tanto periódica quanto convencional dependendo das condições iniciais do sistema, como a temperatura e umidade do grão e do ar. Como as características do ar e da soja variam muito nas diferentes alimentações dos secadores industriais, este estudo sugere que os processos de secagem com ferramentas de controle na entrada dos secadores, que utilizam modelos como os ajustados neste trabalho, podem auxiliar na melhor determinação das modulações das condições do ar de secagem a fim de se reduzir o consumo energético do processo.

OPTIMIZATION OF PERIODIC DRYING OF SOYBEAN IN FIXED BED

AUTHOR: RAFAEL OLIVEIRA DEFENDI

SUPERVISOR: PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

PhD Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL. E46 – 09; CEP 87020-900, Maringá – PR, Brazil, presented on September 4th, 2015.

ABSTRACT

Brazilian production and exportation of soybean grains occupy a leading position in the global raking. One of the main expenditures related to the production of these grains is focused on the drying process. An alternative do reduce the energy consumption of this process is the intermittent drying which can lead to higher dryer performance and to enhance the mass and energy transfers. In this context, it was aimed to study the periodic operation of soybean in fixed bed focusing to find the best modulation conditions of the air temperature and its flow aiming to reduce the process energy consumption. Based on this central goal, it was established five goals related to this study: study of the air heating process with electric resistors in transient regime; drying kinetics of soybean in thin layer and mass transfer coefficient estimation; experimental and comparative study between the periodic and the conventional drying of soybean in fixed bed; modeling, validation and simulation of drying of soybean in fixed bed operating periodically and conventionally; optimization of the drying process of soybean in fixed bed with the adjusted models aiming to minimize the process energy expenditure.

Results revealed that the electric heater model adjusted in transient regime showed to be ideal to estimate the necessary voltage to achieve the required temperature during the drying experiments in fixed bed according to climate conditions. In the drying kinetics studies, it was observed that the air velocity did not influence the drying kinetics, while the air temperature and the grain initial moisture content significantly impact on the drying rates. Experimental results from the soybean drying in fixed bed showed that the percentage of evaporated water was significantly higher for the periodic operation, which marked an improvement in the dryer performance for cases where both operations were conducted with the same energy consumption, air demand, climate condition and drying time. Simulating the drying process with the adjusted models, it was possible to achieve with the periodic operation a reduction of 21% in the heat input energy consumption. Optimization studies revealed that either conventional or periodic operation can be the best operational condition depending on the system initial conditions, such as the temperature and moisture content of the grain and the air. As the air and the grain characteristics vary in each industrial drying feeding, this study showed that the drying process with control strategies at the dryer entrance based on adjusted models according to the methodology used in this work can assist on the determination of the best modulation patterns of air conditions aiming to reduce the energy consumption.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	29
1.1 Justificativa e Objetivos	29
1.2 Estrutura	31

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Secagem e Armazenagem de Grãos	33
2.2 Terminologias	36
2.3 Transferência de Calor Envolvida no Processo de Secagem	38
2.4 Transferência de Massa Envolvida no Processo de Secagem	40
2.5 Modelos Matemáticos para Secagem de Grãos em Leito Fixo	44
2.5.1 Modelo a Duas Fases	44
2.5.2 Modelo Pseudo-Homogêneo	47
2.5.3 Modelo a Três Fases	49
2.6 Soluções Numéricas Para os Modelos Matemáticos	50
2.7 Secagem Intermitente	53
2.8 Contextualização dos Objetivos da Tese.....	55

CAPÍTULO 3

3. AQUECIMENTO DO AR DE SECAGEM	57
--	-----------

3.1 Introdução e Objetivos	57
3.2 Materiais e Métodos	59
3.2.1 Equipamentos e Materiais.....	59
3.2.2 Procedimento Experimental	60
3.2.3 Modelo Matemático	61
3.3 Resultados e Discussão	65
3.3.1 Validação do Modelo	65
3.4 Conclusão	71

CAPÍTULO 4

4. CINÉTICA DE SECAGEM DE SOJA EM CAMADA DELGADA	72
4.1 Introdução e Objetivos	72
4.2 Materiais e Métodos	73
4.2.1 Equipamentos e Materiais	73
4.2.2 Procedimento Experimental	75
4.2.3 Modelos Matemáticos de Parâmetros Concentrados	78
4.2.4 Ajuste dos Parâmetros	81
4.2.5 Modelo de Parâmetros Distribuídos	82
4.2.6 Caracterização dos Grãos de Soja EMBRAPA 48	85
4.3 Resultados e Discussão	85
4.3.1 Caracterização	85
4.3.2 Influência da Velocidade na Cinética de Secagem	88
4.3.3 Modelos de Parâmetros Concentrados	89

4.3.4 Modelo de Parâmetros Distribuídos	100
4.3.4 Considerações Finais dos Modelos Ajustados	106
4.4 Conclusão	106

CAPÍTULO 5

5. ESTUDO EXPERIMENTAL DA SECAGEM PERIÓDICA E CONVENCIONAL EM LEITO FIXO	108
5.1 Introdução e Objetivos	108
5.2 Materiais e Métodos	110
5.2.1 Equipamentos e Materiais	110
5.2.2 Procedimento Experimental	111
5.2.3 Caracterização do Leito	116
5.3 Resultados e Discussão	117
5.3.1 Modulação da Temperatura	117
5.3.2 Modulação da Vazão	126
5.3.3 Modulação da Vazão com Fornecimento de Taxa de Calor Constante	130
5.3.4 Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor	133
5.3.5 Caracterização do Leito	136
5.4 Conclusão	138

CAPÍTULO 6

6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SOJA EM LEITO FIXO.....	140
6.1 Introdução e Objetivos	140

6.2 Metodologia	140
6.2.1 Resolução do Modelo	140
6.2.2 Ajuste do Modelo	144
6.2.3 Simulações e Análise do Consumo Energético	145
6.3 Resultados e Discussão	146
6.3.1 Ajuste Preliminar	146
6.3.2 Análise Energética	148
6.3.3 Análise da Sensibilidade Paramétrica e da Malha	152
6.3.4 Modelo Generalizado	155
6.4 Conclusão	158

CAPÍTULO 7

7. OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO.....	159
7.1 Introdução e Objetivos	159
7.2 Metodologia	160
7.3 Resultados e Discussão	162
7.3.1 Otimização da Secagem Convencional	162
7.3.2 Determinação das Estimativas Iniciais	167
7.3.3 Otimização da Secagem Periódica	170
7.4 Conclusão	175

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÕES GERAIS176

CAPÍTULO 9

9. REFERÊNCIAS179

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
2.1	Produção Mundial de Soja	33
2.2	Exportação Mundial de Soja	34
2.3	Equações do Modelo a Duas Fases	45
2.4	Tipos de Secagem Intermitente	55
3.1	Esquema do Aquecedor	59
3.2	Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 2	67
3.3	Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 18	68
3.4	Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 23	68
3.5	Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 25	69
3.6	Desvio Global do Modelo	69
3.7	Aquecimento do Ar com Perturbações Alternadas	70
3.8	Desvio Global para o Sistema com Perturbações Alternadas	70
4.1	Esquema do Secador de Bandeja	74
4.2	Foto dos equipamentos sob perspectiva 1	75

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
4.3	Foto dos equipamentos sob perspectiva 2	75
4.4	Diagrama de Caixa para a distribuição das Massas Específicas	86
4.5	Diagrama de Caixa para a distribuição dos Raios	87
4.6	Massa Específica da Soja em Função do Teor de Umidade	87
4.7	Influência da Velocidade em 30 °C	88
4.8	Influência da Velocidade em 60 °C	89
4.9	Dependência das Constantes de Page em função de T e de Y_{s0}	90
4.10	Simulação com o Modelo de Page	91
4.11	Desvio do Modelo Generalizado de Page	94
4.12	Curvas de Secagem a 30 °C com o Modelo Generalizado de Page	94
4.13	Curvas de Secagem a 60 °C com o Modelo Generalizado de Page	95
4.14	Curvas de Secagem a 0,18 de Y_{s0} com o Modelo Generalizado de Page	95
4.15	Desvio Global para o Modelo K_3	96
4.16	Estimativa de K a 30 °C pelo Modelo K_3	96
4.17	Estimativa de K a 60 °C pelo Modelo K_3	97
4.18	Taxas de Secagem a 30 °C	98
4.19	Taxas de Secagem a 60 °C	99

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
4.20	Estimativa de K a 40 °C pelo Modelo K_4	100
4.21	Sensibilidade do Parâmetro K_c	101
4.22	Sensibilidade do Parâmetro D	101
4.23	Cinética de Secagem com o Modelo de Parâmetros Distribuídos	103
4.24	Distribuição de Umidade em 0,18 de Umidade Média	104
4.25	Distribuição de Umidade em 0,13 de Umidade Média	104
4.26	Distribuição de Umidade para Soja com Umidade Inicial de 0,18	105
4.27	Distribuição de Umidade para Soja com Umidade Inicial de 0,13	105
5.1	Sistema dos Equipamentos Utilizados	110
5.2	Modulação da Vazão do Ar na Entrada do Secador	113
5.3	Umidade do Ar na saída do Secador para modulação 0 – 15% da vtagem	119
5.4	Umidade do Ar na saída do Secador para modulação 0 – 27% da Vtagem	119
5.5	Umidade do Ar na saída do Secador para diferentes modulações da Vtagem	120
5.6	Temperatura do Ar para diferentes modulações da vtagem	120
5.7	Perfil de Temperatura ao longo do leito para a Operação Periódica	121

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
5.8	Perfil de Temperatura ao longo do leito para a Operação Convencional	122
5.9	Umidade do Ar para intervalo entre perturbações de 5 min	122
5.10	Umidade do Ar para intervalo entre perturbações de 30 min	123
5.11	Umidade do Ar para diferentes intervalos entre perturbações	124
5.12	Temperatura na entrada do secador para diferentes intervalos	124
5.13	Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Temperatura)	126
5.14	Umidade do ar para diferentes amplitudes de modulação da vazão	127
5.15	Temperatura ao longo do leito para experimento com modulação da vazão	129
5.16	Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão)	129
5.17	Temperatura na entrada e saída do leito para o experimento M	130
5.18	Umidade do Ar para os experimentos G e M	131
5.19	Umidade do Ar para diferentes amplitudes de modulação da vazão	132
5.20	Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão com Aquecimento a uma Taxa Constante)	133

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
5.21	Perfil de Temperatura para experimentos com modulação da vazão e da taxa de calor	134
5.22	Perfil de Umidade para experimentos com modulação da vazão e da taxa de calor	135
5.23	Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor)	136
5.24	Diagrama de Caixa para a Distribuição de Porosidade	137
5.25	Resíduos, Normalidade e Homogeneidade das Variâncias	138
6.1	Modulação da Temperatura do Ar	146
6.2	Temperatura do Ar estimada pelo Modelo	147
6.3	Teor de Umidade do Ar estimado pelo Modelo	147
6.4	Análise Energética para Diferentes Amplitudes e T_{gc} em 35 °C	149
6.5	Análise Energética para Diferentes Amplitudes e T_{gc} em 40 °C	150
6.6	Análise Energética para Diferentes Períodos e T_{gc} em 40 °C	150
6.7	Análise Energética para Ar inicialmente nas Menores Temperaturas	151
6.8	Análise do Número de Divisões da Malha	152
6.9	Análise do Número de Divisões da Malha	153
6.10	Sensibilidade de $K_{s,a}$	154

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
6.11	Sensibilidade de h_a	154
6.12	Sensibilidade de Y_{se}	155
6.13	Temperatura do Ar estimada pelo Modelo Generalizado	156
6.14	Umidade do Ar estimada pelo Modelo Generalizado	156
6.15	Perfil de Temperatura do Ar ao Longo do Leito	157
6.16	Perfil de Umidade do Ar na Saída do Leito	158
7.1	Influência de T_{s_0} no tempo de secagem	162
7.2	Influência de T_{s_0} no consumo energético	163
7.3	Influência de U_{Ag_0} no tempo de secagem	164
7.4	Influência de U_{Ag_0} no consumo energético	164
7.5	Influência de Y_{s_0} no tempo de secagem	165
7.6	Influência de Y_{s_0} no consumo energético	165
7.7	Influência de T_{ga} no tempo de secagem	166
7.8	Influência de T_{ga} no consumo energético	166
7.9	Influência da Modulação da Temperatura do Ar no Tempo de Secagem	167
7.10	Influência da Modulação da Temperatura do Ar no Consumo Energético	168

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
7.11	Influência da Modulação da Vazão do Ar no Tempo de Secagem	168
7.12	Influência da Modulação da Vazão do Ar no Consumo Energético	169
7.13	Modulação da Temperatura do Ar para o Experimento E	172
7.14	Modulação da Temperatura do Ar para o Experimento G	173
7.15	Modulação da Vazão do Ar para o Experimento K	174

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA	TÍTULO	PÁGINA
2.1	Umidade Recomendada de Armazenagem dos Grãos	35
3.1	Condições dos Experimentos	61
3.2	Parâmetros Estatísticos do Ajuste	66
4.1	Condições Experimentais	77
4.2	Modelos Matemáticos Empíricos	80
4.3	Valores médios da função objetivo e dos parâmetros estatísticos	89
4.4	Parâmetros Estatísticos para os Modelos Generalizados	92
4.5	Constantes Ajustadas dos Modelos Generalizados	92
5.1	Posição dos Termopares	111
5.2	Condições dos Experimentos com Modulação da Temperatura	112
5.3	Condições dos Experimentos com Modulação da Vazão	113
5.4	Condições dos Experimentos com Modulação da Vazão e Fornecimento de Calor numa Taxa Constante	114
5.5	Condições dos Experimentos com Modulação Simultânea do Calor Fornecido ao Ar e de sua Vazão	114
5.6	Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Temperatura)	117

TABELA	TÍTULO	PÁGINA
5.7	Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão)	127
5.8	Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão com Fornecimento de Calor em Taxa Constante)	131
5.9	Porcentagem de Água Evaporada (Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor)	134
6.1	Parâmetros da Equação (6.5)	141
6.2	Parâmetros da Equação (6.7)	142
6.3	Parâmetros Ajustados	148
6.4	Média dos Parâmetros Estatísticos	148
6.5	Parâmetros Ajustados do Modelo Generalizado	157
6.6	Média dos Parâmetros Estatísticos do Modelo Generalizado	157
7.1	Condições Otimizadas	161
7.2	Limite dos Parâmetros para Determinação das Estimativas	170
7.3	Parâmetros Otimizados	171

NOMENCLATURAS

A, B, C	parâmetros	
A_s	área superficial	m^2
c_p	calor específico	$J/kg.^{\circ}C$
E	energia	J
EF	eficiência do modelo	
D	difusividade	m^2/s
d	diâmetro	m
d_i	dimensão	m
f	taxa de secagem por volume de partículas	$kg/m^3.s$
Gg	taxa de fluxo mássico do gás	$kg/m^2.s$
h	coeficiente global de transferência de calor	$W/m^2.K$
h_a	coeficiente de transferência de calor	$kJ/m^3.s.^{\circ}C$
H	entalpia	kJ/kg
K	coeficiente de referência de transferência de massa	s^{-1}
k_{ax}	condutividade térmica efetiva axial	$W/m^2.K$
Kc	coeficiente convectivo de transferência de massa	m/s
k_{eff}	condutividade térmica efetiva	$W/m^2.K$

k_r	condutividade térmica efetiva radial	$W/m^2.K$
K_s	coeficiente global de transferência de massa	$kg/m^2.s$
$K_{s,a}$	coeficiente volumétrico de transferência de massa	$kg/m^3.s$
M	porcentagem mássica	adimensional
m	massa	kg
\dot{m}	vazão mássica	kg/s
N	fluxo mássico de água	$kg/m^2.s$
N_c	número de constantes	
N_d	número de divisões	
N_o	número de observações	
P	pressão	N/m^2
p	pressão parcial	N/m^2
p_s	pressão de saturação	N/m^2
Sc	número de Schmidt	adimensional
Sh	número de Sherwood	adimensional
q	calor	J
Q	vazão volumétrica	L/min
R	resistência	Ω
Re	número de Reynolds	adimensional

REQM	raiz do erro quadrático médio	
r	raio ou posição radial	m
t	tempo	s
T	temperatura	°C
UR	umidade relativa	adimensional
V	volume	m ³
Vo	voltagem	V
v _r	componente de velocidade radial	m/s
v _z	componente de velocidade axial	m/s
X	umidade em base seca	adimensional
Y	umidade em base seca	adimensional
y	umidade em base úmida	adimensional
Y _{abs}	umidade absoluta	kg/m ³
\bar{Y}_S	umidade média em base seca	adimensional
YR	razão de umidade	adimensional
z	posição axial	m

Letras Gregas

ε	porosidade	adimensional
---------------	------------	--------------

ϕ	função objetivo	
λ	calor latente de vaporização	kJ/kg
ρ	massa específica	kg/m ³
χ	qui-quadrado reduzido	

Subscrito

0	inicial
a	alimentação
amb	ambiente
cal	calculado
e	equilíbrio
en	entrada
ev	evaporado
exp	experimental
f	final
g	gás
l	líquido
m	média
s	soja / sólido

sa	saída
sat	saturação
ss	sólido seco
T	total
v	vapor

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e Objetivos

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos. Dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura e pelo USDA mostram que durante a safra 2013/2014, o Brasil foi o maior exportador de grãos de soja e o segundo maior produtor deste grão, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Um processo fundamental durante a cadeia produtiva destes grãos é a secagem que auxilia garantir as condições ideais de armazenamento para se evitar perdas e manter a qualidade do produto estocado.

O armazenamento de grãos de soja é uma etapa necessária, uma vez que sua produção é periódica e as demandas das indústrias e do comércio são ininterruptas (Puzzi, 2000). Uma colheita realizada em dois meses pode ser consumida durante um ou mais anos. Contudo, muitos fatores podem prejudicar a qualidade destes grãos enquanto eles estão armazenados. De acordo com Puzzi (2000), estes fatores podem ser um agente físico (temperatura, teor de umidade, danos mecânicos) ou um agente biológico (microorganismos, insetos, fungos). Este autor ainda ressalta que é importante controlar e minimizar os efeitos provenientes destes fatores para garantir a qualidade e a composição química (carboidratos, gorduras, proteínas, fibras, minerais e vitaminas) destes grãos. Observa-se que o teor de umidade é o fator predominante que controla a qualidade do grão estocado (Puzzi, 2000). Em baixos valores de umidade, as reações enzimáticas são reduzidas como também as taxas de respiração inerentes ao metabolismo do grão que quando desenvolvem altas taxas podem levar o material à podridão. Destaca-se que o teor de umidade pode ser reduzido pelo processo de secagem.

Contudo, o custo do processo de secagem na produção desses grãos é significativo. Biagi *et al.* (2002) argumentam que este processo necessita de alta demanda de energia calorífica e mecânica para o aquecimento e movimentação do ar. De acordo com Silva *et al.* (2000), a secagem em temperaturas altas pode consumir 60% ou mais do total de energia usada na produção de produtos agrícolas. Dentre os diversos componentes do custo operacional de secadores utilizados por pequenos produtores,

Martins *et al.* (2002 b) citam os gastos com combustíveis, energia elétrica, mão-de-obra e custos fixos.

Uma alternativa para redução dos custos do processo de secagem é a redução do gasto energético do processo que pode ser alcançada pelo uso da operação intermitente, a qual opera com as condições do ar, como temperatura e vazão, em regime não estacionário, ao contrário da operação tradicional que opera com o ar em condições fixas em regime permanente. A secagem com entradas transientes pode beneficiar o processo de secagem potencializando os transportes de massa e de energia envolvidos no processo. Segundo Chua *et al.* (2003), a secagem intermitente é benéfica para produtos cuja secagem é controlada pelos transportes difusivos internos no material, que é o caso da soja. Um tipo de secagem intermitente é a operação periódica cuja entrada transiente é representada pela modulação contínua das condições do ar (temperatura ou vazão) numa dada frequência e amplitude. O estudo sobre a operação periódica na secagem de grãos é recente, com poucas referências na literatura. Contudo, há um estudo concentrado deste tipo de modulação periódica na temperatura, composição e vazão de reagentes em reatores químicos, onde observou-se que é possível aumentar o rendimento, melhorar a seletividade, potencializar os transportes de massa e de energia envolvidos nas reações e aumentar as conversões em relação às reações com reagentes em condições de entradas em regime permanente (LANGE *et al.*, 1999; ROUGE *et al.*, 2001; SILVESTON & HANIKA, 2004; TUKAC *et al.*, 2003; TUKAC *et al.*, 2007). No caso do sistema de secagem de grãos, Romero *et al.* (2010) e Defendi (2013) fizeram um estudo teórico no qual mostraram que a secagem periódica de soja com modulação da temperatura pode ser mais eficiente e gastar menos energia que a secagem convencional.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é encontrar as melhores condições da operação periódica de secagem de soja em leito fixo visando minimizar o gasto energético. Com base neste objetivo central, estabeleceram-se cinco objetivos de base inerentes a este estudo:

- O estudo do sistema de aquecimento do ar de secagem: objetiva-se modelar, validar e simular um modelo dinâmico de aquecimento de ar por resistências elétricas que descreva o perfil de temperatura do ar na saída do aquecedor ao se

aplicar diferentes voltagens visando obter o perfil periódico desejado referente a temperatura do ar na entrada do leito do secador.

- O levantamento da cinética de secagem de soja em camada delgada: objetiva-se avaliar os efeitos que controlam a cinética de secagem de soja avaliando a influência da temperatura do ar, da velocidade do ar e da umidade inicial do grão sobre as taxas de secagem. Além disso, deseja-se modular e validar modelos matemáticos que descrevam esta cinética e que estimem os coeficientes globais de transferência de massa essenciais para o estudo da secagem em camada espessa.
- O estudo experimental e comparativo da secagem de soja em leito fixo e em camada espessa: objetiva-se operar o sistema de forma periódica e convencional em casos nos quais ambas as operações demandem o mesmo consumo energético inerente ao fornecimento de energia na entrada do secador. Pretende-se avaliar se nestes casos com mesma demanda energética a operação periódica aumenta o desempenho do processo.
- Validação do modelo de secagem de soja em leito fixo e em camada espessa: deseja-se por meio dos dados experimentais validar um modelo heterogêneo a duas fases que descreva os perfis de umidade e de temperatura do grão e do ar ao longo do tempo e da posição no leito em operação tanto periódica quanto convencional.
- Otimização da secagem periódica de soja em leito fixo: objetiva-se por meio dos modelos ajustados encontrar as melhores condições de modulação da temperatura e vazão do ar na entrada do secador buscando minimizar os gastos energéticos do processo.

1.2 Estrutura

Este trabalho está dividido em nove capítulos, sendo o primeiro referente à introdução em que se descreve os objetivos, as justificativas e a estrutura do trabalho. Em seguida no Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica geral sobre os temas que serão discutidos no decorrer dos outros capítulos. Os principais temas abordados nesta revisão são a secagem e o armazenamento de grãos, os modelos matemáticos da secagem de grãos em leito fixo e o método matemático das diferenças finitas para solução das equações dos modelos.

Dando continuidade, os cinco capítulos em sequência representam o corpo da Tese e são escritos na forma de artigos apresentando uma breve introdução e revisão da literatura, seus respectivos objetivos e justificativas, a metodologia empregada, os resultados obtidos e as conclusões referentes às análises feitas. No capítulo 3, aborda-se o sistema de aquecimento de ar, onde se propôs um modelo para o aquecimento do ar em regime transiente que descreve a temperatura do ar na saída do aquecedor em função da voltagem aplicada nas resistências, da temperatura ambiente e da vazão mássica do ar.

No Capítulo 4 são analisadas as curvas de cinética de secagem da soja em camada delgada realizadas em um secador de bandeja. Nesse capítulo, avaliam-se os efeitos que controlam as taxas de secagem e são propostos modelos generalizados que relacionam o coeficiente global de transferência de massa como uma função da temperatura do ar, da umidade da soja e do valor inicial desta umidade.

O Capítulo 5 foca na realização de experimentos de secagem da soja em leito fixo operando tanto periódica quanto convencionalmente. Verifica-se neste estudo se há melhora no desempenho do secador quando se opera periodicamente modulando a temperatura e a vazão do ar na entrada do secador em comparação com a operação convencional conduzida com o mesmo gasto energético referente ao fornecimento de energia na entrada do secador da operação periódica.

Um modelo heterogêneo de secagem de grãos em leito fixo é validado no Capítulo 6 em base nos resultados obtidos experimentalmente com a operação periódica e convencional. Este modelo é utilizado para simular e analisar o gasto energético do processo, comparando o rendimento energético entre diferentes operações periódicas e convencionais.

O Capítulo 7 foca na otimização do processo, que tem como objetivo determinar as melhores condições de modulação da temperatura e da vazão do ar para se reduzir o consumo energético do processo. As otimizações são realizadas para diferentes condições do sistema, avaliando assim se as melhores condições operacionais se alteram com a umidade e temperatura iniciais da soja e do ar.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões gerais da Tese e por fim citam-se as referências bibliográficas consultadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem e Armazenagem de Grãos

No cenário mundial, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos. Dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura e pelo USDA (U.S. Department of Agriculture) apontam que durante o ano safra 2013/2014, o Brasil foi o maior exportador de grãos de soja e o segundo maior produtor deste grão, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam respectivamente a produção e exportação em toneladas de soja dos maiores produtores e exportadores durante a safra 2013/2014.

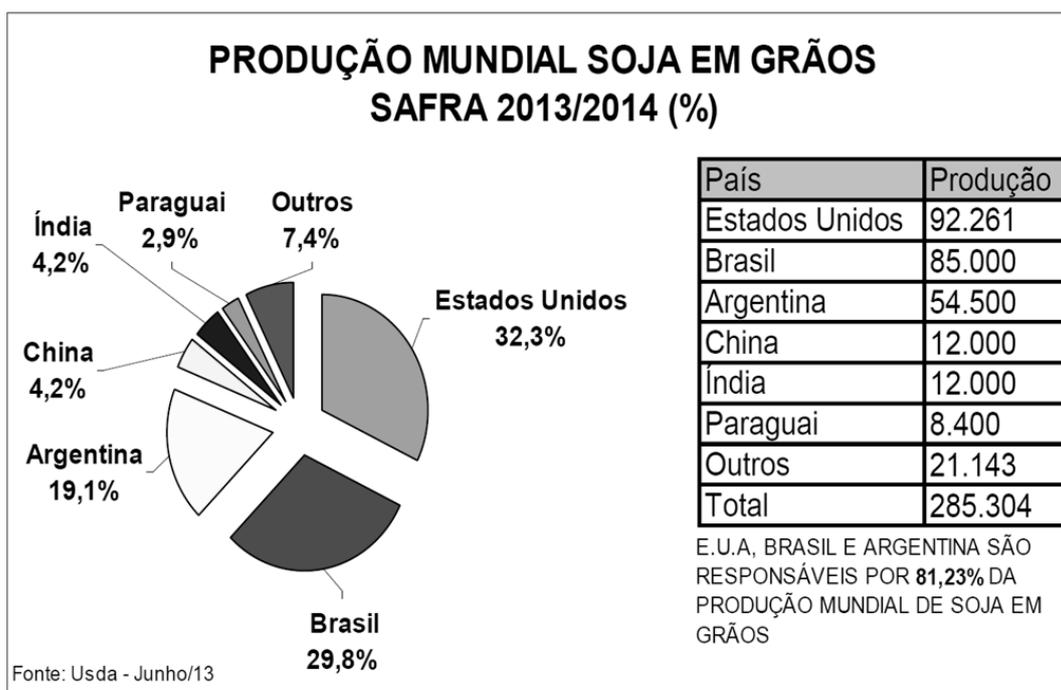


Figura 2.1 – Produção Mundial de Soja (Ministério da Agricultura)

O Brasil produziu 29,8% da produção mundial de soja, enquanto que a produção dos Estados Unidos foi levemente acima deste valor atingindo 32,3%. Juntos, o Brasil, a Argentina e os Estados Unidos representaram 81,23% da produção mundial de soja. No caso da exportação, o Brasil liderou representando 38,8% da exportação mundial seguido pelos Estados Unidos com 37,7% desta exportação. 91,53% das exportações mundiais são devidas aos Estados Unidos, ao Brasil, à Argentina e ao Paraguai.

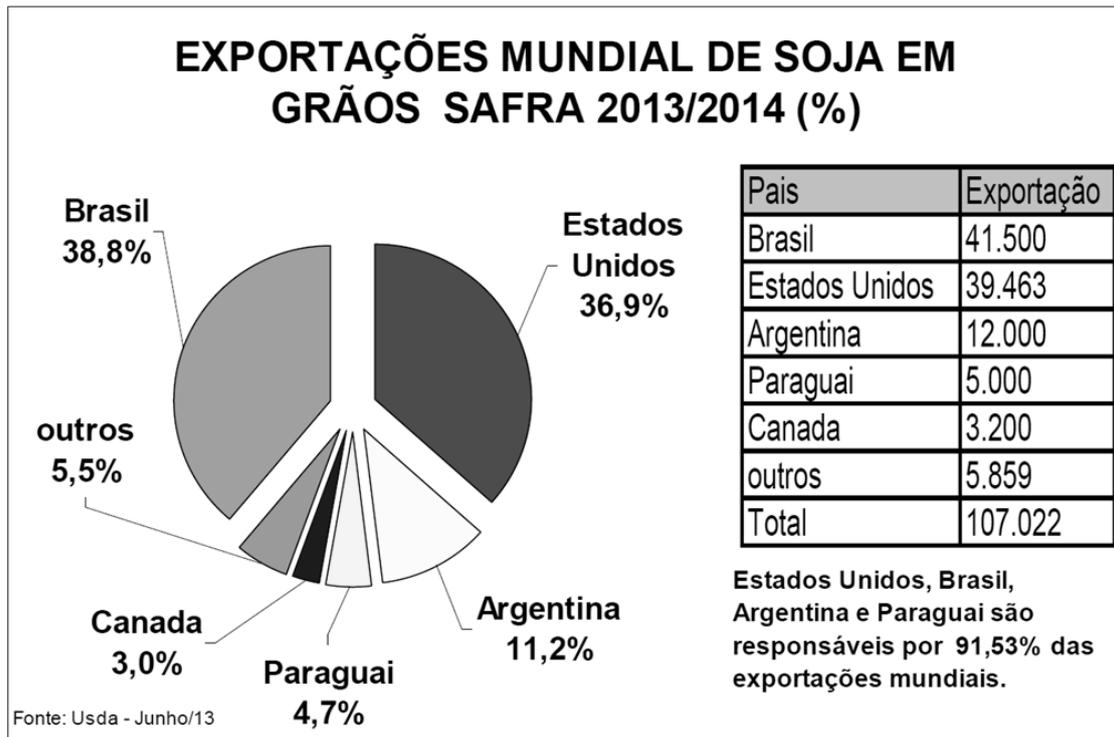


Figura 2.2 – Exportação Mundial de Soja (Ministério da Agricultura)

Puzzi (2000) destaca entre os principais fatores que afetam o abastecimento desses grãos no Brasil a inflação, a produção, o armazenamento, o transporte, a comercialização e as perdas, ressaltando que esses fatores são interdependentes entre si. No setor produção, observa-se que a secagem é uma operação que consome muita energia e esta é essencial para obter as condições ideais de armazenamento e comercialização.

Puzzi (2000) ainda acrescenta que a produção de grãos é periódica, enquanto sua demanda nas agroindústrias e na alimentação é ininterrupta, de forma que a colheita de uma safra em dois meses pode ser consumida durante um ou mais anos. Neste contexto, a armazenagem dos grãos se faz necessária. Segundo Martins *et al.* (2002 a), uma armazenagem sem risco é aquela em que os grãos são secos até teores de umidade seguros conforme indicado na Tabela 2.1. Esses materiais são estocados em unidades armazenadoras como os armazéns ou silos. Martins *et al.* (2002 a) definem os silos como unidades armazenadoras de grãos que possibilitam o mínimo de incidências ou trocas de influências entre o meio externo e o ambiente de estocagem e ainda ressaltam

que os silos oferecem condições de armazenagem por períodos mais longos que os armazéns, pois propiciam um controle das fontes de deterioração muito mais eficiente.

Tabela 2.1 – Umidade Recomendada de Armazenagem dos Grãos

Produto	Teor de umidade (% em base úmida)		
	Umidade colheita	Até 1 ano	Mais de 1 ano
Amendoim	15 - 18	8	7
Arroz em casca	18 - 20	13	12
Feijão	16 - 18	13	12
Milho	24 - 32	13	12
Soja	15 - 18	12	11
Sorgo	28 - 32	12	11
Trigo	18 - 20	13	12

Fonte: Lazzari (1993)

Os sistemas de armazenagem apresentam muitos desafios, principalmente para os pequenos produtores. Martins *et al.* (2002 a) argumentam que estes produtores geralmente estocam em paióis ou utilizam a secagem natural na própria planta ainda na lavoura. Contudo, apesar do clima brasileiro ser favorável, estes autores destacam que essas alternativas são inadequadas, acarretando perdas tanto na quantidade quanto na qualidade do produto estocado, e ainda acrescentam que inúmeros trabalhos e publicações demonstraram que essas práticas são vulneráveis ao ataque de insetos, roedores, pássaros, ácaros e ao desenvolvimento de fungos no campo e pós-colheita.

Outro fato que Silva *et al.* (2005) acrescentam é que os pequenos produtores têm acesso restrito a crédito, técnicas e insumos modernos. Estes autores ainda argumentam que os pequenos produtores que habitam longe dos complexos agroindustriais ou sistema de cooperativas têm poucas possibilidades de comercializar a produção diretamente com o mercado consumidor ou de armazenar os grãos para aguardar por épocas de melhores preços. Dessa forma, estes produtores acabam geralmente vendendo seus produtos a baixos preços para “atravessadores” ou agentes de comercialização, que exportam ou vendem diretamente para a agroindústria.

Assim, diante do que foi exposto, observa-se que a secagem é de extrema importância na armazenagem e na qualidade dos grãos. Muitos outros fatores afetam o

armazenamento dos grãos como reporta Puzzi (2000) os fatores físicos (temperatura, umidade, danos mecânicos) e biológicos (microorganismos, insetos, ácaros), cujo conhecimento visa manter a composição química do produto (carboidratos, proteínas, gorduras, fibras, minerais e vitaminas) e minimizar a redução do poder germinativo e do vigor das sementes, grãos destinados ao plantio. Contudo, Puzzi (2000) enfatiza que o teor de umidade, que é controlado pela secagem, é o elemento que governa a qualidade do produto armazenado. Este autor ainda acrescenta que baixos teores de umidade reduzem reações de escurecimento enzimático e taxas de respiração relacionadas ao metabolismo do grão que leva a podridão.

A secagem dos grãos pode ser feita naturalmente com o calor do sol ou mecanicamente com a ação de uma corrente de ar quente que atravessa a massa de grãos (Puzzi, 2000). Contudo a secagem natural geralmente não é capaz de levar os grãos a níveis ideais de umidade para armazenagem. Por outro lado, a secagem mecânica demanda muita energia mecânica para movimentação do ar e energia calorífica para seu aquecimento (Biagi *et al.* 2002), o que eleva os custos do processo. De acordo com Silva *et al.* (2000), a secagem em temperaturas altas pode consumir 60% ou mais do total de energia usada na produção de produtos agrícolas. Martins *et al.* (2002 b) citam os gastos com combustíveis, energia elétrica, mão-de-obra e custos fixos como relacionados aos custos inerentes à operação de secagem. Uma alternativa para redução dos custos deste processo e para a melhora da qualidade dos materiais está na aplicação da operação intermitente como a operação periódica, que pode potencializar os transportes de massa e de energia envolvidos no processo e subsequentemente o rendimento.

2.2 Terminologias

McCabe *et al.* (1993), de uma forma geral diz que a secagem de um sólido implica na remoção de pequenas quantidades relativas de água ou de outro líquido de um material sólido a fim de se reduzir a quantidade residual líquida em níveis aceitáveis. De outra forma, o processo de secagem pode ser definido, segundo Perry e Green (1998), como um processo no qual há a remoção de um líquido de um sólido por meio de evaporação.

A remoção de líquido pode ser feita mecanicamente por centrifugação ou por pressão e termicamente pelo processo de evaporação (McCABE *et al.*, 1993). O foco deste trabalho é o processo de secagem devido a elevação de temperatura que promove a evaporação da substância líquida presente no sólido.

Antes de apresentar os balanços de massa e de energia envolvidos no processo de secagem é interessante estudar algumas terminologias. De acordo com Perry e Green (1998), seguem abaixo algumas definições:

Difusão interna. Devido a gradientes de concentração, há transporte de massa de líquido ou de vapor no interior de um sólido. Esse transporte é definido como difusão interna.

Teor de umidade. Geralmente, é definido o teor de umidade como a quantidade de umidade por unidade de massa do sólido úmido ou seco.

Teor de umidade crítico. Ao término do período de secagem a velocidade constante, há um teor médio de umidade, o qual se define como teor de umidade crítico.

Teor de umidade em base seca (Y). É definido como teor de umidade do sólido úmido representado pela relação de massa de água por massa de sólido seco:

$$Y = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{ss}}} \quad (2.1)$$

Teor de umidade em base úmida (y). É definido como teor de umidade do sólido úmido representado pela relação de massa de água por massa de sólido úmido:

$$y = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{ss}} + m_{\text{água}}} \quad (2.2)$$

Teor de umidade em equilíbrio. Em dadas condições de temperatura e umidade do ar, o material sólido pode secar até um limite de teor de umidade, o qual é definido como o teor de umidade em equilíbrio.

Umidade absoluta do (Y_{abs}). Representa a relação entre a quantidade de vapor de água presente em uma massa definida de ar seco.

Umidade relativa (UR). É definida como a relação entre a pressão parcial do vapor de água no ar (p) e a pressão de vapor de água em condições de equilíbrio (p_s : pressão de saturação), conforme a expressão:

$$UR = \frac{p}{p_s} \quad (2.3)$$

2.3 Transferência de calor envolvida no processo de secagem

No processo de secagem, há três formas distintas de aquecimento do produto, sendo uma direta, outra indireta e a outra por radiação. No caso direto, há contato entre o gás e o sólido ocorrendo transferência de calor por convecção. No caso indireto, há uma superfície condutora entre o gás e o sólido, ocorrendo transferência de calor tanto por condução quanto por convecção. Além disso, o gás pode trocar calor com o sólido por meio de convecção natural ou forçada. Geralmente, nos processos industriais se utiliza da convecção forçada para fins de otimização, pois há maiores taxas de transferência de calor e de massa (PERRY e GREEN, 1998).

Outro fato a ser ressaltado no processo de transferência de calor e de massa na secagem são os mecanismos envolvidos (PERRY e GREEN, 1998):

- Transferência de calor do gás para o sólido por convecção.
- Transferência de calor por condução dentro do sólido.
- Evaporação do líquido presente no sólido.
- Transferência de massa do líquido até a superfície do sólido por escoamento capilar ou difusão interna.
- Transporte de massa do vapor na superfície do sólido para o gás.
- Transporte de massa do vapor por difusão ou por convecção (natural ou forçada) no sistema gasoso.

Adicionalmente, é importante analisar os fatores que podem limitar a secagem, dentre os quais estão os efeitos externos e internos. As características do gás estão relacionadas com os efeitos externos. Assim, a temperatura, a umidade e a vazão do gás são parâmetros que vão determinar se efeitos externos limitam o processo. Quando isso ocorre, geralmente se observa que há saturação da superfície do sólido e há uma constante taxa de evaporação do líquido. (PERRY e GREEN, 1998).

Ainda de acordo com Perry e Green (1998), os fatores internos estão relacionados com o transporte de massa do líquido no interior do sólido. Quando este efeito limita o processo, há um decaimento da taxa de evaporação do líquido com o tempo. Os mecanismos internos podem ocorrer por difusão em sólidos ou por escoamentos por contração, capilar, por gradientes de pressão, por gravidade ou em virtude da vaporização-condensação.

Segundo McCabe *et al.* (1993), na maioria dos processos de secagem adiabáticos, as taxas de secagem são mais dependentes dos coeficientes de transferência de calor do que dos coeficientes de transferência de massa. Assim, os efeitos difusivos de transporte de massa podem ocorrer, mas geralmente não limitam o processo.

Neste contexto, a velocidade de secagem é determinada pelos efeitos que governam este processo, ou seja, é governada pelo transporte de calor para evaporar o líquido e/ou pelo transporte de massa na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido e na forma de vapor a partir da superfície. (PERRY e GREEN, 1998)

McCabe *et al.* (1993) propõe que para o cálculo da taxa de transferência de calor do processo de secagem seja considerado que o calor fornecido ao sistema deve ser suficiente para aquecer o sólido mais o líquido, vaporizar o líquido e aquecer o sólido e o vapor até as suas respectivas temperaturas finais. Os termos energéticos para o cálculo desta taxa apresentados por McCabe *et al.* (1993) são apresentados a seguir:

O calor para aquecer o sólido da temperatura de alimentação até sua temperatura final por unidade de massa de sólido seco é dado por:

$$\frac{q_1}{m_{ss}} = Cps(Tsf - Tsa) \quad (2.4)$$

Em que Cps é o calor específico do sólido, Tsf é a temperatura final do sólido e Tsa é a temperatura de alimentação.

O calor para aquecer o líquido da temperatura de alimentação até sua temperatura de vaporização por unidade de massa de sólido seco é dado por:

$$\frac{q_2}{m_{ss}} = Ya.Cpl.(Tv - Tsa) \quad (2.5)$$

Em que Ya é a massa de líquido inicial presente no sólido pela massa de sólido seco, Cpl é o calor específico do líquido e Tv é a temperatura de vaporização do líquido.

O calor latente do líquido evaporado por unidade de massa de sólido seco é dado por:

$$\frac{q_3}{m_{SS}} = (Y_a - Y_f) \cdot \lambda \quad (2.6)$$

Em que Y_f é a massa final de líquido presente no sólido por unidade de massa de sólido seco e λ é o calor de vaporização do líquido.

O calor para aquecer o líquido não evaporado da temperatura de vaporização até a temperatura final do sólido por unidade de massa de sólido seco é dado por:

$$\frac{q_4}{m_{SS}} = Y_f \cdot C_{pl} \cdot (T_{sf} - T_v) \quad (2.7)$$

Por fim, o calor para aquecer o vapor da temperatura de vaporização do líquido até a temperatura final do vapor por unidade de massa de sólido seco é dado por:

$$\frac{q_5}{m_{SS}} = (Y_a - Y_f) \cdot C_{pv} \cdot (T_{va} - T_v) \quad (2.8)$$

Em que C_{pv} é o calor específico do vapor e T_{va} é a temperatura final do vapor.

Assim, a quantidade de calor transferida por unidade de massa de sólido seco é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{q}{m_{SS}} = & C_{ps}(T_{sf} - T_{sa}) + Y_a \cdot C_{pl} \cdot (T_v - T_{sa}) + (Y_a - Y_f) \cdot \lambda + Y_f \cdot C_{pl} \cdot (T_{sf} - T_v) + \\ & + (Y_a - Y_f) \cdot C_{pv} \cdot (T_{va} - T_v) \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.4 Transferência de Massa envolvida no Processo de Secagem

O estudo da transferência de massa no processo de secagem de grãos é de extrema importância, pois é por meio deste que se pode analisar as características do sistema que limitam o processo. Há vários efeitos inerentes tanto à transferência de energia quanto ao transporte de massa que podem limitar o processo nas diferentes etapas da secagem.

Segundo Perry e Green (1998), a secagem de sólidos de forma geral apresenta três etapas consecutivas: a perda de umidade por evaporação da superfície saturada do sólido, a evaporação da superfície saturada com diminuição gradual da área saturada e a

evaporação da água no interior do sólido. Este autores ainda argumentam que os períodos da secagem podem ser estudados ao se analisar a velocidade de secagem que pode ser determinada pela derivação gráfica ou numérica da curva de secagem representada por dY/dt contra o tempo ou contra a umidade do sólido.

O primeiro período apresentado pelos autores é o período a velocidade constante, em que a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de transferência de calor para a superfície evaporante, de forma que a superfície do sólido é mantida saturada, pois o movimento da água do interior até a superfície é suficientemente rápido. Em seguida, os autores argumentam sobre o período a velocidade decrescente que ocorre após o sólido atingir um teor de umidade crítico. Esta etapa é caracterizada por duas zonas: a de secagem das regiões insaturadas da superfície e a em que o movimento interno da umidade é controlante. Perry e Green (1998) assim discorrem que a primeira zona é caracterizada pelo fato de se chegar a um ponto em que não é possível manter toda a superfície saturada, ocorrendo uma diminuição na velocidade de secagem. Enquanto isso, os autores acrescentam que a segunda zona ocorre quando toda a superfície se encontra insaturada de forma que a evaporação desloca-se para o interior do sólido, sendo a secagem controlada pela velocidade do movimento da umidade interna cujos mecanismos de controle mais usuais são os de difusão, de capilaridade e os dos gradientes de pressão inerentes à contração.

Da literatura, uma parte dos autores concluiu que a maior resistência na secagem de grãos e produtos agrícolas encontra-se no transporte de massa no interior do sólido, ou seja, a maior parte da secagem ocorre no período de decaimento contínuo das velocidades das taxas de secagem (AKPINAR *et al.*, 2003; ARABHOSSEINI *et al.*, 2009; BENALI, 2012; CHINENYE *et al.*, 2010; CIL e TOPUZ, 2010; DEMIR *et al.*, 2007; MEISAMI-Asl *et al.*, 2010; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; SILVA *et al.*, 2014; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Se a umidade inicial do material é muito alta, as taxas de secagem podem apresentar valores constantes no início do processo, como foi observado na secagem de cacau com umidades em base úmida entre 70 e 100% (BARYEH, 1985).

Foi verificado em muitos estudos que a temperatura do ar de secagem fortemente influencia nas taxas de secagem aumentando os seus valores (AKPINAR *et al.*, 2003; BABALIS e BELESSIOTS, 2004; BENALI, 2012; BOERI e

KHATCHATOURIAN, 2012; CHINENYE *et al.*, 2010; CIL e TOPUZ, 2010; DEMIR *et al.*, 2007; KASHANINEJAD *et al.*, 2007; MEISAMI-ASL *et al.*, 2010; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; SILVA *et al.*, 2014; SIMAL e ROSSELLO, 1994; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Em alguns estudos, observou-se que a influência da velocidade do ar nas taxas de secagem é menor em comparação a influência da temperatura (BENALI, 2012; BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; CIL e TOPUZ, 2010; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Nestes estudos, observou-se que quanto maior a velocidade do ar, maior é a velocidade com que o material é seco. Contudo, em outros estudos a velocidade do ar não interferiu nas taxas de secagem como foi o caso da secagem de farelo de soja (LUZ *et al.*, 2006).

Outro aspecto que pode interferir nas taxas de secagem é a área superficial disponível em contato com o ar. Meisami-asl *et al.* (2010) avaliaram a espessura de fatias de maçã na secagem em camada delgada. Estes autores observaram que as taxas de secagem aumentaram com a redução da espessura das amostras. Estes resultados apontam que as taxas de secagem aumentam com o aumento da área superficial do material disponível em contato com o ar de secagem.

A umidade inicial do grão é outra propriedade que pode impactar na cinética de secagem do material. Foi observado em alguns casos que as taxas de secagem aumentaram em quantidades altas de teor de umidade inicial do produto (BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; OLIVEIRA e ROCHA, 2007). Contudo, alguns autores negligenciam a influência da umidade inicial na estimativa dos coeficientes de transferência de massa (SILVA *et al.*, 2004; ELIAS *et al.*, 2002; MANCINI *et al.*, 2002b).

Oliveira e Rocha (2007) observaram na secagem de feijão que as taxas de secagem são fortemente afetadas pela temperatura do ar e depois pela umidade inicial do grão. As taxas de secagem aumentaram nos valores altos de umidade inicial. Contudo, Mancini *et al.* (2002 b) verificaram que a inclusão do termo de umidade inicial não melhorou os resultados entre valores experimentais e preditos pelo modelo ajustado para estimar as taxas de secagem de feijão em comparação ao modelo ajustado que considerava estas taxas em função apenas da temperatura do ar e a umidade do grão.

Uma propriedade intrínseca à transferência de massa no processo de secagem é o coeficiente global de transferência de massa que está relacionado com a taxa de água evaporada no processo e cujo estudo pode indicar as propriedades que limitam a secagem. O valor do coeficiente global de transferência de massa geralmente é estimado por equações empíricas validadas frente a dados experimentais da secagem de sólidos realizada tanto em camada delgada quanto camada espessa.

Mancini (1996) definiu camada delgada como “*um leito de grãos de espessura tal que, ao ser percolado pelo gás, as condições de umidade e temperatura da fase fluida não sofram variações, isto é, as variações nas propriedades da fase fluida são menores do que a sensibilidade dos equipamentos de medida, podendo considerar-se que todo o leito de grãos está sujeito às mesmas condições de umidade e temperatura de gás de secagem*”. Este autor ainda acrescenta que o estudo da secagem nessas condições possibilita não apenas um maior controle sobre as condições operacionais, mas também possibilita avaliar separadamente os efeitos inerentes a temperatura, vazão e umidade do gás sobre o coeficiente de transferência de massa. Em camada delgada, é possível considerar que todo o leito está sob condições homogêneas, ou seja, que todo o leito está com a mesma temperatura e umidade (ELIAS *et al.*, 2002). De acordo com Thompson *et al.* (1968), o tempo de residência do ar dentro do secador é muito pequeno e o equilíbrio térmico entre o material e o ar é alcançado rapidamente. Enquanto isso, para leitos de camada espessa, ou leito profundo, a secagem de grãos é controlada pelos parâmetros do processo (como a temperatura do ar e a pressão parcial da água evaporada na fase gasosa) e pelas propriedades das partículas (coeficientes de transferência de massa e de energia) (MANGANARO, 2007).

Alguns autores como Mancini (1996) e Barrozo (1995) realizaram experimentos em camada delgada ajustando modelos para estimativa do coeficiente global de transferência de massa e posteriormente obtiveram bons resultados na aplicação destes modelos na simulação em camada espessa. A camada espessa, ao contrário da camada delgada, tem uma espessura de leito suficiente para que haja uma variação significativa de umidade e temperatura do ar. Outros autores validaram um modelo empírico para estimativa do coeficiente global de transferência de massa com dados obtidos por experimentos realizados em camada espessa, como foi o caso de Coutinho *et al.* (2009) na secagem de soja em leito fixo. A desvantagem de se ajustar os parâmetros do modelo para estimativa deste coeficiente em base de experimentos realizados em camada

espessa é que este ajuste pode corrigir outras falhas da estimativa de outras propriedades não relacionadas à transferência de massa, uma vez que há muitas variáveis envolvidas, como apontam os modelos de secagem de grãos em camada profunda.

2.5 Modelos Matemáticos para Secagem de Grãos em Leito Fixo

2.5.1 Modelo a Duas Fases

Para estudar a remoção de líquido de um sólido em função do tempo e da posição em um processo de secagem em leito fixo, pode-se partir de um modelo que descreva matematicamente este comportamento. Prado (2004) aponta as vantagens em se usar modelos matemáticos na simulação computacional dos perfis de umidade e temperatura nos secadores, destacando a possibilidade de se examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de obter dados experimentais e a ajuda em se compreender melhor os fenômenos de transferência de massa e de energia entre o sólido e a fase fluida, permitindo o estudo da otimização dos processos a fim de se obter condições ideais para armazenamento. Contudo, este autor ainda ressalta que os dados experimentais são extremamente importantes para a compreensão física do processo como também para a validação de modelos mais realísticos.

A Equação (2.9) apresentada anteriormente estima a quantidade de calor necessária para se atingir uma dada condição, mas não apresenta como as propriedades variam com o tempo e a posição no leito. Calçada (1994) apresenta alguns modelos que descrevem este comportamento, sendo classificados usualmente para sistemas em leito fixo como modelos heterogêneos ou pseudo-homogêneos. Esses modelos partem de balanços de energia e de massa que consistem em equações diferenciais para apontar como a umidade e a temperatura do sistema gasoso e sólido variam com o tempo e a posição.

De acordo com Coutinho *et al.* (2009), o modelo pseudo-homogêneo, ou de uma fase, trata o sistema sólido e gasoso como uma única fase, de forma que a temperatura e a umidade desses dois sistemas são as mesmas em dado tempo e posição. Por outro

lado, o modelo heterogêneo, ou a duas fases, ou ainda modelo de Michigan (SPERANDIO, 2005), faz distinção entre o comportamento do sólido e do gás. Assim, este modelo leva em consideração que há transporte tanto de massa quanto de calor entre as duas fases.

Segundo Calçada *et al.* (2002), o modelo a duas fases está fundamentado nas leis de conservação de massa e de energia. Associado a este modelo está o fato de que em um ponto do sistema haverá uma específica umidade, temperatura e velocidade tanto para a fase gasosa quanto para a fase sólida. A base dessa teoria está fundamentada nas equações de conservação de quantidade de movimento, de massa e de energia, nos dados de equilíbrio termodinâmico e nas informações inerentes às características da transferência de calor e de massa entre as fases.

As Equações envolvidas no modelo a duas fases segundo Massarani e Silva Telles (1992) estão apresentadas na Figura 2.3.

Fase Sólida	$\text{div}(\mathbf{G}_s Y_s) + \frac{\partial(Y_s(M_{ss}/V_{sp}))}{\partial t} = -f(T_s, Y_s, UR)$ $\text{div}(\mathbf{G}_s H_s) + \frac{\partial(H_s(M_{ss}/V_{sp}))}{\partial t} = ha(T_g - T_s) - f\langle H \rangle$
Fase Fluida	$\text{div}(\mathbf{G}_g Y_g) + \frac{\partial(Y_g(M_{gs}/V_{sp}))}{\partial t} = f(T_s, Y_s, UR)$ $\text{div}(\mathbf{G}_g H_g) + \frac{\partial(H_g(M_{gs}/V_{sp}))}{\partial t} = -ha(T_g - T_s)$
Equações Auxiliares	$f = k_s a(Y_s - Y_{se}) \quad Y_{se} = \phi_2(T_s, UR) \quad \langle H \rangle = \lambda + Cp_l(T_g - T_s)$ $H_s = (Cp_s + Y_s Cp_l)(T_s - T_r) \quad H_g = (Cp_g + Y_g Cp_v)(T_g - T_r)$

Figura 2.3 – Equações do Modelo a Duas Fases (MANCINI *et al.*, 2002 a,b)

As considerações adotadas para este modelo por uma significativa parte dos autores, como Coutinho *et al.* (2009), Motta Lima (2001), Defendi (2013), Defendi *et al.* (2015b) e Calçada (1994) e que também serão utilizadas neste trabalho são as seguintes:

- O volume da fase sólida é tomado como constante com o tempo.
- A variação da massa específica do sólido seco e do ar é negligenciada.
- Comportamento ideal para a fase gasosa, considerada apenas formada por ar e vapor de água.
- Despreza-se a variação da porosidade do leito.
- Considera-se constante a viscosidade da fase gasosa com o tempo.
- O sólido seco e o líquido formam uma única fase homogênea.
- São constantes as velocidades de ambas as fases.
- Desprezam-se os fluxos radiais difusivos e condutivos, a radiação térmica, a dissipação viscosa, a compressibilidade da fase gasosa e as perdas de calor pelas paredes do sistema (sistema adiabático).
- Negligencia-se o acúmulo da fase fluida no sistema, uma vez comparada ao mesmo termo da fase sólida.

Com base nessas considerações, a variação da umidade do gás com a posição do leito em um sistema adiabático segundo Calçada (1994) é dada por:

$$\frac{\partial Y_g}{\partial z} = \frac{f}{G_g} \quad (2.10)$$

Em que G_g é a taxa de fluxo mássico do gás, Y_g é a umidade do gás em base seca, z é a posição no eixo z e f é a taxa de secagem por unidade de volume do leito de partículas. Essa equação representa um balanço de massa para a água presente na fase gasosa. O valor de f pode ser estimado pela seguinte Equação:

$$f = K_s a. (Y_s - Y_{se}) \quad (2.11)$$

Em que Y_s é a umidade do sólido em base seca, Y_{se} é a umidade de equilíbrio do sólido em base seca e $K_s a$ é o coeficiente volumétrico de transferência de massa. O valor deste coeficiente geralmente é estimado pelo levantamento da cinética de secagem do material em camada delgada, no qual é possível verificar com mais facilidade e separadamente a influência de cada propriedade do ar e das condições do grão. No capítulo 4 serão ajustados os valores deste coeficiente com dados em camada delgada, para posterior simulação em leito profundo.

No balanço de energia na fase gasosa, observa-se que o calor sensível inerente à variação de temperatura do gás e do vapor na fase gasosa é igual ao calor trocado por convecção entre o gás e o sólido:

$$G_g \cdot (cp_{ar} + Y_g \cdot cp_v) \cdot \frac{\partial T_g}{\partial z} = -ha(T_g - T_s) \quad (2.12)$$

Em que cp_{ar} é o calor específico do ar, cp_v é o calor específico do vapor, T_s é a temperatura do sólido, T_g é a temperatura da fase gasosa e ha é o coeficiente de transferência de calor que pode ser obtido para sistemas de aquecimento e resfriamento de grãos segundo Boyce (1965) pela seguinte expressão:

$$ha = 4286,5 \cdot \left[\frac{G_g \cdot (T_g + 273)}{P} \right]^{0,6011} \quad (2.13)$$

Em que T_g é dada em °C, G_g é dada em kg/(m².min), P é a pressão do sistema dada em Pa e ha é dado em kJ/(m³.min.°C).

Já a conservação de massa referente a variação da umidade do sólido é dada por:

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = - \frac{f}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_{ss}} \quad (2.14)$$

Em que Y_s é a umidade do sólido em base seca, t é o tempo, ε é a porosidade média do leito e ρ_{ss} é a massa específica do sólido seco.

Por fim, no balanço de energia na fase sólida observa-se que o calor sensível inerente à variação de temperatura do sólido, do líquido e do vapor mais o calor latente envolvido no processo de vaporização da água vão ser iguais ao calor de troca entre as fases por convecção:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{ss} \cdot (cp_s + cp_l \cdot Y_s) \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = ha(T_g - T_s) - f(cp_v(T_g - T_s) + \lambda) \quad (2.15)$$

2.5.2 Modelo Pseudo-Homogêneo

Como visto anteriormente, o modelo pseudo-homogêneo trata as fases sólida e gasosa indistintamente, de forma a tomar as duas fases como uma única chamada de fase pseudo-homogênea. As propriedades térmicas desta fase segundo Fregolente *et al.* (2004) são chamadas de propriedades térmicas efetivas.

Segundo esses autores, este modelo, por tomar uma única fase, apresenta equações de balanço de massa e de energia mais simples, sendo geralmente usado nos processos de leito fixo na presença ou ausência de reações químicas. Os autores ainda apontam que este modelo, por ser mais simples, pode ser mais conveniente para fins de controle e otimização de secadores em leito fixo. Contudo, eles ainda ressaltam que, no processo de secagem de grãos em leito fixo, o modelo heterogêneo tem sido mais usado que o modelo das propriedades térmicas efetivas, uma vez que a secagem tem caráter endotérmico e a resistência de transferência de massa no interior dos grãos neste processo é dominante, ou seja, em alguns aspectos, o grão e a fase fluida apresentam características diferentes para serem considerados como a mesma fase.

No trabalho de Castillo-Araiza *et al.* (2007), observa-se que o modelo pseudo-homogêneo tem sido usado em muitos estudos experimentais sobre a transferência de calor em leitos empacotados a fim de se estimar os parâmetros das propriedades efetivas (o coeficiente de transferência de calor na parede e a condutividade térmica efetiva). Estes autores apresentaram as equações do modelo pseudo-homogêneo tanto em um leito adiabático quanto em um não adiabático, sendo que o modelo adiabático foi apresentado pela seguinte Equação:

$$\rho_g \cdot Cp_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_{z0} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.16)$$

Em que ρ_g é a massa específica do gás, Cp_g é o calor específico do gás, v_{z0} é a velocidade axial em r (raio) = 0 e k_{eff} é a condutividade térmica efetiva. Este modelo foi usado depois que a diferença de temperatura entre o gás e as partículas sólidas se tornou desprezível, de forma que o modelo unidimensional foi adequado. Por outro lado, o modelo não adiabático considera também a dispersão radial, como mostra a Equação do modelo bidimensional:

$$\rho_g \cdot Cp_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.17)$$

Em que v_z e v_r são os componentes de velocidade axial e radial respectivamente. Este modelo também negligencia a diferença de temperatura entre o sólido e o gás e considera a dispersão radial e axial e o transporte convectivo de calor. Outros autores também utilizaram um modelo dinâmico, porém adimensionalizando algumas variáveis como o raio e a posição z , como se observa no trabalho de Jorge *et al.* (2010). Estes

autores utilizaram dados experimentais em regime permanente para estimar a condutividade térmica radial efetiva e o coeficiente de transferência de calor da parede e dados experimentais em regime transiente para estimar a constante de tempo característica do leito empacotado.

De acordo com Fregolente *et al.* (2004), no começo do processo de secagem em leito fixo a quantidade de água evaporada é muito significativa, diminuindo com o tempo até parar, de forma que a transferência de massa cessa quando a umidade de equilíbrio nas condições de operação é alcançada. Contudo, apesar do sistema atingir um estado permanente, ainda há transferência de calor na direção radial e axial do leito. O modelo pseudo-homogêneo, em regime permanente, apresenta um balanço de energia com este comportamento bidimensional de transferência de calor como mostrado por Fregolente *et al.* (2004) pela equação:

$$k_r \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_{ax} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = G \cdot cp \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.18)$$

Em que k_r é a condutividade térmica efetiva radial, k_{ax} é a condutividade térmica efetiva axial, z é a posição axial, r é a posição radial, G é a densidade do fluxo mássico ($\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$) e cp é a capacidade calorífica ($\text{L}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}$). Este modelo foi usado pelos autores para estimar as propriedades térmicas no processo de secagem de grãos de soja, milho, trigo e feijão carioca em leito fixo.

2.5.3 Modelo a Três Fases

Durante o processo de secagem de materiais particulados, existe a possibilidade em certas condições operacionais de a água presente no gás atingir o ponto de orvalho e se condensar. Segundo Calçada (1994), este fenômeno ocorre no processo de secagem de materiais particulados porosos, enquanto que na secagem de cereais ele é observado apenas no início do processo.

Para analisar este comportamento, Calçada *et al.* (2002) propôs o modelo a “três fases”, o qual consiste em uma extensão do modelo a “duas fases” proposto por Massarani e Silva Telles (1992) e abordado no item 2.5.1. Segundo o modelo a “três fases”, a condensação de água no processo de secagem é levada em consideração com a

adição das equações psicométricas no sistema de equações inerentes aos balanços de massa e de energia envolvidos no processo.

Estes balanços de massa e de energia são os mesmos envolvidos no modelo a “duas fases” do item 2.5.1. Contudo, a variável Y_g (umidade do gás) é composta por duas parcelas: a umidade na forma de vapor (Y_{gv}) e a umidade na forma líquida (Y_{gl}). A soma dessas duas variáveis resulta na umidade do gás.

Para os casos em que a umidade relativa do ar está abaixo de 100 %, a condensação de água não ocorre de forma que a umidade na forma líquida é nula e a umidade do gás é dada pela umidade na forma de vapor. Se a umidade relativa chegar a 100 %, o estado de saturação é atingido. Para este caso a temperatura do gás é a temperatura de saturação e a umidade do gás na forma vapor é a umidade de saturação. Estas propriedades são inerentes às equações psicométricas. Além disso, a umidade na forma líquida é determinada pela diferença entre a umidade do gás e a umidade do gás na forma de vapor. As equações abaixo apresentam estes casos:

Gás não saturado:

$$Y_{gv} = Y_g \quad e \quad Y_{gl} = 0 \quad (2.19)$$

Gás saturado:

$$T_g = T_{gsat}, \quad Y_{gv} = Y_{gsat} \quad e \quad Y_{gl} = Y_g - Y_{gsat} \quad (2.20)$$

2.6 Soluções Numéricas Para os Modelos Matemáticos

Como observado nos itens anteriores, os balanços de massa e de energia envolvidos nos modelos de secagem de soja em leito fixo para representar o perfil de temperatura e de umidade podem resultar em equações ou sistema de equações diferenciais parciais. Muitas vezes, a solução analítica para esse conjunto de equações é difícil de se encontrar. Para contornar este problema, pode-se utilizar um método numérico como o método das diferenças finitas. Segundo Özisik (1990), este método consiste em transformar as equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas.

Coutinho (2006) ressalta que o método de diferenças finitas, em sistemas transientes, pode ser resolvido em alguns casos discretizando as derivadas espaciais e integrando no tempo. Além disso, Benetti (2009) acrescenta que este método está baseado na diferenciação de funções polinomiais interpolativas, em que os operadores são determinados segundo a expansão em série de Taylor. A seguir é apresentado como Coutinho (2006) aplicou a expansão em série de Taylor no conceito de diferenças finitas.

A expansão em série de Taylor para determinar um valor de f em $(x + \Delta x)$ de uma função $f(x)$ é dada por:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)\Delta x^2}{2!} + \frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (2.21)$$

Da mesma forma, para um ponto em $(x - \Delta x)$:

$$f(x - \Delta x) = f(x) - f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)\Delta x^2}{2!} - \frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} - \dots \quad (2.22)$$

O método das diferenças finitas se baseia nessas expansões da série de Taylor. Este método pode ser de três tipos diferentes: diferenças finitas centrais, para frente ou para trás. O método das diferenças finitas centrais se baseia na subtração da Equação (2.21) em relação a Equação (2.22), como se observa abaixo:

$$f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) = 2f'(x)\Delta x + 2\frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (2.23)$$

Isolando $f'(x)$, obtém-se:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} + 2\frac{f'''(x)\Delta x^2}{3!} + \dots \quad (2.24)$$

Pode-se desprezar os termos após o primeiro termo do lado direito da Equação (2.24). Dessa forma, a ordem de magnitude do erro associado a essa consideração será Δx^2 . Assim, o valor de $f'(x)$ vai ser dado por:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} + O[\Delta x^2] \quad (2.25)$$

O método das diferenças finitas para frente se baseia na expansão de Taylor representada pela Equação (2.21). Da mesma forma, pode-se isolar o valor de $f'(x)$ e considerar apenas os dois primeiros termos da expansão:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} + O[\Delta x] \quad (2.26)$$

Analogamente, o método das diferenças finitas para trás se baseia na expansão de Taylor representada pela Equação (2.22). Isolando o valor de $f'(x)$ e tomando apenas os dois primeiros termos da expansão, obtém-se:

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x-\Delta x)}{\Delta x} + O[\Delta x] \quad (2.27)$$

Para o caso de Equações diferenciais de 2º ordem, para discretizá-las pelo método das diferenças finitas, soma-se as Equações (2.21) e (2.22). Realizando esta operação, isolando o valor de $f''(x)$ e tomando apenas os primeiros termos da expansão, obtém-se:

$$f''(x) = \frac{f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) - 2f(x)}{\Delta x^2} + O[\Delta x^2] \quad (2.28)$$

Este método de discretização pelas diferenças finitas foi aplicado por vários autores para resolver os modelos de secagem de grãos, como podem se destacar os trabalhos de Dalpasquale *et al.* (2012), Romero *et al.* (2010), Coutinho *et al.* (2009), Defendi (2013) e Srivastava e John (2001). Quando o modelo é representado por um sistema de equações diferenciais parciais, como o caso do modelo a duas fases, alguns autores optam por abrir o sistema de equações pela discretização tanto no tempo como no espaço, como é o caso de Romero *et al.* (2010) e Coutinho *et al.* (2009).

Assim, a malha é dividida em intervalos no tempo e no espaço suficientes para os resultados representarem adequadamente o comportamento do sistema. Os pontos são calculados a partir das condições de contorno e das condições iniciais. Outra alternativa para resolução do modelo a duas fases é a adimensionalização das equações do modelo, como Calado (1993) aplicou em um secador de leito fixo, discretizando a variável espacial das equações de balanço da fase fluida por meio do método implícito de Euler para garantir a estabilidade numérica de todo passo de integração. Assim, o modelo resultou em um sistema de equações diferenciais ordinárias não lineares, as quais foram resolvidas por meio do algoritmo de Runge-Kutta de 4ª ordem com passo variável.

2.7 Secagem Intermitente

Recentemente, a secagem intermitente de alguns produtos agrícolas tem sido estudada por um número significativo de pesquisadores (CHUA *et al.*, 2000 a,b; CHUA *et al.*, 2003; HOLOWATY *et al.*, 2012; KOWALSKI e PAWLOWSKI, 2011; MENEGHETTI *et al.*, 2012; OLIVEIRA & ROCHA, 2007; PUTRANTO *et al.*, 2011; RAMALLO *et al.*, 2010). Contrariamente a operação tradicional, a secagem intermitente fornece ao sistema ar em condições (temperatura, vazão ou pressão) transientes focando obter as melhores condições operacionais. Um dos principais objetivos da secagem intermitente é minimizar os gastos energéticos e alcançar e manter a melhor qualidade dos produtos (PUTRANTO *et al.*, 2011). De acordo com Chua *et al.* (2003), a secagem intermitente é benéfica para materiais cuja secagem é controlada pela difusão de calor e umidade dentro do grão.

A maioria dos produtos agrícolas incluindo a soja possui esta característica. É interessante optar por variar a energia fornecida ao sistema para este tipo de material, pois pode ocorrer de se fornecer uma quantidade desnecessária de energia, uma vez que a migração de água até a superfície é o efeito que controla o processo. Assim, em secagem intermitente pode-se fornecer energia para evaporar a água ao passo que em intervalos estabelecidos pode-se reduzir ou até mesmo cessar esse fornecimento de energia durante o tempo necessário para que esta difusão de água até a superfície ocorra. Neste contexto, a secagem intermitente pode levar mais tempo, porém acarreta numa diminuição do consumo energético do processo e evita que os grãos sejam expostos por muito tempo a temperaturas que podem degradar estes materiais (CHUA *et al.*, 2003).

Assim, Chua *et al.* (2003) ainda acrescentam que esta variação de energia na entrada do secador devida a modulação da temperatura do ar é também benéfica para materiais sensíveis à variação de calor como comidas, ervas, temperos e medicamentos à base de plantas, pois o tempo em contato com ar em temperaturas altas é reduzido.

Chua *et al.* (2000 a) observaram em experimentos que foi possível melhorar a qualidade da goiaba em secagem com modulação da temperatura do ar em comparação a secagem com fornecimento contínuo de ar numa temperatura fixa. Eles observaram que a quantidade de ácido ascórbico presente na goiaba seca foi 20% superior aplicando a secagem intermitente. Chua *et al.* (2000 b) verificaram que, por meio da secagem

intermitente da temperatura do ar, foi possível reduzir em 87, 75 e 67% a variação da cor de amostras de batata, de goiaba e de banana respectivamente.

Oliveira e Rocha (2007) em estudo de secagem intermitente de feijão observaram que se o tempo dos períodos das modulações é muito grande, ou seja, se o tempo de descanso do leito de jorro que eles analisaram for muito grande pode ocorrer a hidratação do grão que pode por em risco a qualidade do grão devido aos níveis altos de teor de umidade do feijão no final do processo. Contudo, eles observaram que a eficiência em questão de consumo energético foi melhor para o processo em regime intermitente.

Kowalski e Pawlowski (2011) estudaram a secagem intermitente de madeira e materiais cerâmicos visando avaliar a qualidade destes materiais sujeitos à ruptura durante a secagem partindo de modulações da temperatura e da umidade do ar e comparando estes resultados com os obtidos pela secagem convencional. Os resultados apontaram que a modulação da temperatura levou a casos com o menor consumo energético, enquanto que a modulação da umidade levou o sistema a casos com as melhores qualidades dos materiais. Além disso, observaram que a secagem intermitente pôde conduzir a um produto de melhor qualidade com tempos de secagem não significativamente superiores aos da secagem tradicional.

No estudo da secagem intermitente de erva-mate, Holowaty *et al.* (2012) conseguiram economizar em 10% o consumo energético do processo. Também no estudo da secagem de erva-mate, Ramallo *et al.* (2010) conseguiram aumentar em algumas condições operacionais o desempenho do aquecedor em regime intermitente, no qual os níveis de umidade do material seco foram de 10 a 12% menores do que os obtidos em operação convencional.

A secagem intermitente com variação das propriedades do ar com o tempo é aplicável apenas a sistemas em batelada, pois é possível variar a temperatura ou vazão do ar alimentado com o tempo ao longo da secagem (CHUA *et al.*, 2003). Para sistemas contínuos, as variações das condições do ar podem ser feitas em entradas laterais de ar ao longo do leito, porém para secar os materiais de forma homogênea, as condições do ar em cada entrada do secador são operadas de forma convencional preestabelecida numa dada temperatura e vazão podendo ser variáveis ao longo da posição do leito.

As secagens intermitentes podem ser realizadas de várias formas em relação a maneira como as propriedades do ar, como temperatura e vazão, ou do sistema como pressão são moduladas. O enfoque deste trabalho é a operação periódica, cuja modulação é dada continuamente numa específica frequência e amplitude. Há outros tipos de modulação como os casos em que as entradas são variadas na forma de rampa, degrau, por impulso, cíclicas ou até mesmo de forma arbitrária. A modulação arbitrária pode ser empregada em casos em que o controle da temperatura do sólido é extremamente necessário para manter a qualidade do material, assim o sistema irá ajustar a temperatura na entrada do secador conforme as perturbações e as leituras de temperatura na superfície do produto durante o processo de secagem. A Figura 2.4 ilustra os tipos de modulações referentes aos processos de secagem intermitente.

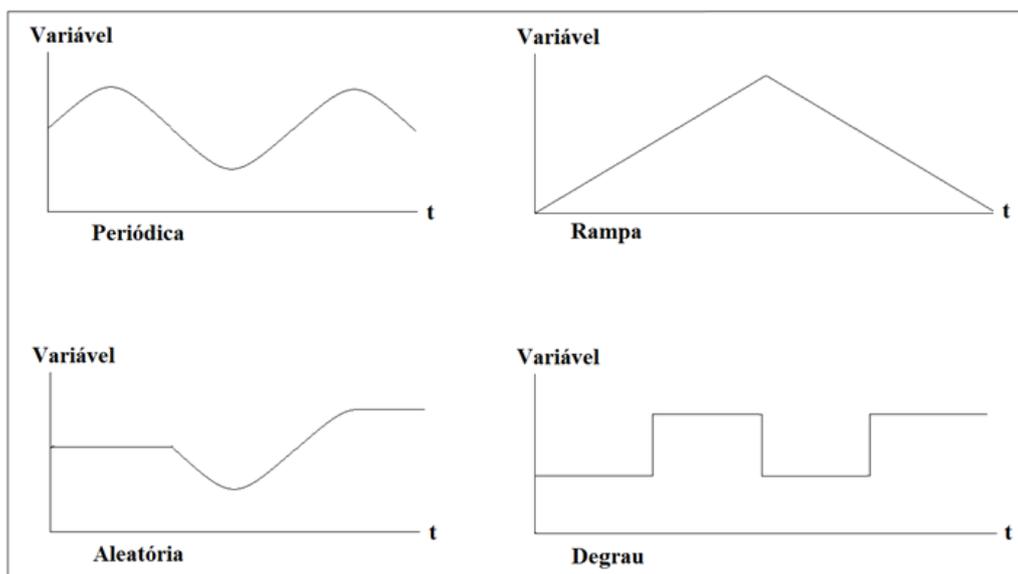


Figura 2.4 – Tipos de Secagem Intermitente

2.8 Contextualização dos Objetivos da Tese

De tudo o que foi abordado, observa-se que muitos trabalhos vêm sendo publicados com o intuito de mostrar que a secagem intermitente pode reduzir o consumo energético do processo, reduzir o tempo efetivo de secagem e melhorar a qualidade do material seco em comparação com a operação tradicional com ar alimentado em regime permanente. Neste contexto, este trabalho tem a finalidade de contribuir com esses estudos com o foco de avaliar a operação periódica na secagem de

grãos de soja do tipo EMBRAPA 48. O trabalho também contribui com modelos de secagem ajustados para a soja operando tanto convencional, quanto periodicamente, e com os estudos de otimização, visando encontrar as melhores condições de modulação da temperatura e da vazão do ar na entrada do secador a fim de se reduzir o máximo possível o consumo energético. Esta Tese é uma sequência do estudo desenvolvido durante o Mestrado (DEFENDI *et al.*, 2013).

3. AQUECIMENTO DO AR DE SECAGEM

3.1 Introdução e Objetivos

Os aquecedores elétricos são equipamentos capazes de converter energia elétrica em calor. Este sistema de conversão de energia é descrito pelo efeito Joule, em que certa energia elétrica percorre um material condutor que oferece resistência ao fluxo dessa corrente, de forma que o atrito presente promove a conversão de energia elétrica em aquecimento do material. Segundo Halliday *et al.* (1996), a resistência de um condutor pode ser medida aplicando uma diferença de potencial entre dois pontos do condutor e medindo a corrente resultante. O material utilizado para oferecer resistência à corrente elétrica nos aquecedores elétricos são os resistores.

Estes aquecedores elétricos podem ser utilizados em processos para o aquecimento de fluidos como a água em sistemas em que se necessita de trocadores de calor e ar, como na secagem de materiais sólidos. Também podem ser acoplados em trocadores de calor para evitar que ocorra congelamento de água (proveniente de ar em altas umidades) na superfície destes trocadores quando operados em baixas temperaturas, melhorando assim a eficiência da troca de calor envolvida (KWAK e BAI, 2010). Outra aplicação dos aquecedores elétricos está nos processos de estocagem a frio para evitar o congelamento de água presente no ar refrigerante, possibilitando uma melhora no coeficiente de desempenho do processo de refrigeração, cujo valor é reduzido em condições abaixo do ponto de orvalho (YIN *et al.*, 2012). Em um contexto geral, os aquecedores elétricos são usados quando a demanda de energia é pequena (MATHUR, 2011).

É de extrema importância o controle de temperatura para esses processos, principalmente na secagem de grãos como reporta Coutinho *et al.* (2004). Segundo estes autores, a falta de controle da temperatura neste processo pode provocar a inviabilização da germinação quando se destina à secagem de sementes. Além disso, de acordo com Silva *et al.* (2008), a quantidade de calor fornecida em um processo de secagem tem efeito definitivo sobre o valor nutricional dos grãos.

Outro fator importante é que os sistemas de aquecimento de fluidos estão diretamente relacionados com o gasto energético do processo envolvido. Segundo Luz *et al.* (2006), a secagem é uma etapa da produção agrícola que consome muita energia. Reinato *et al.* (2002) argumentam que a operação de secagem, quando conduzida eficientemente contribui para a redução de custos operacionais, devido a economia de energia proporcionada pelo melhor controle do processo. Assim, modelar, simular e validar o desempenho de sistemas de aquecimento é extremamente importante para a otimização destes processos.

Estes modelos também podem auxiliar no controle da temperatura em processos de secagem em operação intermitente. Como apresentado na revisão bibliográfica, esta operação é benéfica para produtos sensíveis à temperatura e produtos cuja secagem é controla pelos efeitos difusivos de transporte internos do material, pois é possível melhorar a qualidade do produto e reduzir o consumo energético do processo. Com um modelo apropriado para o sistema de aquecimento do ar, é possível controlar a modulação da temperatura na entrada do secador de forma a manter as melhores condições de consumo energético e a evitar a perda de qualidade do material.

O controle da temperatura nos aquecedores elétricos pode ser feito por meio da manipulação da voltagem aplicada à resistência do sistema de aquecimento do fluido. Para dada voltagem, o fluido será aquecido até certa temperatura, de acordo com as condições da vizinhança em que o aquecedor está inserido. Além disso, assim que se aplica uma perturbação variando a voltagem até um valor específico, o sistema leva um tempo para alcançar a condição de regime permanente, momento em que a temperatura se estabiliza.

Com base no que foi discutido, o objetivo desta etapa do trabalho é propor um modelo dinâmico de um aquecedor elétrico operando em regime não permanente que relaciona o perfil de temperatura do ar na saída do aquecedor com a voltagem aplicada e com as condições do meio em que o aquecedor está inserido. Buscou-se validar este modelo frente a dados experimentais obtidos em um sistema de aquecimento de ar por meio de um aquecedor elétrico utilizado em um secador de leite fixo em escala de bancada. Além disso, busca-se aplicar o modelo no estudo do aquecimento do ar no processo de secagem de soja em leite fixo que será abordado nos próximos capítulos.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Equipamentos e Materiais

Os equipamentos e materiais utilizados foram um compressor que opera a 7 bar, um aquecedor elétrico com resistência de $7,60 \Omega$ e área superficial de $1,07 \times 10^3 \text{ cm}^2$, um regulador de tensão (VARIAC), um rotâmetro para medir a vazão de ar, um secador de leito fixo de 6 cm de diâmetro interno com 30 cm de comprimento isolado com lã, grãos de soja do tipo Embrapa 48 fornecidos pela COCAMAR, um psicrômetro digital, termopares tipo K (precisão de $\pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$) e um cronômetro.

O ar do sistema é fornecido por um compressor em cuja linha há um rotâmetro para quantificar a vazão de ar. O ar segue para um aquecedor elétrico que possui um dispositivo para regular a voltagem aplicada. Em seguida, o ar segue para o leito do secador, no qual há vários termopares situados em diferentes posições. O termopar utilizado neste experimento é o situado logo na saída do aquecedor como esquematizado na Figura 3.1.

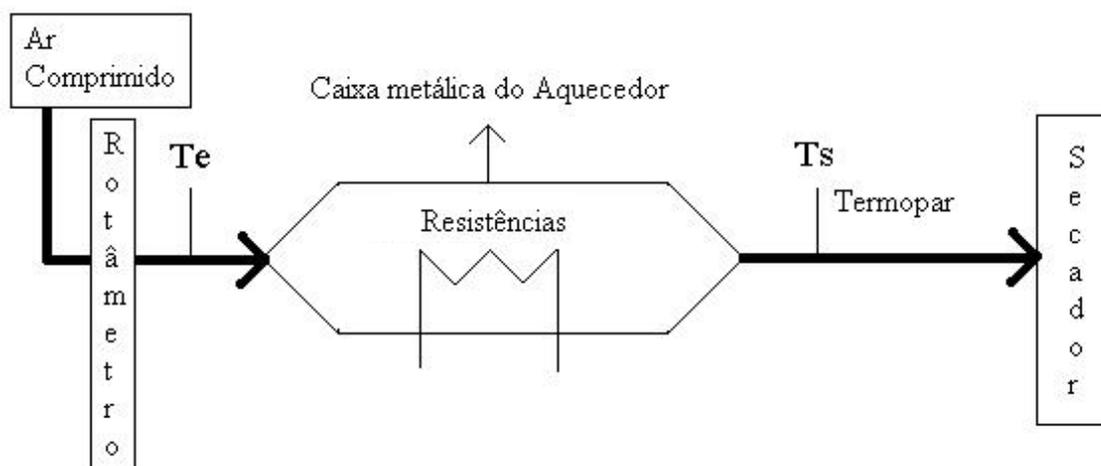


Figura 3.1 – Esquema do Aquecedor (DEFENDI *et al.*, 2015a)

3.2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu nos seguintes passos, cujos resultados foram obtidos durante o Mestrado (DEFENDI, 2013):

- 1) regulou-se a vazão de ar em 100 L/min;
- 2) mediu-se a temperatura de entrada do ar no aquecedor (T_{en}) e do ar ambiente com o psicrômetro;
- 3) acionou-se à resistência uma voltagem tal que a temperatura na saída do aquecedor (T_{sa}) atingisse 53 °C;
- 4) logo que a temperatura do ar atingiu 53 °C (temperatura inicial), a voltagem foi ajustada na posição de 6% (6,6 V – faixa de tensão de 0 a 110 V) e o cronômetro foi acionado simultaneamente;
- 5) mediu-se T_{sa} em função do tempo até se atingir um valor constante (regime permanente) utilizando o termopar situado logo após o aquecedor bem na entrada do secador;
- 6) repetiram-se os itens 1, 2, 3, 4 e 5 para cada condição de voltagem, de vazão de ar e de temperatura inicial de T_{sa} como apresentadas pela Tabela 3.1.

As vazões de 100 e 200 L/min foram escolhidas para ajustar o modelo, pois são valores que estão na faixa a ser utilizada nos experimentos de secagem. Para cada vazão, foram assumidos valores pequenos, médios e altos para a voltagem aplicada na resistência do aquecedor. A voltagem máxima tomada foi assumida de forma que a temperatura do ar não ultrapassasse 65 °C, pois isto poderia danificar o material da tubulação do ar (PVC). As temperaturas iniciais foram tomadas de forma que em alguns casos, dependendo da voltagem aplicada, o ar seria resfriado ou aquecido. Assim, obtiveram-se dados de aquecimento e resfriamento do ar inicialmente nas maiores e menores temperaturas. Em alguns casos, a temperatura inicial de um experimento foi a

temperatura de equilíbrio de um experimento realizado anteriormente no mesmo dia e em sequência.

Tabela 3.1 – Condições dos Experimentos

Vazão de ar de 100 L/min			Vazão de ar de 200 L/min		
Experimento	Voltagem	T _{sa} Inicial	Experimento	Voltagem	T _{sa} Inicial
	(%)	(°C)		(%)	(°C)
1	6	53	14	9	63
2	6	44	15	10	25
3	7	42	16	10	56
4	9	56	17	13	65
5	9	62	18	15	25
6	17	60	19	18	55
7	20	22	20	29	32
8	22	42	21	29	30
9	22	62	22	30	63
10	25	25	23	35	29
11	25	49	24	35	52
12	25	40	25	35	32
13	26	52			

Defendi *et al.*, 2015a

3.2.3 Modelo Matemático

Para se obter um modelo matemático para o sistema de aquecimento do ar, faz-se um balanço de energia térmica na caixa do aquecedor, representado pela equação:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Energia} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Entrada de} \\ \text{Energia no} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Energia do} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Geração de} \\ \text{Energia} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Para este sistema, considera-se que:

- As propriedades físicas como o calor específico do ar, a condutividade térmica da caixa do aquecedor e a resistência do aquecedor são constantes com o tempo.
- O material metálico da caixa do aquecedor é um bom condutor.
- A temperatura de saída do ar é igual a temperatura da caixa do aquecedor.

Com essas considerações, cada termo do balanço de energia vai resultar em:

$$\begin{bmatrix} \text{Entrada de} \\ \text{Energia no} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} = \dot{m}_{ar} c p_{ar} (T_{en} - T_{sa}) = -\dot{m}_{ar} c p_{ar} (T_{sa} - T_{en}) \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Energia do} \\ \text{Sistema} \end{bmatrix} = h \cdot A_s (T_{sa} - T_{amb}) \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Geração de} \\ \text{Energia} \end{bmatrix} = \frac{V_o^2}{R} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Energia} \end{bmatrix} = \frac{dE}{dt} = m_{caixa} c p_{caixa} \frac{dT_{caixa}}{dt} = m_{caixa} c p_{caixa} \frac{dT_{sa}}{dt} \quad (3.5)$$

Em que \dot{m}_{ar} é a vazão mássica do ar, $c p_{ar}$ é o calor específico do ar, T_{en} é a temperatura do ar na entrada do secador, T_{sa} é a temperatura do ar na saída do aquecedor, h é o coeficiente convectivo de transferência de calor, A_s é a área superficial da caixa do aquecedor, T_{amb} é a temperatura ambiente, V_o é a voltagem aplicada, R é o valor da resistência do aquecedor, m_{caixa} é a massa da caixa do aquecedor, $c p_{caixa}$ é o calor específico da caixa, t é o tempo e E é a energia.

Assim, a entrada de energia líquida no sistema é calculada pelo calor sensível inerente a variação da temperatura de entrada e saída do ar. Enquanto isso, a saída de energia é representada pelo calor perdido por convecção natural pelo ar para a vizinhança. A temperatura média do ar que abandona o aquecedor se aproxima da

temperatura do aquecedor, sendo esta temperatura usada na lei de resfriamento de Newton. Já a geração de energia é fornecida pelo calor gerado pela resistência do aquecedor. Por fim, o acúmulo de energia do sistema é a variação de energia pelo tempo na caixa do aquecedor. Substituindo cada termo no balanço global de energia, obtém-se:

$$m_{caixa}c_{pcaixa} \frac{dT_{sa}}{dt} = -\dot{m}_{ar} \cdot c_{par} \cdot (T_{sa} - T_{en}) - h \cdot As \cdot (T_{sa} - T_{amb}) + \frac{V_o^2}{R} \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) representa a equação do modelo dinâmico. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma resultando no modelo proposto por Coutinho *et al.* (2004) para o estado em regime permanente:

$$\frac{V_o^2}{R} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{par} \cdot (T_{sa} - T_{en}) + h \cdot As \cdot (T_{sa} - T_{amb}) \quad (3.7)$$

A equação do modelo (3.6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$A \frac{dT_{sa}}{dt} = \frac{V_o^2}{R} - B \cdot (T_{sa} - T_{en}) - C \cdot (T_{sa} - T_{amb}) \quad (3.8)$$

Em que A, B e C são os parâmetros do modelo determinados dados por:

$$A = m_{caixa}c_{pcaixa} \quad (3.9)$$

$$B = \dot{m}_{ar} \cdot c_{par} \quad (3.10)$$

$$C = h \cdot As \quad (3.11)$$

A solução da equação do modelo (Equação 3.8) resulta em (Defendi *et al.*, 2015a):

$$T_{sa} = e^{\frac{t}{C_1}}(C_2 + T_{sa_0}) - C_2 \quad (3.12)$$

Em que C1 e C2 são dadas por:

$$C_1 = -\frac{A}{B+C} \quad (3.13)$$

$$C_2 = -\frac{\frac{V_o^2}{R} + B \cdot T_{en} + C \cdot T_{amb}}{B+C} \quad (3.14)$$

O valor da massa específica e calor específico do ar (estimados na temperatura média do sistema) podem ser obtidos da literatura de Perry e Green (1998), para se

estimar o valor do parâmetro B, que para as vazões de 100 e 200 L/min resultou respectivamente em 2,02 e 4,04 W/K.

Os valores dos parâmetros A e C foram ajustados com base nos dados experimentais da voltagem aplicada, da temperatura de entrada do ar no aquecedor, da temperatura ambiente e da temperatura do ar na saída do aquecedor.

Para isso, utilizou-se o software Matlab[®] para resolver a equação do modelo, cujos resultados foram comparados com os dados experimentais. Os parâmetros foram ajustados ao se minimizar a seguinte função objetivo (somatório dos mínimos quadrados) por meio da função ‘*fminsearch*’:

$$\phi = \sum (T_{exp} - T_{cal})^2 \quad (3.15)$$

Em que T_{exp} é a temperatura na saída do aquecedor experimental e T_{cal} é o valor desta temperatura estimada pelo modelo. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio dos seguintes parâmetros estatísticos:

$$\chi^2 = \frac{\sum (T_{exp} - T_{cal})^2}{No - Nc} \quad (3.16)$$

$$REQM = \left(\frac{1}{No} \sum (T_{cal} - T_{exp})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

$$EF = \frac{\sum (T_{exp} - \bar{T}_{exp})^2 - \sum (T_{cal} - T_{exp})^2}{\sum (T_{exp} - \bar{T}_{exp})^2} \quad (3.18)$$

Em que χ^2 é o qui-quadrado reduzido, $REQM$ é a raiz do erro quadrático médio, EF é a eficiência do modelo, No é o número de observações, Nc é o número de constantes do modelo e \bar{T}_{exp} é o valor da temperatura média experimental na saída do aquecedor. De acordo com Meisami-asl *et al.* (2010), o valor do qui-quadrado reduzido determina o quão bom foi o ajuste e representa a raiz quadrada do desvio entre os dados experimentais e os calculados pelo modelo. Assim, o melhor valor para χ^2 é o menor valor possível. Estes autores ainda acrescentam que o valor de $REQM$ representa o desvio entre os valores experimentais e os estimados pelo modelo e EF está relacionada com a habilidade do modelo descrever o sistema. Idealmente, é interessante obter zero para o valor de $REQM$ e 1,0 para o valor de EF .

Adicionado a isso, estimou-se o valor de h por meio do parâmetro C e comparou-o com valores da literatura. De acordo com Incropera *et al.* (2008), os valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção natural para gases está entre 2 e 25 W/m²K. Segundo Bird *et al.* (2002), a ordem de grandeza para h para sistemas de troca térmica por convecção livre entre gases está em torno de 3 a 20 W/(m²K). Para o caso de troca térmica de gases sendo um em escoamento (convecção forçada) e outro estacionário (convecção natural), a ordem de grandeza de h está entre 3 e 10 W/(m²K). Pela correlação proposta por Churchill e Chu (1975) para cilindros horizontais com 10 cm de diâmetro e para uma diferença de temperatura entre o gás aquecido e o ar ambiente de 1 a 40°C, o valor de h está compreendido entre 2 a 7,5 W/(m²K).

Por fim, simulou-se o processo com os parâmetros ajustados e calcularam-se os desvios entre a temperatura experimental do ar de saída do aquecedor e a temperatura estimada pelo modelo. Além disso, foi feito um experimento aquecendo-se o ar com perturbações alternadas durante 30 minutos numa vazão de 100 L/min. A cada 5 minutos, ajustava-se a posição da voltagem alternando entre 10 e 26%. O perfil de temperatura obtido deste experimento foi comparado com o esperado pelo modelo ajustado.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Validação do Modelo

O valor ajustado para o parâmetro C com a minimização da função objetivo foi de 1,105 W/K, o que resultou em um valor de 10,3 W/(m²K) para coeficiente convectivo de transferência de calor que esteve dentro da ordem de magnitude esperada. Enquanto isso, o valor do parâmetro A ajustado foi de 697,7 J/K. A Tabela 3.2 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos para cada ajuste e o valor médio destes parâmetros.

Tabela 3.2 – Parâmetros Estatísticos do Ajuste

Experimento	ϕ	χ^2	REQM	EF
1	23,9934	0,8569	0,8943	0,9892
2	1,4456	0,0761	0,2624	0,9981
3	1,5398	0,1283	0,3316	0,9929
4	6,9757	0,2405	0,4744	0,9972
5	27,6638	0,9221	0,9298	0,9897
6	3,4729	0,1929	0,4167	0,9946
7	8,0042	0,3638	0,5775	0,9929
8	2,5081	0,2787	0,4775	0,9751
9	1,0651	0,1183	0,3112	0,9894
10	7,4785	0,2412	0,4760	0,9975
11	6,8018	0,5232	0,6734	0,9722
12	3,4986	0,1749	0,3988	0,9960
13	2,9613	0,2692	0,4773	0,9806
14	31,9040	0,9384	0,9414	0,9917
15	1,2568	0,2514	0,4237	0,9450
16	19,2041	0,7682	0,8434	0,9881
17	27,1688	0,8233	0,8811	0,9923
18	0,7019	0,0780	0,2526	0,9919
19	12,9579	0,6820	0,7855	0,9827
20	20,8213	0,9915	0,9515	0,9790
21	15,1500	0,6312	0,7633	0,9895
22	1,4547	0,1818	0,3814	0,9804
23	67,9101	1,9403	1,3548	0,9838
24	5,8490	0,4874	0,6464	0,9728
25	37,9027	1,1486	1,0406	0,9893
Média	13,5876	0,5323	0,6387	0,9861

Defendi *et al.* (2015a)

Observa-se destes resultados que os experimentos 2 e 18 apresentaram os melhores valores dos parâmetros estatísticos e, por consequência, o melhor ajuste. Por outro lado, os piores ajustes foram dos experimentos 23 e 25. Contudo, apesar desta diferença entre os valores destes parâmetros, verifica-se que esta diferença é

proveniente ao número de observações dos experimentos 23 e 25 que são maiores em comparação ao número de observações dos experimentos 2 e 18.

Quanto maior o número destas observações, maiores são as quantidades de termos que se somam nas equações que possuem somatórios referentes a cada parâmetro estatístico. Isto faz com os valores destes parâmetros aumentem ainda que em suas equações há termos divididos por N_o para compensar a quantidade de termos observados. Esta observação é reforçada pelo comportamento dos gráficos referentes às Figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 que apresentam o perfil de temperatura estimado pelo modelo nos experimentos 2, 18, 23 e 25 respectivamente. Nestas figuras observa-se que apesar dos parâmetros estatísticos e da função objetivo terem sido piores para os experimentos 23 e 25, observa-se que o modelo representou bem o comportamento do sistema ao se comparar com os resultados obtidos para os melhores ajustes obtidos, experimentos 2 e 18, os quais possuem menores quantidades de observações.

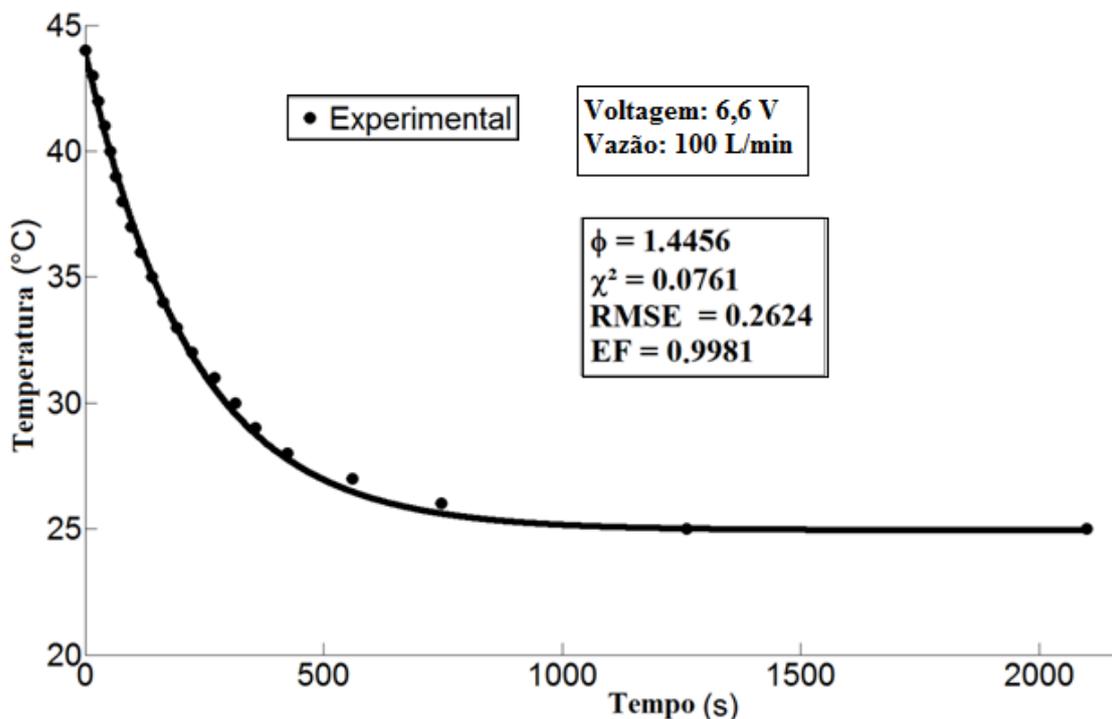


Figura 3.2 – Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 2
(DEFENDI *et al.*, 2015a)

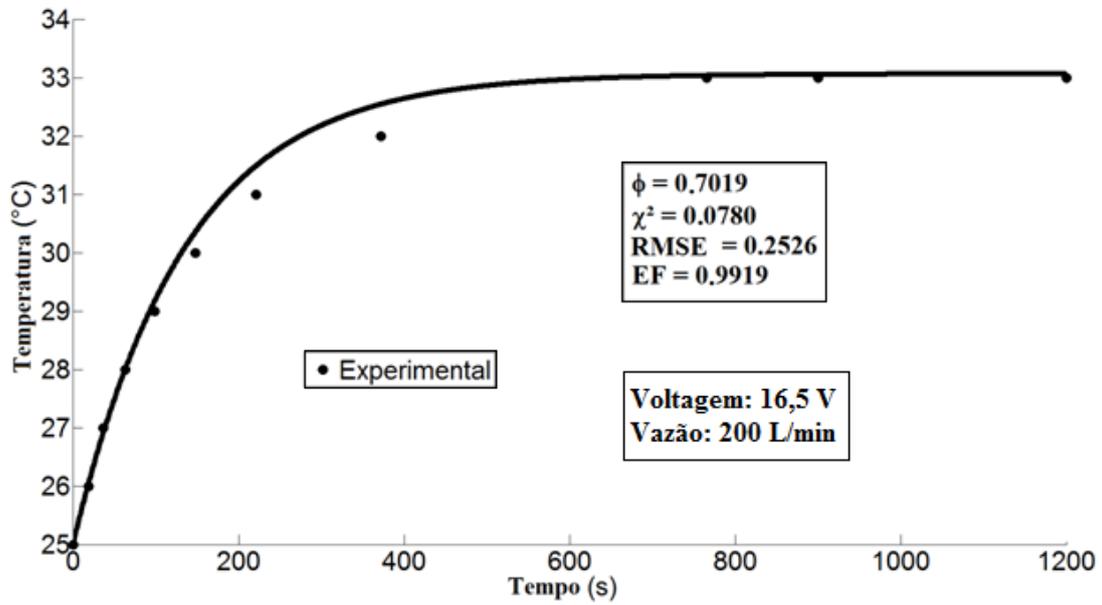


Figura 3.3 – Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 18
(DEFENDI *et al.*, 2015a)

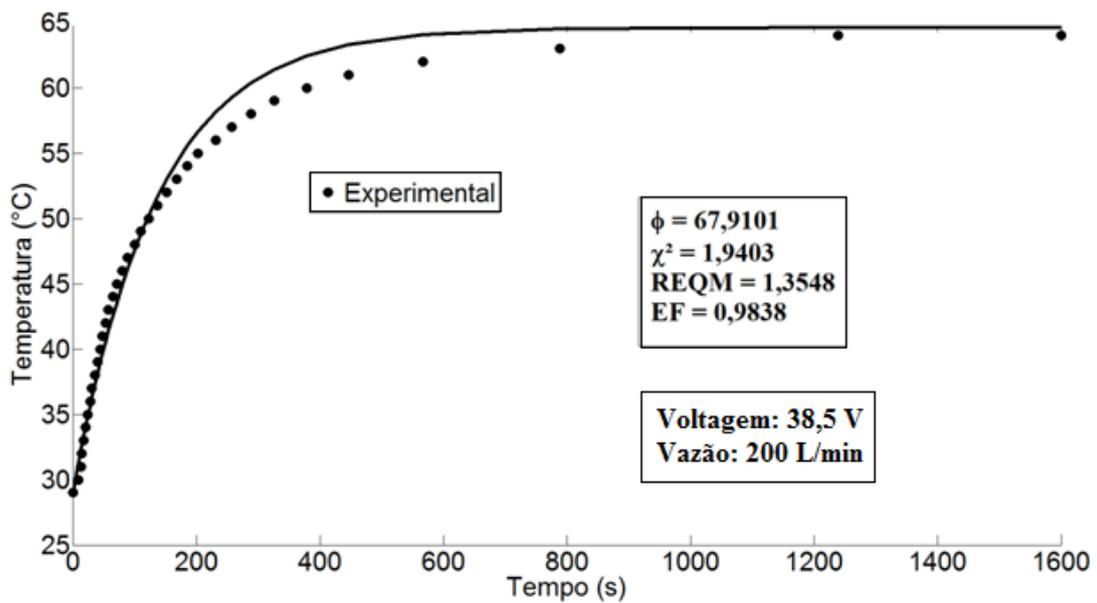


Figura 3.4 – Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 23
(DEFENDI *et al.*, 2015a)

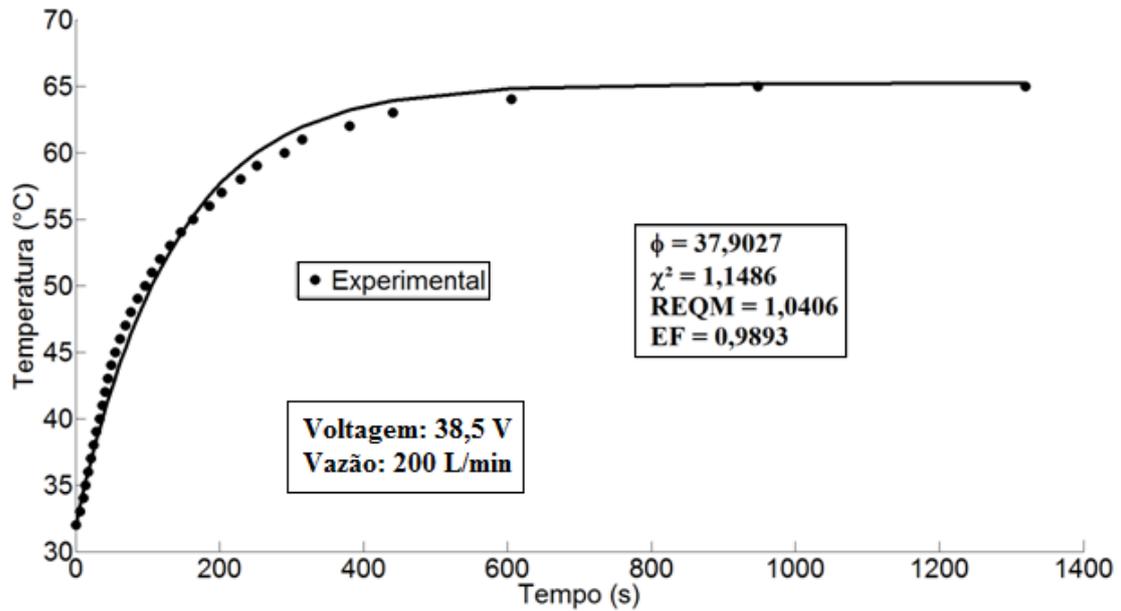


Figura 3.5 – Perfil de Temperatura na Saída do Secador para o Experimento 25
(DEFENDI *et al.*, 2015a)

Além disso, observou-se que o modelo conseguiu representar todos os resultados obtidos experimentalmente com um desvio global em torno de 3,0% como mostra a Figura 3.6. Este desvio se encontra próximo a precisão do termopar fornecida pelo fabricante ($\pm 2,2$ °C) para a faixa de temperatura estudada neste trabalho.

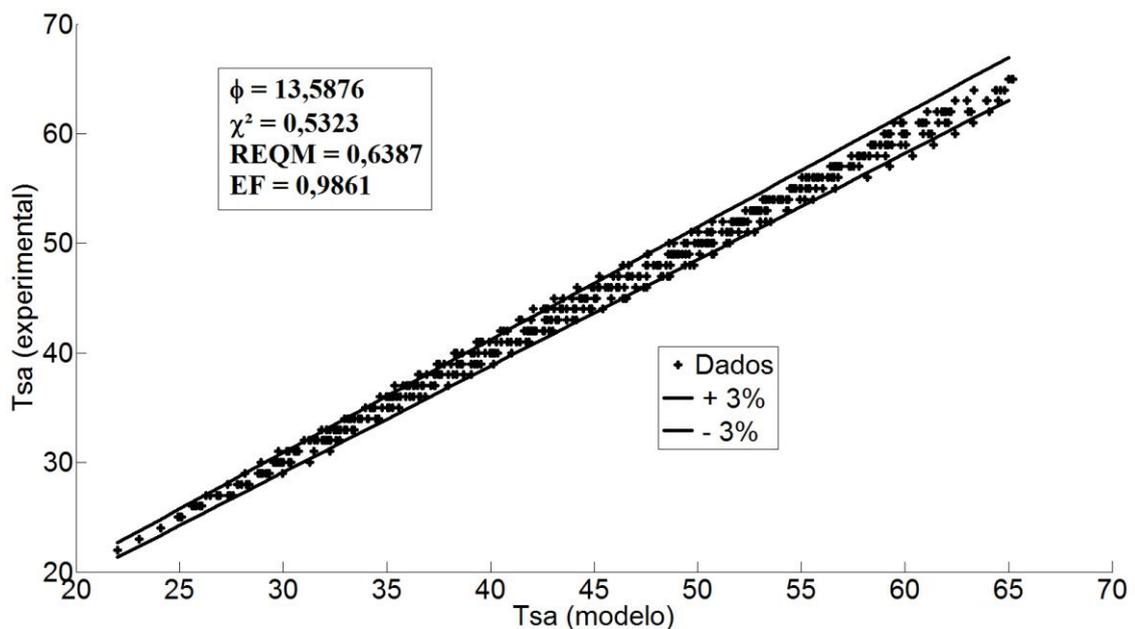


Figura 3.6 – Desvio Global do Modelo (DEFENDI *et al.*, 2015a)

Observou-se também que o modelo representou bem o sistema com perturbações alternadas tipicamente usadas nas secagens intermitentes. A Figura 3.7 apresenta o perfil de temperatura na saída do aquecedor (T_{sa}) para a perturbação alternada da voltagem entre 10 e 26% a cada 5 minutos.

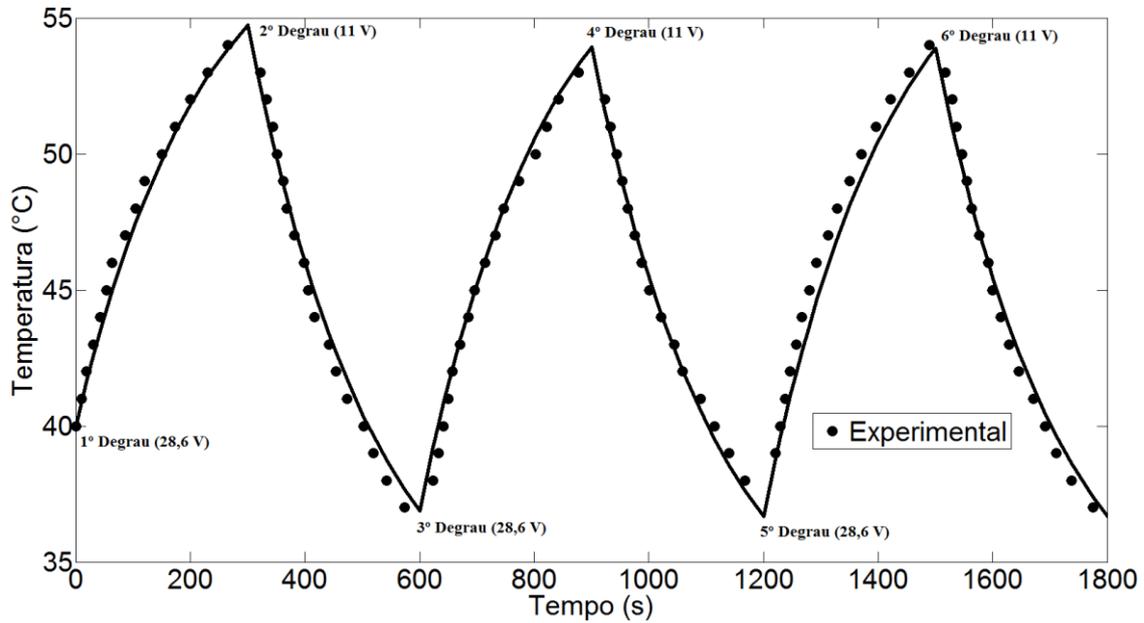


Figura 3.7 – Aquecimento do Ar com Perturbações Alternadas (DEFENDI *et al.*, 2015a)

Foi possível estimar este perfil de temperatura com um desvio global em torno de 3,0% (Figura 3.8), valor que está dentro da precisão do termopar para a faixa de temperatura estudada.

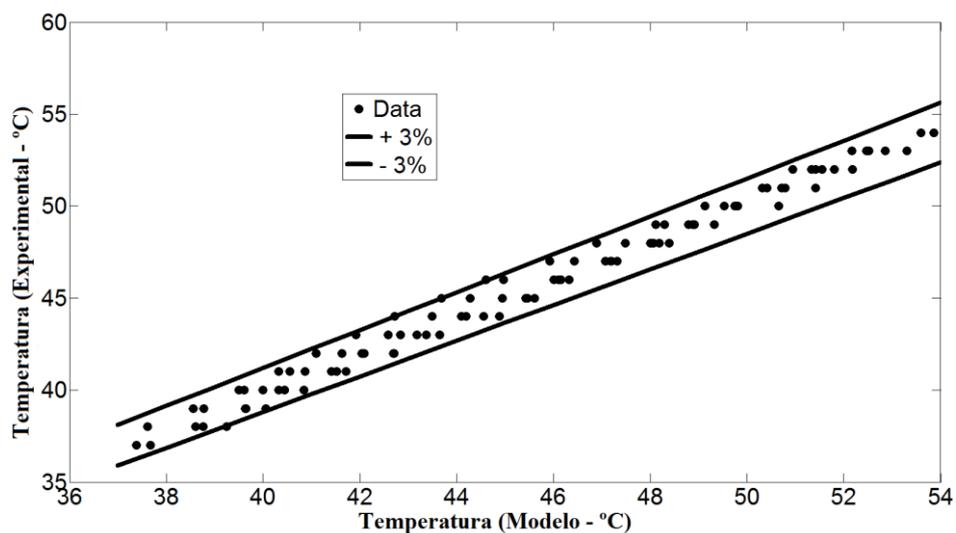


Figura 3.8 – Desvio Global para o Sistema com Perturbações Alternadas (DEFENDI *et al.*, 2015a)

3.4 Conclusão

Os resultados obtidos revelaram que o modelo representa adequadamente o comportamento do sistema operando em regime transiente e apontam que este modelo pode ser utilizado para fins de simulação, análise e projeto de aquecedores elétricos. O valor do parâmetro C obtido por ajuste foi de 1,105 W/K, resultando em um valor do coeficiente convectivo de transferência de calor em torno de 10,3 W/(m²K), situando-se dentro da ordem de grandeza encontrada na literatura. O modelo validado representou a temperatura de saída do aquecedor com um desvio em torno de 3,0 % estando dentro da precisão do termopar fornecida pelo fabricante. Além disso, o modelo mostrou-se adequado para representar sistemas com variações oscilatórias na temperatura tipicamente encontradas nas operações de secagem intermitente estudadas neste trabalho.

4. CINÉTICA DE SECAGEM DA SOJA EM CAMADA DELGADA

4.1 Introdução e Objetivos

Recentemente, muitos produtos fabricados necessitam de pelo menos um processo de secagem (CHEN 2002). A secagem é um processo industrial complexo onde os transportes de massa e de energia entre a fase gasosa e o sólido ocorrem simultaneamente (FREGOLENTE *et al.*, 2004). De acordo com Sander *et al.* (2010), não existe um meio simples de descrever a cinética de secagem de um material e essas cinéticas são diferentes para sistemas nas mesmas condições (temperatura e umidade inicial do material), mas com diferentes tipos de secadores.

Neste contexto, modelos matemáticos validados com dados experimentais de cinética de secagem têm sido vastamente usados na simulação e otimização da secagem e no projeto de secadores. Segundo Kucuk (2014), as curvas de secagem são geralmente representadas por modelos teóricos, semiteóricos ou empíricos. Em geral, estes projetos visam os menores custos possíveis para se atingir o teor de umidade seguro para se estocar o produto. A estimativa dos coeficientes de transporte de massa por meio destes modelos se faz importante, pois a partir deles é possível investigar os efeitos que controlam o processo.

Como visto na revisão bibliográfica, muitos são os efeitos que podem controlar o processo de secagem, sendo que para os produtos agrícolas observou-se que o transporte interno de umidade dentro destes materiais limita o processo (AKPINAR *et al.*, 2003; ARABHOSSEINI *et al.*, 2009; BENALI, 2012; CHINENYE *et al.*, 2010; CIL e TOPUZ, 2010; DEFENDI *et al.*, 2015c; DEMIR *et al.*, 2007; MEISAMI-ASL *et al.*, 2010; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; SILVA *et al.*, 2014; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Num contexto geral, observou-se que as taxas de secagem tendem a aumentar com o aumento da temperatura do ar (AKPINAR *et al.*, 2003; BABALIS e BELESSIOTS, 2004; BENALI, 2012; BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; CHIN *et al.*, 2009; CHINENYE *et al.*, 2010; CIL e TOPUZ, 2010; DEMIR *et al.*, 2007; KASHANINEJAD *et al.*, 2007; MEISAMI-ASL *et al.*, 2010; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; PARDESHI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2014; SIMAL e ROSSELLO, 1994; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012), da velocidade do ar (BENALI, 2012; BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; BORGES, 2002; CIL e TOPUZ, 2010; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012), da umidade

inicial do produto (BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; OLIVEIRA e ROCHA, 2007) e da área superficial em contato com o ar (MEISAMI-ASL *et al.*, 2010).

Na validação de modelos para estimar o valor dos coeficientes globais de transferência de massa no processo de secagem, alguns autores consideram este coeficiente como uma função apenas da temperatura do ar e da umidade do material (ELIAS *et al.*, 2002). Outros autores também consideram o coeficiente de transferência de massa como uma função da velocidade do ar (BORGES, 2002; SILVA *et al.*, 2004; HOSSAIN e BALA, 2002). Geralmente, modelos para prever o valor deste coeficiente são validados com dados obtidos em secagem em camada delgada e depois estes modelos são utilizados nas simulações em leito profundo (MANCINI *et al.*, 2002 b).

A camada delgada é muito utilizada para levantar a cinética de secagem de materiais, pois é possível avaliar separadamente a influência de cada efeito sobre o processo de secagem. Alguns autores obtiveram bons resultados ao se utilizar modelos ajustados em camada delgada para auxiliar modelos de camada profunda (BORGES, 2002; MANCINI *et al.*, 2002 b).

Neste contexto, o principal objetivo desse capítulo é propor e validar modelos que estimem o valor do coeficiente global de transferência de massa no processo de secagem em camada delgada como função de todas as propriedades que influenciem o processo para posteriormente aplicar este modelo na solução do modelo a duas fases na secagem de soja em leito de camada espessa para fins de otimização. Além disso, busca-se estudar a influência de cada propriedade (temperatura do ar, velocidade do ar e umidade inicial do grão) sobre as taxas de secagem. Visa-se validar modelos empíricos e semiteóricos generalizados que estimem as curvas de secagem em cada condição experimental estudada e que estimem os valores dos coeficientes globais de transferência de massa necessários nas simulações de processos de leito profundo.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Equipamentos e Materiais

Os equipamentos utilizados neste experimento foram um secador composto por: um ventilador, um tubo com 4 resistências (uma de 2500 W, a segunda de 2200 W e as

outras duas de 3000 W) sendo a primeira com um regulador de tensão (VARIAC) para ajuste fino, uma bandeja retangular de dimensões de 43 por 42 cm, uma mesa de suporte para a bandeja e uma válvula borboleta para controle da vazão de ar. Além disso, utilizou-se um termopar do tipo K, uma peneira circular (Tyler 9 – abertura 2 mm) de diâmetro de 20 cm, um psicrômetro digital, um anemômetro, uma balança com leitura mínima de 0,01 g, um cronômetro, soja do tipo EMBRAPA 48 fornecida pela COCAMAR, um papelão com mesma dimensão que a bandeja com um furo circular no meio de mesmo raio da peneira e uma estufa que opera a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O ar é proveniente do ambiente e segue até a peneira por meio do tubo que liga o ventilador e a mesa que dá suporte à bandeja. As resistências dentro do tubo são usadas para aquecer o ar no processo de secagem. A soja é posta dentro da peneira alocada no centro do papelão sobre a bandeja a fim de que o fluxo de ar passe apenas dentro da peneira. Este esquema está demonstrado pela Figura 4.1 e o secador pelas Figuras 4.2 e 4.3.

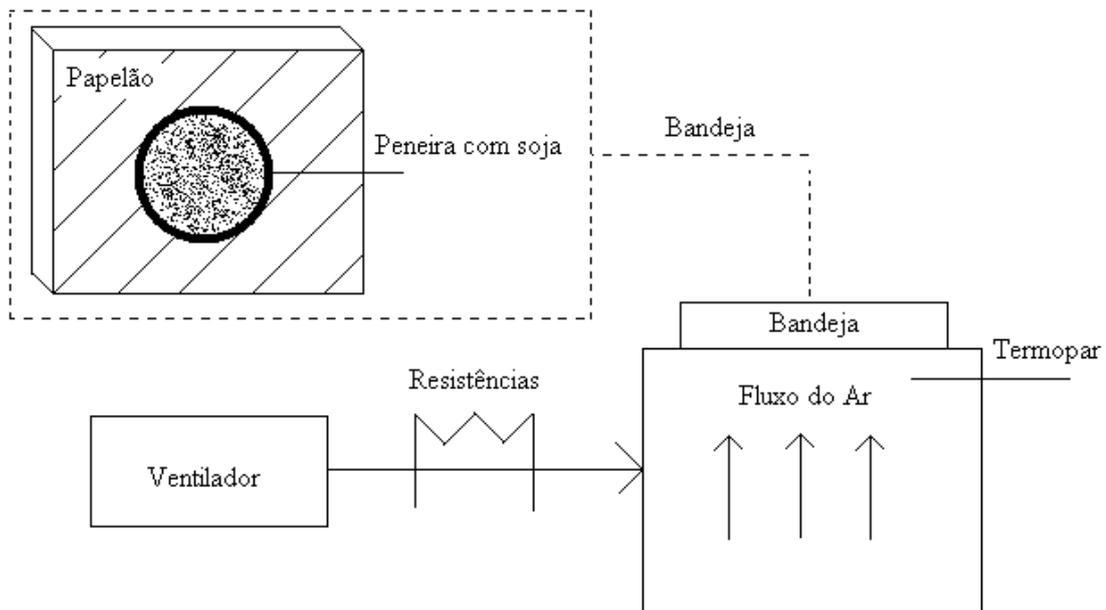


Figura 4.1 – Esquema do Secador de Bandeja

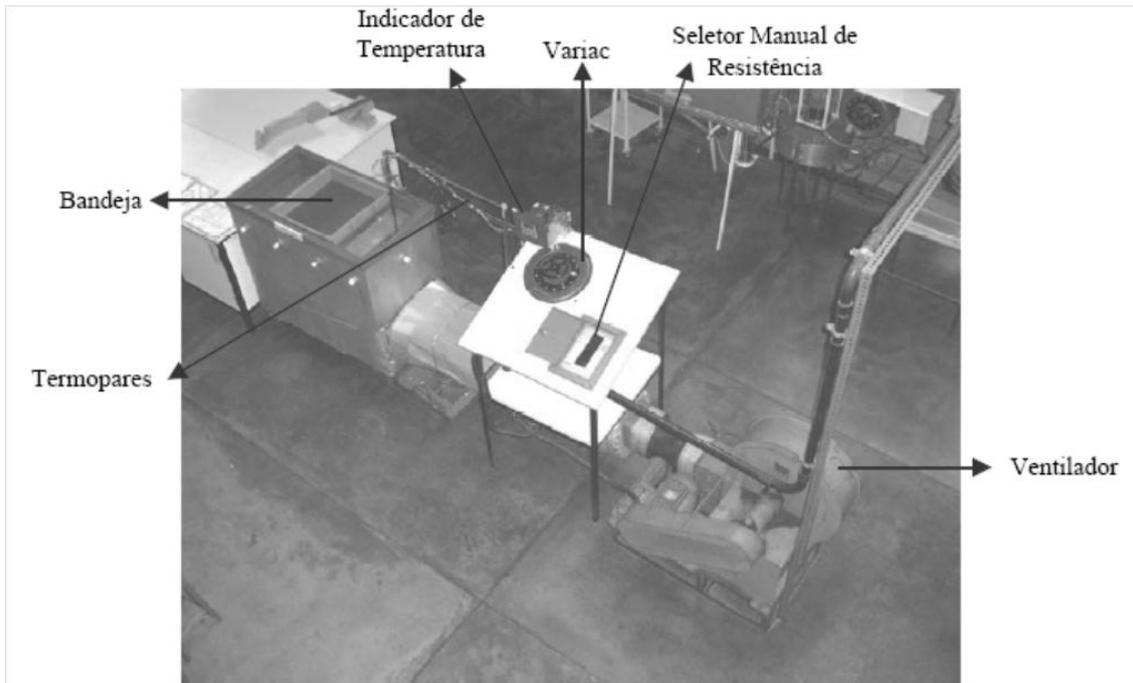


Figura 4.2 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 1 (LUZ, 2006)

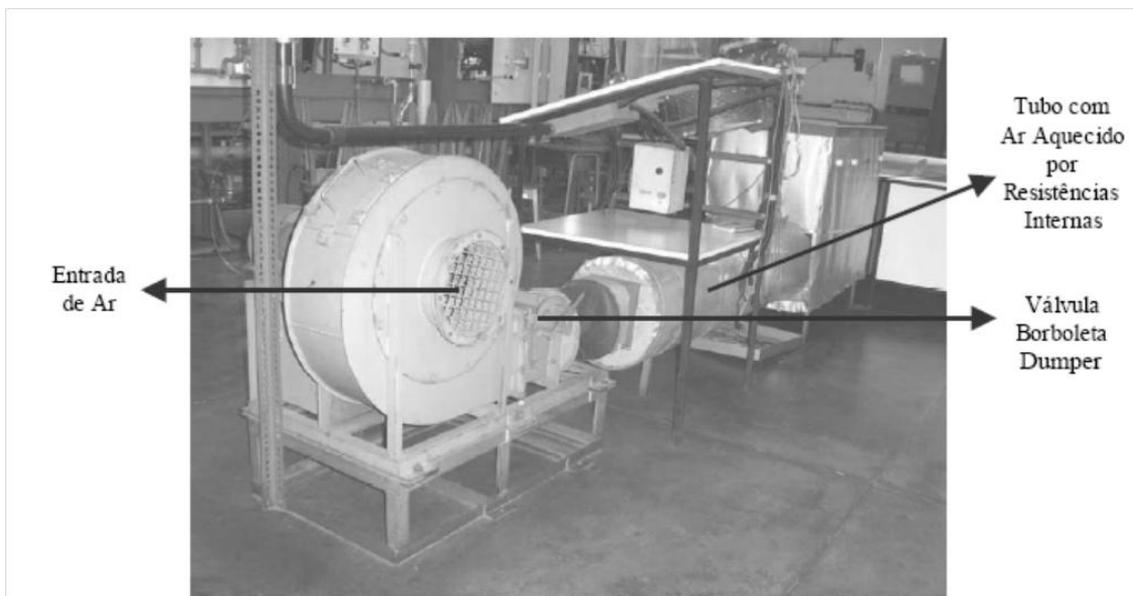


Figura 4.3 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 2 (LUZ, 2006)

4.2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu nos seguintes passos:

- 1) liga-se o ventilador e as resistências e ajustam-se a velocidade e a temperatura do ar sobre a peneira conforme as condições apresentadas pela Tabela 4.1;
- 2) mede-se a massa da peneira até que se atinja um valor constante com o tempo;
- 3) mede-se com o psicrômetro a temperatura e umidade relativa tanto do ambiente quanto do ar aquecido;
- 4) pesam-se quatro amostras de soja que são levadas em estufa a 105 °C por 24 horas para se determinar o teor de umidade inicial;
- 5) cobre-se a superfície da peneira com uma monocamada de 100g de soja e mede-se a massa do sistema peneira mais soja;
- 6) coloca-se a peneira com soja sobre a bandeja e o papelão e aciona-se o cronômetro, dando início a secagem da mesma;
- 7) a massa de soja mais a peneira é medida ao longo do tempo durante 2 horas;
- 8) após a secagem, pesam-se quatro amostras de soja seca e leva-se essas amostras a estufa a 105 °C por 24 horas para se determinar o teor de umidade final;

Os procedimentos dos itens de 1 a 8 são repetidos para cada condição apresentada pela Tabela 4.1. Os experimentos foram realizados em duplicata e em sequência randômica. A soja fornecida pela COCAMAR estava inicialmente com aproximadamente 11% de umidade em base seca. Para se atingir as condições de umidades iniciais apresentadas pela Tabela 4.1, as amostras foram umidificadas. Calculou-se a quantidade de água necessária a ser acrescentada para que as amostras de soja chegassem ao nível de umidade desejado. Em sequência, adicionou-se, em um béquer de plástico essa quantidade de água na amostra de soja agitando-se o sistema continuamente por 5 minutos. Após este procedimento, aguardou-se em torno de 2 horas para que toda a umidade fosse absorvida.

A faixa de temperatura trabalhada foi de 30 a 60°C, pois esta foi a faixa utilizada nos experimentos em leito de camada espessa. Não serão tomadas temperaturas acima de 60 °C, pois a tubulação de PVC do secador de leito profundo pode ser danificada e esse é o valor que pode ser atingido com a soja para fins industriais segundo Silva *et al.* (2008). Com a operação intermitente, pode ser que a qualidade do grão não sofra muitas

alterações ao se trabalhar alternadamente com temperaturas maiores que 60 °C e frias. Contudo, o escopo deste trabalho não é avaliar a qualidade do grão. Assim, não será ultrapassada a temperatura aconselhada.

Tabela 4.1. Condições Experimentais

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Y _{s0} (Base seca)
30	0,6	0,23
40	0,6	0,23
50	0,6	0,23
60	0,6	0,23
30	0,6	0,18
40	0,6	0,18
50	0,6	0,18
60	0,6	0,18
30	0,6	0,13
40	0,6	0,13
50	0,6	0,13
60	0,6	0,13
30	0,6	0,20
30	1,2	0,20
30	2,5	0,20
60	1,2	0,23
60	2,5	0,23

Para cada temperatura foram feitos experimentos com umidades iniciais de 0,23, 0,18 e 0,13 em base seca, que são valores que abrangem a faixa de valores nos quais a soja chega da lavoura. A influência da velocidade foi avaliada apenas nos casos de

maior e menor temperatura. Os valores de 0,6 e 1,2 m/s equivalem às velocidades no secador de leito em camada espessa quando a vazão do ar é respectivamente 100 e 200 L/min. Essa faixa de vazão será utilizada nos experimentos em camada profunda. Experimentos com velocidades de 2,5 m/s foram realizados para verificar se a influência da velocidade é significativa quando se usa um pouco mais que o dobro da velocidade máxima da faixa de 0,6 e 1,2 m/s. Vale ressaltar que cada condição experimental foi realizada em duplicata.

4.2.3 Modelos Matemáticos de Parâmetros Concentrados

Para se propor um modelo para o cálculo do coeficiente global de transferência de massa, parte-se de um balanço de massa de água em um grão de soja:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Entrada de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Massa} \\ \text{do sistema} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Geração de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Não há entrada de massa de água no grão de soja, admitindo-se que o ar está longe da condição de saturação para que haja condensação de água em seguida por umidificação da soja. Além disso, não ocorrem reações químicas no sistema de secagem, assim não há geração de água no grão de soja. Por fim, o balanço de massa se resume a:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Massa} \\ \text{do sistema} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

O acúmulo de massa de água no sistema é dado pela variação de massa de água com o tempo. Enquanto isso, a saída de massa de água do sistema pode ser calculada pelo fluxo mássico de água que sai do sistema multiplicada pela área superficial do grão como representado abaixo:

$$\frac{dm_{\text{água}}}{dt} = -N_{\text{água}} \cdot A_{S_{\text{grão}}} \quad (4.3)$$

Em que $m_{\text{água}}$ é a massa de água contida dentro do grão e $N_{\text{água}}$ é o fluxo mássico de água que sai do sistema dado por:

$$N_{\text{água}} = Ks \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.4)$$

Em que K_s é o coeficiente global de transferência de massa, cuja unidade é dada em $[M.L^{-2}T^{-1}]$, Y_s é a umidade da soja em base seca e Y_{se} é o valor da umidade de equilíbrio. Substituindo a Equação (4.4) na Equação (4.3), obtém-se:

$$\frac{dm_{\text{água}}}{dt} = -K_s \cdot A_{\text{grão}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.5)$$

Sabe-se que

$$m_{\text{água}} = Y_s \cdot m_{ss} \quad (4.6)$$

Substituindo a Equação (4.6) na Equação (4.5), obtém-se:

$$\frac{d(Y_s \cdot m_{ss})}{dt} = -K_s \cdot A_{\text{grão}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.7)$$

Como a massa do sólido seco é constante com o tempo, segue-se que:

$$\frac{dY_s}{dt} = -\frac{K_s \cdot A_{\text{grão}}}{m_{ss}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.8)$$

A área superficial do grão é difícil de medir. Assim, assume-se a seguinte variável K , que será chamada, neste trabalho, como coeficiente de referência de transferência de massa:

$$K = \frac{K_s \cdot A_{\text{grão}}}{m_{ss}} = [T^{-1}] \quad (4.9)$$

Assim, a equação do modelo será dada por:

$$\frac{dY_s}{dt} = -K \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.10)$$

Este modelo é uma analogia a lei de Newton do resfriamento e esta expressão já havia sido proposta por Lewis (1921). Esta equação também tem sido usada por alguns autores no estudo de secagem de produtos agrícolas em camada delgada (ELIAS *et al.*, 2002). De acordo com Henderson e Perry (1955), esta equação descreve a remoção de umidade do material durante o período onde as taxas de secagem são decrescentes.

A solução analítica do modelo (Equação 4.10) pode ser difícil de ser obtida, pois o valor de K geralmente varia ao longo do tempo de secagem. Alguns autores (DEMIR *et al.*, 2007; MEISAMI-ASL *et al.*, 2010) assumem uma equação empírica que descreve as cinéticas de secagem e estes autores ajustam parâmetros por meio de dados

experimentais. Os modelos empíricos utilizados nas simulações das curvas de secagem deste trabalho estão apresentados na Tabela 4.2. A unidade do tempo foi tomada em segundos durante os ajustes e as simulações destes modelos.

Tabela 4.2. Modelos Matemáticos Empíricos de Parâmetros Concentrados

Modelo	Equação
Newton	$YR = \exp(-kt)$
Page	$YR = \exp(-kt^n)$
Henderson e Pabis	$YR = a \exp(-kt)$
Logarítmico	$YR = a \exp(-kt) + c$
Dois Termos	$YR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$
Aproximação da Difusão	$YR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Midilli <i>et al.</i>	$YR = a \exp(-kt^n) + bt$

Referência: Meisami-asl *et al.* (2010).

YR é a razão de umidade $(Y_s - Y_{se}) / (Y_{s0} - Y_{se})$, sendo Y_{s0} o teor de umidade inicial do grão de soja. Comumente, estas expressões empíricas são ajustadas para cada condição de secagem (temperatura do ar, velocidade e umidade) e em alguns casos expressões adicionais são incrementadas para acrescentar a influência da temperatura nas curvas de secagem. Outros estudos negligenciam ou consideram a influência de propriedades como a velocidade do ar e a umidade inicial do grão nestas equações. Neste trabalho, os parâmetros foram ajustados para cada condição operacional relacionada à Tabela 4.1. Na sequência, expressões generalizadas foram ajustadas para descrever o comportamento das cinéticas de secagem em todas as condições de temperatura, velocidade e umidade analisadas. Os formatos destas expressões generalizadas foram tomados com base nos dados experimentais obtidos.

É interessante ajustar expressões generalizadas porque durante os processos industriais e durante os experimentos a serem realizados em camada espessa no próximo capítulo, as condições do ar de secagem podem variar durante o processo e ao longo da posição do secador. Assim, para fins de otimização e projeto de secadores são

necessários modelos que descrevam a cinética de secagem para uma faixa operacional das condições do ar de secagem e da umidade do material.

Contrariamente a camada delgada, os processos industriais geralmente ocorrem em camada espessa. Alguns autores (MANCINI *et al.*, 2002) obtiveram boas simulações de secagem em leito profundo usando valores estimados do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_s a$) por meio de modelos ajustados com resultados obtidos em camada delgada. Este coeficiente de transferência de massa pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$K_s a = K \cdot \rho_{ss} \quad (4.11)$$

Em que ρ_{ss} é a massa específica da soja seca. Neste contexto, o modelo matemático (Equação 4.10) foi resolvido numericamente e os valores de K foram estimados por meio das seguintes equações generalizadas:

$$K_1 = \frac{(A_1 + A_2 \cdot T) \cdot Y_s^2 + (A_3 + A_4 \cdot T) \cdot Y_s + (A_5 + A_6 \cdot T)}{Y_{s0} - Y_s + (A_7 + A_8 \cdot T)} \quad (4.12)$$

$$K_2 = A_1 Y_{s0} + A_2 \cdot T + A_3 Y_s + A_4 Y_s^2 + A_5 \quad (4.13)$$

$$K_3 = \exp [-(A_1 + A_2 T + A_3 Y_{s0} + A_4 Y_{s0} T) Y_s^{A_5 + A_6 \cdot T}] \quad (4.14)$$

$$K_4 = (A_1 \cdot Y_{s0} + A_2 \cdot T + A_3) + (A_4 \cdot Y_{s0} + A_5 \cdot T + A_6) Y_s + (A_7 \cdot Y_{s0} + A_8 \cdot T + A_9) Y_s^2 \quad (4.15)$$

Em que A_i são os parâmetros do modelo e T é a temperatura do ar. Estas equações empíricas foram tomadas em base no comportamento dos dados experimentais relacionados às cinéticas de secagem. As curvas de cinética de secagem tipicamente apresentam um comportamento exponencial para produtos agrícolas. Contudo, expressões quadráticas também foram ajustadas devido ao comportamento similar. É importante ressaltar que todos estes modelos generalizados consideram a influência da temperatura do ar e da umidade inicial da soja.

4.2.4 Ajuste dos Parâmetros

O ajuste dos parâmetros foi feito ao se minimizar a seguinte função objetivo, que representa o somatório dos mínimos quadrados:

$$\phi = \sum (Y_{s_{exp}} - Y_{s_{cal}})^2 \quad (4.16)$$

Em que $Y_{S_{exp}}$ é o teor de umidade em base seca da soja obtido experimentalmente e $Y_{S_{cal}}$ é o valor deste teor calculado pelo modelo. Analogamente ao ajuste feito no capítulo 3, os parâmetros estatísticos χ^2 , $REQM$ e EF foram utilizados para analisar a qualidade do ajuste:

$$\chi^2 = \frac{\sum(Y_{S_{exp}} - Y_{S_{cal}})^2}{No - Nc} \quad (4.17)$$

$$REQM = \left(\frac{1}{No} \sum (Y_{S_{cal}} - Y_{S_{exp}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

$$EF = \frac{\sum(Y_{S_{exp}} - \bar{Y}_{S_{exp}})^2 - \sum(Y_{S_{cal}} - Y_{S_{exp}})^2}{\sum(Y_{S_{exp}} - \bar{Y}_{S_{exp}})^2} \quad (4.19)$$

Em que $\bar{Y}_{S_{exp}}$ é o teor de umidade médio dos dados experimentais. Os ajustes foram feitos para cada modelo empírico em cada condição experimental de temperatura e de velocidade de ar e em cada condição de umidade inicial do grão. Posteriormente, as equações generalizadas foram ajustadas para todas as condições com todos os dados de todos os 34 experimentos realizados.

4.2.5 Modelo de Parâmetros Distribuídos

Para estudar de forma mais detalhada a influência da umidade inicial nas curvas de secagem, é interessante utilizar um modelo de parâmetros distribuídos, o qual estima o perfil de umidade ao longo da posição dentro do grão (NICOLIN *et al.*, 2013). Uma vez que a difusão controla o processo de secagem para a maioria dos produtos agrícolas, é importante avaliar este perfil de umidade ao longo do processo. O modelo de parâmetros distribuídos utilizado neste trabalho é baseado na equação da difusão em coordenadas esféricas considerando que a difusividade (D) é constante e que o grão é uma esfera na qual há distribuição simétrica de umidade do centro até a superfície do grão:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \left[\frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (4.20)$$

Em que X é o teor de umidade da soja em base seca e r é a posição radial dentro do grão. O símbolo X é o teor de umidade da soja ao longo da posição dentro do grão

foi assumido para diferenciar do símbolo Y_s , valor total do teor de umidade de um grão de soja. Para resolver o modelo (Equação 4.20), foi considerado que inicialmente há distribuição homogênea de umidade dentro do grão, ou seja, que o valor da umidade é o mesmo para cada posição dentro do grão ($X(r,0) = X_0$). Além dessa condição inicial, são necessárias 2 condições de contorno. Foi considerado que há simetria no centro do grão ($r = 0$) e que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo na superfície do grão para qualquer tempo do processo:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \forall t \quad (4.21)$$

$$-\rho_{ss} D \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_{r=R} = \rho_{ar} Kc (X_R - X_e) \quad \forall t \quad (4.22)$$

Kc é o coeficiente convectivo de transferência de massa, ρ_{ar} é a massa específica do ar, X_R é a umidade do grão em sua superfície ($r = R$) e X_e é o teor de umidade de equilíbrio ao final da secagem. O modelo de parâmetros distribuídos (Equação 4.20) foi resolvido numericamente e seu parâmetro D foi ajustado com o somatório dos mínimos quadrados com base nos resultados obtidos com as curvas de secagem em 50 °C e para amostras com umidade inicial em base seca de 0,23. Além disso, foi feito um estudo de sensibilidade paramétrica com os parâmetros do modelo. Simulações com o modelo ajustado de parâmetros distribuídos em 50 °C e em diferentes umidades iniciais foram realizadas a fim de se verificar se o teor de umidade inicial significativamente impacta nas taxas de secagem. Resultados estimados pelo modelo foram comparados com os dados experimentais.

Para solução do modelo, uma nova equação diferencial foi obtida para o centro do grão aplicando a regra de L'Hopital na equação do modelo (4.20). Este procedimento é necessário devido à indeterminação do quociente ($2/r$) quando o raio tende a zero. Assim, a equação do modelo para o centro do grão resulta em:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 3D \left[\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \right] \quad (4.23)$$

A técnica de adimensionalização foi utilizada para auxiliar a solução numérica devido à grande diferença na ordem de magnitude entre o raio e o tempo:

$$t^* = t/t_{max} \quad (4.24)$$

$$r^* = r/R \quad (4.25)$$

Em que t_{max} é o tempo máximo de secagem e R é a posição radial na superfície do grão. O método das diferenças finitas foi utilizado para resolver o modelo. Foi utilizado o método das diferenças finitas centrais para discretizar as derivadas de primeira e segunda ordem em função do raio. A equação discretizada do primeiro ponto para a coordenada radial no centro do grão resultou em ($i = 1$):

$$\frac{\partial X_1}{\partial t^*} = 3C \frac{X_2 - 2X_1 + X_0}{(\Delta r^*)^2} \quad (4.26)$$

Em que $C = D t_{max} / R^2$. O ponto X ($i = 0$) não faz parte da malha discretizada porque as coordenadas iniciam quando $i = 1$. Para resolver este problema, foi utilizada a primeira condição de contorno (4.21), a qual estabelece que $X_2 = X_0$ ao se utilizar o método das diferenças finitas centrais. Neste contexto, é possível eliminar o termo X_0 da equação (4.26):

$$\frac{\partial X_1}{\partial t^*} = 6C \frac{X_2 - X_1}{(\Delta r^*)^2} \quad (4.27)$$

Para os pontos discretizados dentro do intervalo de $2 \leq i \leq Nd$ (número de divisões da malha), foi utilizado o método das diferenças finitas centrais diretamente na equação do modelo (4.20). Este procedimento resultou na seguinte expressão:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t^*} = C \left[\frac{2}{(i-1)\Delta r^*} \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2\Delta r^*} + \frac{X_{i+1} - 2X_i + X_{i-1}}{(\Delta r^*)^2} \right] \quad (4.28)$$

Para o último ponto discretizado, quando $i = Nd + 1$, foi utilizada uma aproximação com diferenças finitas para trás de três pontos visando melhorar a exatidão dos cálculos:

$$X_{Nd+1} = \frac{4X_{Nd} - X_{Nd-1} + BX_e}{3+B} \quad (4.29)$$

Em que B é dado por:

$$B = \frac{2\Delta r^* KcR}{\rho_{ss}D} \quad (4.30)$$

O sistema de equações diferenciais obtido pelo método das diferenças finitas foi resolvido com a função ‘ode45’ do Software MATLAB[®]. O número de divisões (Nd) considerado foi 100, que resultou num sistema composto por 101 equações. Nicolin *et al.* (2013) observaram durante o estudo da hidratação de grão de soja que para o modelo de parâmetros distribuídos baseado na equação da difusão não há diferença significativa

nos perfis de umidade para $50 \leq Nd$. Neste contexto, o modelo será resolvido apropriadamente e com uma exatidão maior ao se assumir $Nd = 100$.

4.2.6 Caracterização dos Grãos de Soja EMBRAPA 48

Foram caracterizados o raio médio e a massa específica das partículas de soja do tipo EMBRAPA 48 fornecidas pela empresa COCAMAR. Mediram-se com um paquímetro as três dimensões de 26 amostras à 20% de umidade em base seca (umidade levemente superior ao valor máximo que geralmente a soja é colhida) e de 26 amostras à 11% de umidade em base seca (umidade na qual a soja foi fornecida). Além disso, foi quantificada a massa de cada amostra. Em seguida, estas amostras foram levadas em estufa a 105 °C por 24 horas e as dimensões e massas foram novamente determinadas para as amostras secas.

O volume médio de cada amostra foi determinado pela fórmula do volume de uma elipsoide:

$$V_{elipsoide} = \frac{4}{3}\pi \frac{di_1}{2} \frac{di_2}{2} \frac{di_3}{2} \quad (4.31)$$

Em que di_i são as dimensões medidas com o auxílio do paquímetro. A massa específica de uma amostra foi determinada dividindo a massa da amostra pelo seu volume calculado pelo volume da elipsoide (Equação 4.31). O raio médio de cada amostra foi determinado pela média aritmética dos três raios inerentes às medidas de cada dimensão.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Caracterização

Observou-se que a massa específica da soja variou significativamente com o teor de umidade. Para a soja seca, a soja com 0,11 de umidade e a soja com 0,20 de umidade, o valor médio da massa específica foi respectivamente de 1174, 1210 e 1275 kg/m³. Foi utilizado o *test.t* (teste t de Student) do Software R para verificar se há

diferença entre as médias das massas específicas entre as amostras secas e as amostras com o maior teor de umidade avaliado. Observou-se por meio do teste de normalidade *shapiro.test* que as amostras apresentam distribuição normal com 1% de significância (valor p de 0,8605 para a soja seca e de 0,01911 para a soja úmida) e por meio do teste *var.test* observou-se que os tratamentos possuem variâncias diferentes (valor p de 0,005525). O teste apresentou que as amostras possuem diferença significativa no valor médio da massa específica (valor p de $9,216 \cdot 10^{-7}$). A Figura 4.4 apresenta o diagrama de caixa construído com o auxílio do Software R, onde é possível visualizar indícios na diferença das médias e das variâncias como foi apontado pelos testes.

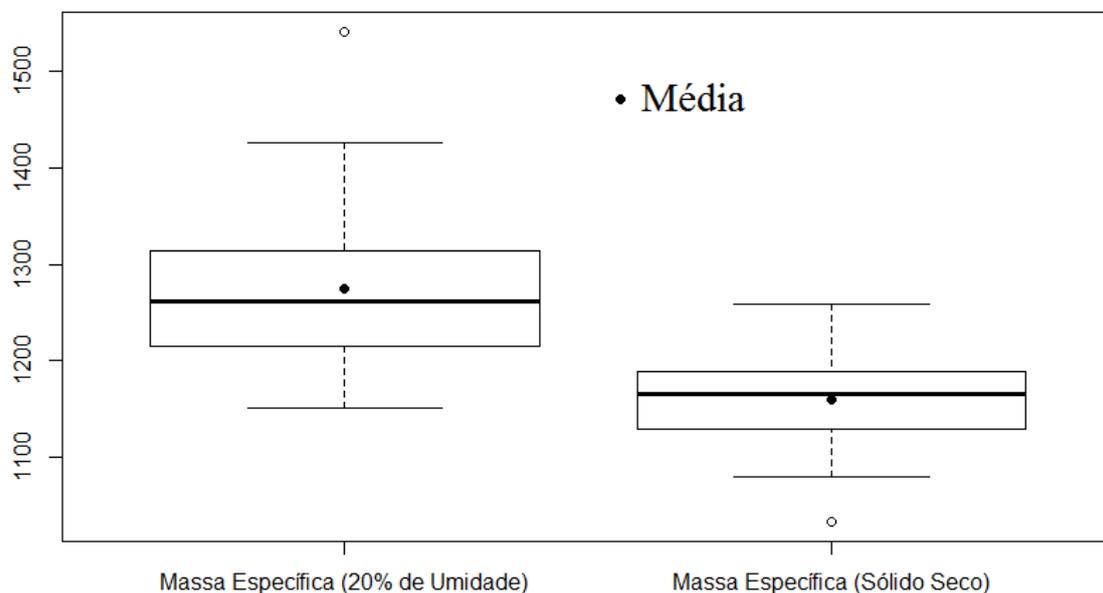


Figura 4.4 – Diagrama de Caixa para a distribuição das Massas Específicas

Quanto ao raio médio das partículas, verificou-se que este esteve em torno de 3,09, 3,14 e 3,21 mm respectivamente para as amostras secas, com 0,11 e com 0,20 de umidade. Os testes de normalidade e de homogeneidade das variâncias do Software R mostraram que há distribuição normal (valor de p de 0,8418 para as amostras secas e de 0,8566 para as amostras com a maior umidade) e que as variâncias são iguais (valor de p de 0,481) em relação à média dos raios entre as amostras da soja seca e da soja com a maior umidade com 5% de significância. O teste t apresentou que a média dos raios das amostras são iguais para um intervalo de confiança de 99%, mas diferentes para um intervalo de confiança de 95% (valor de p de 0,0273). A Figura 4.5 apresenta o diagrama de caixa das médias dos raios, no qual é possível verificar visualmente que as

médias estão próximas. Como a diferença é pequena entre as médias dos raios, foi tomado o raio constante na solução dos modelos com o valor médio de 3,14 mm.

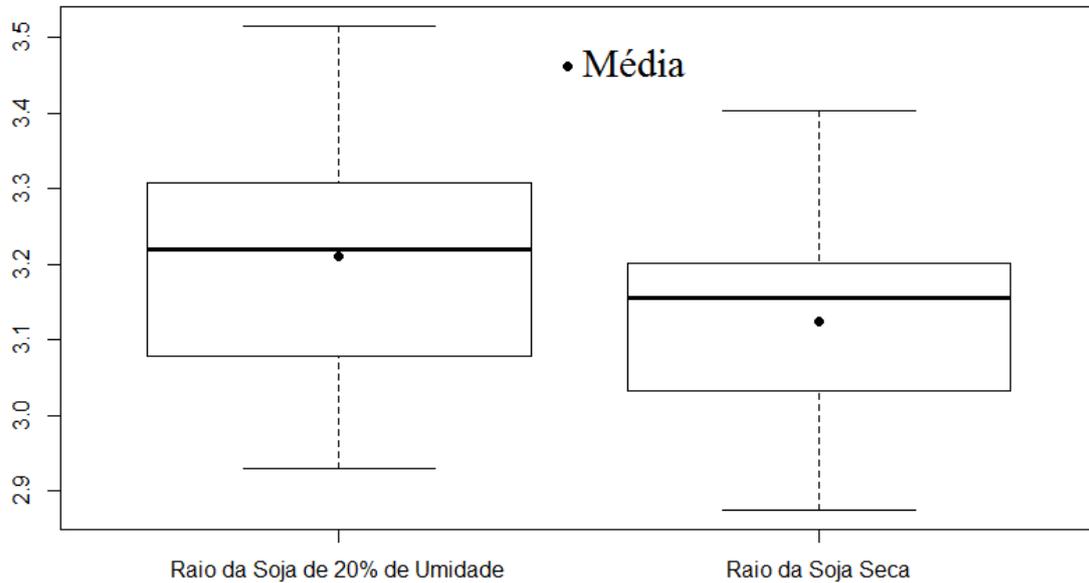


Figura 4.5 – Diagrama de Caixa para a distribuição dos Raios

Como os valores médios da massa específica da soja variaram significativamente com o teor de umidade, ajustou-se uma expressão quadrática para se estimar o valor da massa específica em função do teor de umidade, como mostra a Figura 4.6.

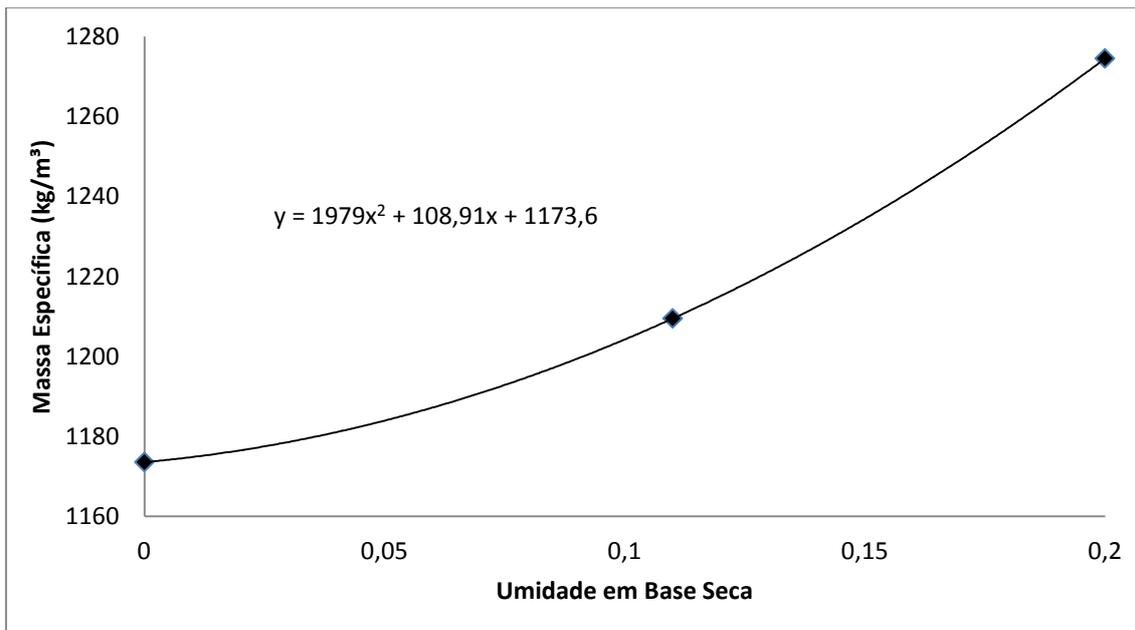


Figura 4.6 – Massa Específica da Soja em Função do Teor de Umidade

4.3.2 Influência da Velocidade na Cinética de Secagem

A umidade do ar variou entre 6 e 65% dependendo das condições climáticas e da temperatura do ar. Foi verificado que a variação da velocidade do ar entre 0,6 e 2,5 m/s não influenciou de forma significativa nas curvas de secagem como está apresentado nas figuras 4.7 e 4.8, as quais ilustram as curvas de secagem respectivamente em 30 e 60 °C. Estes resultados são análogos aos resultados encontrados por Luz *et al.* (2006) que estudaram a secagem de farelo de soja variando a velocidade do ar entre 1,1 e 2,5 m/s.

Contudo, Boeri e Khatchourian (2012) observaram que a velocidade do ar impactou significativamente nas curvas de secagem de soja para leitos empacotados. Para leitos em camada delgada, a área superficial do grão disponível em contato com o ar é maior em comparação a área de leitos empacotados já que os grãos estão mais dispersos. Assim, as transferências de massa e de energia entre o grão e o ar são diferentes entre leitos de camada delgada e leito de camada espessa, uma vez que a área superficial pode impactar nas taxas de secagem (MEISAMI-ASL *et al.*, 2010). Além disso, a velocidade do ar pode influenciar no valor da umidade de equilíbrio, o que impacta nas taxas de secagem, uma vez que em leito empacotado as propriedades do ar podem mudar ao longo do leito, o que altera as condições de equilíbrio. Baseando-se nos resultados obtidos experimentalmente, a influência da velocidade do ar foi negligenciada nos modelos de cinética de secagem ajustados neste trabalho.

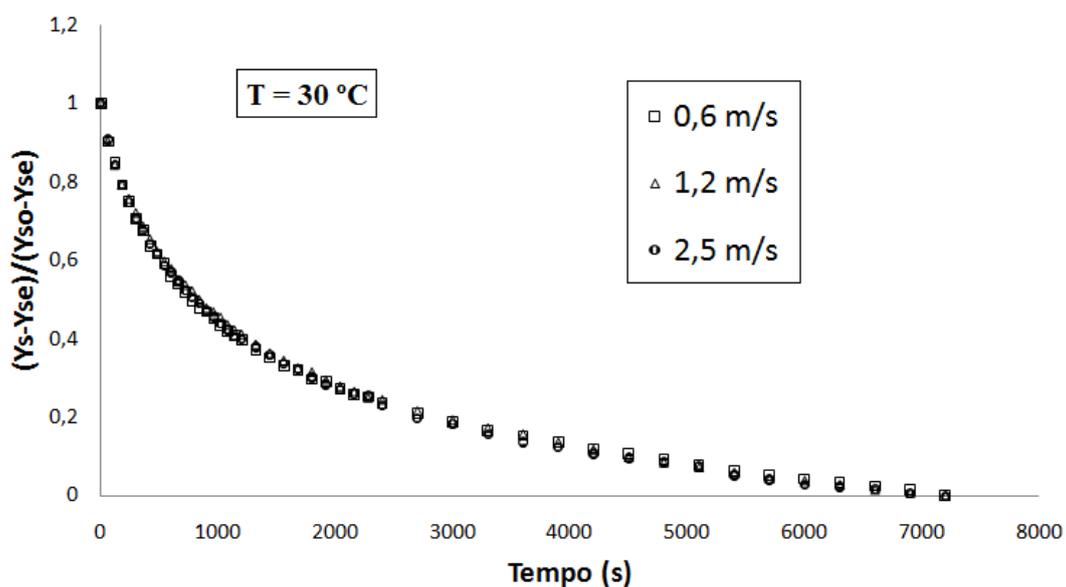


Figura 4.7 – Influência da Velocidade em 30 °C

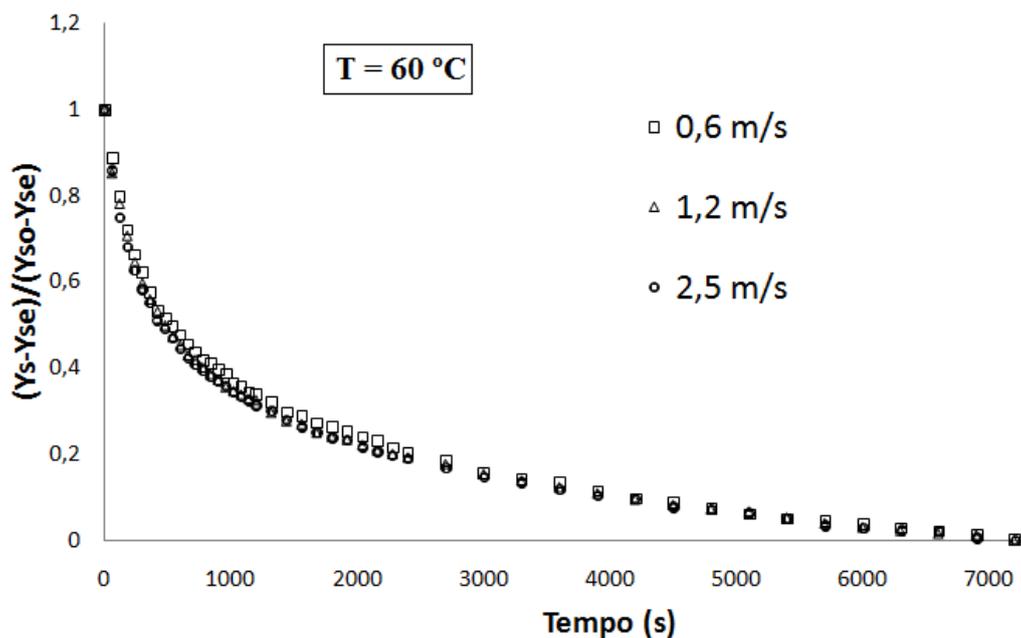


Figura 4.8 – Influência da Velocidade em 60 °C

4.3.3 Modelos de Parâmetros Concentrados

Os valores médios da função objetivo minimizada e os parâmetros estatísticos para cada modelo empírico estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores médios da função objetivo e dos parâmetros estatísticos.

Modelo	ϕ	χ^2	<i>REQM</i>	<i>EF</i>
Newton	0,0013585	0,00003339	0,00508	0,9210
Page	0,0001182	0,00000305	0,00153	0,9884
Henderson e Pabis	0,0006080	0,00001504	0,00333	0,9655
Logarítmico	0,0004457	0,00001147	0,00290	0,9721
Dois Termos	0,0000798	0,00000219	0,00122	0,9915
Aproximação da Difusão	0,0000805	0,00000215	0,00123	0,9915
Midilli <i>et al.</i>	0,0000901	0,00000242	0,00126	0,9920

Os melhores valores ajustados observados na Tabela 4.3 foram dos modelos de Dois Termos, da Aproximação da Difusão e de Midilli *et al.* Estes modelos apresentam 3 ou 4 parâmetros. Estes resultados foram esperados, pois o maior número de parâmetros tende a melhorar o ajuste. Contudo, foi verificado que os modelos de Page e de Page Modificado, os quais têm apenas duas parâmetros, apresentaram valores para os parâmetros estatísticos próximos aos valores obtidos com os modelos de melhores ajustes. O pior ajuste foi do modelo de Newton, o qual possui apenas um único parâmetro.

Dentre os modelos empíricos, o modelo de Page foi escolhido para desenvolver uma equação generalizada que pode descrever as taxas de secagem para todas as condições de secagem conduzidas nos experimentos, em decorrência dos bons ajustes e dos baixos números de parâmetros. É interessante escolher um modelo com o mínimo número de parâmetros possível que apresente um bom ajuste, pois estes parâmetros irão aumentar quando a influência da umidade inicial e da temperatura será considerada. A dependência dos parâmetros do modelo de Page em função da temperatura do ar e da umidade inicial do grão está apresentada na Figura 4.9.

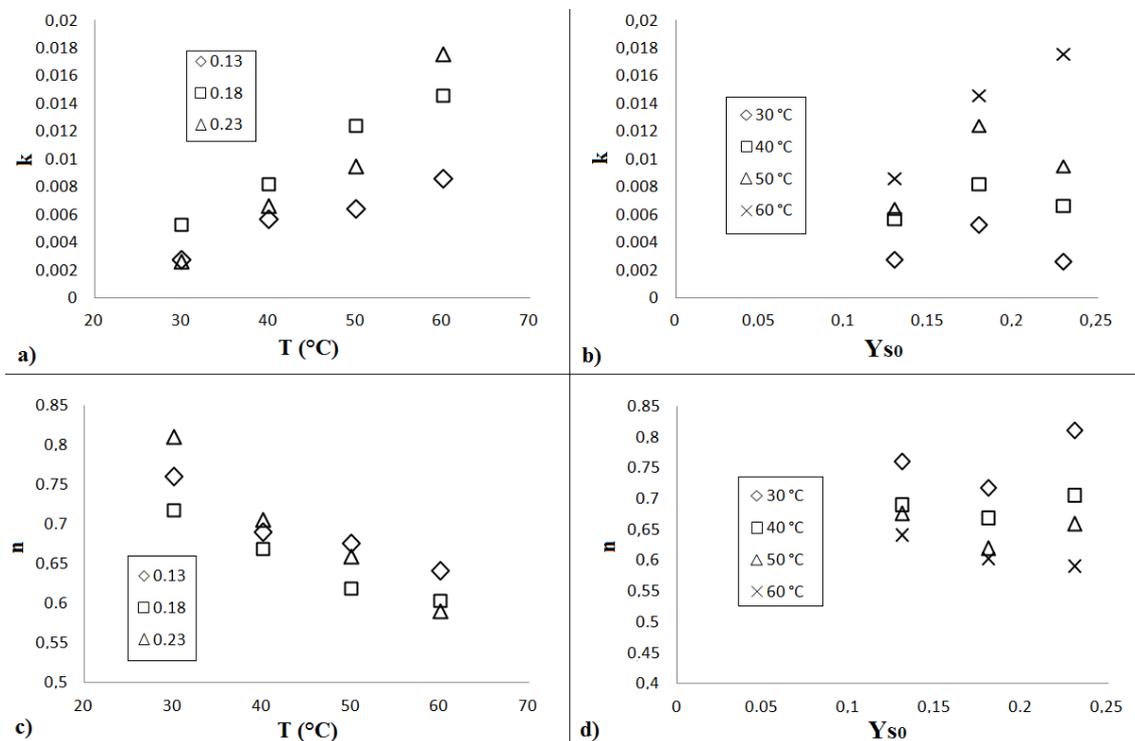


Figura 4.9 – Dependência das Constantes de Page em função de T e de Y_{s0} .

Foi possível observar das Figuras 4.10a e 4.10c uma tendência para ambos os parâmetros k e n variarem linearmente com a temperatura do ar. É possível observar também da Figura 4.10d que o parâmetro n aparenta ser constante em função da umidade inicial em cada temperatura. A dependência de k com a umidade inicial não ficou clara uma vez que seus valores estão mais dispersos como pode ser verificado na Figura 4.10b. Em algumas temperaturas, como 60 °C, há uma tendência de linearidade para a dependência de k com a umidade inicial e em outras temperaturas, como 30°C, há uma tendência de k ser constante.

A variação de k com a umidade inicial para cada temperatura é de ordem aproximada de 30 a 130%, enquanto que a variação de n com a umidade inicial para cada temperatura é de ordem aproximada de 5 a 15%. Além disso, a influência da umidade inicial nos parâmetros do modelo generalizado não pode ser desprezada como pode ser observado na Figura 4.10 que apresenta a curva do modelo de Page ajustado com dados a 60°C e umidade inicial em 0,23 em base seca em comparação com dados experimentais obtidos a 60°C com umidade inicial em 0,13 em base seca.

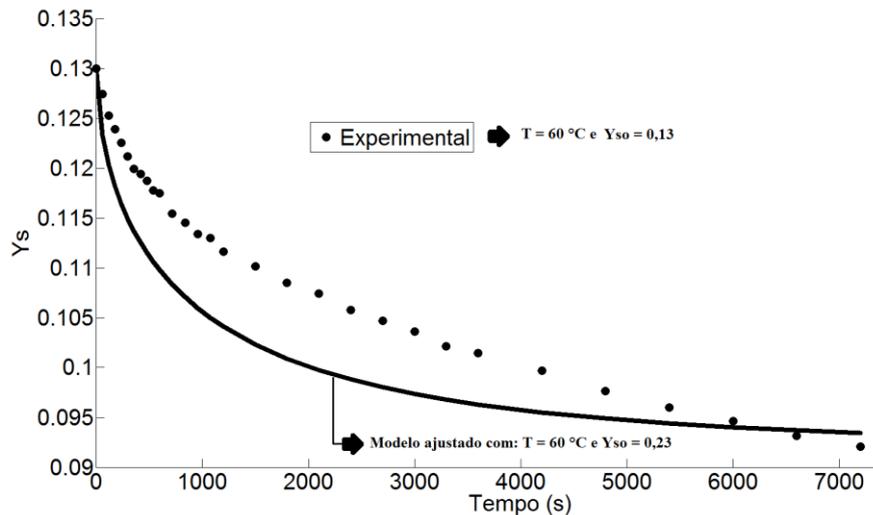


Figura 4.10 – Simulação com o Modelo de Page

Baseando-se nestes resultados, k foi considerado como uma função linear da temperatura do ar e da umidade inicial da soja e n foi considerado como uma função linear apenas da temperatura do ar:

$$k = A_1 + A_2 \cdot T + A_3 \cdot Y_{S0} + A_4 \cdot Y_{S0} \cdot T \tag{4.32}$$

$$n = A_5 + A_6 \cdot T \tag{4.33}$$

É interessante ressaltar que quando k é analisado apenas como função da temperatura, geralmente o formato da equação ajustada é do tipo Arrhenius (BRUCE, 1985). Os valores dos parâmetros estatísticos para o modelo generalizado de Page e para os modelos para estimativa de K estão descritos na Tabela 4.4 e a Tabela 4.5 apresenta os valores dos parâmetros ajustados. A razão entre o somatório dos mínimos quadrados e o número de experimentos (N) foi também calculada uma vez que os parâmetros foram ajustados todos de uma vez e com todos os dados experimentais referentes aos 34 experimentos realizados.

Tabela 4.4 – Parâmetros Estatísticos para os Modelos Generalizados

Model	ϕ	ϕ/N	χ^2	$REQM$	EF
K_1	0,0092	0,00027	0,0000067	0,0023	0,9759
K_2	0,0180	0,00053	0,0000132	0,0033	0,9587
K_3	0,0103	0,00030	0,0000076	0,0026	0,9686
K_4	0,0086	0,00025	0,0000065	0,0023	0,9763
Page	0,0082	0,00024	0,0000060	0,0021	0,9721

Tabela 4.5 – Constantes Ajustadas dos Modelos Generalizados

Constante	Page	K_1	K_2	K_3	K_4
A_1	0,01089	-0,01538	-5,2297E-03	3,0461	0,01036
A_2	-9,8611E-05	2,7394E-04	1,3809E-05	-0,01097	6,7282E-05
A_3	-0,05026	4,9339E-03	2,9544E-03	8,6018	-3,1663E-03
A_4	1,4489E-03	-7,3620E-05	0,02810	-0,08777	-0,05867
A_5	0,7507	-3,6217E-04	1,1302E-08	-0,2586	-1,0383E-03
A_6	-2,0932E-03	5,6313E-06		-3,0550E-03	0,02865
A_7		0,07594			-0,3513
A_8		-4,9829E-04			4,3174E-03
A_9					0,01762

O modelo generalizado de Page foi o melhor modelo generalizado ao se verificar os valores dos parâmetros estatísticos em negrito na tabela 4.4. Estes resultados mostram que este modelo pode ser usado para simular e otimizar o processo de secagem de soja em camada delgada. A Figura 4.11 ilustra o gráfico dos valores calculados pelo modelo em função dos resultados obtidos experimentalmente para o modelo generalizado de Page, o qual pôde descrever o processo de secagem com um desvio global menor que 6,0%.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam as curvas experimentais e as curvas de secagem do modelo generalizado de Page. As Figuras 4.12 e 4.13 simulam as curvas de secagem para diferentes umidades iniciais respectivamente para os casos com ar em 30 e 60 °C. A Figura 4.14 simula as curvas de secagem para diferentes temperaturas e para experimentos com umidade inicial de 0,18.

É possível inferir destes gráficos que as taxas de secagem são fortemente influenciadas pela temperatura do ar, sendo que seus valores aumentam com o aumento da temperatura. Foi observado que não houve o período de taxa constante, comportamento típico para produtos agrícolas, de forma que os efeitos de transporte de umidade no interior do grão limitam o processo, fato que está de acordo com muitos autores (BENALI, 2012; CHINENYE *et al.*, 2010; CIL e TOPUZ, 2010; DEMIR *et al.*, 2007; MEISAMI-ASL *et al.*, 2010; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012). Também foi observado que houve um decréscimo nas taxas de secagem desde o começo do processo de secagem, sendo que as maiores taxas ocorrem no seu início. Estes resultados apontam que a superfície do material não está totalmente saturada de água e que o transporte de água no interior do grão controla estas taxas.

Contudo, como o modelo generalizado de Page é uma expressão empírica, este modelo não se correlaciona diretamente com o coeficiente de transferência de massa (comumente utilizado nos modelos de leito de camada espessa) contrariamente aos modelos semiteóricos que apresentam os valores de K que estão diretamente relacionados com este coeficiente. Foi possível inferir dos resultados que o modelo K_3 , mesmo apresentando parâmetros estatísticos não tão bons quanto o generalizado de Page, pôde descrever o processo de secagem com um desvio global menor que 6,0% como pode ser visualizado na Figura 4.15, a qual mostra os dados experimentais em confronto com os obtidos pelo modelo K_3 .

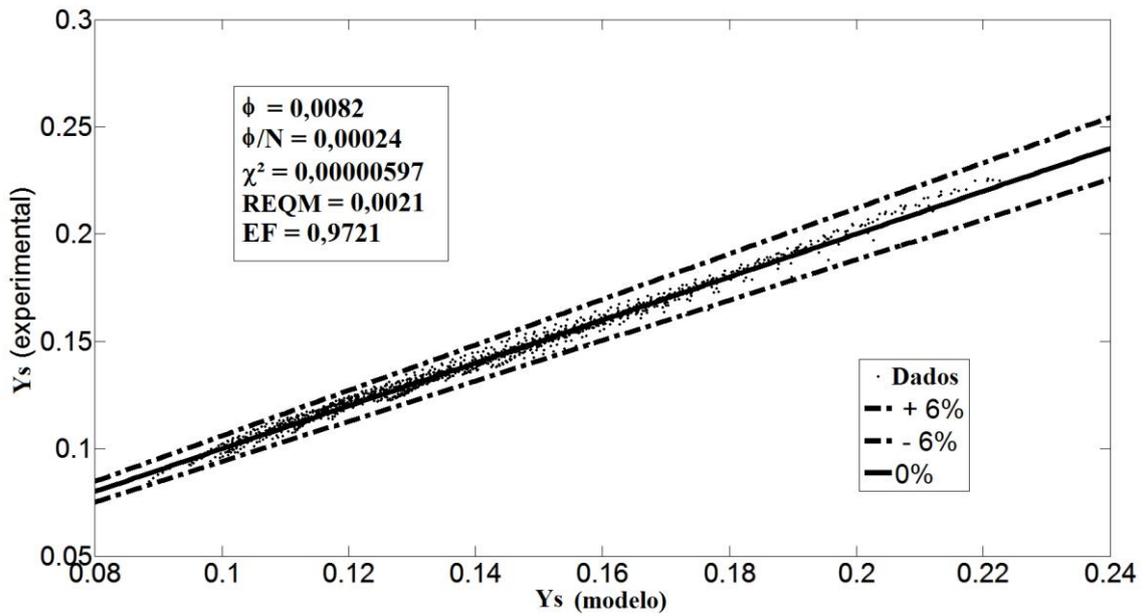


Figura 4.11 – Desvio do Modelo Generalizado de Page

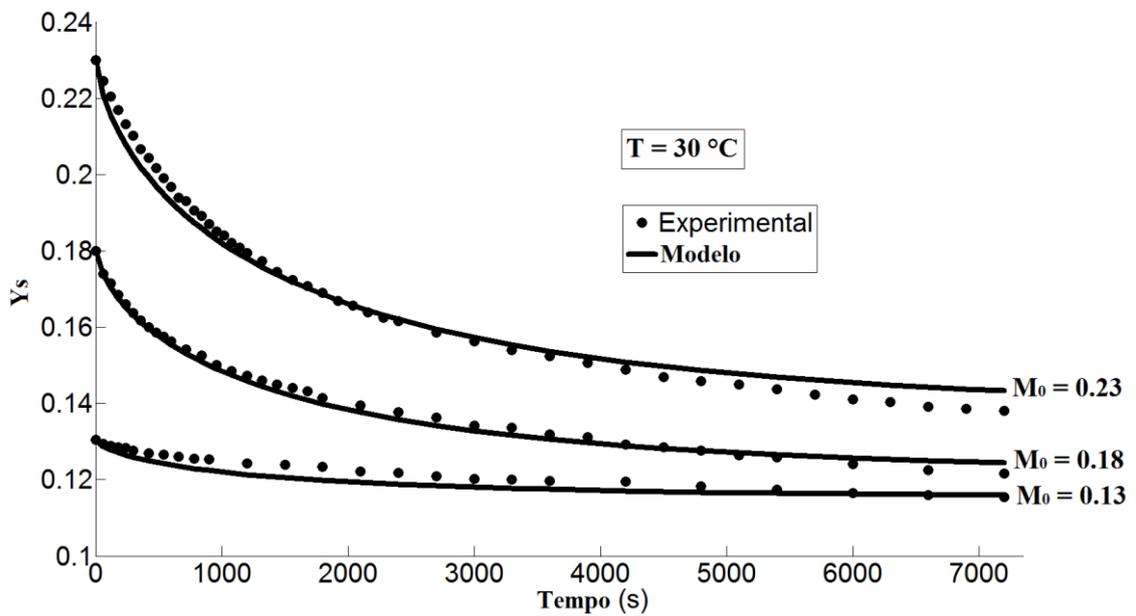


Figura 4.12 – Curvas de Secagem a 30 °C com o Modelo Generalizado de Page

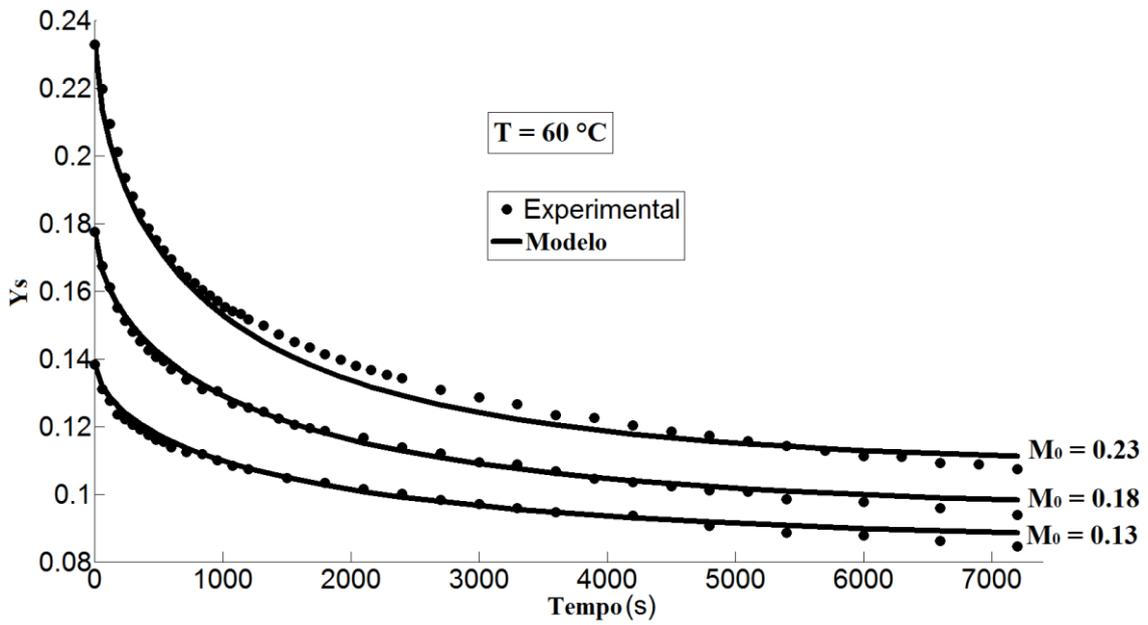


Figura 4.13 – Curvas de Secagem a 60 °C com o Modelo Generalizado de Page

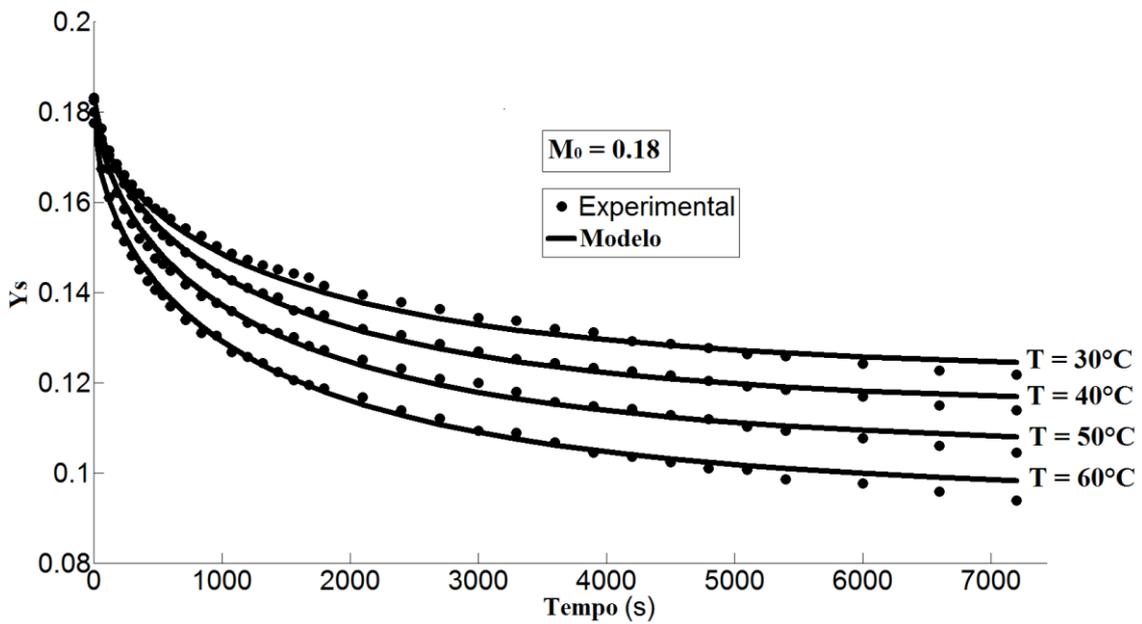
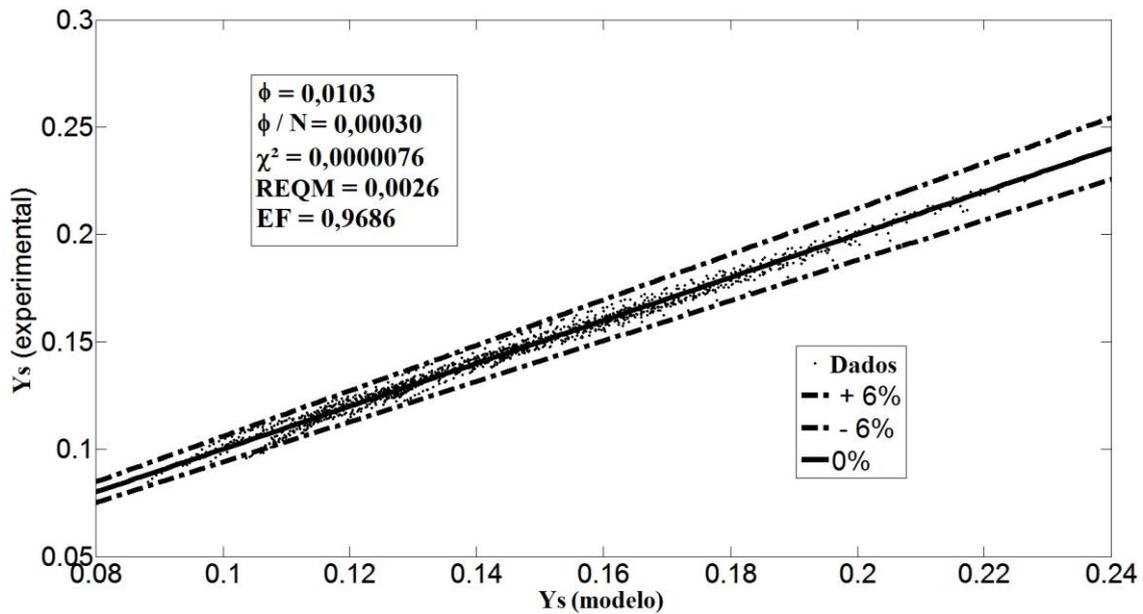
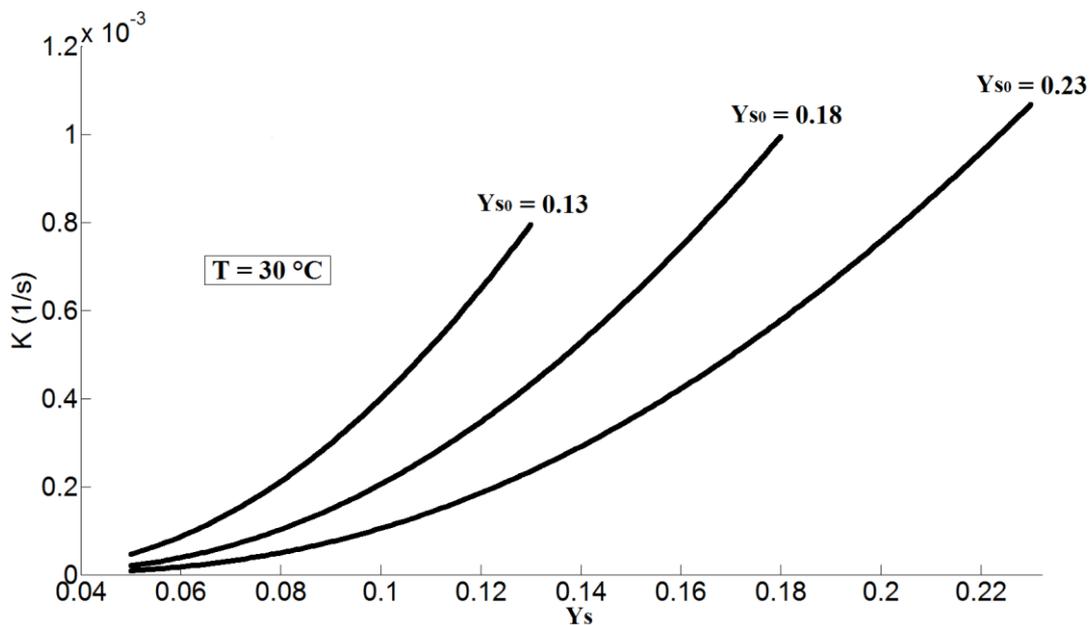


Figura 4.14 – Curvas de Secagem a 0,18 de Y_{s0} com o Modelo Generalizado de Page

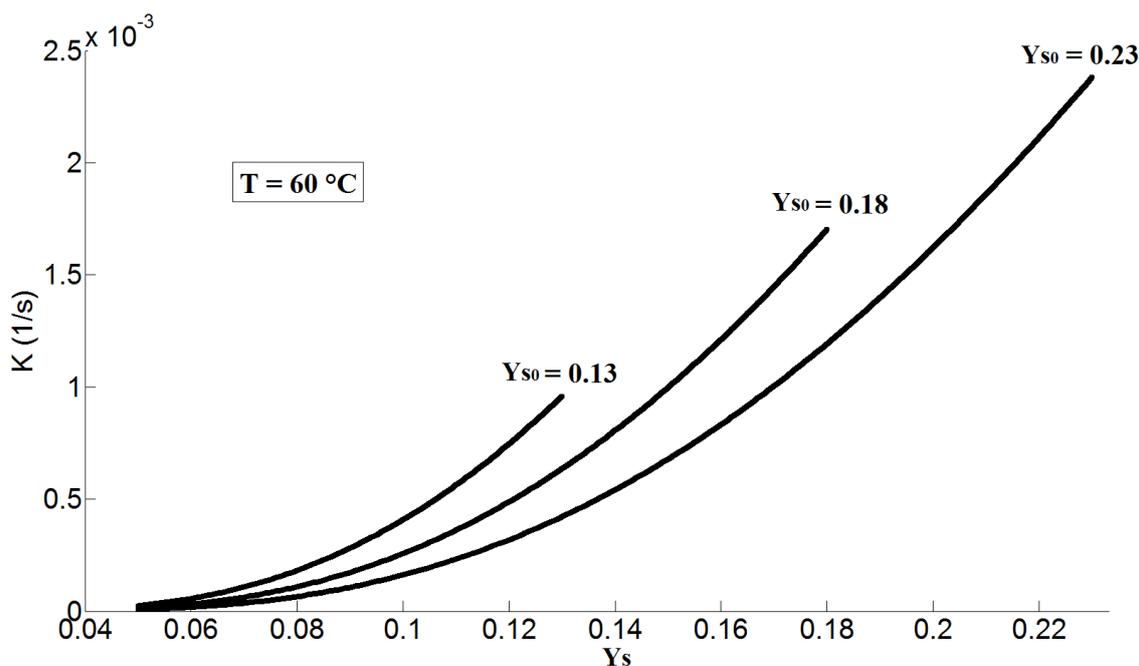


4.15 – Desvio Global para o Modelo K_3

Resultados também indicaram que a umidade inicial impacta significativamente nas curvas de secagem, o que está de acordo com alguns autores (BOERI e KHATCHATOURIAN, 2012; OLIVEIRA e ROCHA, 2007). As curvas de secagem foram diferentes para amostras com diferentes umidades iniciais, em operação com as mesmas temperaturas e velocidades do ar. As Figuras 4.16 e 4.17 simulam com o modelo K_3 o coeficiente de referência de transferência de massa (K) para diferentes umidades iniciais respectivamente em 30 e 60 °C.



4.16 – Estimativa de K a 30 °C pelo Modelo K_3

4.17 – Estimativa de K a 60 °C pelo Modelo K_3

Foi possível observar das Figura 4.16 e 4.17 que para a mesma temperatura e mesmo valor de teor de umidade, o valor de K foi diferente para curvas com diferentes valores de teor de umidade inicial. Quanto maior o valor deste coeficiente de referência de transferência de massa (K), maiores são as taxas de secagem como se pode observar na equação do modelo (Equação 4.10). Maiores também são os valores do coeficiente de transferência de massa (K_s) e do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_s a$), uma vez que estes coeficientes são proporcionais ao valor de K (Equações 4.9 e 4.11). Foi constatado, por exemplo, que a taxa de secagem de uma amostra com umidade inicial de 0,23 quando esta amostra se encontra com umidade de 0,18 é menor do que a taxa de secagem de uma amostra com umidade inicial de 0,18 quando esta última se encontra com umidade de 0,18.

Inicialmente, é razoável assumir que qualquer parte do grão se encontra com o mesmo teor de umidade (distribuição homogênea), ou seja, desde a superfície até o centro do grão há o mesmo valor de umidade. Com o passar da secagem, cada vez mais a superfície e os locais próximos à superfície ficam insaturados de água, o que leva o centro do grão ficar com um teor de umidade superior à quantidade média de umidade do grão e principalmente superior à quantidade de umidade da superfície. Quanto maiores as regiões insaturadas, maior será a influência do movimento interno de água no grão, o que leva as taxas de secagem decrescerem continuamente. Quando ambas as

amostras possuem umidade média de 0,18, a quantidade de água na superfície é maior para a amostra com umidade inicial de 0,18. Quando a amostra com umidade inicial de 0,23 atinge o valor médio de umidade de 0,18, os mecanismos de transferência de massa de água no interior do grão estão fortemente controlando as taxas de secagem. Estes resultados também podem ser notados pelos dados referentes às taxas de secagem experimentais. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as taxas de secagem para amostras com diferentes teores de umidade respectivamente em 30 e 60 °C. Nestas figuras, é também possível perceber que existe diferença entre as taxas de secagem para amostras com diferentes teores de umidade inicial. Os valores das taxas de secagem foram calculados pela seguinte expressão para um dado valor de Y_{S_i} :

$$-\frac{dY_{S_i}}{dt} = -\frac{(Y_{S_{i+1}} - Y_{S_{i-1}})}{(t_{i+1} - t_{i-1})} \tag{4.34}$$

Em que:

$$Y_{S_i} = \frac{Y_{S_{i+1}} + Y_{S_{i-1}}}{2} \tag{4.35}$$

$$t_i = \frac{t_{i+1} + t_{i-1}}{2} \tag{4.36}$$

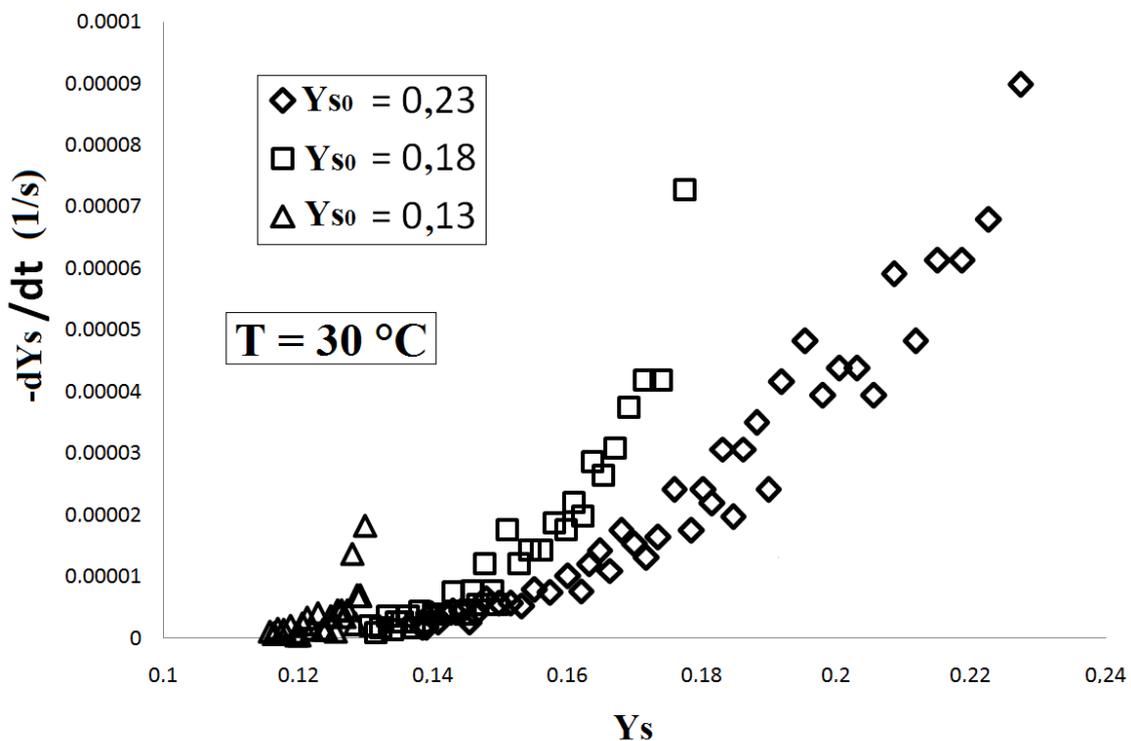


Figura 4.18 – Taxas de Secagem a 30 °C

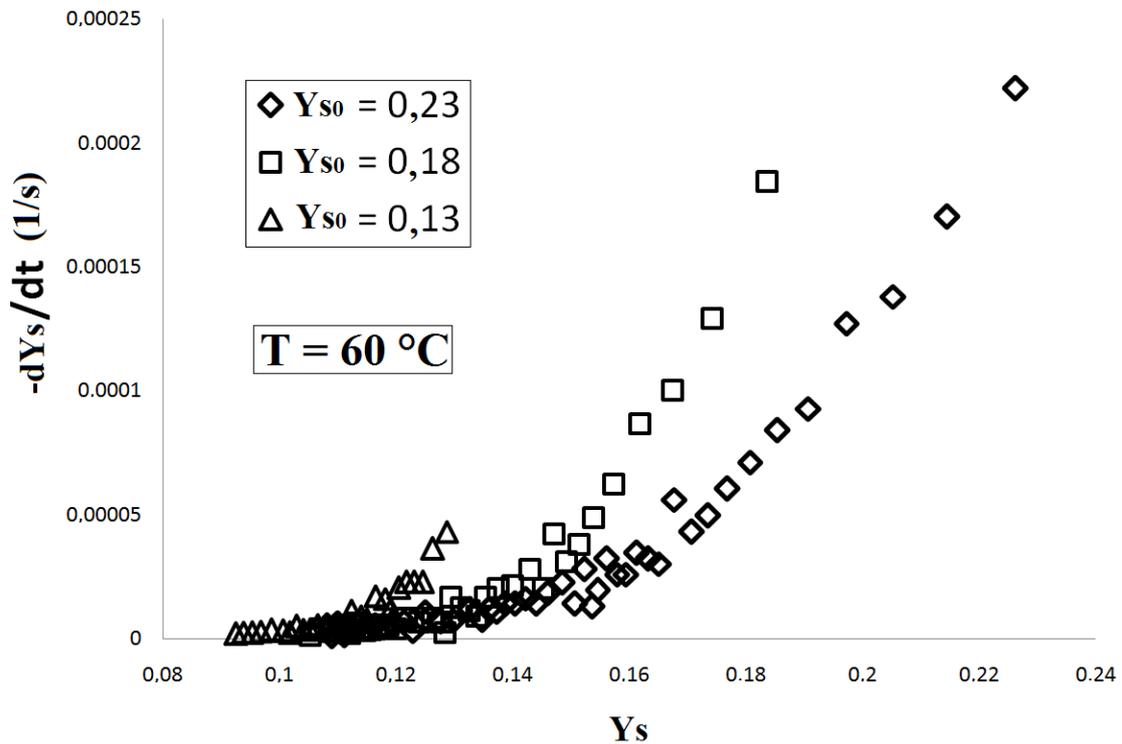


Figura 4.19 – Taxas de Secagem a $60\text{ }^\circ\text{C}$

Foi constatado que o modelo composto por uma função exponencial (K_3) pode ser usado para estimar o valor do coeficiente de transferência de massa em uma região de umidade abaixo da atingida neste trabalho. As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os valores de K tendendo a zero a baixas umidades, o que é esperado uma vez que o processo de secagem se encaminha ao equilíbrio. Contudo, os modelos com expressões quadráticas (K_1 , K_2 e K_4) não podem ser usados para estimar K nestas regiões abaixo da região estudada como pode ser observado na figura 4.20, a qual apresenta os valores de K estimados pelo modelo K_4 a $40\text{ }^\circ\text{C}$. Nesta Figura, é possível inferir que os valores de K tendem a aumentar em baixos valores de umidade, o que não é verdade visto que o processo caminha ao equilíbrio. Mesmo que os modelos quadráticos tiveram um melhor ajuste que o modelo exponencial, estes modelos não são indicados para estimar os valores de K numa faixa de umidade além da considerada nos ajustes.

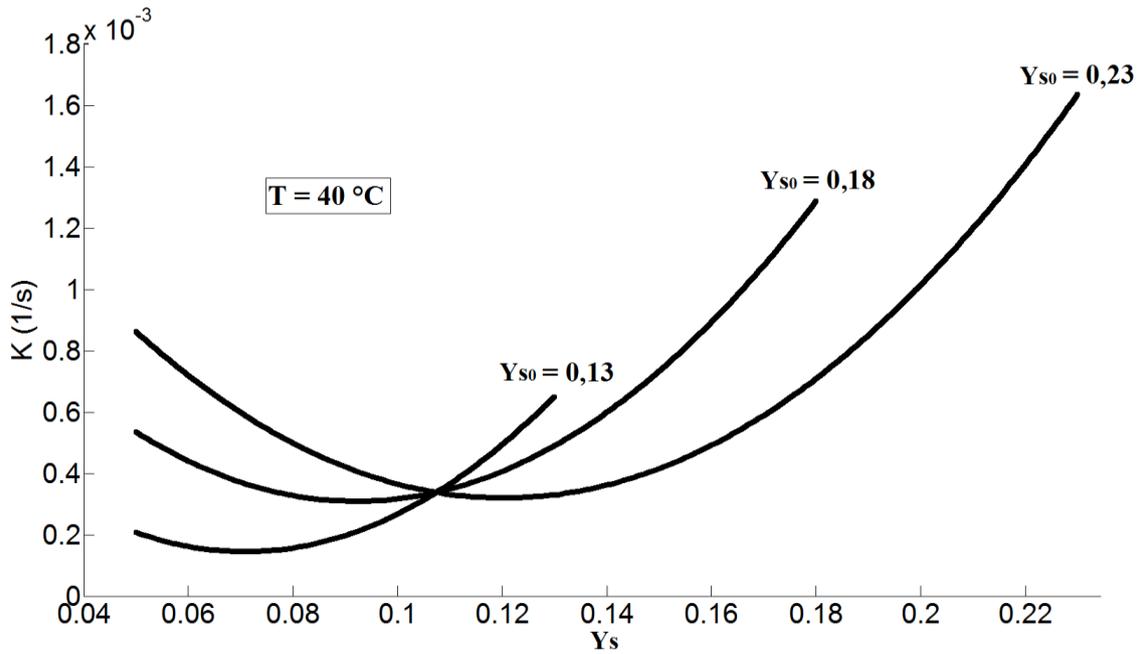


Figura 4.20 – Estimativa de K a 40 °C pelo Modelo K₄

4.3.4 Modelo de Parâmetros Distribuídos

O modelo de parâmetros distribuídos também indicou que a umidade inicial do grão significativamente impacta na cinética de secagem. Primeiramente, foi feita a análise de sensibilidade paramétrica. Foi possível observar que a variação em 50% do valor de Kc não modificou as curvas de secagem como pode ser notado na Figura 4.21, a qual apresenta o valor médio do teor de umidade (X_m) para o processo operando em 50 °C. Contudo, a variação em 50% do valor de D modificou fortemente as curvas de secagem como é possível verificar na Figura 4.22. Baseando-se nestes resultados, o valor de Kc foi considerado constante e este coeficiente foi estimado pelo cálculo do coeficiente convectivo de transferência de massa de uma gota esférica de água com raio de 3,14 mm exposta ao ar em 50 °C e 0,6 m/s. Foi utilizada a equação de Frössling (Equação 4.34, WELTY *et al.*, 2008) para estimar o número de Sherwood relacionado a transferência de massa que ocorre da superfície até a corrente de ar ao redor da esfera:

$$Sh = \frac{Kc d}{D_{AB}} = 2 + 0.552Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} \quad (4.37)$$

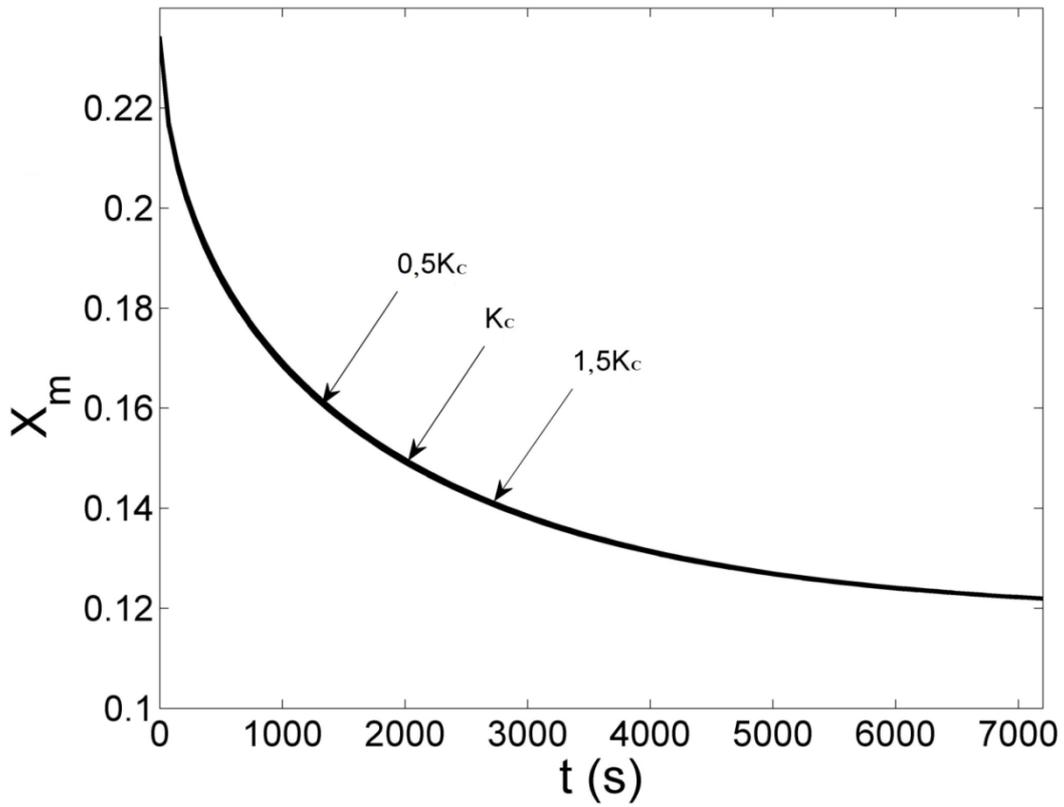


Figura 4.21 – Sensibilidade do Parâmetro K_c

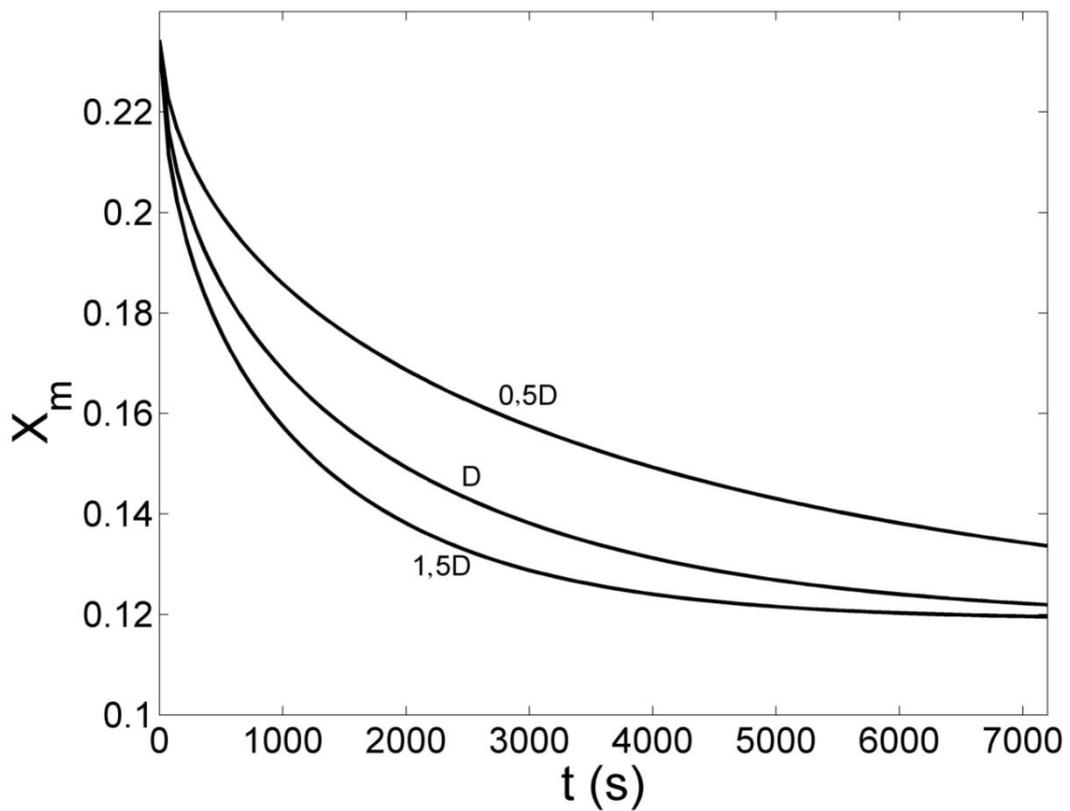


Figura 4.22 – Sensibilidade do Parâmetro D

Em que Sh é o número de Sherwood, Re é o número de Reynolds, Sc é o número de Schmidt, d é o diâmetro do grão e D_{AB} é a difusividade do par ar-água. Foi assumido que a superfície do grão estava saturada com água e que o movimento da umidade ocorre do grão para o ar. O valor de $\rho_{ar} \cdot Kc$ estimado foi 0,045 kg/m²s. O valor de X_m foi calculado por meio da seguinte equação:

$$X_m = \frac{\int_0^R X r^2 dr}{\int_0^R r^2 dr} \quad (4.38)$$

O valor ajustado para D resultou em $4,550 \cdot 10^{-10}$ m²/s. A Figura 4.23 ilustra as curvas de secagem simuladas pelo modelo ajustado de parâmetros distribuídos a 50 °C para diferentes valores de umidade inicial. Não foram colocados os valores do tempo de secagem porque eles não se equivalem para cada curva. Contudo, todas as curvas estão na mesma unidade de tempo. O intuito deste gráfico é comparar as inclinações das curvas nos pontos em que as umidades médias são iguais.

É possível constatar que as curvas da Figura 4.23 não se sobrepõem, ou seja, as taxas de secagem são diferentes para cada teor de umidade inicial. Este fato está de acordo com os resultados previamente obtidos com os modelos de parâmetros concentrados e com os dados experimentais das taxas de secagem. Da Figura 4.23, quando a umidade média é igual a 0,18, pode ser inferido que as taxas de secagem são maiores para a curva com umidade inicial de 0,18 em comparação com a curva com umidade inicial de 0,23. Este argumento está baseado no comportamento das curvas. A curva com umidade inicial de 0,18 é mais inclinada, ou seja, a umidade do grão decresce mais rapidamente. Este comportamento é análogo para a curva com umidade inicial de 0,13, a qual apresenta maiores taxas de secagem quando a curva de umidade inicial de 0,23 atinge a umidade média de 0,13. Esta influencia do teor de umidade inicial do grão pode ser explicada baseando-se na distribuição de umidade dentro do grão. As Figuras 4.24 e 4.25 mostram a distribuição de umidade respectivamente quando o grão com umidade inicial de 0,23 atinge os valores médios de 0,18 e 0,13 de umidade.

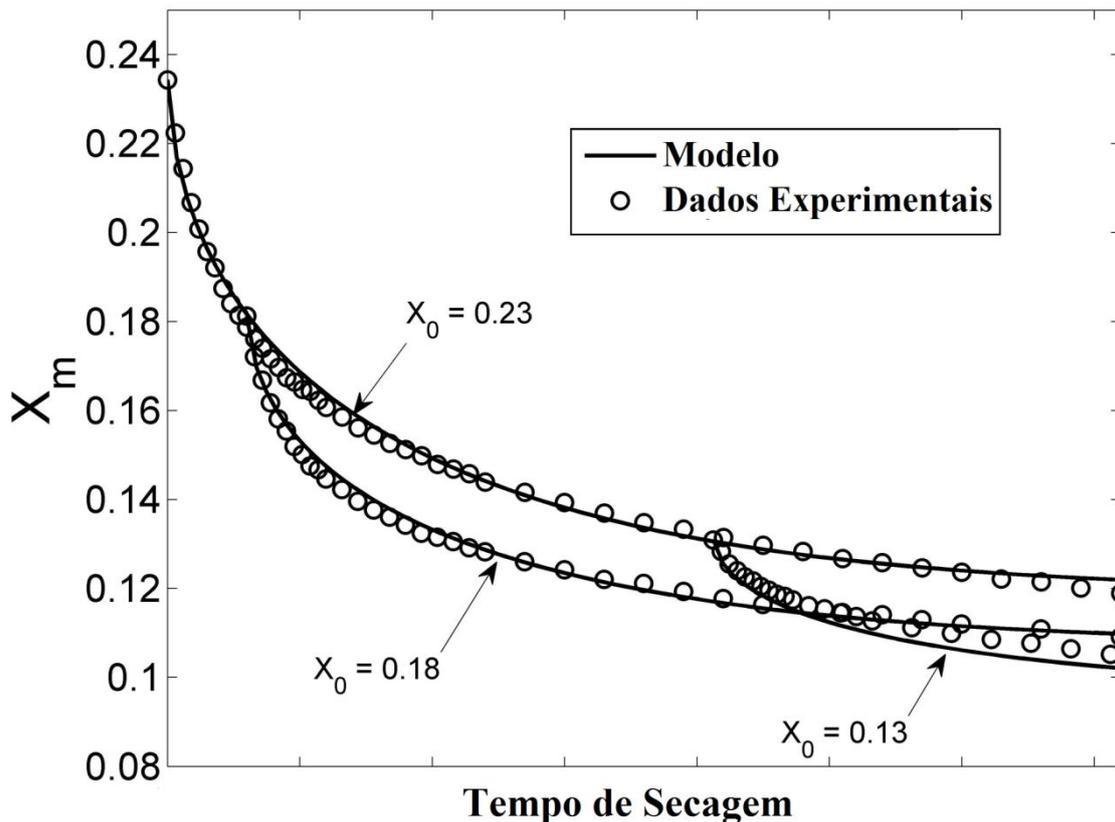


Figura 4.23 – Cinética de Secagem com o Modelo de Parâmetros Distribuídos

Estas figuras indicam que a umidade de equilíbrio na superfície está quase no equilíbrio quando o valor médio da umidade do grão atinge os valores de 0,18 e 0,13. Para a Figura 4.24, a umidade no centro do grão ($r = 0$) é a mesma do valor inicial. Destes resultados, é possível notar que o equilíbrio é atingido primeiramente na superfície e depois consecutivamente da superfície até o centro. Quanto mais longo o tempo de secagem, maior é a influência dos efeitos difusivos internos do grão controlando o processo, ou seja, maior é a distância para a água percorrer até chegar à superfície. Assim, uma amostra com umidade inicial de 0,18 tem uma maior quantidade de água próxima à superfície do que uma amostra com umidade média de 0,18 que inicialmente estava com umidade próxima a 0,23. A distribuição de umidade durante todo o processo de secagem está esquematizada nas Figuras 4.26 e 4.27 respectivamente para amostras com umidades iniciais de 0,18 e 0,13.

Estas figuras enfatizam o impacto da distribuição de umidade nas taxas de secagem. Como pode ser observado, a superfície rapidamente é seca atingindo o equilíbrio, enquanto que a umidade no centro apresenta uma maior resistência para ser seca. Estes resultados indicam que é extremamente importante saber a distribuição de

umidade dentro do grão para prever com mais exatidão a cinética de secagem. Neste contexto, este trabalho aponta que a negligência da influência nas taxas de secagem da umidade inicial e da distribuição de umidade dentro do grão não é recomendada.

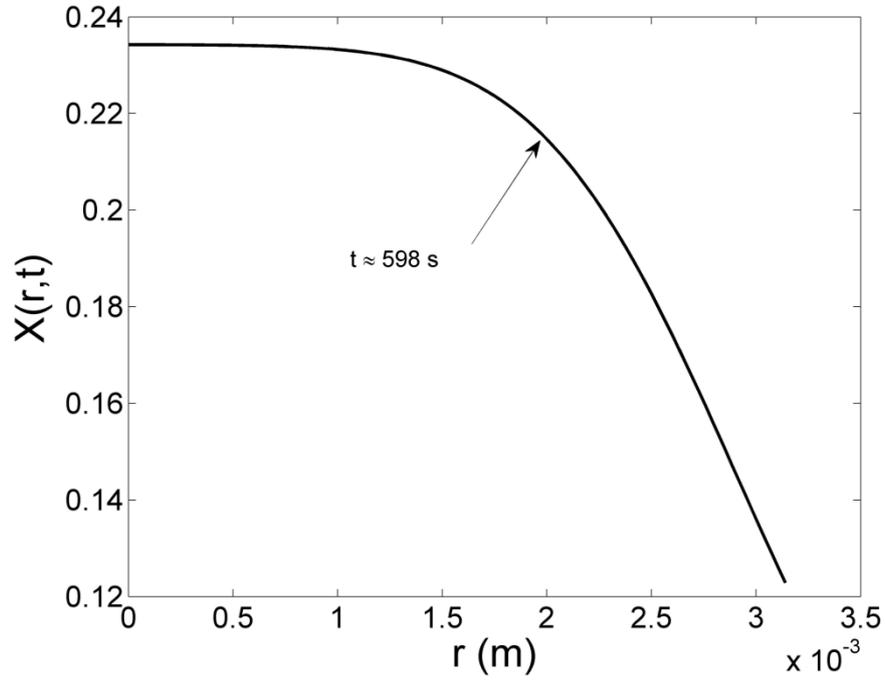


Figura 4.24 – Distribuição de Umidade em 0,18 de Umidade Média

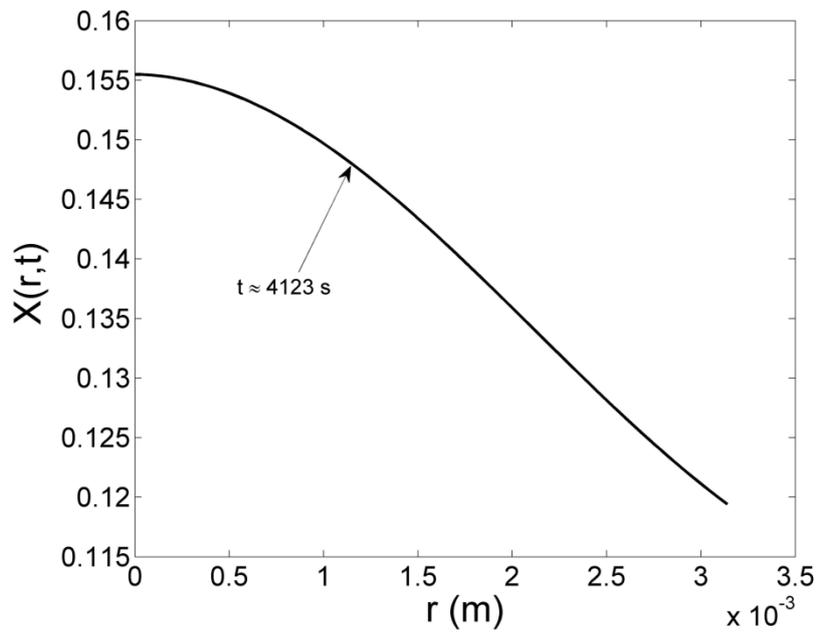


Figura 4.25 – Distribuição de Umidade em 0,13 de Umidade Média

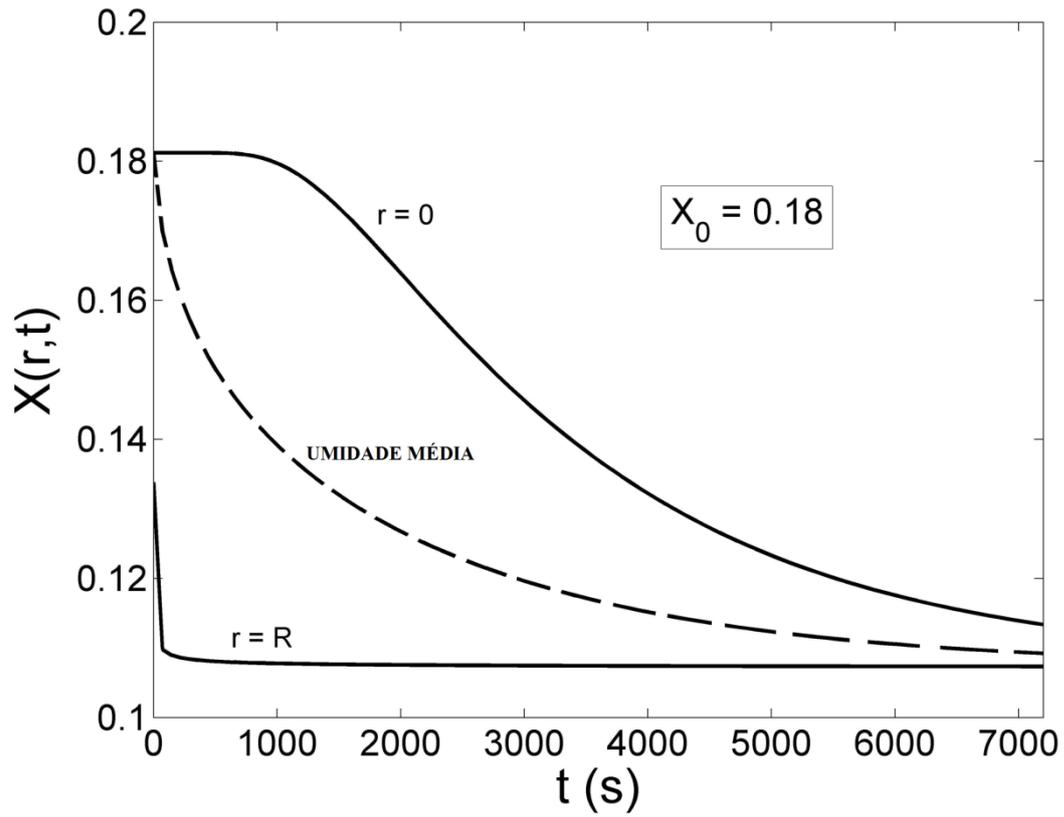


Figura 4.26 – Distribuição de Umidade para Soja com Umidade Inicial de 0,18

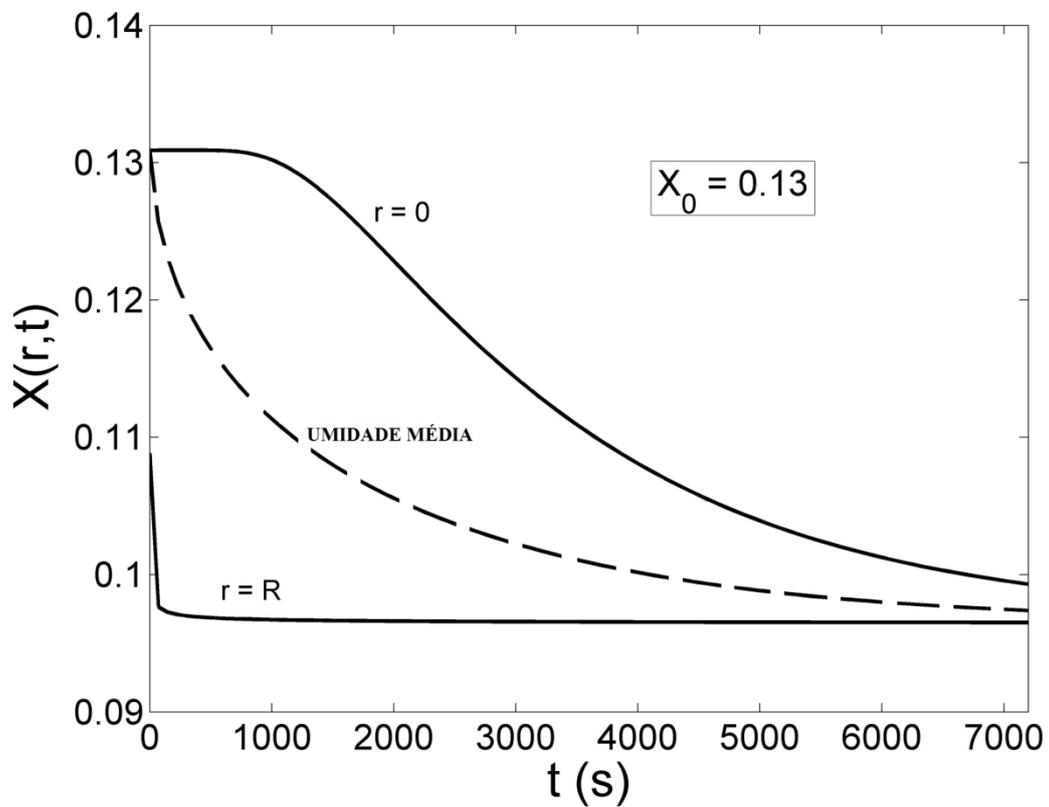


Figura 4.27 – Distribuição de Umidade para Soja com Umidade Inicial de 0,13

4.3.5 Considerações Finais dos Modelos Ajustados

Em base nos modelos ajustados, observa-se que o melhor modelo vai ser aquele que melhor atende os objetivos a serem alcançados. No caso de modelos empíricos, observa-se que sua solução e ajuste de parâmetros tendem a ser mais simples, uma vez que são propostas equações que descrevem o comportamento do sistema sem base fenomenológica. Além disso, os resultados dos modelos empíricos tendem a ser mais exatos, pois se pode propor qualquer tipo de equação para descrever o fenômeno físico. Assim, eles podem ser aplicados em sistemas de controle em casos nos quais a solução do modelo deve ser rapidamente resolvida. Enquanto isso, os modelos fenomenológicos tendem a possuir soluções mais complexas, pois eles se baseiam em balanços de fenômenos da natureza. Neste contexto, usualmente são feitas considerações para diminuir a complexidade, o que afasta o comportamento do sistema da realidade. Contudo, por meio dos modelos fenomenológicos é possível estimar parâmetros físicos, como é o caso da difusividade e dos coeficientes de transferência de massa. Em alguns casos se faz necessário o conhecimento dessas propriedades, o que leva os modelos fenomenológicos serem mais indicados para estas situações. Por outro lado, os modelos semiteóricos situam-se em condições intermediárias dessas vantagens e desvantagens mencionadas. Eles podem ser menos complexos para serem resolvidos e apresentarem resultados exatos, como também podem estimar grandezas físicas. Outro fato interessante a respeito dos modelos fenomenológicos é que estes podem ser resolvidos sem a necessidade do ajuste de parâmetros se os valores das grandezas físicas forem obtidos por meio da literatura.

4.4 Conclusão

Foram avaliadas as influências da velocidade do ar, da temperatura do ar e da umidade inicial da soja nas curvas de secagem. Observou-se que a variação da velocidade do ar de 0,6 até 2,5 m/s não impactou significativamente nas taxas de secagem. Baseando-se nestes resultados, a influência da velocidade do ar foi negligenciada nos modelos matemáticos validados em confronto com os dados experimentais. Foi verificado que os modelos com Equações exponenciais tiveram um

melhor comportamento para descrever as curvas de secagem. Estes modelos estimaram os dados experimentais para cada temperatura do ar e umidade inicial do grão com um desvio máximo menor que 6,0%. Este resultado aponta que estes modelos podem ser usados na simulação e na otimização de processos de secagem de soja como também no projeto de equipamentos.

Foi possível inferir dos resultados que as taxas de secagem são fortemente influenciadas pela temperatura do ar, pois seus valores aumentaram com o aumento desta temperatura. Além disso, as taxas de secagem foram diferentes para diferentes teores de umidade inicial de soja em condições de mesma temperatura e velocidade do ar. Resultados obtidos com dados experimentais, com modelos empíricos, com modelos semiteóricos de parâmetros concentrados e com modelos de parâmetros distribuídos indicaram que o teor de umidade inicial e por consequência a distribuição de umidade dentro do grão impactam de forma significativa nas taxas de secagem. Quanto maior o tempo de secagem, maior será a influência dos efeitos difusivos internos do grão controlando o processo, de forma que a distribuição de umidade dentro do grão influenciará na velocidade com que a água atingirá a superfície.

5. ESTUDO EXPERIMENTAL DA SECAGEM PERIÓDICA E CONVENCIONAL EM LEITO FIXO

5.1 Introdução e Objetivos

Do estudo realizado na revisão bibliográfica deste trabalho, observou-se que o processo de secagem é essencial para manter a qualidade do grão durante seu armazenamento e que este processo demanda uma grande parte da energia consumida durante toda a cadeia de produção do grão. Uma alternativa que vem sendo aplicada para reduzir o consumo energético é a operação intermitente, a qual visa encontrar as melhores condições de modulação das propriedades do ar, como sua temperatura, visando atingir a umidade ideal de armazenamento com os menores gastos energéticos possíveis. Um tipo de secagem intermitente é a operação periódica, que será definida neste trabalho como a operação na qual se modulam as condições operacionais do sistema como a vazão e a temperatura do ar de alimentação em certa frequência e amplitude continuamente. Os estudos da secagem periódica de grãos, em especial da soja, atualmente são escassos. Contudo, Romero *et al.* (2010) e Defendi (2013) fizeram um estudo teórico em que mostraram que a secagem periódica de soja com modulação da temperatura do ar pode ser mais eficiente e gastar menos energia do que a secagem convencional.

Alguns autores estudaram a operação periódica em reatores químicos e observaram que a modulação das condições dos reagentes pode melhorar o rendimento do reator, potencializar os transportes de massa ou de energia, aumentar a seletividade ou até mesmo aumentar a conversão das reações. (BECKER *et al.*, 2011; BOUNECHADA *et al.*, 2013; BRZIC *et al.*, 2010; LANGE *et al.*, 1999; ROUGE *et al.*, 2001; SILVESTON e HANIKA, 2004; SILVESTON e HUDGINS, 2004; TUKAC *et al.*, 2003; TUKAC *et al.*, 2007; WONGKIA *et al.*, 2013). Lange *et al.* (1999) fizeram um estudo teórico e experimental, no qual mostraram que a operação periódica alcança conversões maiores em dado tempo médio de reação em comparação com as reações com fluxos constantes quando os catalisadores são mantidos periodicamente em contato com diferentes fluxos do reagente líquido em reatores de leito gotejante.

Rouge *et al.* (2001) realizaram um estudo teórico e experimental da desidratação isopropanol em propeno levantando a cinética de reação em um reator catalítico de leito fixo. Os resultados experimentais confirmaram o previsto aumento teórico do rendimento do reator sob operação periódica excedendo o rendimento dos reatores operando em regime permanente.

Outro trabalho publicado sobre o estudo da operação periódica em reatores de leito gotejante foi o artigo de Tukac *et al.* (2003) em que estes autores estudaram a operação periódica na oxidação úmida catalítica de diferentes poluentes orgânicos nos processos industriais de tratamento de água. Estes autores mostraram que a conversão do fenol nesta operação foi 10% maior que a realizada em regime permanente. Além disso, Tukac *et al.* (2007) verificaram que a operação periódica em reatores de leito gotejante aumentou a produtividade do reator em 30% no processo de hidrogenação do estireno ao se comparar com a operação em regime permanente.

Acrescentando a isso, Borremans *et al.* (2004) analisaram o impacto da operação periódica na transferência de calor entre partícula e fluido em reatores de leito gotejante. Seus resultados mostraram que para as condições estudadas nos experimentos, a operação periódica não teve influência no coeficiente de transferência de calor entre a partícula e o fluido, o qual se manteve praticamente o mesmo quando comparado com a operação em regime permanente.

Silveston e Hanika (2004) comprovaram experimentalmente que a operação periódica em reatores catalíticos pode aumentar a conversão da reação, mudar sua seletividade e potencializar os transportes de massa. No caso do sistema de secagem de grãos, Romero *et al.* (2010) fizeram um estudo teórico em que mostraram que a secagem periódica de soja com modulação da temperatura pode ser mais eficiente e gastar menos energia do que a secagem convencional. Estes autores observaram que o aumento da amplitude favorece a operação periódica, uma vez que aumenta sua eficiência e que baixos períodos aumentam o consumo energético do processo aproximando o comportamento do sistema ao de uma secagem convencional.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é efetuar experimentos de secagem de soja em leito fixo tanto em operação convencional quanto em operação periódica em condições nas quais ambas as operações demandem o mesmo consumo energético, a mesma demanda de ar e tempo de secagem, visando avaliar se há melhora no

desempenho do secador, caracterizado pelo aumento da quantidade de água evaporada no final do processo.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Equipamentos e Materiais

Os equipamentos e materiais utilizados foram um compressor que opera a 7 bar, um aquecedor elétrico com resistência de $7,60 \Omega$, um regulador de tensão (VARIAC) para controlar a voltagem aplicada no aquecedor, um rotâmetro, um secador de leito fixo isolado com lã de 6 cm de diâmetro interno e 30 cm de comprimento, um psicrômetro digital, 17 termopares do tipo K (precisão de $\pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$), um cronômetro, soja do tipo EMBRAPA 48 fornecida pela COCAMAR, uma balança com leitura mínima de 0,01 g, uma balança analítica com leitura mínima de 0,0001 g, um paquímetro digital, bolinhas de isopor e uma estufa que opera a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. O sistema analisado está representado pela Figura 5.1.

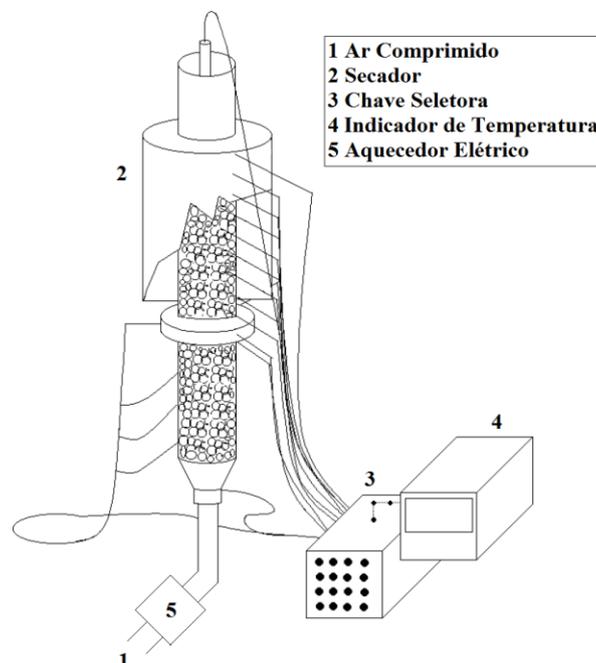


Figura 5.1 – Sistema dos Equipamentos Utilizados (FREGOLENTE et al., (2004))

O ar do sistema é fornecido pelo compressor em cuja linha de tubulação há um rotâmetro para quantificar a vazão de ar. O ar segue para um aquecedor elétrico que possui um dispositivo para regular a voltagem aplicada. Em seguida, o ar percorre o leito do secador, onde há vários termopares situados em diferentes posições conforme a Tabela 5.1. O leito é preenchido com soja suportada pelas bolinhas de isopor (material de baixa absorção de umidade). Além disso, as bolinhas de isopor ajudam a uniformizar o fluxo do ar e a evitar caminhos preferenciais. O psicrômetro é usado para medir a temperatura e umidade do ambiente e do ar na saída do secador.

Tabela 5.1 – Posição dos Termopares

Posição acima da entrada do leito (cm)	Número de Termopares	Posição acima da entrada do leito (cm)	Número de Termopares
0.0	3	20.3	1
5.3	1	23.3	1
8.3	1	26.3	1
11.3	1	29.3	1
14.3	1	30.0	5
17.3	1		

5.2.2 Procedimento Experimental

Primeiramente, ajustou-se a vazão do ar e sua temperatura inicial ligando a resistência na primeira posição desejada aguardando-se até que o ar atinja temperatura constante. A temperatura, a umidade absoluta e a umidade relativa foram medidas tanto para o ar de secagem quanto para o ar ambiente. Em sequência, preencheu-se a base do leito com bolas de isopor que serviram como suporte ao leito de soja e ajudaram a uniformizar o fluxo de ar para evitar caminhos preferenciais. Além disso, o isopor apresenta alta inércia térmica e baixa absorção de umidade. Os trinta centímetros do leito do secador isolado foram preenchidos apenas com soja, cuja massa foi quantificada. Quatro amostras da soja utilizada foram levadas em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas a fim de se determinar o teor de umidade inicial.

Com o leito preenchido, a linha de ar do compressor foi plugada na entrada do secador e secou-se o material durante 1 hora. As temperaturas em cada termopar foram

medidas ao longo do processo. O psicrômetro foi acoplado na saída do secador para medir a umidade absoluta e a temperatura do ar que deixa o leito. No final do processo, a massa de soja seca foi quantificada e quatro amostras foram levadas em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas para se determinar o teor médio de umidade final da soja.

Foram realizados quatro tipos diferentes de experimentos, sendo um com modulação apenas da temperatura do ar na entrada do secador, mantendo sua vazão constante, outro com a modulação apenas da vazão do ar, mantendo a temperatura constante (aquecedor desligado), outro com modulação da vazão do ar juntamente com fornecimento de calor ao ar a uma taxa constante e o último com a modulação simultânea do calor fornecido ao ar e da sua velocidade.

No primeiro caso, foram feitas perturbações alternadas entre dois valores fixos na voltagem imposta à resistência do secador em intervalos constantes ao passo que a vazão do ar foi fixada no valor constante de 100 L/min. Dessa forma, a temperatura na entrada do secador variou periodicamente conforme o ar era aquecido e resfriado. As posições nas quais a voltagem foi ajustada e os intervalos de tempo em cada perturbação estão apresentados na Tabela 5.2. Todos os experimentos foram realizados em duplicata e em sequência aleatória.

Tabela 5.2 – Condições dos Experimentos com Modulação da Temperatura

Primeira / Segunda Posição do Regulador da Voltagem (%)	Intervalo Entre Cada Perturbação (min)	Vazão do Ar (L/min)	Número de Perturbações
A) 0 / 20	10	100	6
B) 20 / 0	10	100	6
C) 0 / 20	30	100	2
D) 0 / 20	5	100	12
E) 0 / 27	10	100	6
F) 0 / 15	10	100	6

No segundo caso, a secagem foi realizada com o ar em temperatura constante e ambiente, sendo que o aquecedor elétrico permaneceu desligado durante todo o processo. Foram impostas modulações na vazão do ar entre dois valores fixos em

intervalos constantes conforme a Tabela 5.3. Estes experimentos também foram realizados em duplicata e em sequência randômica.

Tabela 5.3 – Condições dos Experimentos com Modulação da Vazão

Primeira / Segunda Posição da Vazão (L/min)	Intervalo Entre Cada Perturbação (min)	Posição do Regulador da Voltagem (%)	Número de Perturbações
G) 200 / 40	10	0	6
H) 40 / 200	10	0	6
I) 200 / 40	30	0	2
J) 200 / 40	5	0	12
K) 170 / 70	10	0	6
L) 140 / 100	10	0	6

Para ficar mais clara a forma da modulação da vazão do ar na entrada do secador, a Figura 5.2 apresenta as perturbações para os casos G, K e L e para a operação convencional no valor médio de 120 L/min.

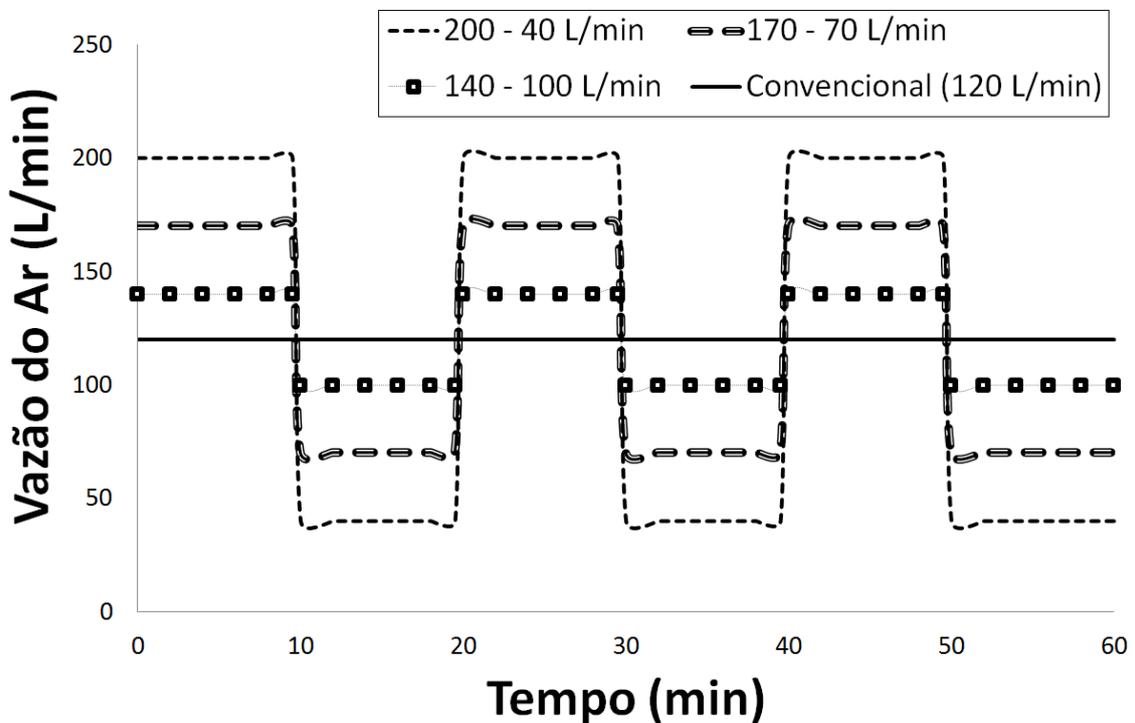


Figura 5.2 – Modulação da Vazão do Ar na Entrada do Secador

No terceiro caso, a resistência do aquecedor foi acionada no valor específico de 17% de forma que a quantidade de calor fornecida ao ar foi constante ao longo da secagem. Nestas condições, a vazão do ar foi modulada conforme a Tabela 5.4, sendo os experimentos conduzidos em duplicata e em sequência aleatória.

Tabela 5.4 – Condições dos Experimentos com Modulação da Vazão e Fornecimento de Calor numa Taxa Constante

Primeira / Segunda Posição da Vazão (L/min)	Intervalo Entre Cada Perturbação (min)	Posição do Regulador da Voltagem (%)	Número de Perturbações
M) 200 / 40	10	17	6
N) 40 / 200	10	17	6
O) 200 / 40	30	17	2
P) 200 / 40	5	17	12
Q) 170 / 70	10	17	6
R) 140 / 100	10	17	6

Por fim, modulou-se simultaneamente o calor fornecido ao ar de secagem e sua vazão ao longo do processo de secagem. Nestas condições, tanto a voltagem imposta à resistência do aquecedor quanto a vazão do ar de secagem foram alternadas entre dois valores fixos em intervalos constantes durante todo o processo. As posições do regulador da voltagem e da vazão do ar estão apresentadas na Tabela 5.5. Novamente, os experimentos foram conduzidos em duplicata e em ordem randômica.

Tabela 5.5 – Condições dos Experimentos com Modulação Simultânea do Calor Fornecido ao Ar e de sua Vazão

Primeira / Segunda Posição do Regulador da Voltagem (%)	Intervalo Entre Cada Perturbação (min)	Primeira / Segunda Posição da Vazão (L/min)	Número de Perturbações
S) 0 / 20	10	200 / 40	6
T) 0 / 20	10	40 / 200	6
U) 20 / 0	10	40 / 200	6
V) 20 / 0	10	200 / 40	6

É interessante ressaltar que para todos os tipos de operação periódica, com exceção da operação com modulação simultânea do calor fornecido e da vazão do ar, foram feitos três experimentos para três amplitudes distintas e três experimentos para três intervalos de tempo distintos. Foram tomados valores de amplitudes e períodos pequenos, médios e grandes de forma que se adequassem ao tempo de secagem de uma hora. Para o caso com modulação simultânea do calor fornecido e da vazão do ar, foram feitos experimentos numa amplitude fixa e nos intervalos de perturbação de 10 minutos, porém foram combinadas as formas de se iniciar os valores das perturbações na vazão do ar e na voltagem aplicada no aquecedor.

A menor vazão adotada foi de 40 L/min, pois foi o menor valor perceptível pelo anemômetro na saída do leito. O valor máximo de 200 L/min foi tomado com base na leitura máxima do rotâmetro. Quanto ao valor máximo da voltagem, este foi considerado tentando evitar que a temperatura do ar ultrapassasse 60 °C, o qual é o valor que pode ser atingido para soja em processos industriais segundo Silva *et al.* (2008).

Para cada secagem periódica, uma secagem convencional (temperatura e vazão do ar constantes durante todo o processo) foi conduzida no mesmo dia para evitar interferências inerentes às condições climáticas nas análises comparativas entre os rendimentos de ambas as operações. As operações convencionais foram realizadas de forma a consumir o mesmo gasto energético referente à entrada de energia no sistema, o mesmo tempo de secagem (uma hora) e a mesma demanda de ar (trabalhou-se com a vazão média da operação periódica) em relação às quantidades obtidas de suas respectivas secagens periódicas. A quantidade de energia consumida durante a operação periódica foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$E_p = \int \dot{m}_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot T_{a_p} \cdot dt \quad (5.1)$$

Em que T_{a_p} é a temperatura do ar de alimentação da operação periódica. Este consumo energético avalia a quantidade de energia que o ar fornece na entrada do secador para que a secagem ocorra. Uma vez que o leito é adiabático, essa quantidade foi a energia consumida pelo processo de secagem. Neste cálculo de consumo energético, não se levou em conta a forma com que o ar foi aquecido, que neste caso foi por meio de resistências elétricas. O intuito deste estudo é avaliar se com o mesmo fornecimento de energia na entrada do secador é possível aumentar o rendimento do

processo com uso da modulação das condições do ar. Para processos industriais, é interessante integrar este estudo de rendimento com os custos inerentes ao processo de aquecimento do ar.

Como a temperatura do ar é constante em operação convencional, a energia consumida nesta operação é dada por:

$$E_C = \dot{m}_{ar} c p_{ar} \cdot T a_C \cdot t \quad (5.2)$$

Em que $T a_C$ é a temperatura do ar de alimentação da operação convencional. Para garantir o mesmo consumo energético em ambas as operações, a temperatura do ar na entrada do secador para a operação convencional foi determinada com base na energia consumida em operação periódica calculada pela equação (5.1). Assim, igualaram-se as equações (5.1) e (5.2) para garantir que o consumo energético foi o mesmo em ambas as operações conduzidas no mesmo dia. A voltagem necessária a ser aplicada ao aquecedor para chegar à temperatura desejada foi estimada pelo modelo do aquecedor do Capítulo 3.

5.2.3 Caracterização do Leito

A porosidade do leito no início e no final do processo foi determinada com base nos dados obtidos da massa do leito de soja e na equação para sua massa específica ajustada no Capítulo 4 (Figura 4.7), a qual se encontra em função da umidade da soja. Além disso, foi medida a variação da altura do leito contraído no final do processo. O volume ocupado pela massa de soja no leito foi determinado dividindo a massa do leito pela massa específica da soja estimada pela equação da Figura 4.7. A porosidade do leito foi determinada dividindo a diferença entre o volume total do leito e o volume ocupado pela soja pelo volume total do leito, cujo volume para o leito contraído foi calculado em função da altura do leito:

$$\varepsilon = \frac{V_T - V_S}{V_T} = 1 - \frac{V_S}{V_T} \quad (5.3)$$

Em que V_T é o volume total do leito e V_S é o volume ocupado pela soja. Um tratamento estatístico foi realizado para verificar se há diferença entre as médias das porosidades iniciais e finais do leito.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Modulação da Temperatura

Os resultados indicaram que a operação periódica pode levar a maiores rendimentos uma vez que as taxas de secagem foram maiores em comparação com os resultados obtidos em operação convencional. Foi constatado que a porcentagem de água evaporada foi maior para todos os experimentos em operação periódica em comparação com suas respectivas operações convencionais. A Tabela 5.6 apresenta a porcentagem de água evaporada nos experimentos cujo foco foi a modulação da temperatura do ar. A equação utilizada para calcular a porcentagem de água evaporada no final do processo foi a seguinte:

$$M_{ev} = \frac{m_{ev}}{y_0 \cdot m_s} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

Tabela 5.6 – Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Temperatura)

Porcentagem de Água Evaporada (%)			
Experimento (Tabela 5.2)	Operação Periódica	Operação Convencional	Diferença
A	33,1	27,6	5,5
A	28,6	22,3	6,3
B	33,4	28,6	4,8
B	30,0	25,0	5,0
C	34,1	26,3	7,8
C	29,8	23,4	6,4
D	30,4	26,2	4,2
D	32,3	24,9	7,4
E	35,6	28,6	7,0
E	33,2	27,6	5,6
F	29,0	24,9	4,1
F	32,2	25,0	7,2

Em que M_{ev} é a porcentagem da massa de água evaporada, m_{ev} é a massa de água evaporada, y_0 é a umidade da soja inicial em base úmida e m_s é a massa de soja inicial presente no leito.

O perfil de umidade do ar na saída do secador também indicou uma melhora no seu rendimento em operação periódica. Os níveis de umidade foram maiores em comparação com os níveis em operação convencional. Estes resultados evidenciam que a quantidade de água transferida para a fase gasosa foi maior em operação periódica. Observou-se uma melhora nos transportes de massa e de energia envolvidos no processo, uma vez que as taxas de secagem foram maiores. Como as taxas de secagem não são linearmente dependentes da temperatura do ar, a operação periódica pode atingir um maior rendimento em comparação a operação com a temperatura do ar constante, quando ambas as operações são conduzidas com o mesmo consumo energético e mesmo tempo de secagem.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o perfil de umidade do ar na saída do secador respectivamente para os experimentos com a modulação da voltagem nas posições de 0 – 15% e 0 – 27%. Estes experimentos referem-se aos experimentos F e E da Tabela 5.2. É possível observar que há uma tendência de aumento nas taxas de secagem com o aumento da amplitude da voltagem aplicada. Essa tendência está mais visível na Figura 5.5, a qual apresenta o perfil de umidade do ar na saída do secador para três diferentes tipos de modulação da voltagem. Estes perfis indicam que quanto maior o valor da amplitude da voltagem, maiores são os níveis de umidade do ar na saída do secador indicando um aumento nas taxas de secagem.

O aumento na amplitude da modulação da voltagem leva a maiores oscilações na temperatura como pode ser observado na Figura 5.6, a qual apresenta a temperatura do ar na entrada do secador para três tipos diferentes de amplitudes. As temperaturas iniciais de cada curva são diferentes, pois a temperatura ambiente foi diferente em cada dia. Quanto maior a amplitude, maior é o pico de temperatura atingido, o que pode aumentar as taxas de secagem e modificar as condições de equilíbrio, propriedades que impactam na velocidade da secagem e no teor final de umidade possível de ser atingido.

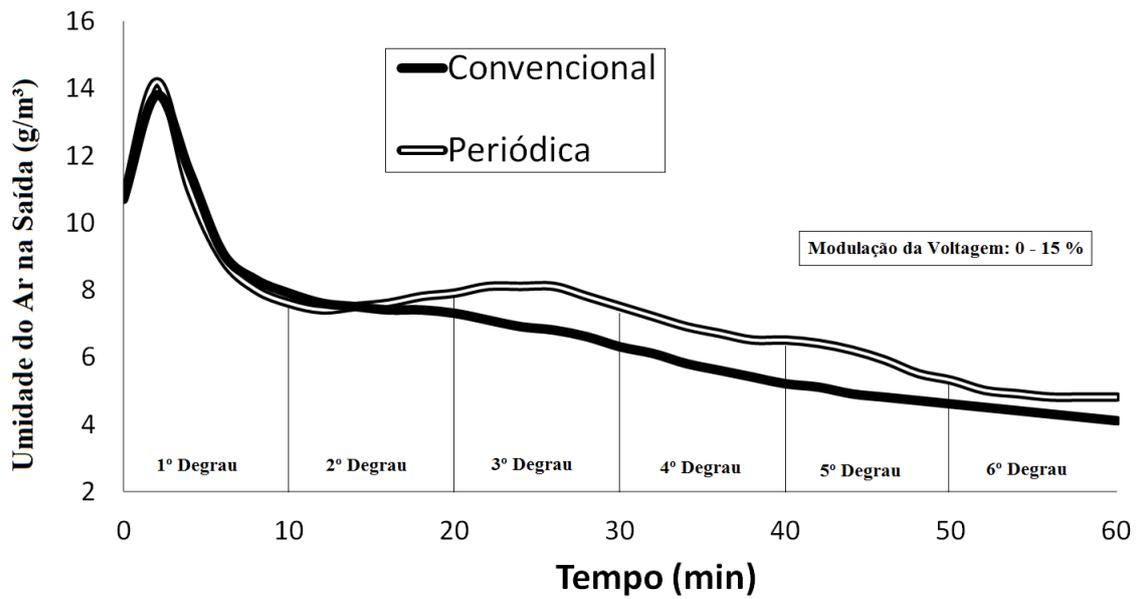


Figura 5.3 – Umidade do Ar na saída do Secador para modulação 0 – 15% da voltagem

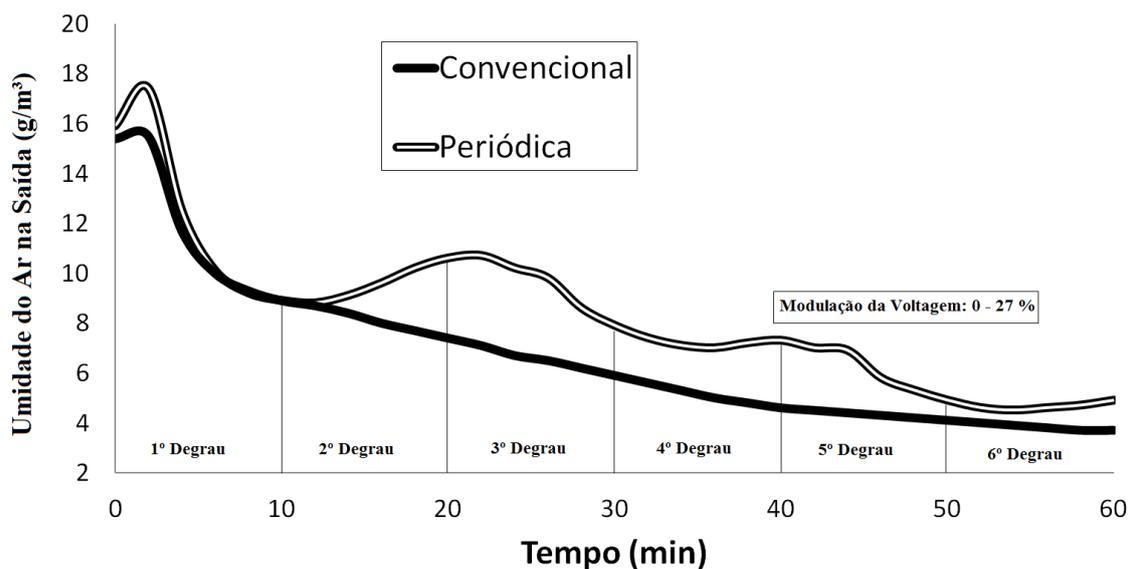


Figura 5.4 – Umidade do Ar na saída do Secador para modulação 0 – 27% da voltagem

As oscilações na temperatura do ar melhoraram as transferências de massa e de energia envolvidas no processo, o que favoreceu a operação periódica. É interessante ressaltar que após 40 minutos, os níveis de umidade do ar se aproximam entre as diferentes oscilações da Figura 5.5. Destes resultados, há indícios de que é interessante se trabalhar com as maiores temperaturas no início do processo e as menores temperaturas no final. Com o decorrer da secagem, mais os efeitos de transporte

internos do grão controlam o processo, como foi observado no capítulo 4. Assim, as maiores temperaturas no final do processo não vão impactar tanto nas taxas de secagem quanto no início, momento no qual a quantidade de água na superfície do grão é maior.

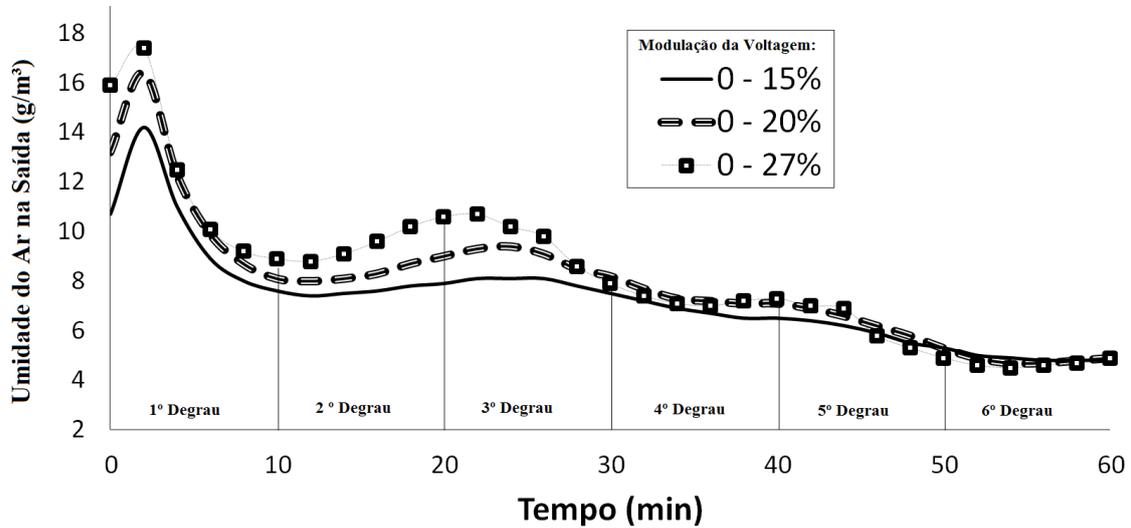


Figura 5.5 – Umidade do Ar na saída do Secador para diferentes modulações da voltagem

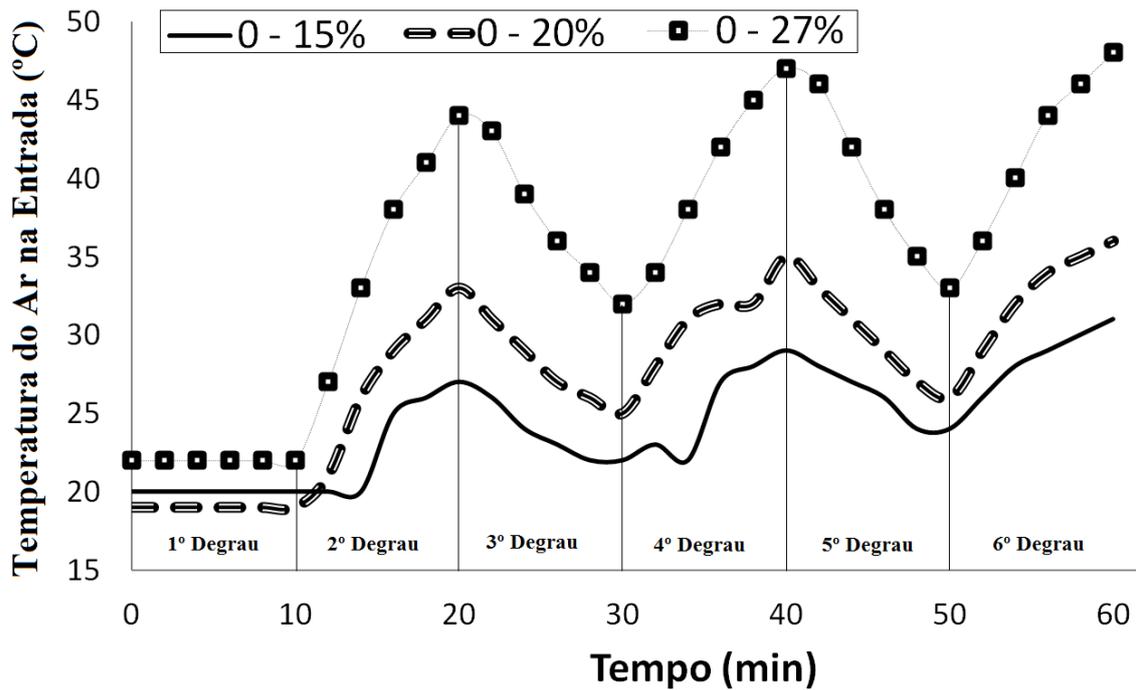


Figura 5.6 – Temperatura do Ar para diferentes modulações da voltagem

Outro fato interessante a ser ressaltado é que, devido às taxas de secagem serem maiores na operação periódica, esta pode demandar menos tempo que a operação convencional para se atingir um determinado valor de umidade. Além disso, observou-se que a operação periódica secou mais, em um mesmo tempo de secagem e em uma

mesma demanda energética, que a operação convencional. Assim, para se atingir um certo valor de umidade, a operação periódica pode consumir menos energia, pois como a operação periódica atingiu o valor de umidade final da operação convencional antes dos 60 minutos de secagem, se o processo fosse interrompido quando a periódica atinge este valor de umidade, o consumo energético seria menor.

As Figuras 5.7 e 5.8 representam os perfis de temperatura ao longo do leito do experimento E da Tabela 5.2, respectivamente em operação periódica e convencional. Foi possível verificar que durante a operação periódica as oscilações de temperatura são maiores ao longo de todo o leito, levando a maiores taxas de secagem. Além disso, constatou-se que uma hora de secagem não foi suficiente para se atingir um equilíbrio térmico em ambas as operações, uma vez que há diferença de temperatura entre a entrada e a saída do secador. Como o leito é isolado, e conforme se observa as tendências das curvas das Figuras 5.6 e 5.7, espera-se que estas temperaturas sejam iguais em certo tempo de secagem.

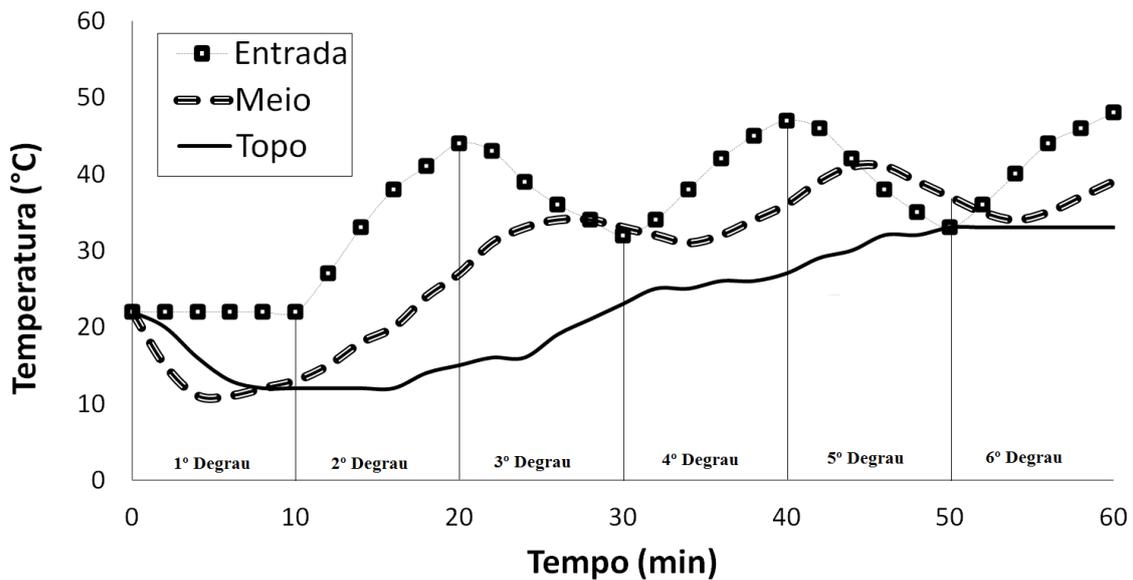


Figura 5.7 – Perfil de Temperatura ao longo do leito para a Operação Periódica

Outro fato interessante a ser ressaltado é que para baixos valores de amplitude referente a modulação da voltagem, a operação periódica tende a valores similares de taxas de secagem aos da secagem convencional, como pode ser observado na Figura 5.3. Esta tendência é análoga quando se analisa os intervalos de tempo entre as perturbações na voltagem. Baixos valores destes intervalos (5 minutos) levam a baixas oscilações na temperatura do ar resultando em perfis semelhantes de umidade do ar na

saída do secador para ambas as operações como mostra a Figura 5.9. Este comportamento indica que as taxas de secagem são semelhantes entre estas operações nestas condições. Este comportamento também foi observado por Romero *et al.* (2010).

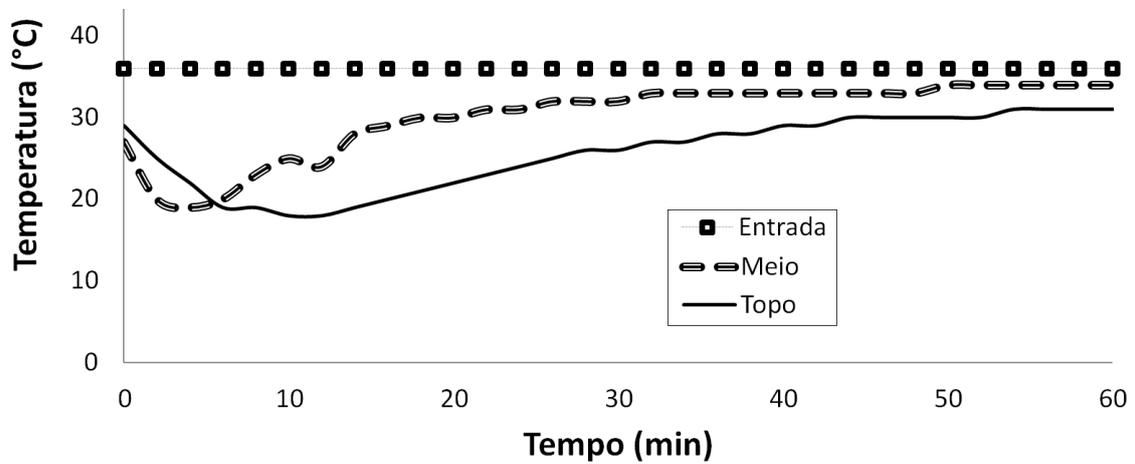


Figura 5.8 – Perfil de Temperatura ao longo do leito para a Operação Convencional

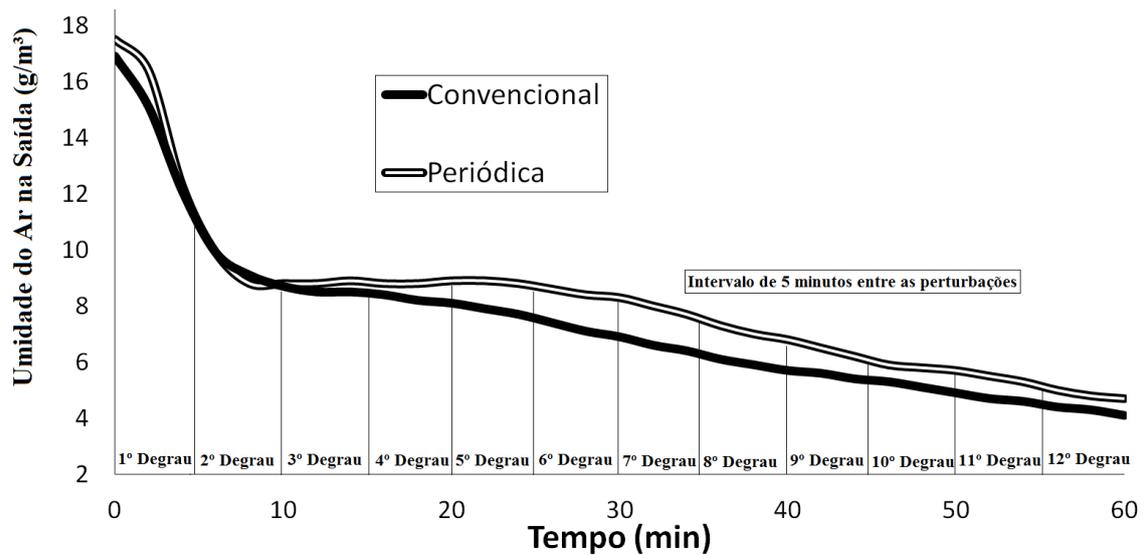


Figura 5.9 – Umidade do Ar para intervalo entre perturbações de 5 min

Para o maior intervalo entre as perturbações (30 minutos), tanto a secagem periódica quanto a convencional podem atingir altos níveis de taxas de secagem dependendo do momento no qual o processo é analisado como pode ser observado na Figura 5.10, a qual apresenta a umidade do ar na saída do secador para o experimento com o intervalo de 30 minutos. No começo desta secagem, os níveis de umidade do ar na saída do secador são menores em comparação aos níveis em operação convencional.

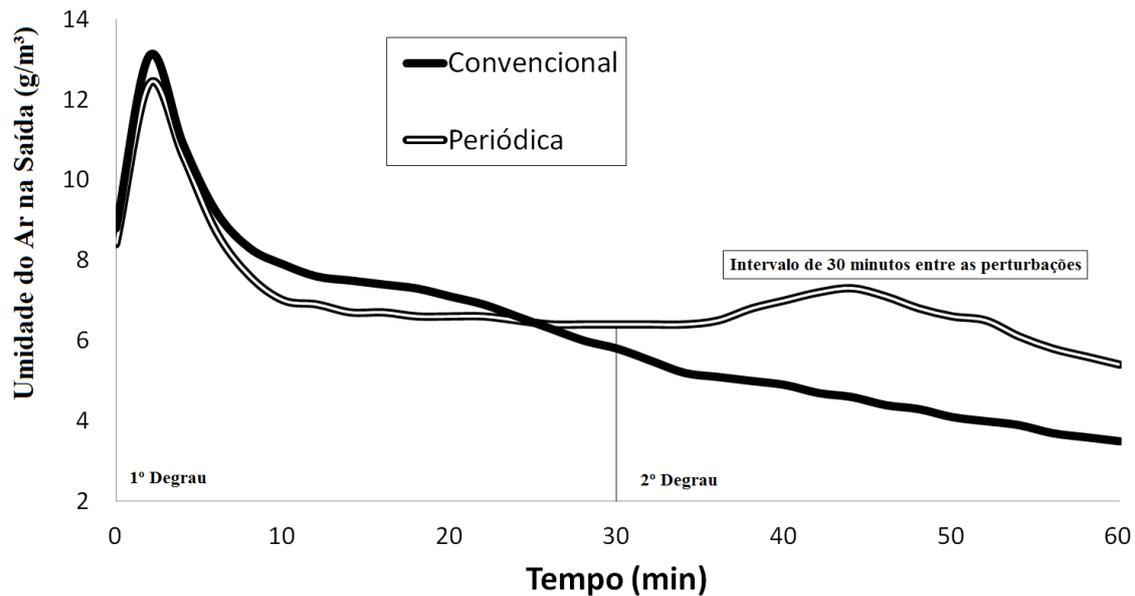


Figura 5.10 – Umidade do Ar para intervalo entre perturbações de 30 min

Assim, nos primeiros minutos do processo a secagem convencional atinge maiores valores de taxas de secagem. Contudo, depois de 30 minutos, a temperatura do ar da operação periódica atinge valores superiores aumentando as taxas de secagem. Neste momento, a superfície da soja pode estar bastante insaturada e os efeitos difusos internos do grão podem estar controlando fortemente o processo. Mesmo assim, as maiores temperaturas no final do processo potencializaram as transferências de massa e de energia envolvidas no processo aumentando assim as taxas de secagem. Um aumento destas taxas neste momento da secagem melhorou a eficiência do processo uma vez que a porcentagem de água evaporada foi maior em operação periódica.

Os intervalos de tempo entre as perturbações na voltagem do aquecedor impactaram no comportamento dos perfis de umidade do ar na saída do secador como pode ser constatado na Figura 5.11 que apresenta estes perfis para três diferentes intervalos entre as perturbações. As taxas de secagem foram maiores para os intervalos de 5 e de 10 minutos e para o intervalo de 30 minutos respectivamente no começo e no final do processo. Para o caso de intervalo de 30 minutos, o processo se inicia nas menores temperaturas, por isso as menores taxas de secagem no começo. Um estudo de otimização com base em um modelo ajustado com os dados obtidos neste trabalho permitirá encontrar as melhores condições de operação visando atingir a umidade ideal de estocagem com os menores custos possíveis.

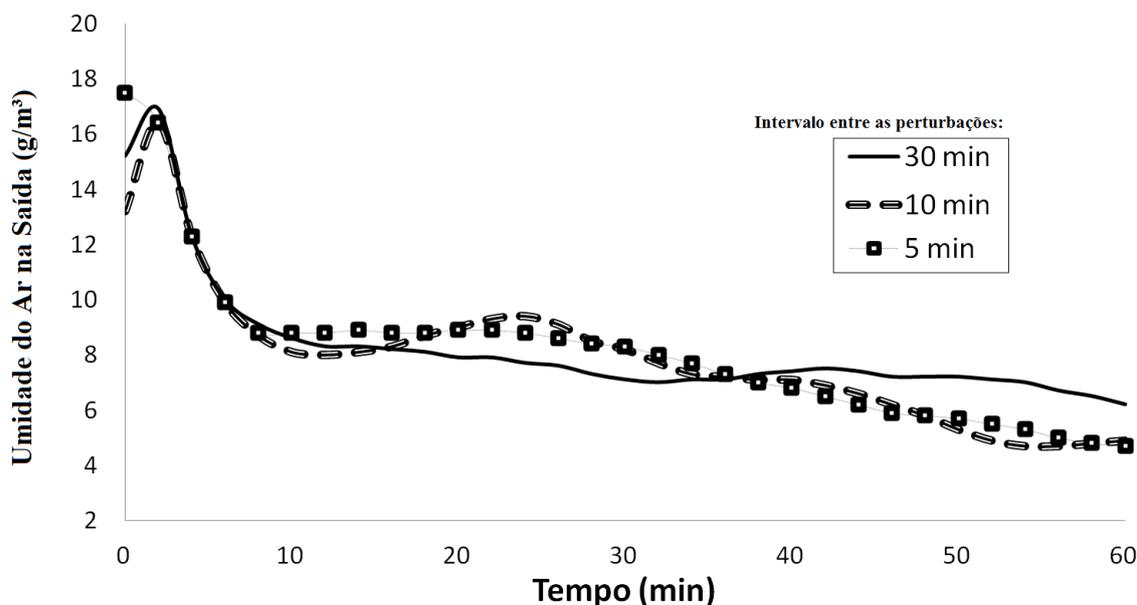


Figura 5.11 – Umidade do Ar para diferentes intervalos entre perturbações

Os intervalos de tempo entre as perturbações também impactam nas oscilações da temperatura como pode ser verificado na Figura 5.12. Valores mais altos de intervalos permitem que a temperatura do ar atinja valores superiores uma vez que o tempo que o ar recebe energia para ser aquecido sem sofrer perturbações é maior.

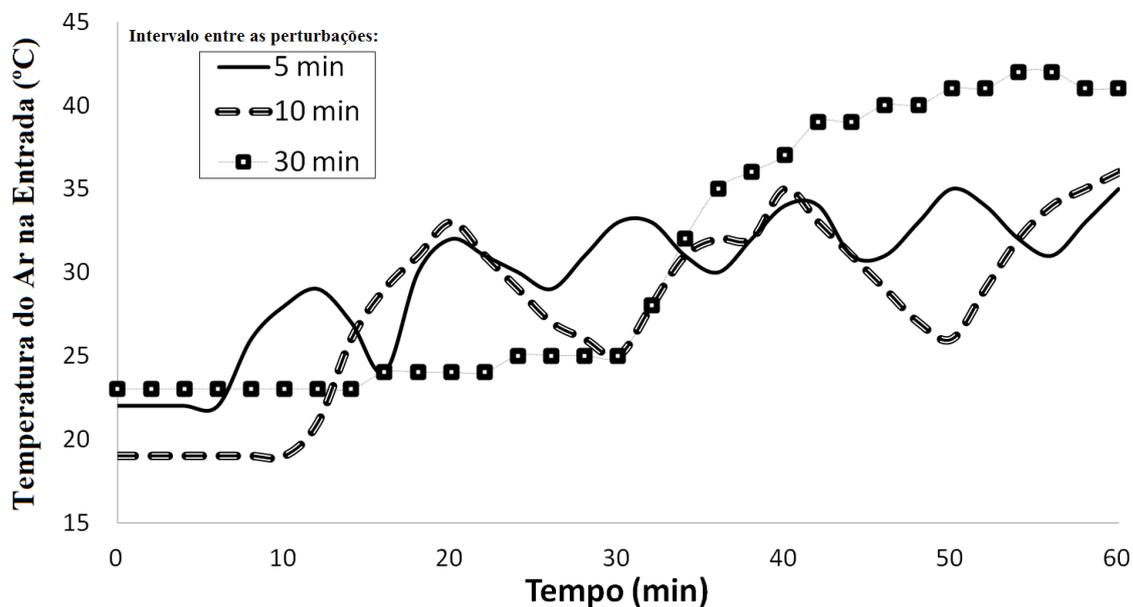


Figura 5.12 – Temperatura na entrada do secador para diferentes intervalos

Um tratamento estatístico foi usado para analisar se há diferença significativa entre as médias das porcentagens de água evaporada das operações periódicas e convencionais. O método utilizado foi o teste t pareado descrito por Montgomery e

Runger (2003). Este método é ideal para amostras de pequenos tamanhos com variâncias desconhecidas e para observação de duas populações de interesse quando os dados coletados são feitos em pares e em condições homogêneas.

Para cada operação periódica, foi realizado um experimento em operação convencional conduzido no mesmo dia garantindo assim as mesmas condições climáticas. Além disso, ambas as operações foram conduzidas com a mesma amostra de soja (garantindo também a mesma umidade inicial). Assim, os experimentos foram realizados em condições homogêneas e coletados aos pares.

Para se utilizar o teste pareado t , é necessário que as amostras tenham distribuição normal e que as amostras tenham variâncias homogêneas. O Software gratuito R foi utilizado para avaliar estas suposições. A função *shapiro.test* foi utilizada para usar o teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Resultados indicaram que, com 5% de significância, ambas as amostras possuem distribuição normal com o valor p de 0,6205 para os dados de operação periódica e com o valor p de 0,5286 para os dados de operação convencional.

A função *var.test* foi utilizada para comparar se há diferença significativa entre as variâncias das amostras. Resultados indicaram que as variâncias das amostras são similares com 5% de significância. O valor p obtido foi de 0,7325.

A Figura 5.13 apresenta um diagrama de caixa para a distribuição de porcentagem de água evaporada para cada tipo de operação. Nesta figura, é possível inferir que as médias das porcentagens de água evaporada entre as operações periódica e convencional aparentam ser diferentes. Para confirmar esta observação, a função *t.test* foi utilizada com os dados das diferenças entre as porcentagens da operação periódica e convencional. O teste confirmou que há diferença significativa entre estas médias com 5% de significância. O valor p obtido foi de $4,751 \cdot 10^{-09}$. Assim, o tratamento estatístico confirmou a melhora no rendimento do secador pelo uso da operação periódica com modulação da temperatura do ar na sua entrada, uma vez que a quantidade de água evaporada foi significativamente maior em comparação com a quantidade evaporada em operação convencional, nos casos em que ambas as operações foram realizadas com o mesmo gasto energético, mesmo tempo de secagem, mesma amostra de soja e mesma demanda de ar.

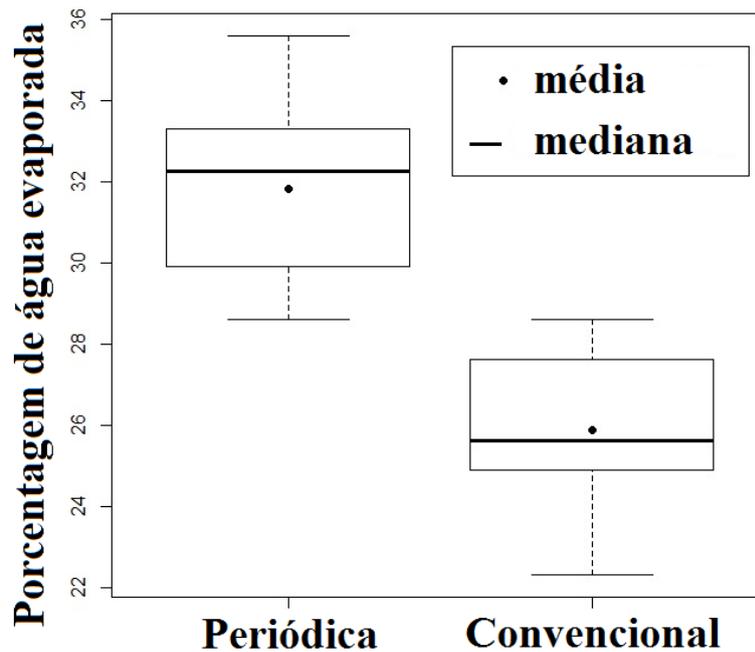


Figura 5.13 – Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Temperatura)

5.3.2 Modulação da Vazão

Nos experimentos com modulação da vazão do ar e sem fornecimento de calor para aquecer o ar, observou-se que a operação periódica também mostrou ser vantajosa com base nas quantidades de água evaporada no processo. A Tabela 5.7 apresenta as porcentagens de água evaporada para cada operação. Destes resultados, notou-se que a quantidade relativa de água evaporada foi maior em operação periódica com modulação da vazão do ar na entrada do secador em comparação com os dados em operação convencional.

Este tipo de operação impacta na quantidade de água por massa de ar que vai sendo transportada ao longo do leito e impacta na temperatura ao longo do leito. Estas duas propriedades por sua vez influenciam nas taxas de secagem, uma vez que elas interferem nas transferências de massa e de energia e nas condições de equilíbrio. A Figura 5.14 mostra o perfil de umidade do ar na saída do secador para três diferentes tipos de amplitude entre as perturbações na vazão do ar. Nota-se que nesta figura foi construída apenas uma curva para a operação convencional (realizada a 120 L/min) referente ao experimento de modulação de 200 – 40 L/min, uma vez que as curvas das

outras operações convencionais foram muito similares devido a vazão do ar ser a mesma e as temperaturas ambientes serem próximas.

Tabela 5.7 – Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão)

Porcentagem de Água Evaporada (%)			
Experimento (Tabela 5.3)	Operação Periódica	Operação Convencional	Diferença
G	27,9	23,2	4,7
G	26,0	22,9	3,1
H	26,6	23,3	3,3
H	24,0	21,5	2,5
I	28,8	24,3	4,5
I	24,7	22,3	2,4
J	28,5	24,4	4,1
J	23,3	20,3	3
K	29,9	23,6	6,3
K	25,3	21,2	4,1
L	26,4	21,6	4,8
L	22,5	19,1	3,4

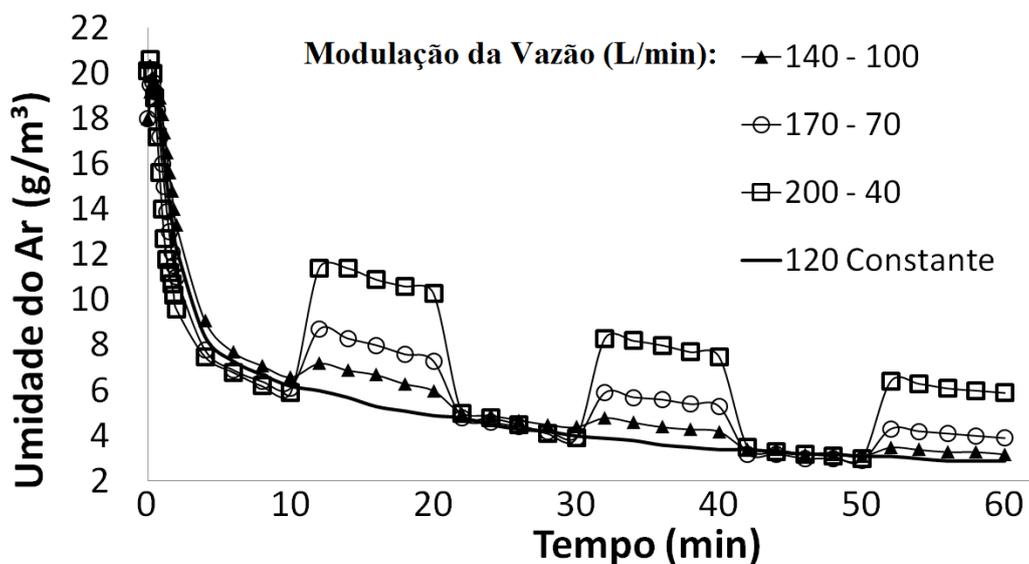


Figura 5.14 – Umidade do ar para diferentes amplitudes de modulação da vazão

Desta figura, constata-se que, quanto menor a velocidade do ar, mais altos são os níveis de umidade na saída do secador. Neste caso, não se pode dizer que quanto maior os níveis de umidade do ar na saída do secador maiores são as taxas de secagem, pois as vazões do ar alternaram, diferentemente do caso anterior, no qual elas eram constantes. Quanto maior a vazão do ar, menos tempo este fica dentro do secador e menor é a quantidade de água por massa de ar transportada com o tempo. Quanto menor a vazão, maiores são as possibilidades de o ar saturar e, quanto mais próximo da saturação, maiores as pressões parciais do vapor d'água no ar. Estes fatos dificultam o transporte de massa de água do grão para o ar, o que impacta em uma redução das taxas de secagem. Assim, em leito profundo a vazão (por consequência a velocidade também) do ar influencia nas taxas de secagem, pois altera as condições de equilíbrio e os transportes de massa e de energia entre o grão e o ar. A operação periódica foi mais vantajosa, pois houve indícios com base nas quantidades de água evaporada que as maiores velocidades compensaram as menores velocidades em comparação com a velocidade média em operação convencional. Este resultado indica que as taxas de secagem não são linearmente dependentes da velocidade do ar.

Outro fato interessante a ser avaliado é que a temperatura do leito decaiu nas menores vazões devido à evaporação. A Figura 5.15 apresenta o perfil de temperatura dentro do leito na entrada, no meio e na saída para o experimento I da Tabela 5.3, em que o intervalo entre as perturbações da vazão de 200 e 40 L/min foi de 30 min. Verifica-se destes resultados que a operação periódica apresenta níveis de temperatura maiores nos trinta minutos iniciais do processo uma vez que sua vazão é maior e por consequência a umidade do ar é menor. Após os 30 minutos, quando a vazão em operação periódica é reduzida, a temperatura do meio do leito começa a diminuir devido ao aumento de umidade. Por outro lado, a temperatura do topo do leito leva em torno de 10 minutos para sentir o efeito da perturbação da vazão.

O teste estatístico pareado t também foi aplicado nas diferenças entre as porcentagens de água evaporada analogamente ao caso anterior dos experimentos com modulação apenas da temperatura do ar. O teste apontou, em um nível de confiança de 95%, que as operações periódicas e convencionais apresentam diferença significativa entre suas médias de porcentagem de água evaporada em condições de mesmo gasto energético, tempo de secagem e demanda de ar. O valor p obtido foi de $1,303.10^{-07}$. A Figura 5.16 apresenta o diagrama de caixa para a distribuição das porcentagens de água

evaporada, sendo possível observar também que há diferença entre as médias das operações. O teste de Shapiro-Wilk indicou que as amostras tanto da operação periódica quanto da convencional apresentam distribuição normal com 5% de significância resultando em valores p respectivamente de 0,9582 e de 0,6986. Além disso, o teste pela função *var.test* indicou, com 5% de significância, que há igualdade entre as variâncias das amostras com o valor p de 0,2526.

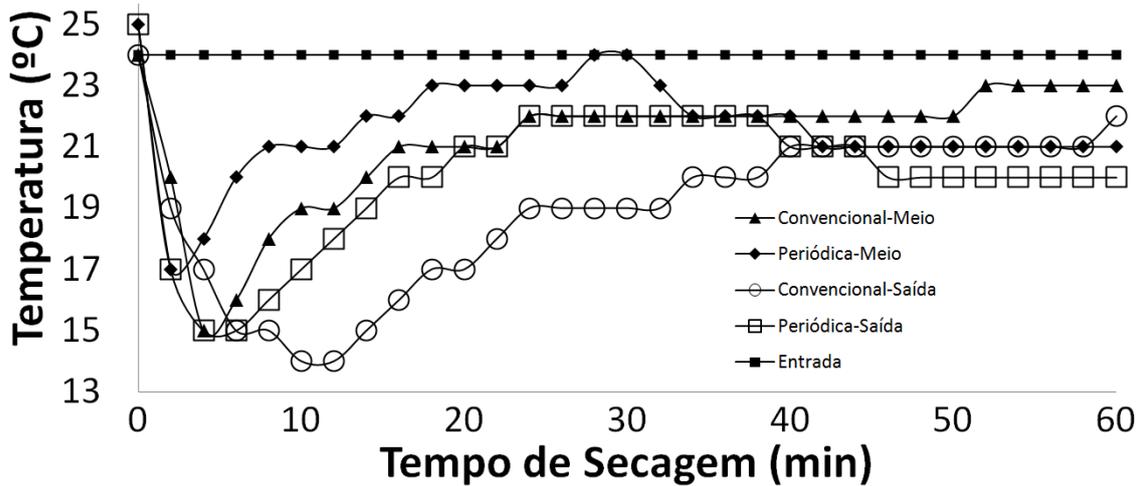


Figura 5.15 – Temperatura ao longo do leito para experimento com modulação da vazão

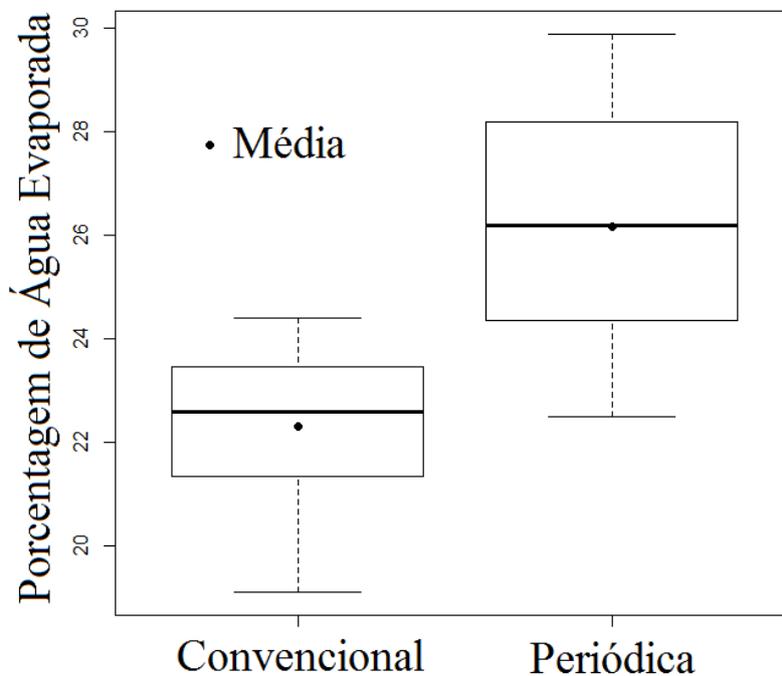


Figura 5.16 – Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão)

5.3.3 Modulação da Vazão com Fornecimento de Taxa de Calor Constante

Ao contrário do caso anterior, no qual a temperatura de entrada do ar era mantida constante, em função da variação da vazão do ar, sua temperatura mudou ao longo do tempo de secagem, uma vez que a taxa de calor fornecida pelas resistências do aquecedor eram constantes. A Figura 5.17 apresenta os perfis de temperatura na entrada e na saída do secador referentes ao experimento M da Tabela 5.4, cuja modulação da vazão foi feita entre 200 e 40 L/min em intervalos de 10 minutos com o aquecedor ligado na posição do regulador da voltagem de 17%.

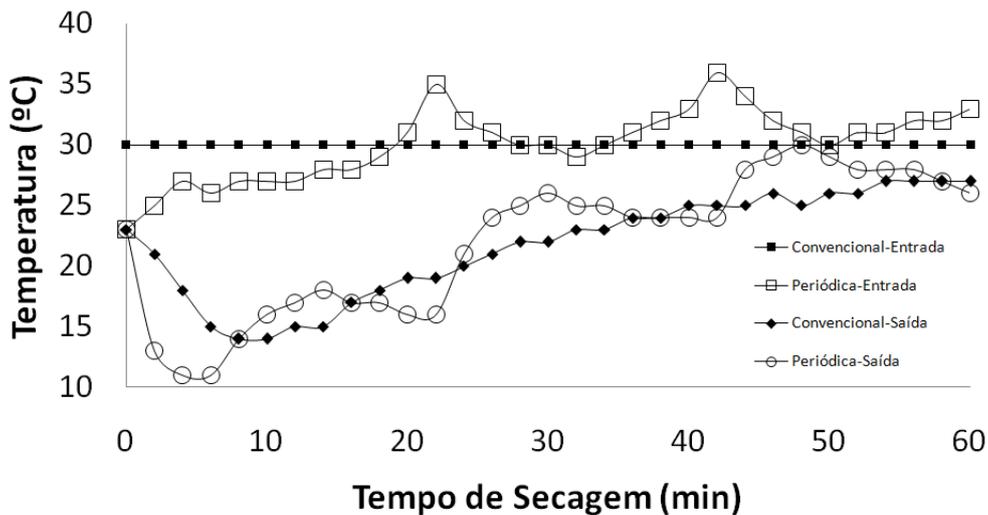


Figura 5.17 – Temperatura na entrada e saída do leito para o experimento M

Observa-se que a temperatura do ar oscila tanto na entrada quanto na saída do secador. Estas oscilações beneficiaram a secagem uma vez que as porcentagens de água evaporada foram maiores em operação periódica como pode ser observado na Tabela 5.8. Além disso, os perfis de umidade do ar na saída do secador foram levemente superiores como pode ser observado na Figura 5.18 caracterizando uma leve melhora nas taxas de secagem com a adição da oscilação da temperatura. A Figura 5.17 apresenta os perfis de umidade do ar para os experimentos G da Tabela 5.3 e M da Tabela 5.4, realizados com o mesmo tipo de modulação da vazão, sendo o primeiro a temperatura constante e o outro com oscilações da temperatura. Neste caso, como as velocidades foram as mesmas e as temperaturas ambientes foram próximas (condições climática similares), os perfis de umidade podem ser comparados e um aumento no nível do teor de umidade do ar na saída do secador indica um aumento nas taxas de secagem.

Tabela 5.8 – Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão com Fornecimento de Calor em Taxa Constante)

Porcentagem de Água Evaporada (%)			
Experimento (Tabela 5.4)	Operação Periódica	Operação Convencional	Diferença
M	29,8	25,3	4,5
M	27,3	22,9	4,4
N	28,8	25,1	3,7
N	29,9	25,1	4,8
O	35,6	28,5	7,1
O	31,5	26,6	4,9
P	34,5	28,1	6,4
P	31,4	25,9	5,5
Q	35,6	28,9	6,7
Q	31,3	26,9	4,4
R	35,9	30,6	5,3
R	31,4	26,0	5,4

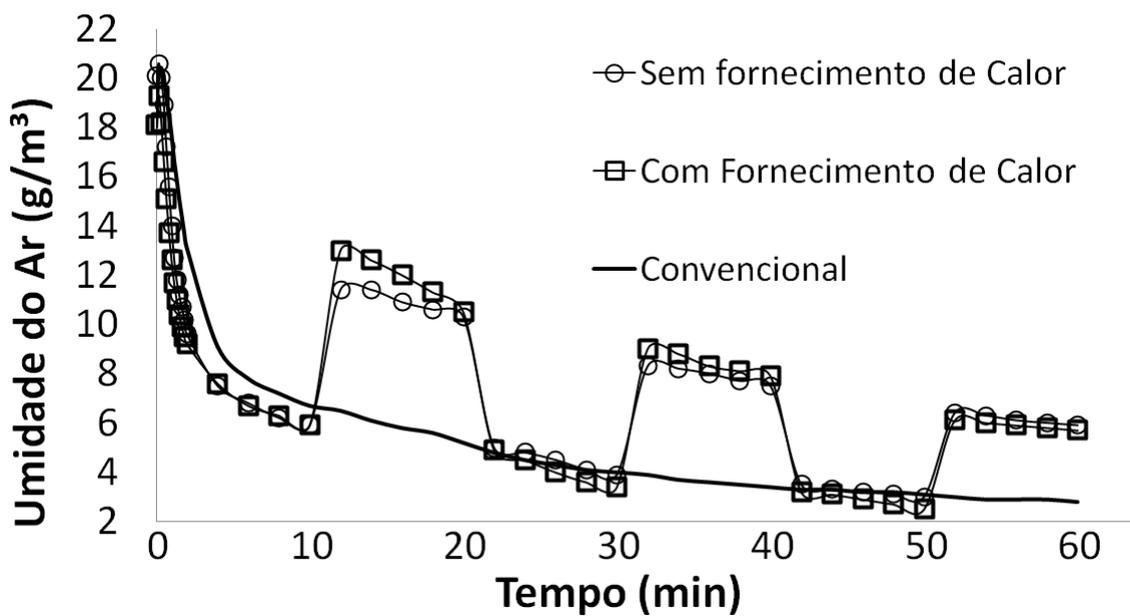


Figura 5.18 – Umidade do Ar para os experimentos G e M

O impacto da amplitude da modulação da vazão do ar foi análogo ao encontrado no estudo do item anterior como pode ser constatado na Figura 5.19 que apresenta os perfis de umidade do ar na saída do secador para diferentes amplitudes. Contudo, a diferença concentra-se no fato das oscilações na temperatura do ar levemente aumentarem as taxas de secagem, pois os níveis de umidade do ar na saída do secador foram levemente superiores.

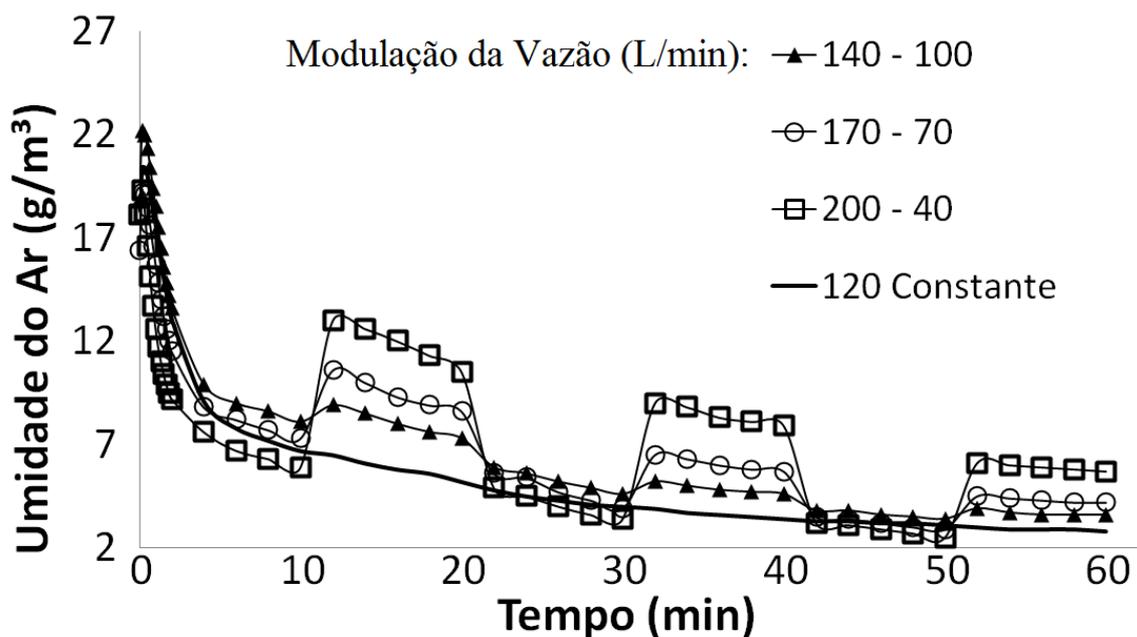


Figura 5.19 – Umidade do Ar para diferentes amplitudes de modulação da vazão

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apontou com 5% de significância que os dados referentes às porcentagens de água evaporada apresentam distribuição normal com os valores p de 0,2294 e de 0,9465, respectivamente para a operação periódica e convencional. O teste para verificar a igualdade entre as variâncias apontou, com o valor p de 0,3081, que as variâncias são iguais com 5% de significância. Assim, os pressupostos do teste pareado t foram satisfeitos e este teste apontou, com um nível de confiança de 95%, que as médias entre as porcentagens de água evaporada das operações periódica e convencional são diferentes, em casos com mesma demanda energética, mesmo tempo de secagem e mesmo consumo de ar (valor p obtido de $1,991 \cdot 10^{-09}$). Este resultado indica que houve melhora significativa no desempenho do secador com a operação periódica, pois as taxas de secagem foram significativamente superiores. A Figura 5.20 apresenta o diagrama de caixa das porcentagens de água evaporada para os experimentos deste tópico em estudo.

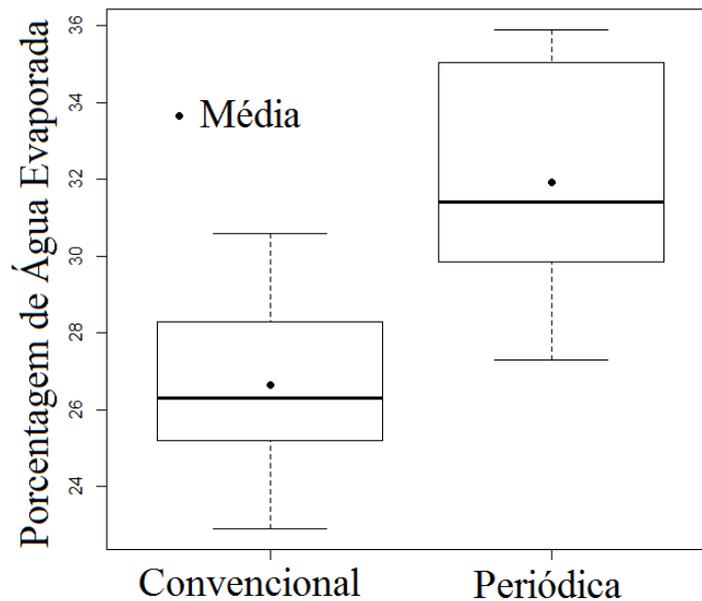


Figura 5.20 – Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação da Vazão com Aquecimento do Ar a uma Taxa Constante)

5.3.4 Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor

Os resultados obtidos para os experimentos com as modulações simultâneas da vazão do ar e da taxa de calor cedida ao ar pelo aquecedor apontaram que as porcentagens de água evaporada no processo foram maiores em operação periódica como mostra a Tabela 5.9. As oscilações da velocidade e da temperatura do ar na entrada do secador potencializaram os transportes de massa e de energia envolvidos no processo, melhorando as taxas de secagem. Os perfis de temperatura e de umidade tem um comportamento específico de acordo com o tipo de modulação, conforme são mostrados nas Figuras 5.21 e 5.22, respectivamente, os perfis de temperatura e umidade para os experimentos S (inicia com velocidade alta e temperatura baixa), T (inicia com velocidade e temperatura baixa), U (inicia com velocidade baixa e temperatura alta) e V (inicia com velocidade e temperatura alta).

Observou-se que as oscilações nos perfis de temperatura são maiores para os casos dos experimentos S e U, em que as maiores taxas de calor estão juntas às menores velocidades. Para estes casos, a temperatura na entrada do ar resfria e esquenta rapidamente, tendo variações de 10 °C. Temperaturas altas com velocidades altas (casos

T e V) não permitem que o ar esquente e esfrie muito. É interessante ter maiores variações na temperatura do ar, como visto anteriormente, pois isto proporciona um aumento nas taxas de secagem. Contudo, constatou-se que todos os tipos de modulações favoreceram a secagem periódica aumentando a quantidade de água evaporada.

Tabela 5.9 – Porcentagem de Água Evaporada (Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor)

Porcentagem de Água Evaporada (%)			
Experimento (Tabela 5.5)	Operação Periódica	Operação Convencional	Diferença
S	29,1	23,9	5,2
S	29,1	24,2	4,9
T	29,5	23,9	5,6
T	24,8	21,5	3,3
U	31,3	27,0	4,3
U	28,9	25,2	3,7
V	33,2	27,2	6
V	32,0	25,6	6,4

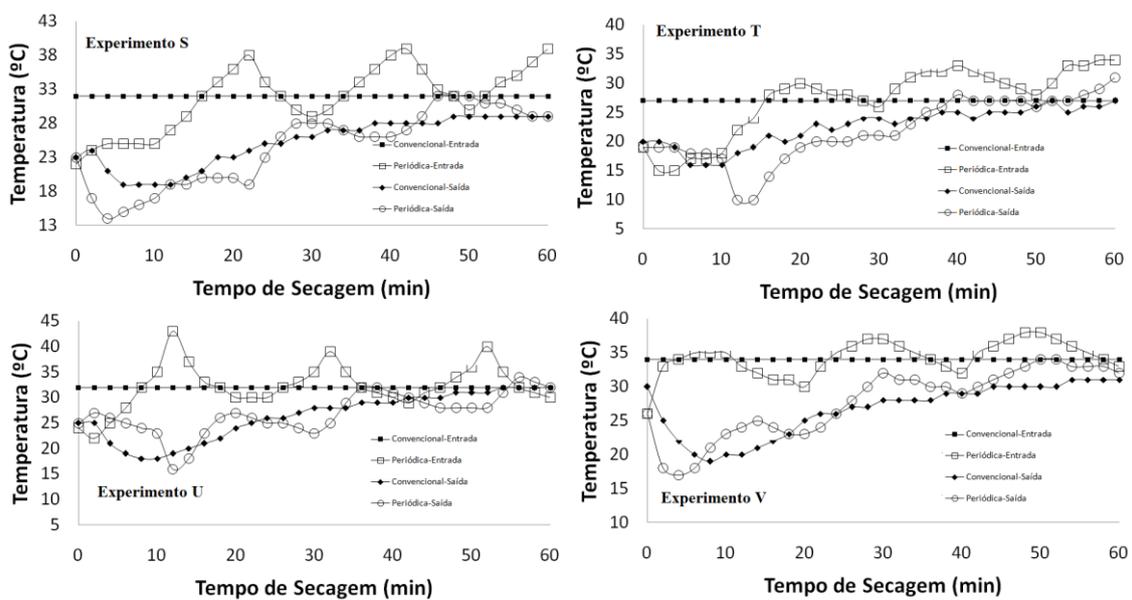


Figura 5.21 – Perfil de Temperatura para experimentos com modulação da vazão e da taxa de calor

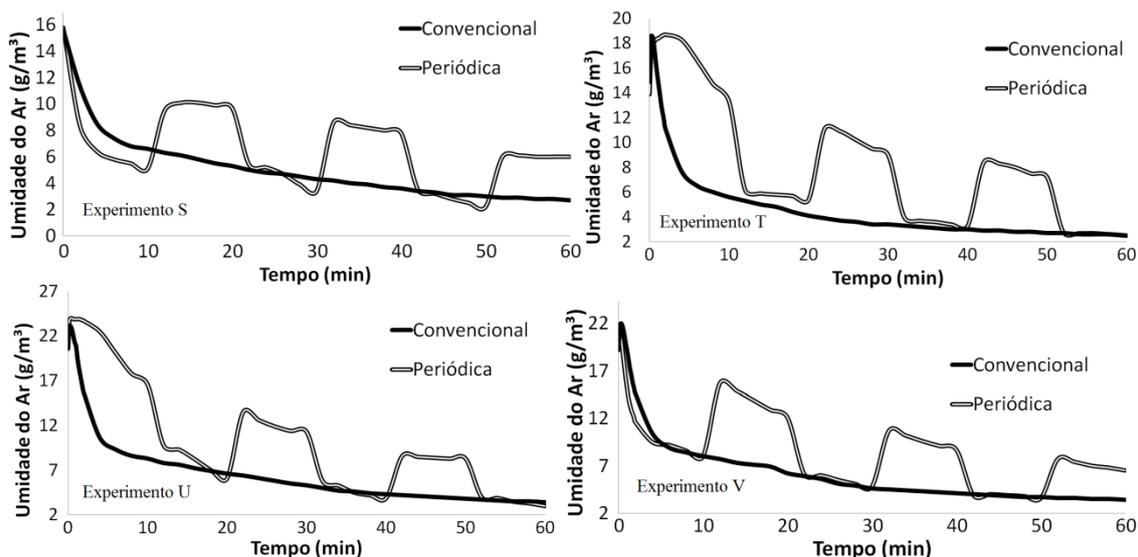


Figura 5.22 – Perfil de Umidade para experimentos com modulação da vazão e da taxa de calor

Quanto aos perfis de umidade na saída do secador, constatou-se que a velocidade do ar é a variável que mais impacta nestes perfis, pois independente da temperatura do ar, os níveis de umidade foram mais altos nas menores velocidades. Este fato não indica necessariamente que as taxas de secagem foram maiores, visto que o tempo de residência do ar dentro do leito é menor do que este tempo nas maiores velocidades.

Os testes estatísticos também indicaram melhora no desempenho do secador em operação periódica, pois as quantidades de água evaporada foram significativamente maiores em comparação com as quantidades obtidas em operação convencional nos casos em que ambas as operações consumiram o mesmo gasto energético, tiveram o mesmo tempo de secagem e demandaram a mesma quantidade de ar. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk apontou com um valor p de 0,4323 para os dados de operação periódica e de 0,6396 para os dados de operação convencional, que os dados seguem distribuição normal com 5% de significância. O teste de igualdade entre variâncias apontou, em um nível de 95% de confiança, que as variâncias são iguais. O teste pareado t indicou com 5% de significância que há diferença significativa entre as médias das porcentagens de água evaporada entre as operações periódica e convencional (valor p de $4,269 \cdot 10^{-06}$).

A Figura 5.23 mostra o diagrama de caixa para a distribuição das porcentagens de água evaporada em cada operação. Neste gráfico, nota-se que os níveis percentuais

são mais altos para a operação periódica. Além disso, toda faixa de distribuição dos níveis percentuais de água evaporada na operação periódica está em regiões superiores à faixa da operação convencional

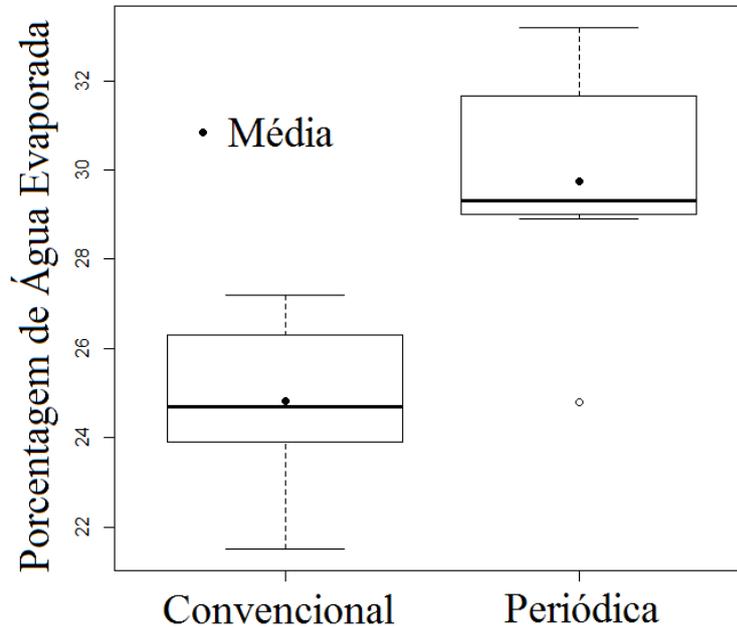


Figura 5.23 – Diagrama de Caixa para a Porcentagem de Água Evaporada (Modulação Simultânea da Vazão e da Taxa de Calor)

5.3.5 Caracterização do Leito

Observou-se no final dos experimentos que o leito de soja encolheu de 3 a 40 mm em sua altura dependendo do tipo de operação. Constatou-se que em operação periódica o encolhimento foi superior ao obtido em operação convencional. Contudo, observou-se uma tendência de a porosidade do leito se manter constante, havendo apenas uma leve diminuição em seu valor médio no final do processo.

A Figura 5.24 apresenta o diagrama de caixa para a distribuição de porosidade para os experimentos em operação convencional e periódica tanto no início quanto no final do processo. Observa-se que a distribuição entre os dados são muito similares. Para verificar se esta similaridade é significativa, foi aplicado um teste de comparações múltiplas construindo a Tabela ANOVA com o auxílio do software R. Como o valor de

F_0 (0,5115) foi menor que o valor de F (0,6749), não se rejeitou a hipótese de que as médias entre as porosidades de cada situação são iguais com 5% de significância.

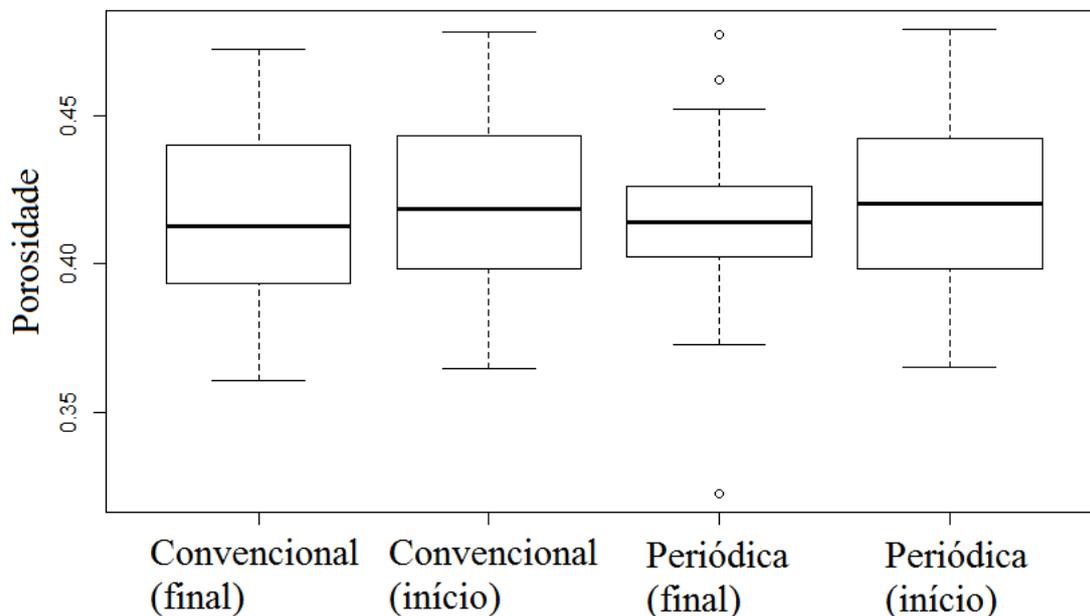


Figura 5.24 – Diagrama de Caixa para a Distribuição de Porosidade

Para determinar se o teste aplicado foi adequado, verificaram-se os pressupostos do teste. Assim, foram analisados o comportamento dos resíduos, a homogeneidade das variâncias e se há distribuição normal dos dados por meio da Figura 5.25, gerada pelo programa R.

Observa-se do gráfico 1 desta figura que os resíduos estão aleatórios em torno de zero, fato esperado indicando variâncias constantes. Do gráfico 2, nota-se que a maioria dos dados estão próximos da reta de normalidade, sendo que poucos dados estão levemente afastados, apontando assim que há distribuição normal dos dados. Enquanto isso, no gráfico 4 poucos dados estão fora do intervalo entre 2 e -2, o que indica que os resíduos estão dentro de limites aceitáveis para que o modelo possa ser considerado adequado.

Neste contexto, aplicou-se o teste *bartlett.test* do programa R para verificar se há homogeneidade entre as variâncias. Como o valor de p foi igual a 0,8875 não se rejeitou a hipótese de que as variâncias são iguais com 5% de significância. Além disso, com o valor p de 0,1201, o teste de Shapiro-Wilk indicou que os resíduos possuem distribuição normal ao nível de 95% de confiança. Assim, como os pressupostos do modelo foram

satisfeitos, as conclusões feitas com a Tabela ANOVA são válidas, ou seja, não há diferença significativa entre as médias de porosidade para o leito em operação periódica e convencional tanto no início quanto no final do processo. A porosidade média do leito resultou em 0,42.

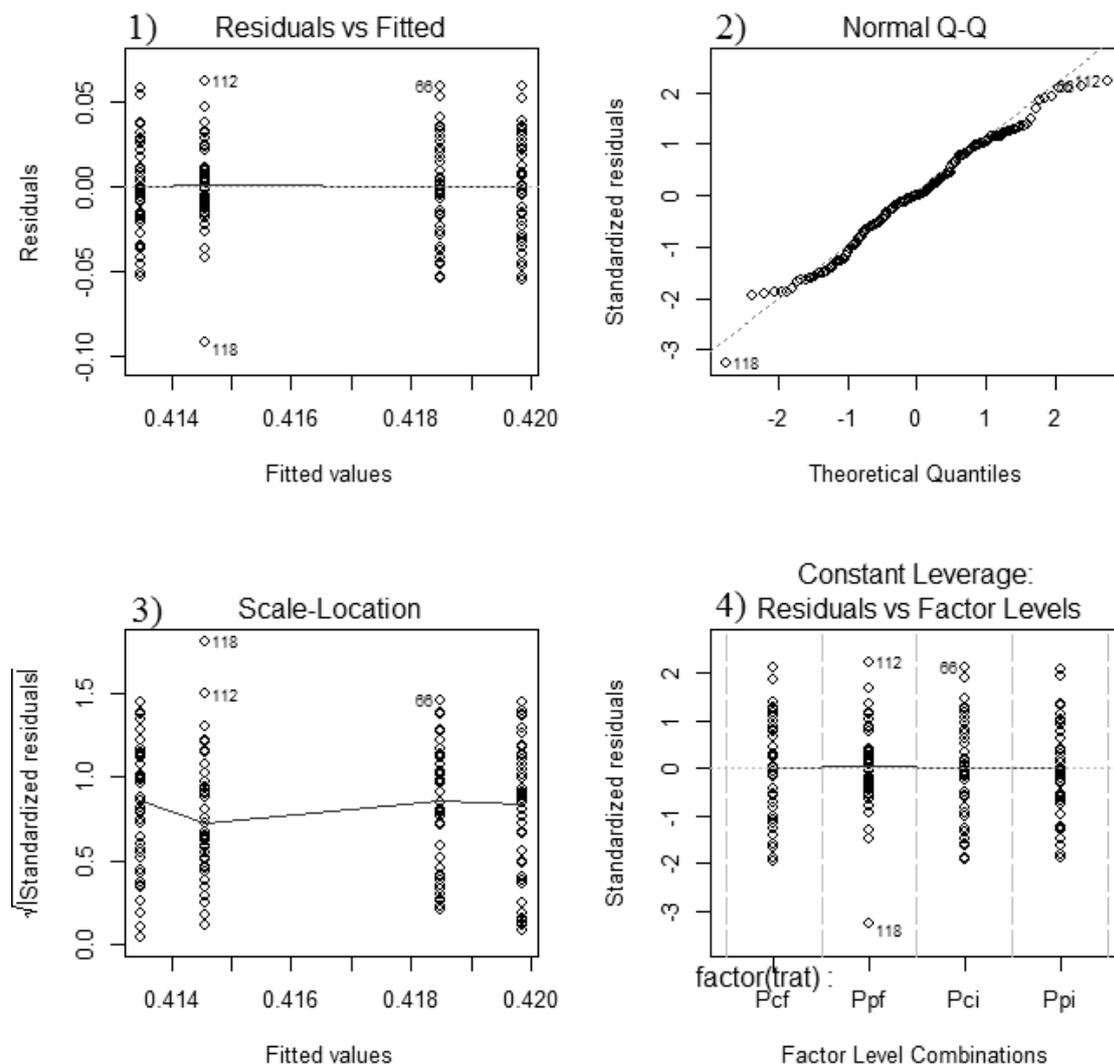


Figura 5.25 – Resíduos, Normalidade e Homogeneidade das Variâncias

5.4 Conclusão

Observou-se, dos resultados obtidos, que a operação periódica pode aumentar o rendimento do secador em comparação à secagem convencional, nos casos em que ambas as operações tiverem o mesmo gasto energético, tempo de secagem e demanda de ar. A modulação da temperatura e da vazão do ar na entrada do secador potencializou

os transportes de massa e de energia envolvidos no processo e alterou as condições de equilíbrio, levando assim a maiores taxas de secagem. Testes estatísticos indicaram com 5% de significância que a porcentagem de água evaporada em operação periódica foi maior em comparação aos resultados obtidos na operação convencional.

Constatou-se que maiores amplitudes na modulação das propriedades do ar irão impactar em maiores oscilações na temperatura e na umidade do ar ao longo do processo de secagem. Além disso, pequenas amplitudes e intervalos de tempo entre as perturbações levam o comportamento da operação periódica próximo ao da operação convencional. Houve indícios de que é interessante se trabalhar com as maiores temperaturas (consequentemente altas amplitudes nas oscilações da temperatura) no início do processo e as menores temperaturas no final, pois com o decorrer da secagem, os efeitos de transporte interno no grão controlam ainda mais o processo.

Observou-se que a velocidade do ar é a variável que mais impacta em seu teor de umidade em decorrência dos tempos de residência do ar no leito, mas não foi comprovado se a velocidade é a variável que mais impacta nas taxas de secagem. Resultados obtidos no Capítulo 4 e nas referências apontam a temperatura e os efeitos de transporte interno no grão como as propriedades que mais influenciam as taxas de secagem. Por fim, testes estatísticos apontaram que não houve mudança significativa na média do valor da porosidade com o encolhimento do leito; a porosidade média obtida foi de 0,42.

6. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE SOJA EM LEITO FIXO

6.1 Introdução e Objetivos

Neste capítulo objetivou-se ajustar o modelo heterogêneo a duas fases apresentado na revisão bibliográfica aos dados obtidos na secagem de soja em operação periódica e convencional do capítulo anterior. O objetivo deste ajuste é aplicar o modelo na simulação e na otimização do processo de secagem visando avaliar e minimizar o consumo energético.

Prado (2004) aponta as vantagens de se usar modelos matemáticos na simulação computacional dos perfis de umidade e temperatura em secadores, destacando a possibilidade de se examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo, sem a necessidade de se obter dados experimentais e a ajuda em se compreender melhor os fenômenos de transferência de massa e de energia entre o sólido e a fase fluida, permitindo o estudo da otimização dos processos a fim de se obter condições ideais para armazenamento.

Neste contexto, o modelo foi ajustado com dados de temperatura e umidade do ar de secagem e com dados da quantidade de água evaporada no processo. Foram feitos estudos de sensibilidade dos parâmetros do modelo ajustado e estudos de análise energética, avaliando se a aplicação da operação periódica reduz o consumo energético para se atingir um determinado valor para o teor de umidade da soja próprio para o seu armazenamento. Por fim, o modelo ajustado será aplicado na otimização do processo no próximo capítulo, em que serão determinadas as melhores condições de modulação das propriedades do ar na entrada do secador.

6.2 Metodologia

6.2.1 Resolução do Modelo

Para resolução do sistema de equações diferenciais do modelo a duas fases abordado na revisão bibliográfica, utilizou-se o método numérico das diferenças finitas para frente, como demonstrado a seguir:

$$Y_{S_i}^{n+1} = Y_{S_i}^n - \Delta t. \frac{K_s a. (Y_{S_i}^n - Y_{se_i}^n)}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}} \quad (6.1)$$

$$T_{S_i}^{n+1} = T_{S_i}^n + \Delta t. \frac{ha(Tg_i^n - Ts_i^n) - f(Cpv(Tg_i^n - Ts_i^n) + \lambda)}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}(Cps + CplY_{S_i}^n)} \quad (6.2)$$

$$Yg_{i+1}^n = Yg_i^n + \Delta z. \frac{K_s a}{G_g} (Y_{S_i}^n - Y_{se_i}^n) \quad (6.3)$$

$$Tg_{i+1}^n = Tg_i^n - \Delta z. \frac{ha(Tg_i^n - Ts_i^n)}{G_g(Cpar + Yg_i^n.Cpv)} \quad (6.4)$$

Em que i e n são os índices referentes a divisões no espaço e no tempo respectivamente. Os calores específicos do ar, da água e do vapor e o calor latente de vaporização da água podem ser estimados pelas equações da literatura de Perry e Green (1998):

$$Cp = C1 + C2. \left[\frac{C3}{T. \sinh\left(\frac{C3}{T}\right)} \right]^2 + C4. \left[\frac{C5}{T. \sinh\left(\frac{C5}{T}\right)} \right]^2 \quad (6.5)$$

Em que Cp é dado em $J/(kmol.K)$, T em kelvin e os parâmetros para cada espécie são dados conforme a Tabela que segue abaixo:

Tabela 6.1 – Parâmetros da Equação (6.5)

	Ar	Vapor
C1	28960	33360
C2	9390	26790
C3	3012	2610,5
C4	7580	8900
C5	1484	1169

$$Cpl = 276370 - 2090,1.T + 8,125.T^2 - 0,014116T^3 + 9,3701.10^{-6}.T^4 \quad (6.6)$$

Em que Cpl é dado em $J/(kmol.K)$ e T em Kelvin.

$$\lambda = C1. (1 - T_R)^{C2+C3.T_R+C4.T_R^2} \quad (6.7)$$

Em que λ é dado em J/(kmol) e T_R é a temperatura reduzida dada por:

$$T_R = \frac{T}{T_c} \quad (6.8)$$

Em que T_c é a temperatura crítica da água, cujo valor é 647,13 Kelvin.

Tabela 6.2 – Parâmetros da Equação (6.7)

Água	
C1	52053000
C2	0,3199
C3	-0,212
C4	0,25795

O calor específico da soja pode ser determinado pela equação apresentada por Mata *et al.* (1999):

$$Cps = 0,391 + 0,461 \frac{Y_s}{100+Y_s} \quad (6.9)$$

Em que Cps é dado em cal/(g°C).

A umidade de equilíbrio da soja e os coeficientes de transferência de massa e de energia foram estimados por equações ajustadas com os dados experimentais. O coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_{s,a}$) foi estimado com o mesmo formato da Equação de K_3 ajustada no capítulo da cinética de secagem da soja em camada delgada, porém foi acrescentado o termo da velocidade em formato similar ao trabalho de Borges (2002), uma vez que se verificou no capítulo anterior que esta variável interferiu nas taxas de secagem em camada espessa:

$$\frac{K_{s,a}}{\rho_s} = \exp[-(A_1 + A_2.Tg + A_3.Y_{s0} + A_4.Y_{s0}.Tg).Y_s^{A_5+A_6.Tg}].(A_7.v)^{A_8} \quad (6.10)$$

Em que v é a velocidade do ar em m/s. O valor do coeficiente convectivo de transferência de energia entre o grão e o ar foi ajustado por Boyce (1965):

$$ha = 4286.5. \left[\frac{G.Tg}{P} \right]^{0.6011} = A_9. \left[\frac{G.Tg}{P} \right]^{A_{10}} \quad (6.11)$$

Em que T_g é dada em °C, G_g é dada em kg/(m².min), P é a pressão do sistema dada em Pa e ha é dado em kJ/(m³.min.°C). A umidade de equilíbrio da soja pode ser estimada pela equação de Silva *et al.* (2008), conforme segue abaixo, para umidade relativa do ar entre 0 e 55%:

$$Y_{S_e} = \frac{0.0396.UR^{0.492}}{\ln[T_g(^{\circ}F)]} = \frac{A_{11}.UR^{A_{12}}}{\ln[T_g(^{\circ}F)]} \quad (6.12)$$

Em que UR é o valor da umidade relativa do ar. Para valores de umidade relativa superiores a 55%, o valor da umidade de equilíbrio pode ser estimado por (Silva *et al.*, 2008):

$$Y_{S_e} = \frac{0.0621.e^{0.0274.UR}}{\ln[T_g(^{\circ}F)]} = \frac{A_{13}.e^{A_{14}.UR}}{\ln[T_g(^{\circ}F)]} \quad (6.13)$$

Faz-se necessário conhecer o valor da umidade relativa do ar que pode ser determinada pela seguinte relação:

$$UR = \frac{p}{P_s} \quad (6.14)$$

Em que p é a pressão parcial do vapor de água e P_s é a pressão de saturação do vapor de água. De acordo com Smith *et al.* (2007), a pressão de saturação do vapor de água pode ser determinada pela seguinte equação (Equação de Antoine para Pressões de Vapor de Espécies Puras):

$$P_s = \exp\left(16,3872 - \frac{3885,70}{T_g+230,170}\right) \quad (6.15)$$

Em que P_s é dada em kPa e T_g em °C. Enquanto isso, a pressão parcial do vapor de água é calculada por:

$$P_{\hat{a}gua} = P \cdot y_{\hat{a}gua} = P \cdot \left(\frac{n_{\hat{a}gua}}{n_{\hat{a}gua}+n_{ar}}\right) = P \cdot \left(\frac{Y_g}{Y_g + \frac{MM_{\hat{a}gua}}{MM_{ar}}}\right) \quad (6.16)$$

Em que y é a fração molar, n é o número de moles e MM é a massa molar das espécies.

Por fim, para resolução do sistema de equações diferenciais aberto em diferenças finitas para frente, tomam-se as seguintes condições de contorno e iniciais:

- Em $t = 0 \rightarrow T_s = T_{s_0}$

- Em $t = 0 \rightarrow Y_s = Y_{s0}$
- Em $z = 0 \rightarrow T_g = T_{ga}$
- Em $z = 0 \rightarrow Y_g = Y_{ga}$

Em que T_{s0} , Y_{s0} , T_{ga} e Y_{ga} são respectivamente a temperatura inicial da soja, a umidade da soja inicial, a temperatura de alimentação do gás e a umidade do gás de alimentação. Foi avaliado o número de divisões no tempo e no espaço da malha gerada pelo método das diferenças finitas a fim de se obter uma boa representatividade do modelo. O número mínimo de divisões necessário vai depender da ordem de grandeza do tempo de análise e da altura do leito. É interessante especificar um número de divisões no qual, se forem tomadas divisões maiores que este número, não haverá alteração das propriedades do sistema para certa posição no espaço e no tempo.

6.2.2 Ajuste do Modelo

Primeiramente, os parâmetros do modelo das equações 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 foram ajustados com os dados da quantidade de água evaporada e dos dados de umidade e temperatura do ar para os experimentos em operação convencional e periódica com modulação apenas da temperatura. No total são 24 experimentos pertencentes a este grupo. Esta metodologia foi tomada inicialmente devido ao grande número de dados a serem comparados e de equações resultantes do método das diferenças finitas a serem resolvidas. A função objetivo minimizada durante o ajuste dos parâmetros foi a seguinte:

$$\phi = \sum \left(\frac{\sqrt{(Y_{gexp} - Y_{gcal})^2}}{No.Y_{gexp}} + \frac{\sqrt{(T_{gexp} - T_{gcal})^2}}{No.T_{gexp}} + \frac{\sqrt{(m_{evexp} - m_{evcal})^2}}{No.m_{evexp}} \right) \quad (6.17)$$

Esta equação é uma adaptação do somatório dos mínimos quadrados, em que cada termo foi normalizado devido à diferença na ordem de magnitude entre as diferentes grandezas físicas. Os valores do qui-quadrado reduzido, da raiz do erro quadrático médio e da eficiência do modelo foram calculados para avaliar a qualidade do ajuste:

$$\chi^2 = \frac{\sum(Y_{gexp} - Y_{gpre})^2}{No - Nc} = \frac{\sum(T_{gexp} - T_{gpre})^2}{No - Nc} \quad (6.18)$$

$$REQM = \left(\frac{1}{N_o} \sum (Yg_{pre} - Yg_{exp})^2 \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{N_o} \sum (Tg_{pre} - Tg_{exp})^2 \right)^{1/2} \quad (6.19)$$

$$EF = \frac{\sum (Yg_{exp} - \bar{Yg}_{exp})^2 - \sum (Yg_{pre} - Yg_{exp})^2}{\sum (Yg_{exp} - \bar{Yg}_{exp})^2} = \frac{\sum (Tg_{exp} - \bar{Tg}_{exp})^2 - \sum (Tg_{pre} - Tg_{exp})^2}{\sum (Tg_{exp} - \bar{Tg}_{exp})^2} \quad (6.20)$$

Para o ajuste com todos os dados de todos os experimentos realizados, foi feito previamente um estudo de sensibilidade dos parâmetros do modelo. Este estudo teve como finalidade reduzir o tempo de resolução computacional do ajuste do modelo descartando os parâmetros que pouco interferem nos resultados, sendo este parâmetros estimados pelas equações da literatura.

6.2.3 Simulações e Análise do Consumo Energético

Simulações com o modelo ajustado foram conduzidas para verificar se há redução no consumo energético do processo com a aplicação da operação periódica. O sistema estudado foi o mesmo secador utilizado nos experimento do capítulo anterior. As operações convencionais e periódicas foram simuladas e o consumo energético para se atingir um teor de umidade para a soja de 0,124 em base seca na saída do secador foi calculado por meio das Equações 5.1 e 5.2. Este teor de umidade foi considerado, pois é o valor ideal para armazenagem, o qual equivale a 11% em base úmida.

A temperatura do ar na entrada do secador foi modulada conforme a Figura 6.1. A equação utilizada para simular esta modulação foi a seguinte:

$$Tg_i = Amp. \sin(fr. t. 2\pi) + Tg_c \quad (6.21)$$

Em que Amp é o valor da amplitude, fr é o valor da frequência e T_{gc} é a temperatura constante mantida em operação convencional. Estas modulações foram tomadas com valores de período entre 20 e 240 min e amplitudes entre 5 e 20 °C.

Foram assumidos o valor da umidade inicial da soja em 0,18 em base seca e o valor da umidade do ar na entrada do secador nulo (hipotético) a uma velocidade de 0,6 m/s. Todas as operações convencionais foram conduzidas com temperatura constante na entrada do secador. A soja foi considerada inicialmente em 25 °C.

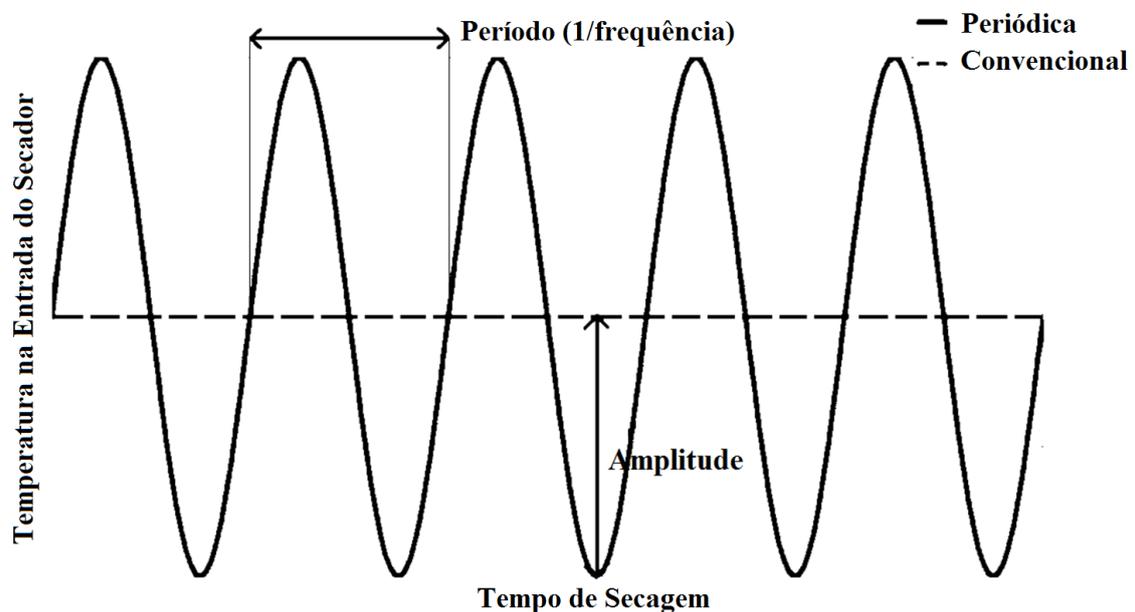


Figura 6.1 – Modulação da Temperatura do Ar

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Ajuste Preliminar

A função objetivo minimizada com os dados das operações periódica e convencional com modulação apenas da temperatura do ar resultou em 0,343. As

Figuras 6.2 e 6.3 apresentam respectivamente os dados da temperatura e do teor de umidade obtidos pelo modelo em comparação aos obtidos experimentalmente. Foi possível observar que o modelo heterogêneo ajustado estimou a maioria dos dados experimentais com um desvio global menor que 20,0%. Apenas 5,7% dos dados de temperatura e 2,9% dos dados de teor de umidade ficaram fora desta faixa de desvio.

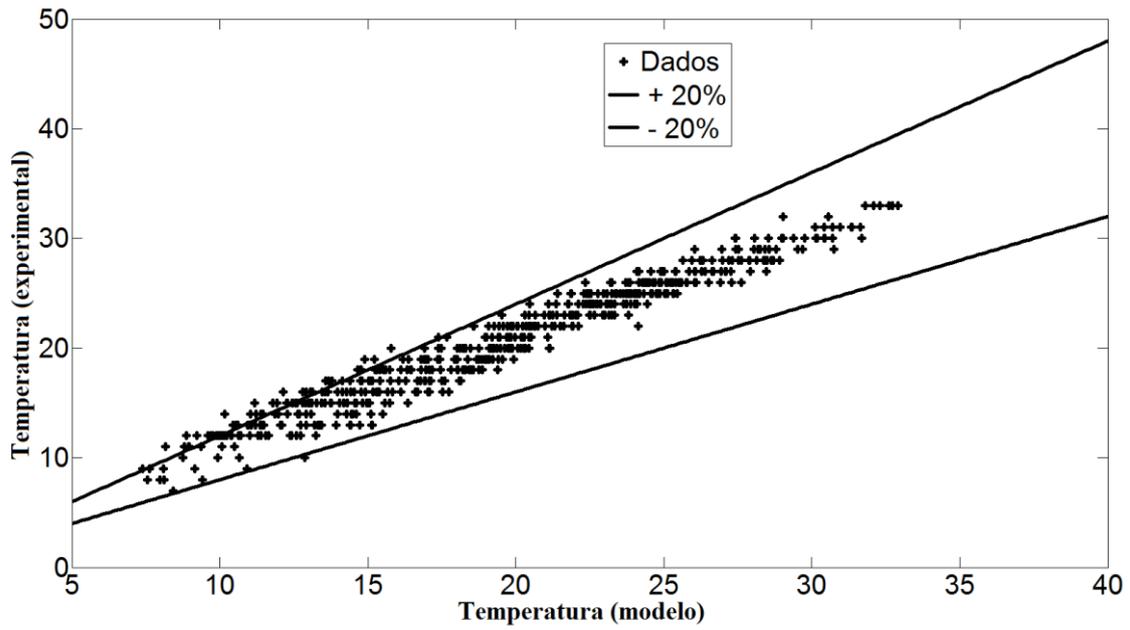


Figura 6.2 – Temperatura do Ar estimada pelo Modelo

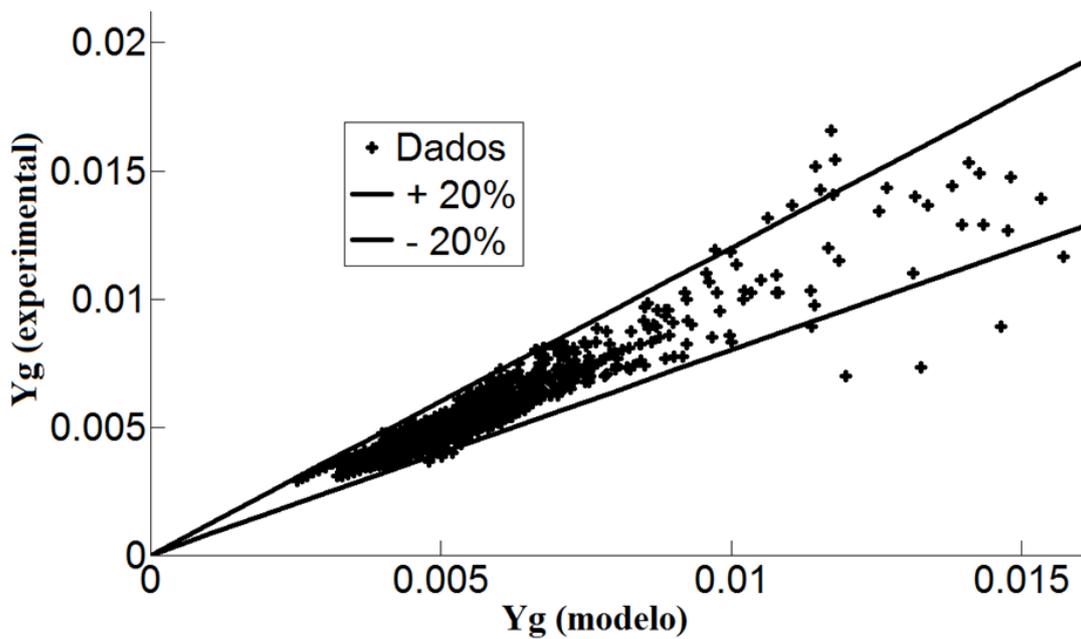


Figura 6.3 – Teor de Umidade do Ar estimado pelo Modelo

Os valores dos parâmetros ajustados estão apresentados na Tabela 6.3 e as médias dos parâmetros estatísticos referentes à qualidade do ajuste estão resumidas na Tabela 6.4. Baseando-se nestes resultados e nos perfis dos gráficos, é possível inferir que o modelo heterogêneo ajustado pôde descrever razoavelmente a secagem de soja em camada espessa sob a operação periódica e convencional.

Tabela 6.3. Parâmetros Ajustados

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
A ₁	0,084776	A ₈	0,11250
A ₂	-6,8814.10 ⁻⁴	A ₉	5,3794.10 ³
A ₃	13,891	A ₁₀	0,40279
A ₄	-0,20108	A ₁₁	2,1460
A ₅	-0,62128	A ₁₂	0,86494
A ₆	-0,011800	A ₁₃	6,4355
A ₇	1,1753	A ₁₄	0,029204

Tabela 6.4. Média dos Parâmetros Estatísticos

	χ^2	<i>REQM</i>	<i>EF</i>
Temperatura	3,8022	1,5414	0,8740
Teor de Umidade	1,4646.10 ⁻⁶	9,6662.10 ⁻⁴	0,7894

6.3.2 Análise Energética

Durante as simulações com o modelo heterogêneo ajustado, foi possível observar uma redução do consumo energético sob a operação periódica, como pode ser verificado na Figura 6.4, a qual apresenta as curvas de cinética de secagem com diferentes amplitudes de modulação da temperatura do ar na entrada do secador. O teor de umidade apresentado neste gráfico é para a soja na saída do leito. Destes resultados, pode ser inferido que há uma tendência de melhora no desempenho do secador com o aumento do valor da amplitude, ou seja, é possível atingir níveis menores de umidade da soja nas maiores amplitudes.

Além disso, o sistema atingiu mais rapidamente o nível ideal de umidade para armazenamento (0,124) em maiores valores de amplitude. Houve também uma redução no consumo energético nas maiores amplitudes. Para a operação convencional e para a operação periódica com amplitudes de 5, 10 e 15 °C o consumo energético para se atingir 0,124 de umidade da soja na saída do secador foi, respectivamente 475, 462, 446 e 434 kJ. Comparando com a operação convencional, foi possível reduzir em 8,6% o consumo energético com o maior valor de amplitude simulado (15 °C).

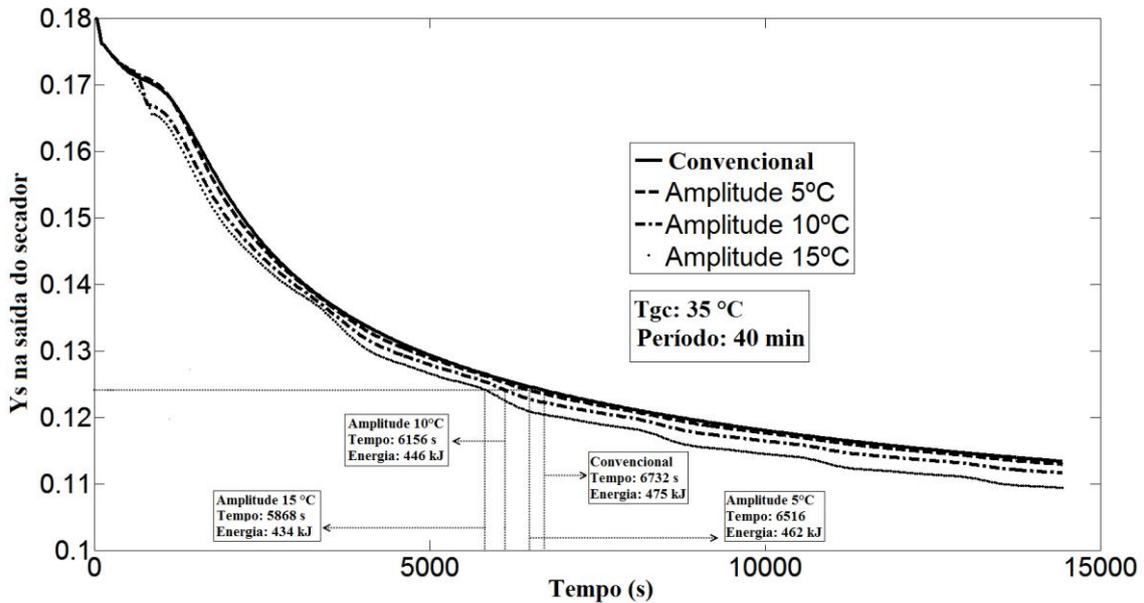


Figura 6.4 – Análise Energética para Diferentes Amplitudes e T_{gc} em 35 °C

Com valores superiores de amplitude foi possível diminuir ainda mais o consumo energético como pode ser observado na Figura 6.5 que apresenta a umidade da soja na saída do secador para a temperatura de entrada do ar, em operação periódica, de 40 °C. Houve uma economia de 21% no consumo energético com a amplitude de 20°C em comparação com a operação convencional e o tempo necessário para se atingir o teor de umidade ideal para estocagem foi 21% menor sob esta operação periódica. Outro aspecto interessante de ser ressaltado é que, em baixos valores de amplitude (5 e 7 °C), o consumo energético e o tempo de secagem para se atingir o desejado teor de umidade da soja foram praticamente os mesmo obtidos na operação convencional. Assim, em nas menores amplitudes, os comportamentos das operações convencional e periódica se aproximam.

Também foi avaliado o impacto do período das oscilações da temperatura na entrada do secador sobre o seu desempenho. A Figura 6.6 mostra o teor de umidade da soja para três valores diferentes de período. Foi possível observar uma melhora da eficiência no consumo energético e no desempenho do secador com o aumento do valor do período. Contudo, durante alguns instantes, a curva de umidade do período de 120 minutos esteve acima da curva do período de 60 minutos, ou seja, nestes instantes as taxas de secagem foram maiores para o período menor de 60 minutos.

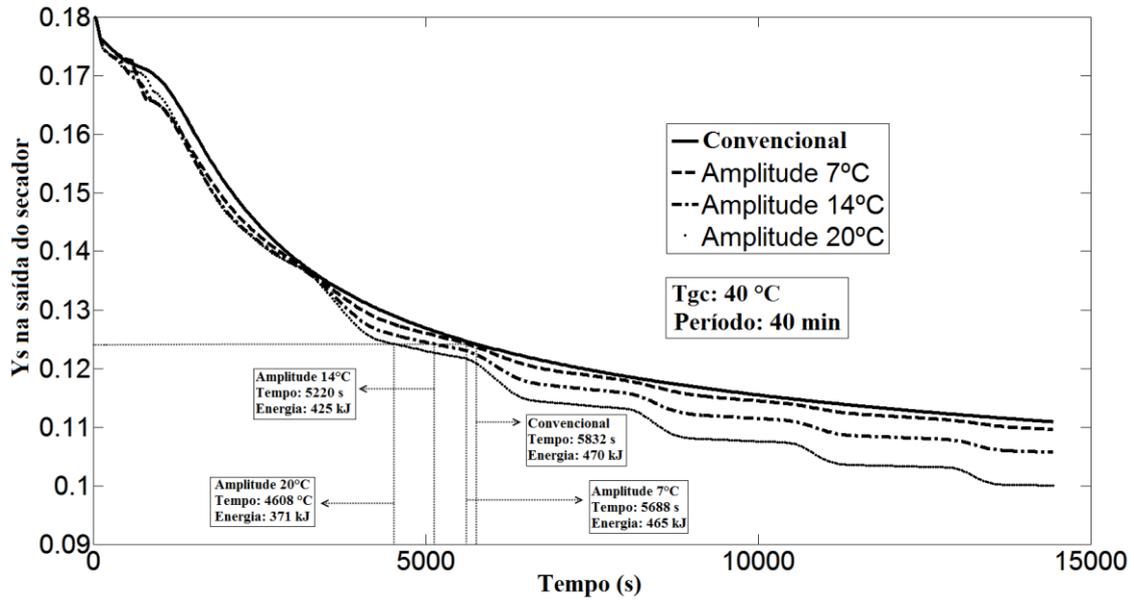


Figura 6.5 – Análise Energética para Diferentes Amplitudes e T_{gc} em 40 °C

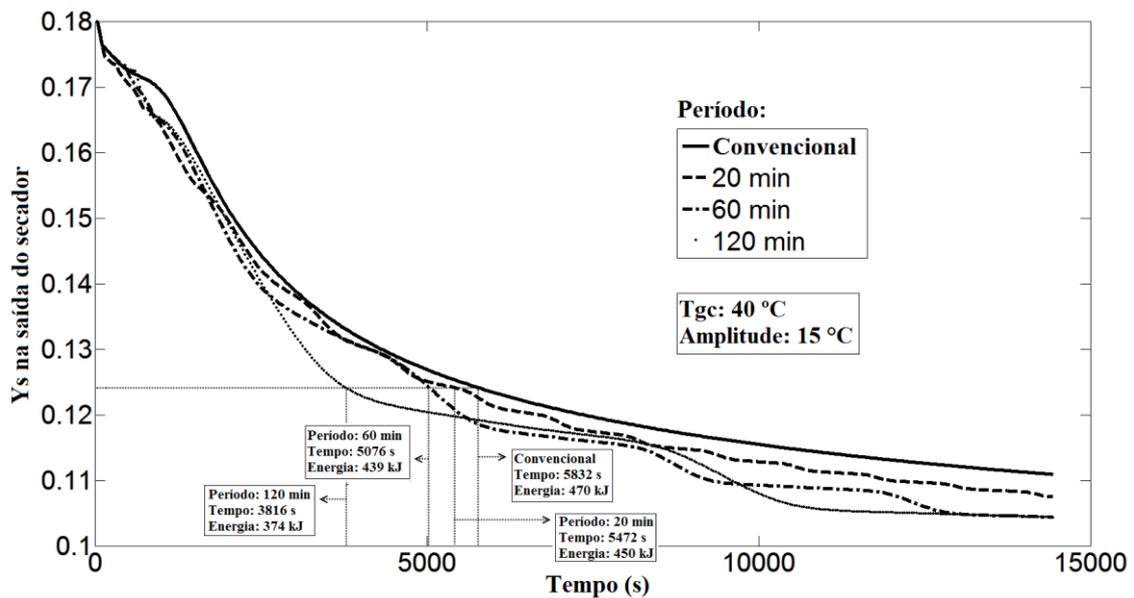


Figura 6.6 – Análise Energética para Diferentes Períodos e T_{gc} em 40 °C

O processo de secagem também foi simulado com a operação periódica com a temperatura do ar inicialmente em baixos valores. A equação utilizada para modular a temperatura do ar foi a mesma utilizada anteriormente, mas com o sinal modificado:

$$Tg_i = -Amp. \sin(fr. t. 2\pi) + Tg_c \quad (6.22)$$

A Figura 6.7 apresenta a cinética de secagem para o ar inicialmente nas menores temperaturas em três valores diferentes de período. É possível observar que há uma tendência de que quanto maior é o valor do período, maior é o tempo necessário para se atingir a umidade ideal de estocagem. Isto é devido ao fato de que períodos mais altos levam a um sistema com longos períodos nas menores temperaturas no início do processo. Contudo, há uma tendência de as taxas globais de secagem serem maiores nos altos valores de períodos devido aos menores níveis de umidade de soja obtidos no final do processo.

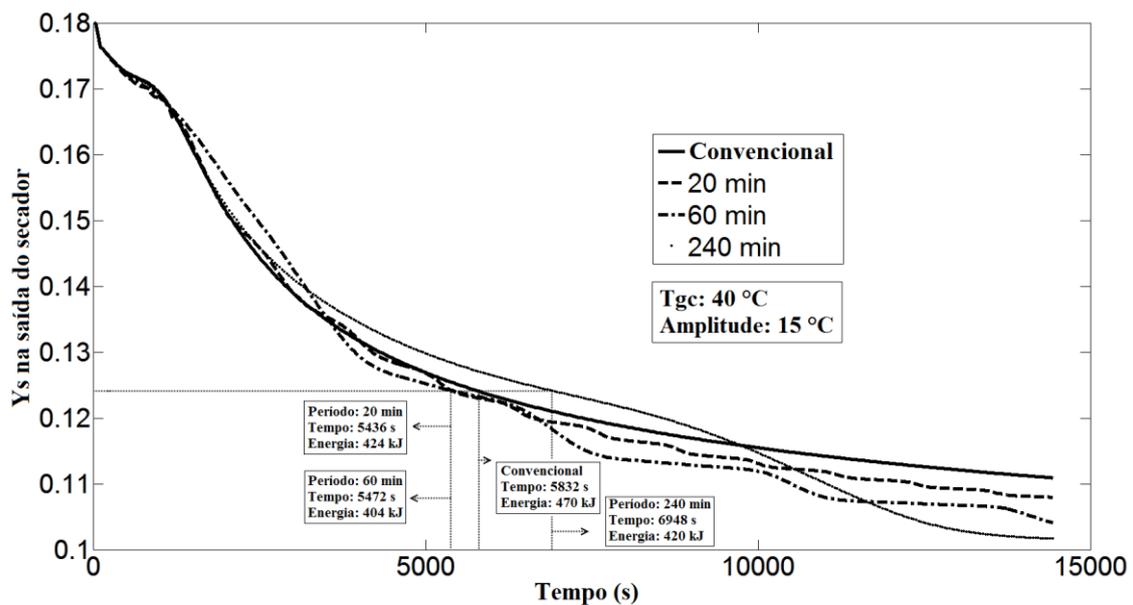


Figura 6.7 – Análise Energética para Ar inicialmente nas Menores Temperaturas

Em termos de consumo energético, foi possível verificar que a operação periódica inicialmente nas menores temperaturas também reduziu o consumo energético em comparação ao consumo da operação convencional, mesmo nos casos de maiores períodos (240 min), nos quais o tempo para se atingir a umidade de soja desejada foi maior. Não houve um padrão claro de dependência do consumo energético e do tempo necessário de secagem com o valor do período da modulação da temperatura do ar. Estudos de otimização conduzidos no próximo capítulo focarão encontrar as melhores

condições de modulação da temperatura do ar (amplitude e período) para atingir o menor consumo energético e a umidade ideal de estocagem.

6.3.3 Análise da Sensibilidade Paramétrica e da Malha

A Figura 6.8 apresenta a influência do número de divisões da malha nos resultados do modelo para os perfis de umidade e de temperatura do ar.

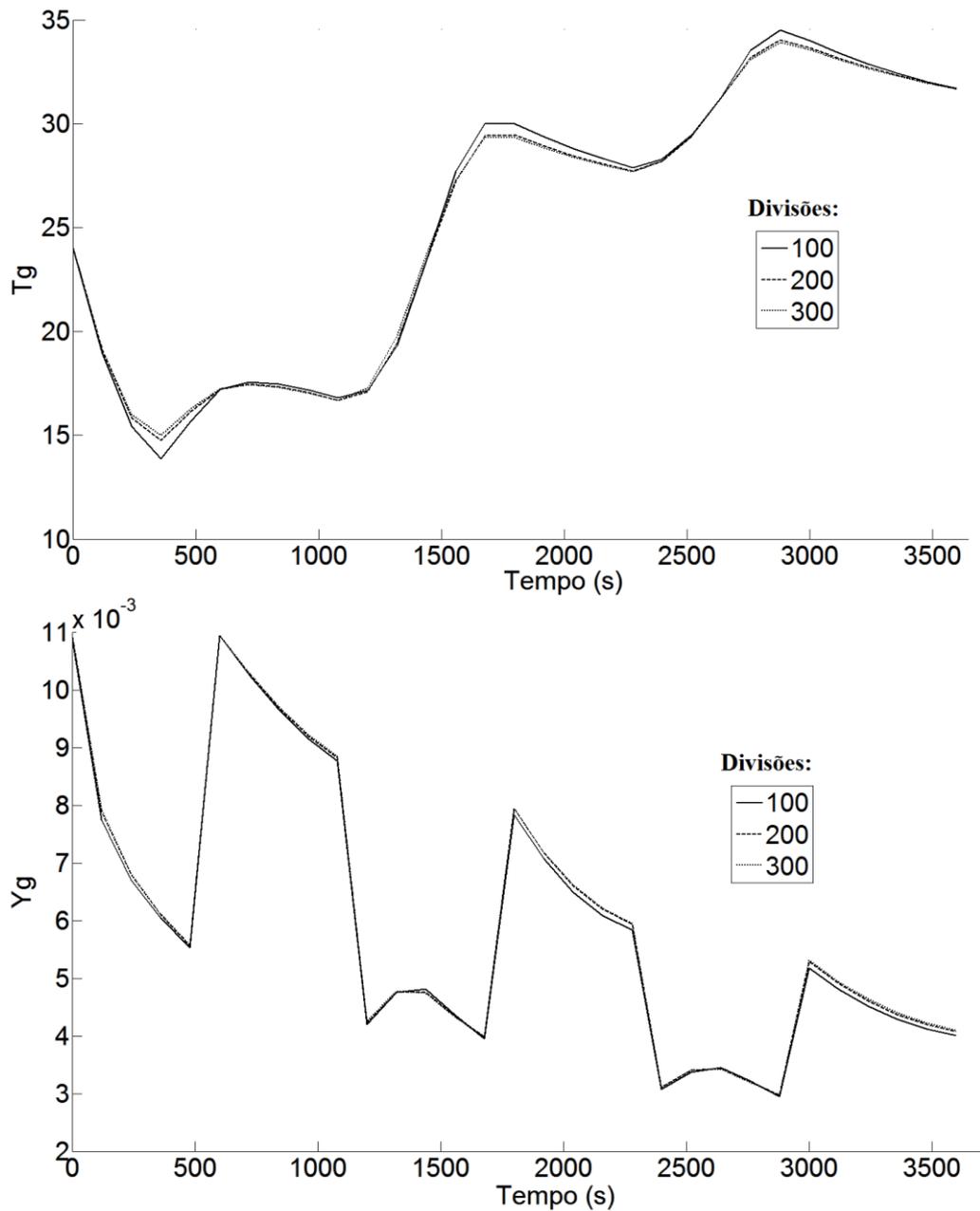


Figura 6.8 – Análise do Número de Divisões da Malha

Estes resultados são para os valores na saída do leito. Observa-se que os perfis apresentados pelo modelo vão variar com o número de divisões que são adotadas no espaço e no tempo. Quanto maior o número de divisões, em princípio mais precisos serão os resultados, porém maior será o tempo computacional para resolução do modelo. A Figura 6.9 apresenta os resultados para divisões superiores a 300.

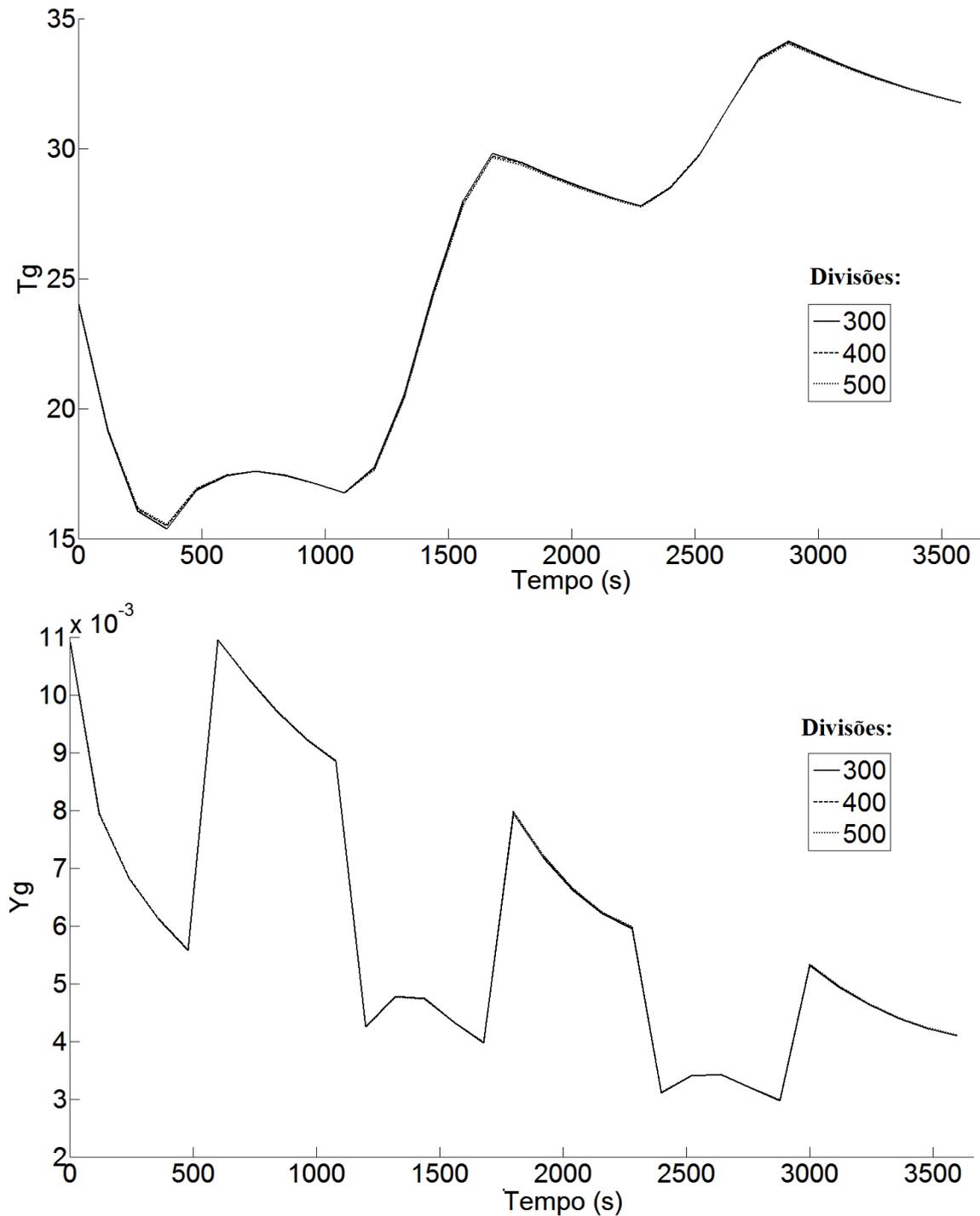


Figura 6.9 – Análise do Número de Divisões da Malha

Observa-se destes resultados que a partir de 300 divisões o sistema não apresenta diferença significativa nos perfis de temperatura e de umidade. Sendo assim, considerou-se 300 o número de divisões no espaço e no tempo para solucionar o modelo adequadamente. No caso de 500 divisões, o tempo de solução computacional foi um pouco acima de 10 minutos. Este tempo é apenas para resolver um único sistema de secagem referente a um único experimento. Para o processo de ajuste dos parâmetros, é necessário resolver 88 experimentos e ao mesmo tempo ajustar 14 constantes. Neste contexto, em cada iteração seriam necessários em torno de 10 minutos vezes 88 experimentos, o que elevaria muito o tempo computacional.

Com 300 divisões, o sistema leva menos de 10 segundos para resolver cada experimento. Além disso, avaliou-se a sensibilidade dos parâmetros com a finalidade de se reduzir o número de constantes, que pode reduzir também o tempo de resolução computacional. As Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam respectivamente a influência do valor de $K_s a$, de h_a e de Y_{se} nos perfis de umidade e de temperatura do ar.

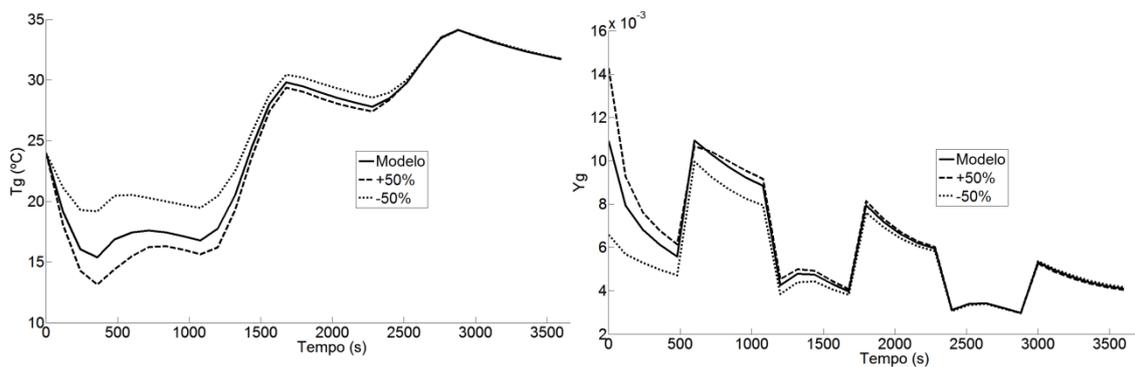


Figura 6.10 – Sensibilidade de $K_s a$

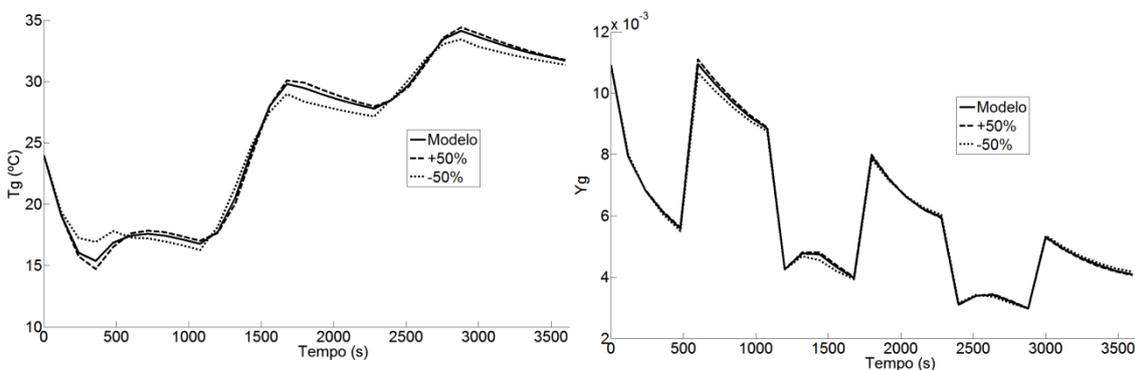


Figura 6.11 – Sensibilidade de h_a

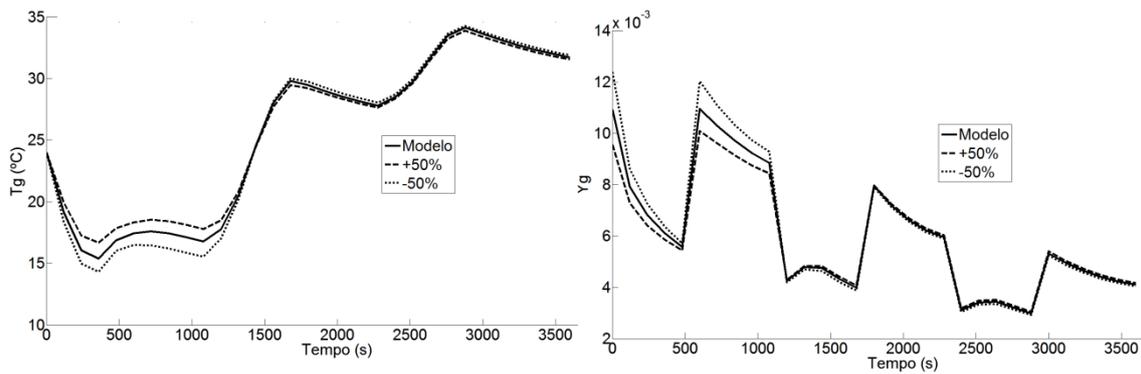


Figura 6.12 – Sensibilidade de Y_{se}

Destes resultados, observa-se que o parâmetro $K_{s,a}$ foi o que apresentou a maior sensibilidade, pois uma variação de 50% de seu valor alterou significativamente os perfis de umidade e de temperatura do ar. É interessante ressaltar, que sua influência foi mais significativa no início do processo, o que é válido, pois se verificou que com o progresso da secagem mais os efeitos difusivos influenciam no processo. Quanto ao parâmetro h_a , verificou-se que este apenas interferiu nos perfis de temperatura e sua interferência foi até o final do processo, pois como é uma operação periódica há perturbações na temperatura de entrada que vai influenciar na troca térmica entre o grão e o sólido até o final do processo.

Quanto ao parâmetro Y_{se} , pode-se inferir dos gráficos que sua influência é maior apenas nos primeiros minutos de secagem, porém sua influência foi menor do que a influência de $K_{s,a}$. Apesar de sua influência, o parâmetro Y_{se} foi descartado no ajuste geral com todos os experimentos para diminuir o tempo computacional de resolução. Sendo assim, seu valor foi estimado pelas Equações 6.12 e 6.13 da literatura.

6.3.4 Modelo Generalizado

O modelo generalizado ajustado com todos os experimentos realizados apresentou a função objetivo minimizada no valor de 0,396. As Figuras 6.13 e 6.14 mostram respectivamente os dados experimentais de temperatura e umidade em comparação aos valores estimados pelo modelo ajustado. Destes resultados, observa-se que o modelo conseguiu prever a maior parte dos dados experimentais com um desvio global menor que 20,0%.

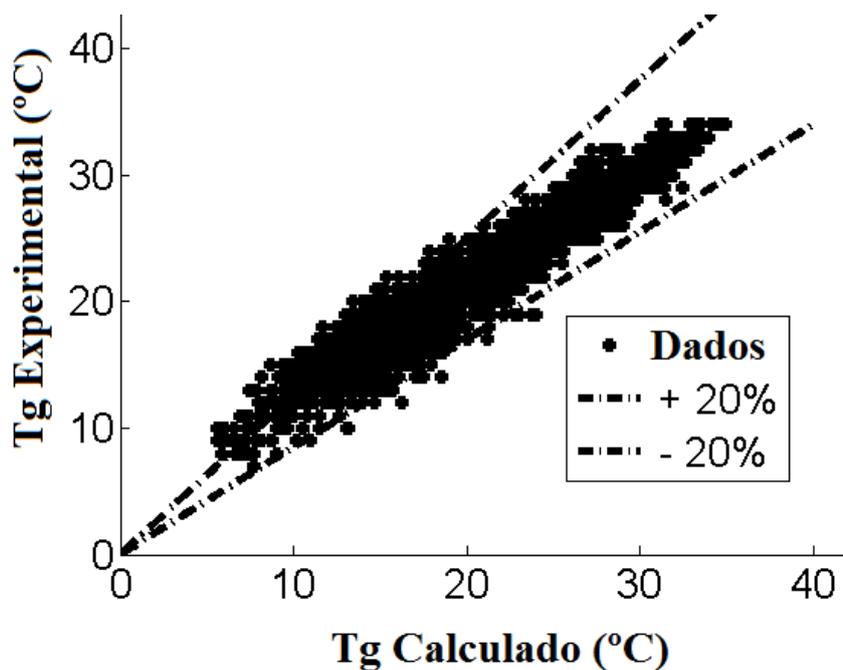


Figura 6.13 – Temperatura do Ar estimada pelo Modelo Generalizado

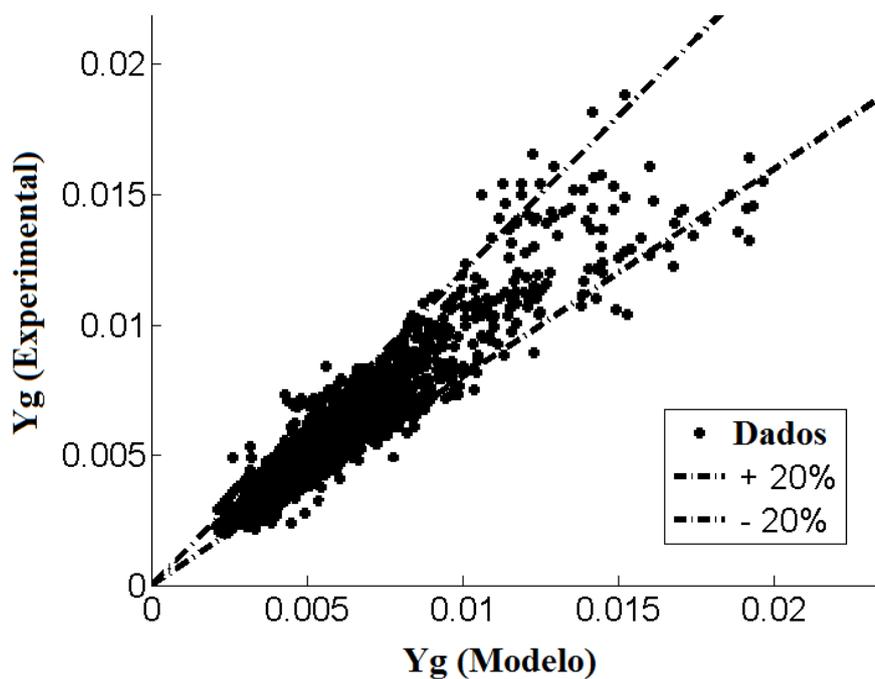


Figura 6.14 – Umidade do Ar estimada pelo Modelo Generalizado

A Tabela 6.5 apresenta os valores dos parâmetros ajustados e a Tabela 6.6 apresenta as médias dos parâmetros estatísticos para análise da qualidade do ajuste. Observa-se que a ordem de magnitude dos parâmetros estatísticos é próxima, sendo apenas levemente superior à ordem de magnitude obtida com o ajuste preliminar.

Tabela 6.5. Parâmetros Ajustados do Modelo Generalizado

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
A ₁	0,068670	A ₆	-0,0131215
A ₂	-7,0969.10 ⁻⁴	A ₇	1,1069
A ₃	13,3877	A ₈	0,2461
A ₄	-0,2194	A ₉	5616,0
A ₅	-0,6838	A ₁₀	0,3628

Tabela 6.6. Média dos Parâmetros Estatísticos do Modelo Generalizado

	χ^2	REQM	EF
Temperatura	7,1049	2,0832	0,65
Teor de Umidade	2,7811.10 ⁻⁶	0,0013	0,70

Destes resultados, observa-se que o modelo heterogêneo generalizado conseguiu estimar os perfis de umidade e de temperatura ao longo do secador e do tempo de secagem razoavelmente. A boa representatividade do modelo também pode ser vista nos gráficos das Figuras 6.15 e 6.16, nas quais estão apresentadas respectivamente os perfis de temperatura do ar ao longo do leito e os perfis de umidade do ar na saída do secador. Assim, o modelo se mostra adequado para ser utilizado no estudo de otimização do próximo capítulo.

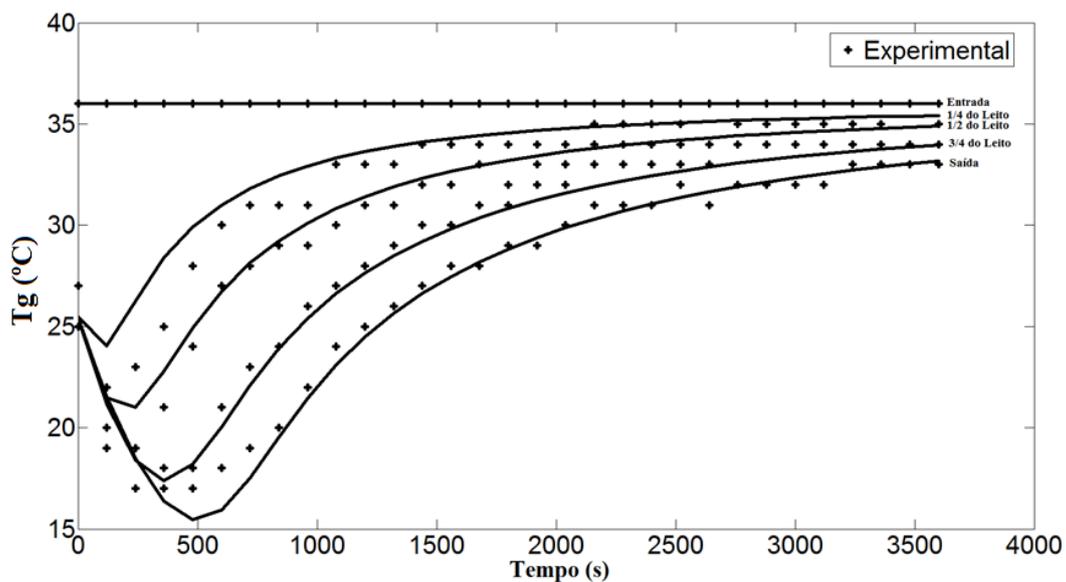


Figura 6.15 – Perfil de Temperatura do Ar ao Longo do Leito

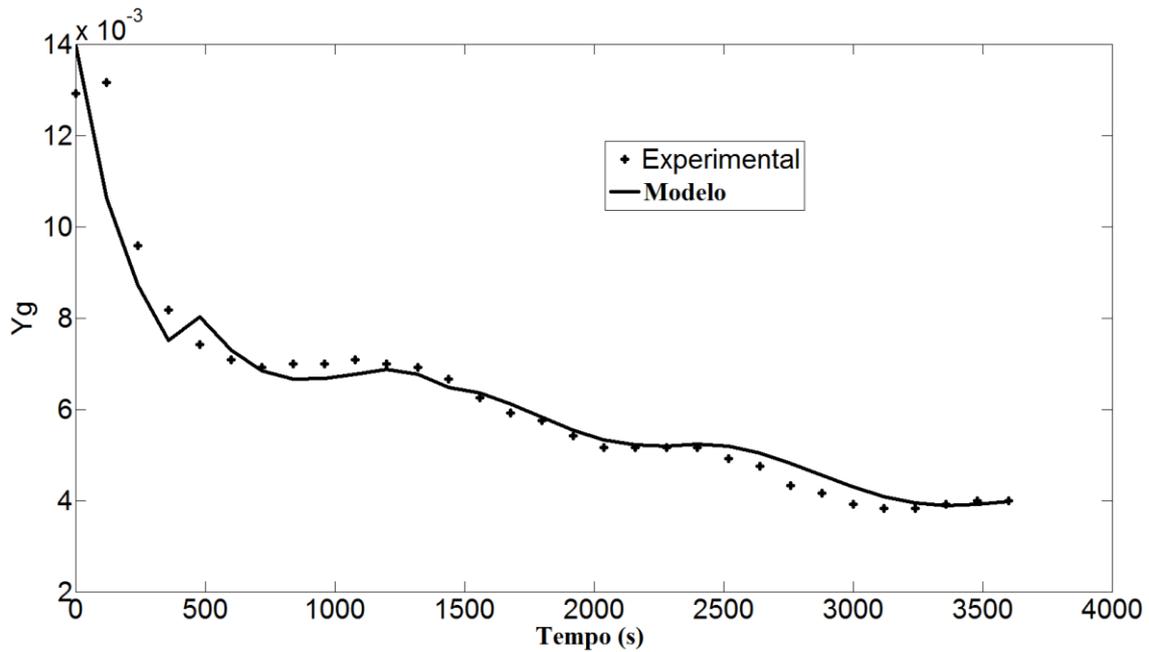


Figura 6.16 – Perfil de Umidade do Ar na Saída do Leito

6.4 Conclusão

O modelo heterogêneo ajustado apresentou boa representatividade dos dados experimentais, cuja maioria pôde ser representada com um desvio global menor que 20,0%. Os bons resultados da temperatura e da umidade estimados pelo modelo apontam que este modelo é adequado para ser utilizado no estudo de otimização do próximo capítulo.

Quanto ao estudo de análise de consumo energético do processo, observou-se que a operação periódica pode demandar menos tempo e energia do que a operação convencional para atingir níveis de umidade da soja satisfatórios para estocagem. Houve uma tendência de se aumentar o desempenho do secador em termos de taxa de secagem e de se reduzir o consumo energético do processo com o aumento do valor da amplitude de modulação da temperatura do ar na entrada do secador. Contudo, verificou-se, que em alguns casos, a operação periódica pode demandar mais tempo e não houve uma dependência clara do desempenho do processo com o valor do período das modulações da temperatura do ar. Assim, os estudos de otimização são necessários para se determinar as melhores condições de modulação das propriedades do ar.

7. OTIMIZAÇÃO DA SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO

7.1 Introdução e Objetivos

Conforme foi exposto na revisão bibliográfica, um significativo número de pesquisadores focou no estudo da secagem intermitente de alguns materiais (BON e KUDRA, 2007; CHIN e LAW, 2010; CHONG e LAW, 2011; CHUA *et al.*, 2003; FARKAS *et al.*, 1997; GOLMOHAMMADI *et al.*, 2012; HERRITSCH *et al.*, 2010; HOLOWATY *et al.*, 2012; ITAYA *et al.*, 1999; JUMAH *et al.*, 2007; KOWALSKI e PAWOWSKI, 2010 a,b; LI *et al.*, 1998; LIMA e NEBRA, 2001; MENEGHETTI *et al.*, 2012; OLIVEIRA e ROCHA, 2007; ONG *et al.*, 2012; PAN *et al.*, 1998; PAN *et al.*, 1999; PUTRANTO *et al.*, 2011; PUTRANTO e CHEN, 2012; PUTRANTO e CHEN, 2013; SHEI e CHEN, 2002; SMITH e LANGRISH, 2008; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; ZHANG e LITCHFIELD, 1991). Um dos principais objetivos deste tipo de operação é minimizar o consumo energético e minimizar as perdas de qualidade do material (PUTRANTO *et al.*, 2011; PUTRANTO e CHEN, 2012). O processo de secagem pode danificar a qualidade dos produtos (PUTRANTO e CHEN, 2013), especialmente quando se opera em temperaturas muito altas.

Alguns estudos apontaram que a operação intermitente pode reduzir o tempo efetivo de secagem (CHIN e LAW, 2010; CHONG e LAW, 2011; FARKAS *et al.*, 1997; HERRITSCH *et al.*, 2010; ONG *et al.*, 2012; PAN *et al.*, 1998; PAN *et al.*, 1999; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; ZHANG e LITCHFIELD, 1991; KOWALSKI e SZADZINSKA, 2014) e pode melhorar a qualidade do material seco (BON e KUDRA, 2007; CHIN e LAW, 2010; CHONG e LAW, 2011; FARKAS *et al.*, 1997; KOWALSKI e PAWOWSKI, 2010 a,b; ONG *et al.*, 2012; PAN *et al.*, 1998; PAN *et al.*, 1999; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; KOWALSKI e SZADZINSKA, 2014) em comparação com os resultados obtidos na operação convencional. Além disso, em alguns casos também foi possível reduzir o consumo energético (CHIN e LAW, 2010; HOLOWATY *et al.*, 2012; JUMAH *et al.*, 2007; LIMA e NEBRA, 2001; PAN *et al.*, 1998; THOMKAPANICH *et al.*, 2007; ZHANG e LITCHFIELD, 1991).

Estudos de otimização são recomendados neste contexto porque é possível determinar as melhores condições operacionais para reduzir o tempo de secagem,

melhorar a qualidade do material seco e reduzir o consumo energético. Alguns modelos para secagem intermitente têm sido estudados e aplicados a fim de se obter estas melhores condições operacionais (BON e KUDRA, 2007; GOLMOHAMMADI *et al.*, 2012; ITAYA *et al.*, 1999; LIMA e NEBRA, 2001; PUTRANTO e CHEN, 2012; SHEI e CHEN, 2002; SMITH e LANGRISH, 2008).

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é de finalizar o estudo da secagem periódica de soja em leito fixo com a otimização do processo visando encontrar as melhores condições de modulação da temperatura e da velocidade do ar na entrada do secador a fim de se obter o menor consumo energético. Neste estudo, foi utilizado o modelo heterogêneo generalizado validado no capítulo anterior. O sistema simulado foi o mesmo leito utilizado durante os experimentos e os ajustes do modelo heterogêneo. Por fim, buscou-se avaliar se as melhores condições operacionais variavam com as propriedades do sistema como umidade inicial da soja e do ar e temperatura inicial do grão.

7.2 Metodologia

A otimização do processo de secagem de soja em leito fixo foi estudada com base no modelo heterogêneo generalizado ajustado no capítulo anterior. O sistema simulado foi o secador de bancada utilizado nos experimentos e durante o ajuste do modelo heterogêneo. Buscou-se minimizar o consumo energético do processo, reduzindo o máximo possível a energia fornecida na entrada do secador adiabático até que o topo do leito atingisse a umidade desejada de estocagem (11 – 12% em base úmida). A equação para o cálculo deste consumo energético foi a seguinte:

$$E = \int \dot{m}_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot T_a \cdot dt \quad (7.1)$$

As variáveis analisadas neste estudo de otimização foram a temperatura e a vazão do ar na entrada do secador. Estas propriedades foram moduladas conforme descrito abaixo pelas seguintes equações:

$$Tg_i = Amp \cdot \sin(fr \cdot t \cdot 2\pi) + Tg_c \quad (7.2)$$

$$Q_i = Amp \cdot \sin(fr \cdot t \cdot 2\pi) + Q_c \quad (7.3)$$

Três parâmetros de cada equação foram avaliados: a amplitude, a frequência (ou período) e o valor da temperatura (Tg_c) ou da vazão (Q_c) em operação convencional

(quando o valor da frequência ou da amplitude é zero). Foram impostas restrições de que o valor da vazão não fosse menor que 100 nem maior que 200 L/min e de que a temperatura não fosse menor que 20 nem maior que 50 °C. Estas restrições estão dentro dos valores das propriedades do sistema nos quais o modelo foi ajustado.

Os valores destes parâmetros foram ajustados ao se minimizar a função objetivo, Equação 7.1, que representa o consumo energético do processo calculado quando a umidade da soja no topo do secador atinge o valor desejado. Primeiramente, foi feito um estudo da otimização da operação convencional, avaliando as melhores temperaturas e vazões para se reduzir o consumo energético. Em seguida, foi verificado se as melhores condições operacionais mudam com os valores da temperatura e umidade inicial da soja e da umidade inicial do ar.

Em sequência foi calculado o consumo energético em vários valores de amplitude e período de modulação da temperatura e da vazão do ar. Buscou-se neste estudo analisar se há formação de mínimos locais, determinando assim uma metodologia para encontrar as melhores estimativas iniciais em base nestes resultados. Por fim, a operação periódica foi otimizada em diversas situações conforme apresentado pela Tabela 7.1, em que se avaliou se o menor consumo energético e os valores dos parâmetros ajustados variam com a umidade inicial e final da soja, a temperatura inicial da soja e a umidade absoluta (Y_{abs0}) inicial do ar.

Tabela 7.1. Condições Otimizadas

Caso	Y_{S0}	T_{S0} (°C)	Y_{abs0} (g/m ³)	Y_{Sf}
A	0,17	10	0,0	0,136
B	0,17	30	0,0	0,136
C	0,17	10	5,0	0,136
D	0,17	30	5,0	0,136
E	0,19	10	0,0	0,136
F	0,19	30	0,0	0,136
G	0,19	10	5,0	0,136
H	0,19	30	5,0	0,136
I	0,18	20	2,5	0,136
J	0,18	20	0,0	0,136
K	0,18	20	0,0	0,124

7.3 Resultados e Discussão

7.3.1 Otimização da Secagem Convencional

Observou-se durante os processos de otimização da operação convencional que o gasto energético do processo e o tempo de secagem vão variar com as propriedades do sistema como a temperatura e a umidade inicial da soja e a umidade do ar de alimentação. As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam respectivamente o tempo de secagem e o consumo energético para se atingir 11% de umidade da soja em base úmida na saída do secador quando foi avaliada a influência da temperatura inicial da soja e da temperatura do ar de alimentação.

Como era esperado, o menor tempo de secagem ocorreu na maior temperatura (50 °C) uma vez que as taxas de secagem aumentam com a temperatura do ar. Um aumento na temperatura inicial da soja também reduziu o tempo de secagem. Contudo a redução do tempo de secagem para uma variação de 20 °C no valor da temperatura da soja foi menor do que o decaimento deste tempo para uma variação de 20 °C na temperatura do ar. Em simulações, observou-se que a temperatura da soja rapidamente atinge valores próximos a temperatura do ar, o que pode explicar o fato da temperatura do ar impactar mais significativamente nas taxas de secagem.

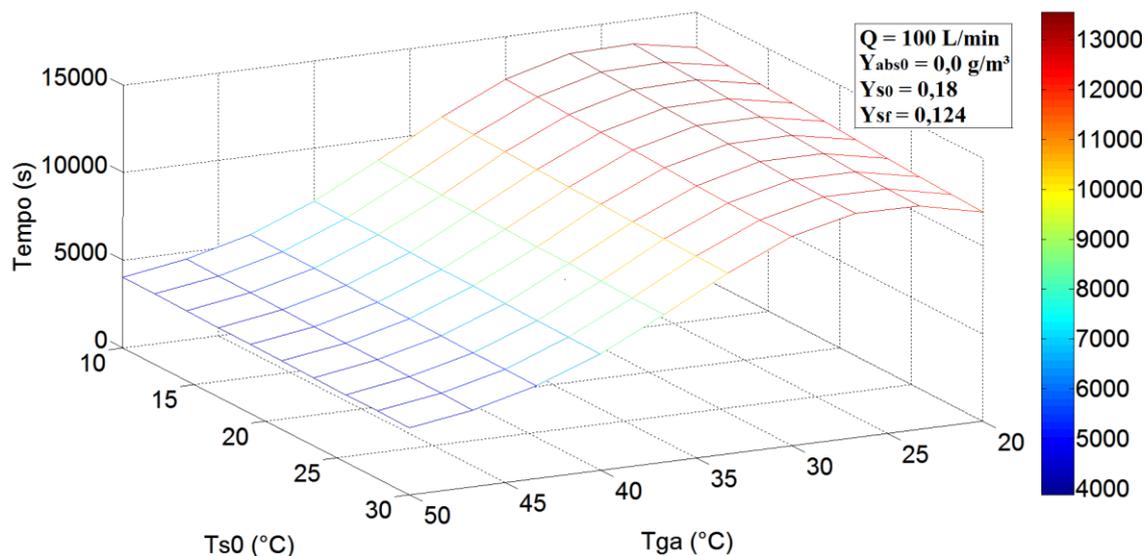


Figura 7.1 – Influência de T_{s0} no tempo de secagem

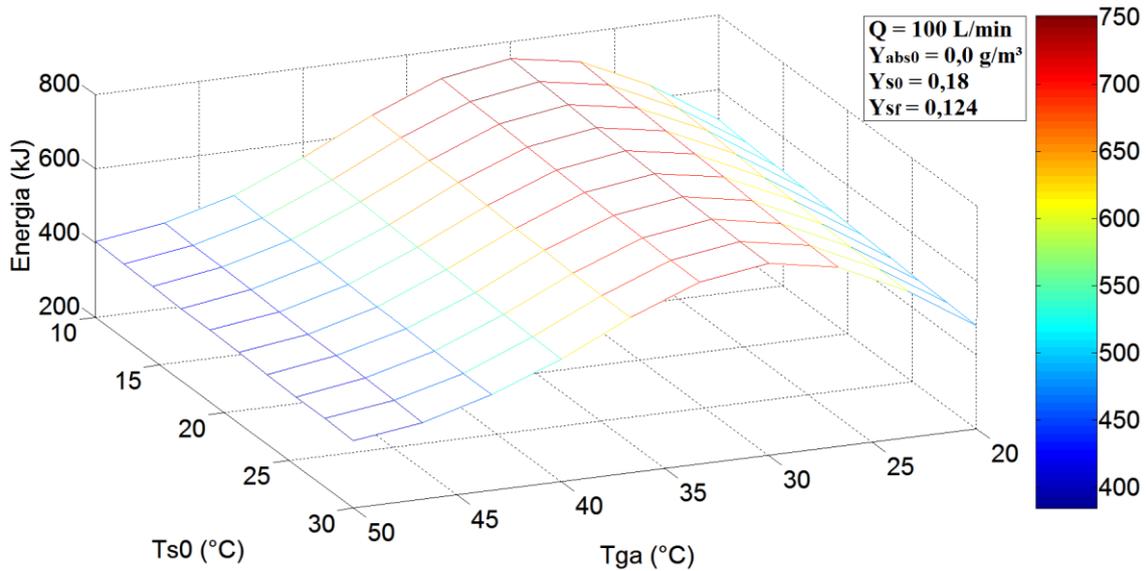


Figura 7.2 – Influência de T_{s0} no consumo energético

Quanto ao consumo energético do processo, observou-se pelo gráfico da Figura 7.2 que há a formação de mínimos locais. O mínimo global poderia ter ocorrido na menor temperatura do ar (20 °C), mas o tempo de secagem foi muito superior ao caso de maior temperatura (50 °C), o que elevou o valor do consumo energético em comparação a este último caso. Assim, o menor gasto energético ocorreu na maior temperatura do ar devido ao tempo de secagem ser significativamente menor. Analogamente ao tempo de secagem, o consumo energético mostrou maior sensibilidade à variação da temperatura do ar do que à variação da temperatura inicial do grão.

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam respectivamente a influência da umidade do ar de alimentação no tempo de secagem e no gasto energético do processo. É possível inferir destes resultados, que a umidade do ar na entrada do secador pouco interfere no consumo energético e no gasto energético nas maiores temperaturas. Contudo, quanto maior a umidade, maior é a pressão de vapor do ar, o que dificulta a transferência de água para a fase gasosa, aumentando assim o tempo e o consumo energético do processo. Nas menores temperaturas, o sistema possui maior sensibilidade ao valor da umidade do ar, sendo vantajoso trabalhar com o ar o mais seco possível. Além disso, foi possível observar que o processo teve o menor gasto energético na temperatura do ar em 20 °C, sendo esse consumo levemente inferior ao obtido em 40 °C. Neste contexto,

mesmo que o tempo de secagem a 20 °C seja superior que o caso a 40 °C é vantajoso se trabalhar na menor temperatura caso se queira minimizar o consumo energético.

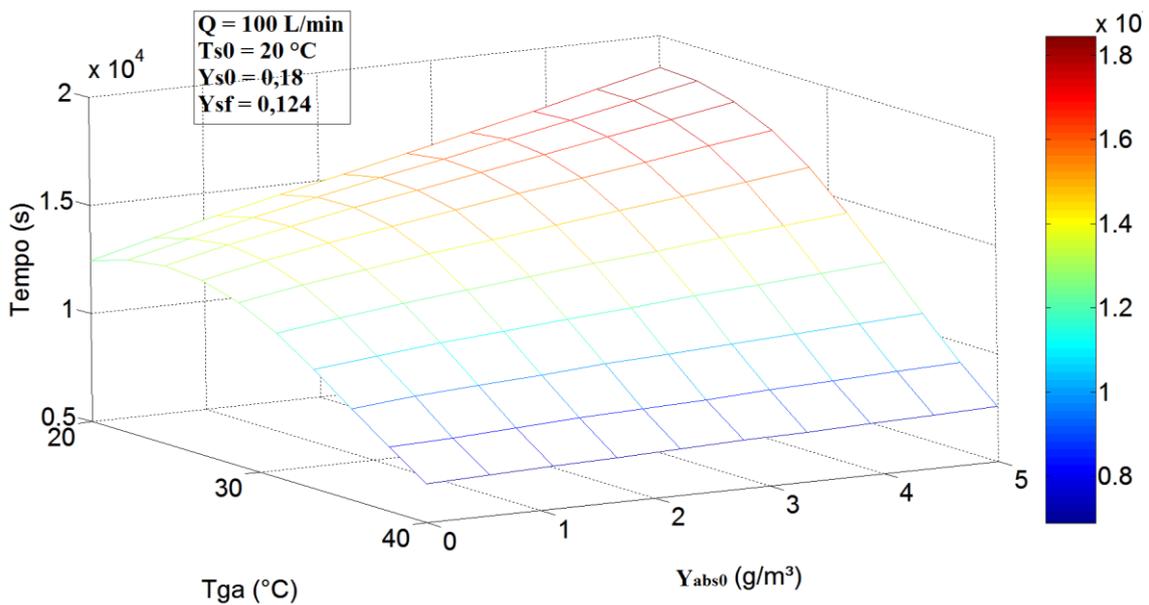


Figura 7.3 – Influência de UAg_0 no tempo de secagem

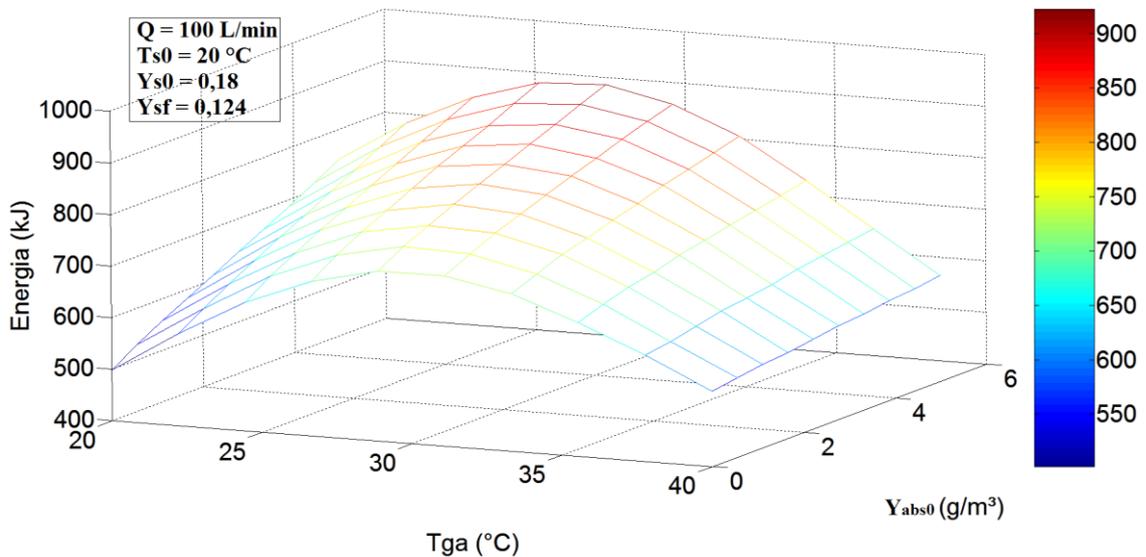


Figura 7.4 – Influência de UAg_0 no consumo energético

A umidade inicial da soja também impacta nas condições ideais para se reduzir o consumo energético. Dependendo do valor desta umidade, a temperatura do ar ideal para reduzir este consumo pode a maior ou a menor. Estas condições ideais de operação estão diretamente relacionadas com o tempo de secagem. Observa-se pelas Figuras 7.5 e 7.6, que quanto menor a umidade inicial da soja, mais favorável é operar nas menores

temperaturas, uma vez que o tempo de secagem foi levemente superior ao obtido na maior temperatura, sendo que este tempo não foi suficientemente maior para aumentar o gasto energético em relação à secagem mais rápida na maior temperatura.

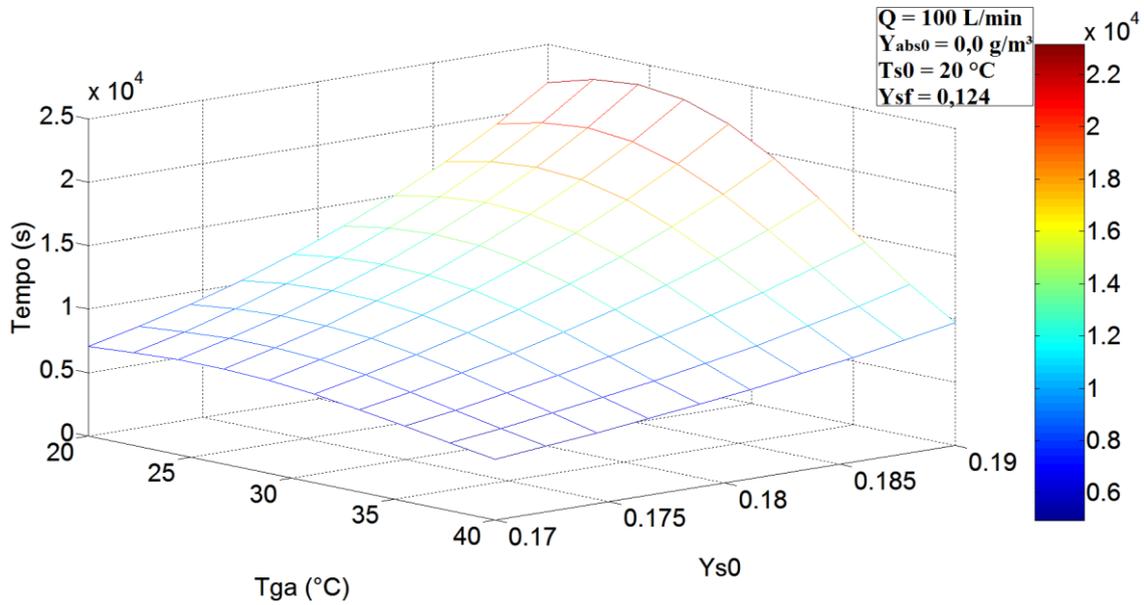


Figura 7.5 – Influência de Y_{s0} no tempo de secagem

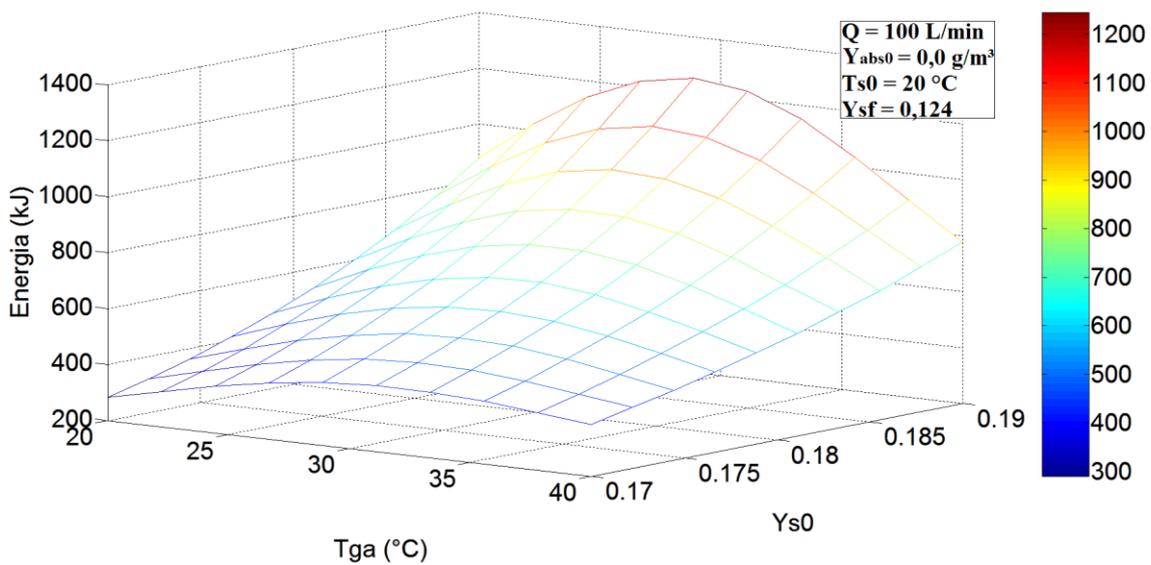


Figura 7.6 – Influência de Y_{s0} no consumo energético

Quanto menor a umidade inicial do grão, menor a quantidade de água que deve ser retirada do material a fim de se obter a umidade ideal de armazenamento. Neste contexto, não é necessário um tempo muito alto para secar o material nas menores temperaturas. Contudo, conforme se aumenta a umidade inicial, verificou-se um

favorecimento em se trabalhar nas maiores temperaturas, pois o tempo de secagem é suficientemente inferior para reduzir o consumo energético do processo em relação à operação nas menores temperaturas.

As Figuras 7.7 e 7.8 mostram respectivamente a influência da vazão do ar no tempo e no consumo energético da secagem.

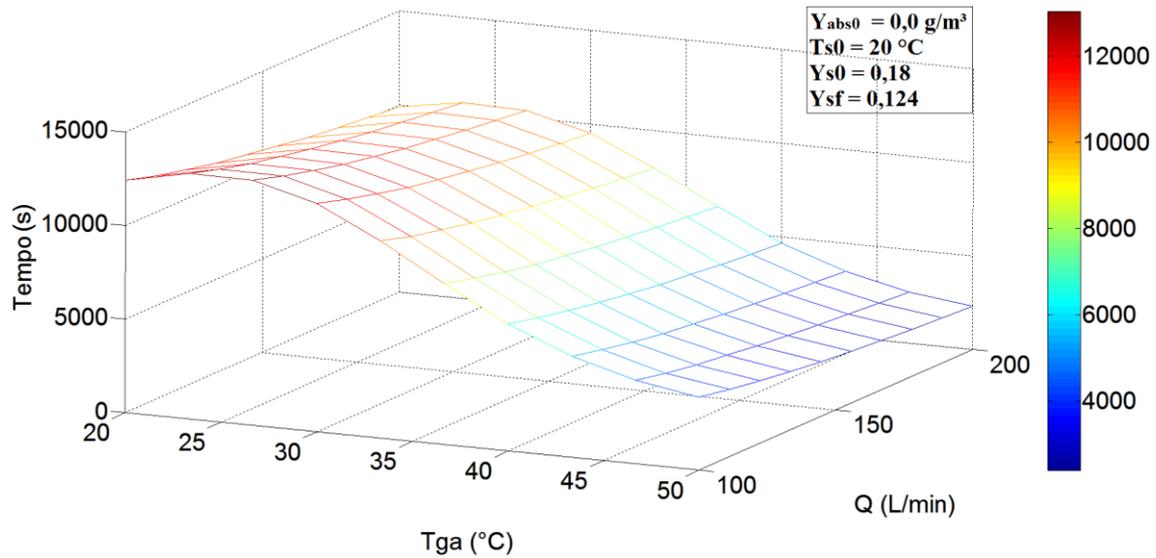


Figura 7.7 – Influência de T_{ga} no tempo de secagem

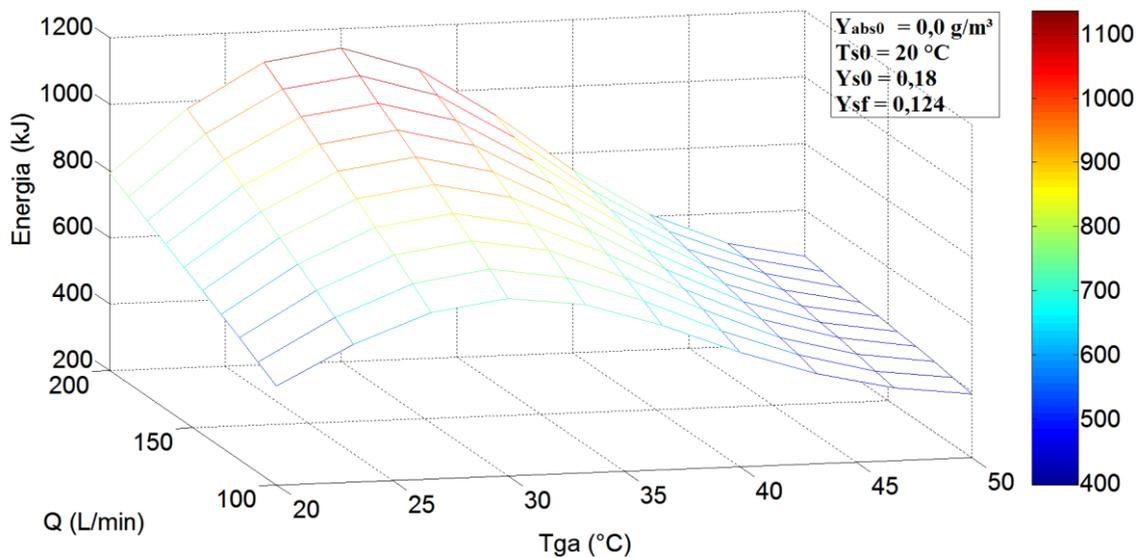


Figura 7.8 – Influência de T_{ga} no consumo energético

Constatou-se destes resultados que nas condições simuladas o consumo energético do processo é reduzido nas menores vazões. Além disso, observou-se que o sistema tem mais sensibilidade a influência da vazão nas menores temperaturas.

De todos estes resultados, é possível inferir que as melhores condições de operação do ar, como sua temperatura, umidade e velocidade, vão depender muito das condições do sistema como a temperatura e umidade inicial da soja e seu teor de umidade desejado para estoque. São muito diferentes as condições nas quais os sistemas industriais de secagem de grãos são operados. Neste item, foram otimizadas apenas algumas condições da operação convencional, cujos resultados servem de referência para o próximo passo da otimização da operação periódica. Neste contexto, estes modelos e metodologias estudadas servem de auxílio para o projeto de secadores, o controle e a otimização de processos industriais.

7.3.2 Determinação das Estimativas Iniciais

Como são muitas variáveis envolvidas no processo de secagem, é importante a determinação de boas estimativas iniciais a fim de que o sistema otimizado não caminhe para mínimos locais. As Figuras 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12 mostram a formação desses mínimos locais, sendo as duas primeiras para a avaliação da modulação da temperatura do ar e as duas últimas para a modulação da vazão.

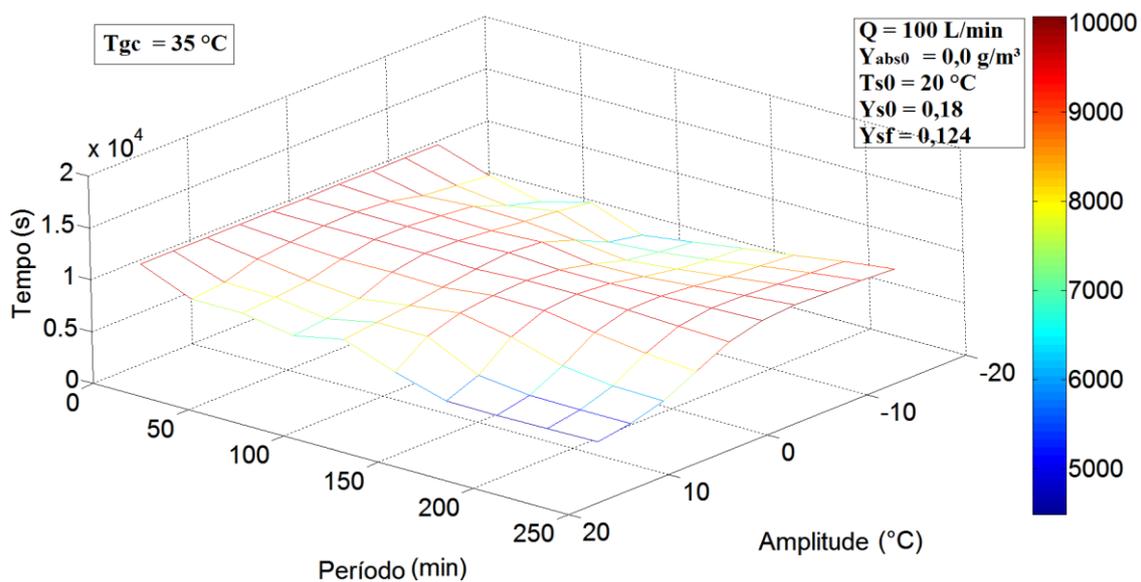


Figura 7.9 – Influência da Modulação da Temperatura do Ar no Tempo de Secagem

Observa-se destes resultados que, dependendo da estimativa inicial, o sistema de otimização poderia convergir para uma região que não representa o melhor consumo energético nem o menor tempo de secagem. Para a Figura 7.9, o menor tempo de

secagem se concentra na região em que a amplitude de modulação da temperatura do ar é 20 °C em um período de 250 minutos. Este resultado aponta que, nesta condição, há uma tendência em se reduzir o consumo energético ao se trabalhar nas maiores temperaturas e em condições de operação convencional, uma vez que os valores da amplitude e do período foram os mais altos. Maiores amplitudes leva o sistema a mais altos valores de temperatura e maiores valores de período levam o sistema a poucas oscilações se aproximando da operação convencional. Além disso, observa-se a formação de mínimos locais como na região próxima a amplitude de -20 °C e período de 100 minutos.

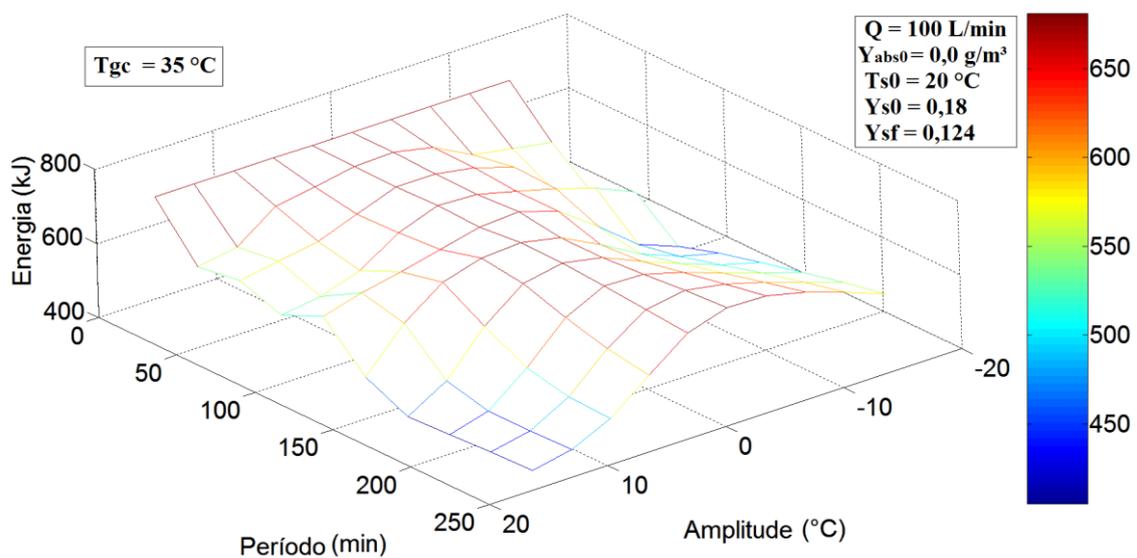


Figura 7.10 – Influência da Modulação da Temperatura do Ar no Consumo Energético

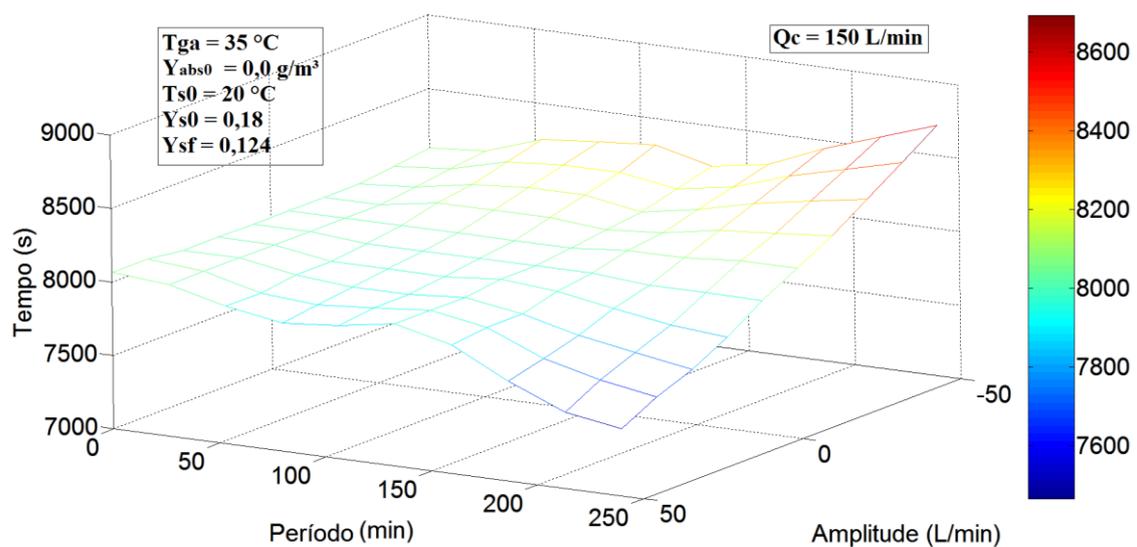


Figura 7.11 – Influência da Modulação da Vazão do Ar no Tempo de Secagem

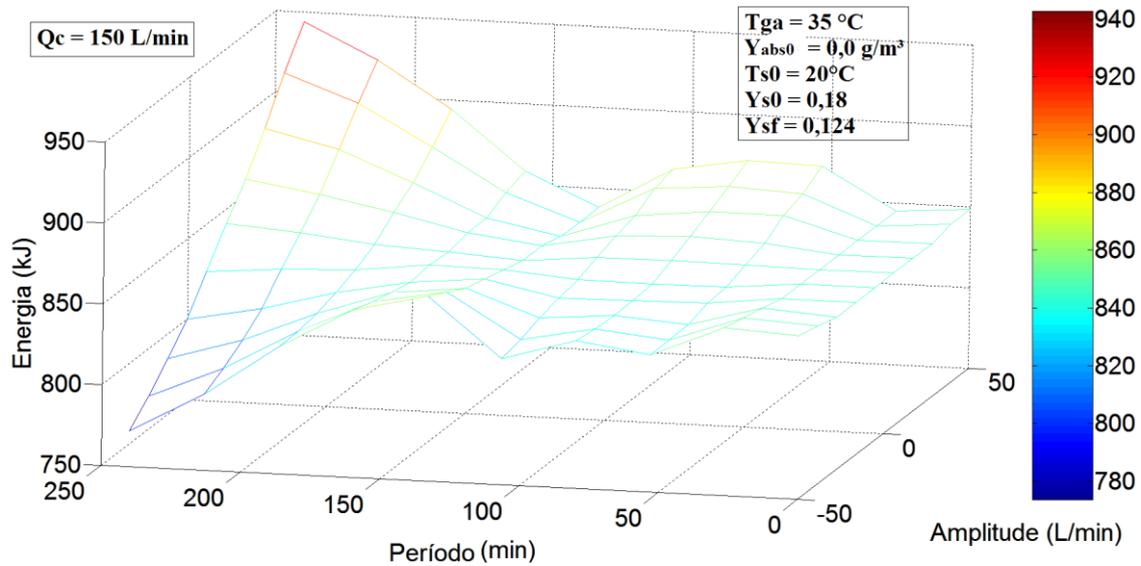


Figura 7.12 – Influência da Modulação da Vazão do Ar no Consumo Energético

Quanto a figura que relaciona o consumo energético com a modulação da temperatura (Figura 7.10), também se observa formações de mínimos locais. É interessante ressaltar que as duas regiões com os menores consumos energéticos representadas pela cor azul escuro tendem a diferentes tipos de operação, sendo uma região tendendo a operação convencional e outra região a operação periódica. Vale ressaltar ainda que essas melhores condições operacionais podem alterar com outras propriedades do sistema, como as questões avaliadas no item anterior do estudo da operação convencional.

O menor tempo de secagem para o sistema com modulação da vazão (Figura 7.11) tendeu para situações nas maiores vazões em operação convencional, analogamente ao caso da modulação da temperatura. Esses resultados já eram esperados, uma vez que as taxas de secagem aumentam com o valor da temperatura e da vazão do ar. Por outro lado, nas regiões em que a operação periódica é mais predominante (valores de período baixos e amplitudes longe do valor zero), o tempo de secagem mostrou-se menos influenciável à variação da vazão do que à variação da temperatura. Quanto ao consumo energético para o sistema com modulação da vazão (Figura 7.12), verificou-se uma tendência de redução de seu valor para operação nas menores vazões em valores constantes. Contudo, houve formações de mínimos locais.

Neste contexto, a determinação de boas estimativas iniciais é um diferencial para se chegar à região do mínimo global. Encontrar boas estimativas fica mais difícil quanto

maior o número de variáveis a serem ajustadas pelo processo de otimização. Neste estudo, foram otimizados seis parâmetros, sendo três referentes à modulação da temperatura e três referentes à modulação da vazão. Para a determinação das estimativas iniciais, cada sistema de secagem apresentado na Tabela 7.1 foi simulado em um conjunto de combinações entre os limites adotados dos valores dos parâmetros. Estes limites estão apresentados pela Tabela 7.2. O intervalo destes limites foi dividido em partes iguais de forma a se obter cinco valores para cada parâmetro. Assim por meio da combinação entre os parâmetros, foram calculados 5^6 (15.625) pontos e as estimativas iniciais para o processo de otimização foram escolhidas a partir dos valores dos parâmetros para os quais o consumo energético foi o menor.

Tabela 7.2. Limite dos Parâmetros para Determinação das Estimativas Iniciais

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
Amplitude da modulação da temperatura (°C)	-30	30
Período da modulação da temperatura (min)	0,1	240
T_{gc} (°C)	20	50
Amplitude da modulação da vazão (L/min)	-100	100
Período da modulação da vazão (min)	0,1	240
Q_c (L/min)	100	200

7.3.3 Otimização da Secagem Periódica

Os parâmetros ajustados durante o processo de otimização da secagem periódica de soja em leito fixo estão apresentados na Tabela 7.3. Destes resultados, observa-se que quanto menor a variação de umidade desejada, ou seja, quanto menor a diferença entre a umidade inicial e final da soja há uma tendência de redução do consumo energético do processo ao se trabalhar convencionalmente nas menores temperaturas e vazões. Este comportamento pode ser verificado com base nos parâmetros observados dos casos de A até D, cujo valor de umidade inicial da soja é 0,17 em base seca. Como a variação de umidade até se chegar a condição desejada é pequena, o tempo de secagem não é suficientemente longo para que o consumo energético seja alto ao se trabalhar nas menores temperaturas. O símbolo ‘---’ presente no valor dos períodos da Tabela 7.3 representa que seu valor não faz diferença, uma vez que a amplitude é zero (operação convencional).

Tabela 7.3. Parâmetros Otimizados

Caso	A	B	C	D
Amplitude de Tg (°C)	0	0	0	0
Período de Tg (min)	---	---	---	---
Tgc (°C)	20	20	20	20
Amplitude de Q (L/min)	0	0	0	0
Período de Q (min)	---	---	---	---
Qc (L/min)	100	100	100	100
Consumo Energético (kJ)	147,4	107,7	230,7	170,9
Tempo de Secagem (s)	3680	2688	5760	4256
Tipo de Operação	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional
Caso	E	F	G	H
Amplitude de Tg (°C)	31,88	50,79	107,0	71,35
Período de Tg (min)	105,6	99,25	118,2	96,15
Tgc (°C)	36,71	30,87	20,00	41,19
Amplitude de Q (L/min)	0	0	0	0
Período de Q (min)	---	---	---	---
Qc (L/min)	100	100	100	100
Consumo Energético (kJ)	343,1	312,0	355,4	321,9
Tempo de Secagem (s)	3872	3616	4032	3616
Tipo de Operação	Periódica	Periódica	Periódica	Periódica
Caso	I	J	K	
Amplitude de Tg (°C)	0	0	63,95	
Período de Tg (min)	---	---	109,6	
Tgc (°C)	20	20	36,36	
Amplitude de Q (L/min)	0	0	6,254	
Período de Q (min)	---	---	69,73	
Qc (L/min)	100	100	103,3	
Consumo Energético (kJ)	262,8	211,5	367,9	
Tempo de Secagem (s)	6560	5280	3904	
Tipo de Operação	Convencional	Convencional	Periódica	

A mudança na umidade inicial da soja de 0,17 para 0,19 (casos de E até H) alterou a forma ideal para se reduzir o consumo energético de operação convencional

para operação periódica. A modulação na temperatura para os experimentos inicialmente em 0,19 de umidade de soja reduziu não só o consumo energético como também o tempo de secagem em relação à operação convencional nas menores temperaturas. Contudo, observou-se que é interessante manter também a vazão em valores baixos e constantes (operação convencional para a vazão). Nestes experimentos, observou-se também que as melhores condições de modulação da temperatura do ar (amplitude e período) variaram com as condições iniciais do sistema como temperatura da soja e umidade do ar.

As Figuras 7.13 e 7.14 mostram o comportamento destas melhores condições de modulação da temperatura para os casos E e G, que apresentam diferença apenas na umidade inicial do ar. Assim, ao se mudar as condições iniciais do sistema, pode-se mudar as suas condições ideais de operação a fim de se reduzir o consumo energético do processo. Vale ressaltar que os instantes nos quais os patamares da temperatura do ar são constantes, nas Figuras 7.13 e 7.14, são devidos às restrições impostas ao processo de otimização. Além disso, verificou-se, que em operação periódica, é interessante se trabalhar inicialmente nas maiores temperaturas e depois aguardar alguns instantes nas menores temperaturas que os efeitos difusivos ocorram, analogamente ao que foi estudado nos capítulos anteriores e ao que foi observado por outros autores no estudo da secagem intermitente de outros materiais.

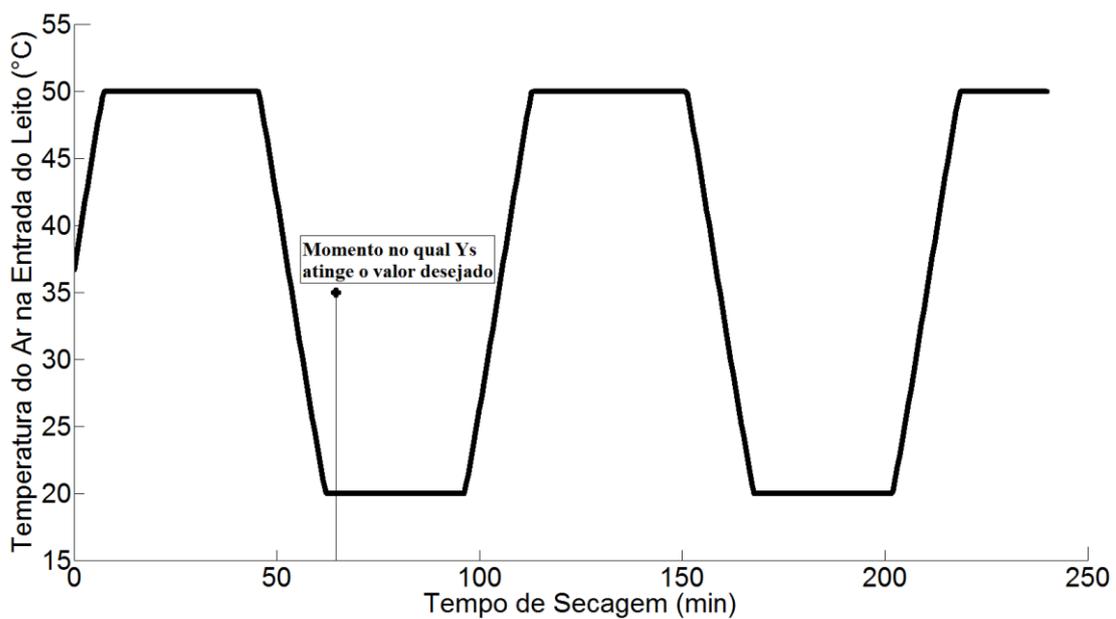


Figura 7.13 – Modulação da Temperatura do Ar para o Caso E

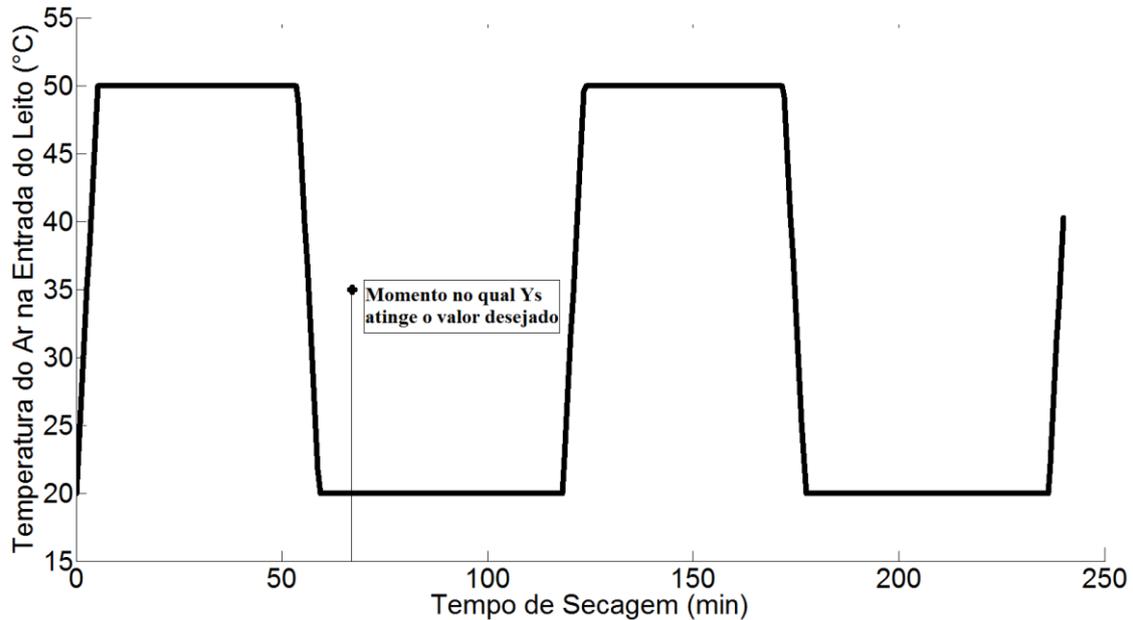


Figura 7.14 – Modulação da Temperatura do Ar para o Caso G

O tempo de secagem também se modificou com a umidade do ar e a temperatura da soja. Quanto maior a temperatura e menor a umidade do ar, há uma tendência a redução do tempo de secagem, fato que já era esperado, uma vez que o aumento da temperatura aumenta as taxas de secagem e o aumento da umidade do ar aumenta a resistência da umidade da soja se transportar para a fase gasosa.

Para os valores intermediários (0,18 em base seca) de umidade inicial de soja estudados (casos I, J e K), constatou-se que o tipo de operação ideal pode ser tanto convencional quanto periódica dependendo da umidade final desejada. Para umidades finais mais altas houve um favorecimento da operação convencional nas menores temperaturas analogamente ao observado com os casos simulados a 0,17 em umidade inicial. Por outro lado, ao se aumentar a variação da umidade da soja até o valor final de 11% em base úmida, observou-se um favorecimento em se operar periodicamente tanto com a modulação da temperatura quanto da vazão. Neste caso, o tempo de secagem em operação convencional nas menores temperaturas é suficientemente maior para levar o consumo do processo a valores superiores ao obtido em operação periódica. A Figura 7.15 apresenta a modulação da vazão do ar na entrada do secador para o caso K.

De um modo geral, observa-se que as condições iniciais do ar e da soja são as propriedades determinantes para apontar o melhor tipo de operação a ser utilizado. Assim, se faz interessante o uso de estratégias de controle na entrada dos secadores. Em

base nas condições de alimentação do ar e nas condições da soja que chega da lavoura, pode-se construir um sistema de controle que determine as melhores condições de modulação das condições do ar a fim de que o consumo energético inerente à energia fornecida na entrada do secador seja o mínimo possível.

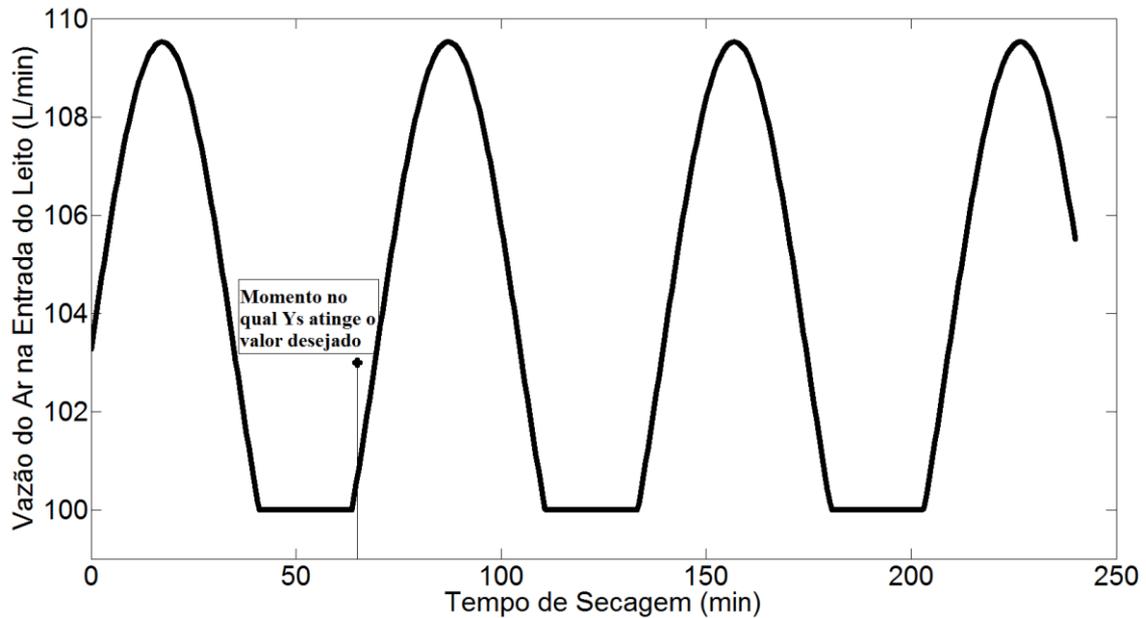


Figura 7.15 – Modulação da Vazão do Ar para o Caso K

Outra propriedade que interfere diretamente nas propriedades do ar, e cuja influência não foi estudada neste trabalho, é a temperatura ambiente. No estudo aqui realizado, esta propriedade não interferiu no consumo energético do processo, pois se analisou apenas a quantidade de energia fornecida na entrada do secador para que a secagem ocorra e atinja as condições desejadas. Assim, negligenciou-se na equação do consumo energético a forma como o ar foi aquecido, que neste estudo foi por meio de resistências elétricas (forma não utilizada nos processos industriais, uma vez que a demanda de energia é muito alta). Além disso, o sistema do secador é adiabático, não perdendo calor para o ambiente.

Para processos industriais, é interessante o estudo do consumo energético integrando a energia para aquecer o ar mais o sistema de secagem e as perdas para as vizinhanças. Para estes estudos, é interessante acrescentar também os custos envolvidos. Neste contexto, os modelos que foram validados servem como base a estes estudos de otimização e controle de processos, como também para o projeto de secadores.

7.4 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a condição operacional na qual se obtém o menor consumo energético varia muito com as propriedades do sistema como as condições iniciais da soja e do ar e as condições finais desejadas do material a ser estocado. Esta variação nas propriedades do sistema é muito comum nos processos industriais, uma vez que o clima que interfere nas condições do ar são muito instáveis e a umidade do grão de soja colhido varia bastante com a região, as condições de transporte e o clima da colheita. Assim, a modulação das propriedades do ar aliada a ferramentas de otimização e controle pode levar o sistema a uma redução significativa do consumo energético, evitando assim um fornecimento extra de energia desnecessário quando os efeitos difusivos controlam o processo.

8. CONCLUSÕES GERAIS

O modelo do aquecedor elétrico em regime transiente se mostrou adequado para descrever o perfil de temperatura do ar na saída do aquecedor. Foi possível descrever este perfil com um desvio máximo menor que 3,0%, estando este desvio dentro da precisão dos termopares. Estes resultados indicam que o modelo pode ser utilizado para fins de simulação, análise e projeto de aquecedores elétricos. O valor do coeficiente global de transferência de calor estimado pelo modelo ajustado esteve dentro da ordem de grandeza estimada pela literatura. Além disso, o modelo foi satisfatório durante os experimentos do Capítulo 5 para determinar a voltagem necessária para se atingir certa temperatura na entrada do secador dependendo da vazão do ar e das condições climáticas.

No levantamento da cinética de secagem de soja em camada delgada, observou-se que a velocidade do ar pouco influenciou nas isotermas de secagem. Outro fato constatado foi que as taxas de secagem aumentaram com aumento da temperatura. Além disso, os modelos generalizados empíricos e semiteóricos ajustados conseguiram prever as cinéticas de secagem com um desvio global máximo de 6% para qualquer condição de temperatura e vazão de ar e qualquer condição de umidade inicial de soja estudada nos experimentos. Estes resultados apontam que estes modelos podem ser usados na simulação, na otimização e no controle de processos de secagem como também no projeto de equipamentos. É interessante ressaltar que a influência da umidade inicial nas taxas de secagem foi significativa, pois a distribuição de água no interior do grão impacta na velocidade com que a água atinge a superfície como apontou o modelo de parâmetros distribuídos. Estes resultados juntamente com os dados referentes às taxas de secagem indicaram que os efeitos internos de transferência de massa de água no interior do grão controlaram o processo.

Para o estudo experimental da secagem periódica e convencional de soja em leito fixo, foi possível inferir a partir dos resultados que o secador teve seu desempenho melhorado com a aplicação da operação periódica. Os testes estatísticos apontaram com 95% de confiança que as médias das porcentagens de água evaporada em operação periódica foram maiores do que as obtidas em condições de secagem tradicional em casos em que ambas as operações são conduzidas com o mesmo consumo energético,

mesma demanda de ar, mesma condição climática e mesmo tempo de secagem. As oscilações da vazão e da temperatura do ar na entrada do secador potencializaram os transportes de massa e de energia, aumentando as taxas de secagem. A amplitude e a frequência dessas oscilações influenciaram nessas taxas de secagem e nos perfis de umidade e de temperatura dentro do leito. Resultados indicaram que é interessante aumentar a temperatura e depois abaixar seu valor para esperar que a água seja transportada do interior do grão até sua superfície de forma a ser transferida para a fase fluida. Esta modulação é interessante porque os efeitos internos de transporte do grão controlam o processo e esta modulação pode ser controlada pela velocidade do ar e/ou pela taxa de calor em seu processo de aquecimento. Além disso, constatou-se que a velocidade do ar é a propriedade que mais impacta nos teores de umidade do ar na saída do secador devido ao tempo de residência do ar dentro do secador. Vale ressaltar que esses altos índices de teor de umidade do ar nas menores velocidades não indicam necessariamente que as taxas de secagem foram maiores. Baixas velocidades aumentam muito a umidade do ar porque a massa de ar por tempo disponível para carregar o vapor de água evaporado é menor, o que pode prejudicar as taxas de secagem devido a redução na temperatura e devido ao ar estar mais próximo da saturação com pressões parciais de vapor suficientes para prejudicar o processo de evaporação.

O modelo heterogêneo de secagem de grãos ajustado com os dados experimentais de secagem em operação tanto periódica quanto convencional simulou razoavelmente o comportamento do sistema. Por meio deste modelo, a análise feita do consumo energético inerente a energia fornecida na entrada do secador apontou que foi possível atingir em alguns casos uma redução de 21% no gasto energético ao se operar com a modulação contínua da temperatura do ar. Houve uma tendência de melhora no desempenho do secador quanto às taxas de secagem com o aumento do valor da amplitude de modulação da temperatura do ar.

Por fim, nos estudos de otimização do processo de secagem de soja em leito fixo, observou-se que o melhor tipo de operação pode ser tanto periódico quanto convencional, dependendo tanto das propriedades iniciais do sistema como temperatura e umidade do ar e da soja quanto das condições finais desejadas para o material seco. Para variações pequenas na umidade do material, houve um favorecimento em se operar convencionalmente nas maiores temperaturas e nas menores vazões, pois o tempo de secagem é curto. Em outras condições, houve o favorecimento da operação com

modulação simultânea da temperatura e da vazão do ar. Neste contexto, os resultados apontam que estratégias de controle e otimização na entrada de secadores podem ser um diferencial para determinar os melhores tipos de modulação das propriedades do ar a fim de se reduzir o consumo energético do processo.

9. REFERÊNCIAS

AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering* 2003, 59, 99–104.

ARABHOSSEINI, A.; HUISMAN, W.; VAN BOXTEL, A.; MÜLLER, J. Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Industrial Crops and Products* 2009, 29, 53–59.

BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 2004, 65, 449–458.

BARBOSA, R. M. Cálculo Numérico. Cálculo de Diferenças Finitas. Editora Livraria Nobel, 1970.

BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, D. J. M. Secagem de Grãos em Camada Delgada, Um Estudo Sobre o Modelo Fickiano. *Anais do XXI ENEMP*; Ouro Preto, MG, 1993.

BARROZO, M. A. S. Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados. Tese de D.Sc, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP. 1995.

BARYEH, E. Cocoa drying and storage, using charcoal and solar heated rods. *Journal of Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 1985, 16 (1), 23–28.

BECKER, E.; CARLSSON, P-A.; KYLHAMMAR, L.; NEWTON, M. A.; SKOGLUNDH, M. In Situ Spectroscopic Investigation of Low-Temperature Oxidation of Methane over Alumina-Supported Platinum during Periodic Operation. *Journal of Physical Chemistry* 2011, 115, 944-951.

BENALI, M. Drying of yellow pea starch on inert carriers: Drying kinetics, moisture diffusivity, and product quality. *Journal of Food Engineering* 2012, 110, 337–344.

BENETTI, D.; CHRISTOFORO, A. L. Aplicação do Método das Diferenças Finitas na Resolução de Equações Diferenciais Elípticas referente à determinação das temperaturas em pontos interiores de uma chapa. *Anais do CNMAC v.2. UNEMAT – MT*, 2009.

BIAGI, J. D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M, C. Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento. In: LORINI, I; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. Armazenagem de Grãos. IBG, Campinas, SP. 2002. Cap. 5.2, p 289 – 307.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Definitions of Heat Transfer Coefficients. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. 2002, p. 425.

BOERI, C. N.; KHATCHATOURIAN, O. Modeling Convective Drying of Soybean (Glycine Max L): Experiments and Numerical Solution. Advances in Mathematical and Computational Methods 2012, 2 (1), 80–87.

BON, J.; KUDRA, T. Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. Drying Technology: An International Journal 2007, 25 (4), 523-532.

BORGES, P. A. P. Modelagem dos Processos Envolvidos nos Sistemas de Secagem e Armazenamento de Grãos. Tese de Doutorado para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Fevereiro, 2002.

BORREMANS, D.; RODE, S.; WILD, G. Liquid flow distribution and particle-fluid heat transfer in trickle-bed reactors: the influence of periodic operation. Chemical Engineering and Processing. 43 (2004) 1403-1410.

BOUNECHADA, D.; GROUPI, G.; FORZATTI, P. Enhanced Methane Conversion Under Periodic Operation Over a Pd/Rh Based TWC in the Exhausts from NGVs. Topics in Catalysis 2013, 56, 372-377.

BOYCE, D. S. Grain Moisture and Temperature Changes with Position and Time During Through Drying. J. Agric. Res., v.10, n. 4, p. 333-341, 1965.

BRUCE, D. M. Exposed-Layer Barley Drying: Three Models Fitted to New Data up to 150°C. Journal of Agricultural Engineering Research 1985, 32, 337-347.

BRZIC, D.; SCHUBERT, M.; HÄRING, H.; LANGE, R.; PETKOVSKA, M. Evaluation of periodic operation of a trickle-bed reactor based on empirical modeling. Chemical Engineering Science 2010, 65, 4160-4165.

CALADO, V. M. DE A. Modelagem e Simulação de Secadores em Leitões Fixo e Deslizante. PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. 1993 (Tese de Doutorado).

CALÇADA, L. A. Modelagem e Simulação de Secadores em Leito Fixo. PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. 1994 (Dissertação de Mestrado).

CALÇADA, L. A. Secagem de Materiais Granulares Porosos. Sc PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1998. (Tese de Doutorado)

CALÇADA, L. A.; BISCAIA Jr, E. C.; MASSARANI, G.. Secagem de Material Particulado: Modelo a Três Fases. Artigo Publicado no anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. 2002

CASTILLO-ARAIZA, C. O.; JIMÉNEZ-ISLAS, H.; LÓPEZ-ISUNZA, F. Heat-Transfer Studies in Packed-Bed Catalytic Reactors of Low Tube/Particle Diameter Ratio. *Ind. Eng. Chem. Res.* v. 46, p. 7426-7435, 2007.

CHEN, X.D. On The Characteristic Drying Rate Approach to Correlating Experimental Results of The Drying of Moist Porous Materials. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2002, 80, 984–990.

CHIN, S.K.; LAW, C.L.; SUPRAMANIAM, C.V.; CHENG, P.G. Thin-Layer Drying Characteristics and Quality Evaluation of Air-Dried *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technology: An International Journal* 2009, 27 (9), 975-984.

CHIN, S.K.; LAW, C.L. Product Quality and Drying Characteristics of Intermittent Heat Pump Drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technology* 2010, 28, 1457-1465.

CHINENYE, N. M.; OGUNLOWO, A. S.; OLUKUNLE, O. J. Cocoa Bean (*Theobroma cacao L.*) Drying Kinetics. *Chilean Journal of Agricultural Research* 2010, 70 (4), 633–639.

CHONG, C.H.; LAW, C.L. Application of Intermittent Drying of Cyclic Temperature and Step-Up Temperature in Enhancing Textural Attributes of Dehydrated *Manilkara zapota*. *Drying Technology: An International Journal* 2011, 29 (2), 245-252.

CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; HO, J. C.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N. A. Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 2000 a, 78 (Part C), 72–78.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K.; HAWLADER, M. N. A.; HO, J. C. Heat pump drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on convective drying kinetics and color change. *Drying Technology—An International Journal* 2000 b, 18 (5), 907–936.

CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview. *Bioresource Technology* 2003, 90, 285–295.

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Kidlington, v. 18, p. 1049, 1975.

CIL, B.; TOPUZ, Z. Fluidized Bed Drying of Corn, Bean and Chickpea. *Journal of Food Process Engineering* 2010, 33, 1079–1096.

CONCEIÇÃO, W. A. S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G; COUTINHO, M. R., JORGE, L. M. M. – Introdução ao MATLAB para Engenharias – Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2009.

CONCEIÇÃO, W. A. S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G; COUTINHO, M. R., JORGE, L. M. M. – MATLAB Aplicado à Solução de Problemas de Introdução à Engenharia Química, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte – Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2009

COUTINHO, M. R.; OMOTO, E. S.; OLIVEIRA, U. G.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. – Modelagem e Desenvolvimento de um Simulador para Aquecedores Elétricos de Ar – *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 26, no. 1 p. 33-37, 2004.

COUTINHO, M. R. Modelagem, Simulação e Análise da Hidratação de Grãos de Soja. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UEM. 2006

COUTINHO, M. R.; ROMERO, J. A. S.; CONCEIÇÃO, W. A. S., PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Secagem de Soja em Leito Fixo: Modelo a Duas Fases. XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. ENEMP, 2009.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L. H.; KOLLING, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. *Applied Mathematics and Computation*, v. 25, n. 2, p. 675-684, 2007.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; KOLLING, E. M. Performance of the Michigan drying simulation model with a new drying rate concept. *Acta Scientiarum. Agronomy. Maringá*, v. 31, n. 4, p. 553-557, 2009.

DALPASQUELE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L. H. Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model. *Acta Scientiarum. Technology. Maringá*, v. 34, n. 2, p. 137-140, Apr-June, 2012.

DEFENDI, R. O. Secagem Periódica de Soja em Leito Fixo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UEM. 2013.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime. *Engevista*, v. 17, n. 3, p. 421-432, 2015a.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. (2015b) The Air Temperature Modulation Impact on the Drying of Soybeans in Fixed Bed, *Drying Technology: An International Journal*, DOI: 10.1080/07373937.2015.1060998.

DEFENDI, R. O.; NICOLIN, D. J.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. (2015c) Assessment of the Initial Moisture Content on Soybean Drying Kinetics and Transport Properties, *Drying Technology: An International Journal*, DOI:10.1080/07373937.2015.1055496.

DEMIR, V.; GUNHAN, T.; YAGCIOGLU, A. K. Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering* 2007, 98, 47–53

ELIAS, R. N.; BARBOSA, A. L. S., MANCINI, M. C. Secagem de Grão de Bico em Leito Fixo. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*. Vol. 21 (1): 113-119, 2002.

FARKAS, I.; RENDIK, Z. Intermittent thin layer corn drying. *Drying Technology: An International Journal* 1997, 15 (6-8), 1951-1960.

FREGOLENTE, L. V.; SANTOS, O. A. A.; JORGE, L. M. M. – Estimativa das Propriedades Térmicas Efetivas de Grãos em um Secador de Leito Fixo – *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 24(2): 270-276, abr.-jun. 2004.

GOLMOHAMMADI, M.; RAJABI-HAMANE, M.; HASHEMI, S.J. Optimization of Drying-Tempering Periods in a Paddy Rice Dryer. *Drying Technology: An International Journal* 2012, 30 (1), 106-113.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Corrente e Resistência. *Fundamentos de Física 3. Eletromagnetismo*. Editora LTC. 4ª Edição. 1996. p. 113-120.

HENDERSON, S.M.; PERRY, R.L. *Agricultural process engineering*; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1955.

HERRITSCH, A.; DRONFIELD, J.; NIJDAM, J.J. Intermittent and Continuous Drying of Red Beech Timber From the Green Condition. *Drying Technology* 2010, 28, 269-277.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in deep bed dryer of yerba maté. *Journal of Food Engineering* 2012, 111, p. 110-114.

HOSSAIN, M.A.; BALA, B.K. Thin-Layer Drying Characteristics for Green Chilli. *Drying Technology: An International Journal* 2002, 20 (2), 489-505.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. Ed. LTC, 6ª Edição, 2008.

ITAYA, Y.; MORI, S.; HASATANI, M. Effect of intermittent heating on drying-induced strain-stress of molded clay. *Drying Technology: An International Journal* 1999, 17 (7-8), 1261-1271.

JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M.; GIUDICI, R. Experimental and numerical investigation of dynamic heat transfer parameters in packed bed. *Heat Mass Transfer*, v. 46, p. 1355-1365, 2010.

JUMAH, R.; AL-KTEIMAT, E.; AL-HAMAD, A.; TELFAH, E. Constant and Intermittent Drying Characteristics of Olive Cake. *Drying Technology* 2007, 25, 1417-1422.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering* 2007, 78, 98–108.

KOWALSKI, S.J.; PAWOWSKI, A. Drying of Wet Materials in Intermittent Conditions. *Drying Technology: An International Journal* 2010 a, 28 (5), 636-643.

KOWALSKI, S.J.; PAWOWSKI, A. Modeling of Kinetics in Stationary and Intermittent Drying. *Drying Technology: An International Journal* 2010 b, 28 (8), 1023-1031.

KOWALSKI, S. J.; PAWLOWSKI, A. Intermittent drying of initially saturated porous materials. *Chemical Engineering Science* 2011, 66, p. 1893-1905.

KOWALSKI, S.J.; SZADZINSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2014, 82, 65-70.

KUCUK, H.; MIDILLI, A; KILIC, A.; DINCER, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Drying Technology: An International Journal* 2014, 32 (7), 757-773.

KWAK, K.; BAI, C. A study on the performance enhancement of heat pump using electric heater under the frosting condition: Heat pump under frosting condition. *Applied Thermal Engineering* 2010, 30, p. 539-543.

LANGE, R.; GUTSCHE, R.; HANIKA, J. Forced Periodic Operation of a Trickle-Bed Reactor. *Chemical Engineering Science* 54 (1999) p. 2569-2573.

LAZZARI, F. A. Umidade, fungos e micotoxinas na qualidade de sementes, grãos e rações. Curitiba: Ed. Do Autor, 1993. 140 p.

LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. *Ind. Eng. Chem.*, v. 13, p 427-432, 1921.

LI, Y.B.; CAO, C.W.; YU, Q.L.; ZHONG, Q.X. Study of Rough Rice Fissuring During Intermittent Drying. *Drying Technology: An International Journal* 1998, 17 (9), 1779-1793.

LIMA, A.G.B.; NEBRA, S.A. Theoretical Study of Intermittent Drying (Tempering) in Prolate Spheroidal Bodies. *Drying Technology: An International Journal* 2001, 19 (8), 1569-1589.

LUZ, G. R.; Modelagem Matemática e Análise do Secador Rotativo de Farelo de Soja. PEQ/UEM. Dissertação de Mestrado. Maringá, 2006.

LUZ, G. R.; ANDRADE, C. M. G., JORGE, L. M. M.; PARAÍSO, P. R. Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. *Acta Scientiarum. Technology*. Maringá, v. 22, no. 2 p. 173-180, 2006.

MANCINI, M. C. Análise do Desempenho de Secadores de Fluxos Cruzados. Sc.COPPE/URFJ – Rio de Janeiro, RJ. (Dissertação de Mestrado), 1991.

MANCINI, M. C.; BISCAIA Jr., E. C. E.; MASSARANI, G., Transferência de Massa na Secagem de Grãos. XXI Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, p. 363-374, Ouro Preto – MG. 1993

MANCINI, M. C. Transferência de Massa em Secadores de Grãos. Sc.COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro – RJ (Tese de Doutorado). 1996

MANCINI, M. C.; MASSARANI, G.; BISCAIA Jr., E. C. Transferência de Massa na Secagem de Milho em Secadores de Camada Espessa em Leitos Fixo e Deslizante. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*. Vol. 21 (1): 121-129, 2002 a.

MANCINI, M. C.; CALÇADA, L. A.; MASSARANI, G.; BISCAIA Jr., E. C. Secagem de Feijão em Leito Fixo. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*. Vol. 21 (1): 89-96, 2002 b.

MANGANARO, J. L. A Quasi-Steady State Shell and Shrinking Core Approach to The Drying of Porous Particles and An Example of Parameter Identification. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2007, 88, 313–325.

MARTINS, R. M.; FRANCO, J. B. da R.; OLIVEIRA, A. V.; ANGONESE, C. Armazéns para propriedade familiar. In: LORINI, I; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. Armazenagem de Grãos. IBG, Campinas, SP. 2002 a. Cap. 3.2, p 117 – 155.

MARTINS, R. M.; FRANCO, J. B. da R.; OLIVEIRA, A. V.; ANGONESE, C. Secagem de grãos para propriedade familiar. In: LORINI, I; MIIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. Armazenagem de Grãos. IBG, Campinas, SP. 2002 b. Cap. 5.1, p 253 – 287.

MASSARANI, G.; SILVA TELLES, A. – Aspectos da Secagem de Material Sólido Particulado, em Tópicos Especiais em Secagem, (Freire, J. T. e Sartori, D. J. M., Editores) DEQ/UFSCAR, S. Carlos, SP, Brasil, p. 1-39. 1992.

MATA, M. E. R. M. C.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. Programa Computacional Para Simulação de Secagem de Grãos. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.1, n.1, p. 33-50, 1999.

MATHUR, S. Safety Considerations in Electric Gas Heaters. Process Safety Progress 2011, 30 (1), p. 35-38.

MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. Editora McGraw-Hill, 1993. 5ª Edição.

MEISAMI-ASL, E.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A.; TABATABAEEFAR, A. Determination of suitable thin layer drying curve model for apple slices (variety-Golab). Plant Omics Journal 2010, 3 (3), 103–108

MENEGHETTI, V.L.; AOSANI, E.; DA ROCHA, J.C.; DE OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORF, R.S. Mathematical models for intermittent drying of rice. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 2012, 16 (10), 1115–1120.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO:

<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/soja> Data de Acesso: 05/08/2014

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO:

http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Sala%20de%20Imprensa/Publica%C3%A7%C3%B5es/graficos_portugues_corrigido2.pdf Data de Acesso: 05/08/2014

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO:

http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Soja/20RO/Apresentacao_Conjuntura_soja.pdf Data de Acesso: 05/08/2014.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers; John Wiley & Sons, Inc: United States of America, 2003

MOTTA LIMA, O. C. Estimation of heat and mass transfer coefficients in cross-flow sliding bed drying grains. Acta Scientiarum. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1421-1425, 2001.

NICOLIN, D. J.; COUTINHO, M. R.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Soybean hydration: investigation of distributed parameter models with respect to surface boundary conditions. Chemical Engineering Communications 2013, 200 (7), 959–976

OLIVEIRA, C.A.; ROCHA, S.C.S. Intermittent Drying of Beans in a Spouted Bed. Brazilian Journal of Chemical Engineering 2007, 24 (4), 571–585.

ONG, S.P.; LAW, C.L.; HII, C.L. Optimization of Heat Pump-Assisted Intermittent Drying. Drying Technology 2012, 30, 1676-1687.

OZISIK, M. N.; Transferência de Calor: um texto básico. Editora Guanabara Koogan, 1990.

PAN, Y.K.; ZHAO, L.J.; HU, W.B. The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials. Drying Technology: An International Journal 1998, 17 (9), 1795-1812.

PAN, Y.K.; ZHAO, L.J.; DONG, Z.X.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Intermittent drying of carrot in a vibrated fluid bed: effect on product quality. Drying Technology: An International Journal 1999, 17 (10), 2323-2340.

PARDESHI, I.L.; ARORA, S.; BORKER, P.A. Thin-Layer Drying of Green Peas and Selection of a Suitable Thin-Layer Drying Model. Drying Technology 2009, 27, 288-295.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Chemical engineers' handbook. Editora McGraw-Hill, 1998. 7ª Edição.

PRADO, M. M. Secagem em Leito Fixo de Sementes com Mucilagem. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2004 (Tese de Doutorado).

PUTRANTO, A.; XIAO, Z.; CHEN, X.D.; WEBLEY, P.A. Intermittent drying of mango tissues: implementation of the reaction engineering approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2011, 50, 1089–1098.

PUTRANTO, A.; CHEN, X.D. Modeling intermittent drying of wood under rapidly varying temperature and humidity conditions with the lumped reaction engineering approach (L-REA). *Drying Technology* 2012, 30, 1658-1665.

PUTRANTO, A.; CHEN, X.D. Multiphase modeling of intermittent drying using the spatial reaction engineering approach (S-REA). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2013, 70, 169-183.

PUZZI, D. Abastecimento e Armazenagem de Grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas, SP. 2000.

RAMALLO, L. A.; LOVERA, N. N.; SCHMALKO, M. E. Effect of the application of intermittent drying on *Ilex paraguariensis* quality and drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 2010, 97, p. 188-193.

REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES, E. de P. Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.1, p. 112-116, 2002.

ROMERO, J. A. da S.; OMOTO, E. S.; CONCEIÇÃO, W. A. dos S.; COUTINHO, M. R.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. de M. Estudo da secagem de soja em operação periódica. COBEQ XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2010.

ROUGE, A.; SPOETZL, B.; GEBAUER, K.; SCHENK, R.; RENKEN, A. Microchannel reactors for fast periodic operation: the catalytic dehydration of isopropanol. *Chemical Engineering Science*. 56 (2001) p. 1419-1427.

SANDER, A.; KARDUM, J.P.; GLASNOVIC, A. Drying of Solids; Estimation of The Mathematical Model Parameters. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2010, 88, 822–829.

SHEI, H.J.; CHEN, Y.L. Computer simulation on intermittent drying of rough rice. *Drying Technology: An International Journal* 2002, 20 (3), 615-636.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABOOTT, M. M. Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. Editora LTC, 7ª Edição. Rio de Janeiro, 2007.

SMITH, S.A.; LANGRISH, T.A.G. Multicomponent Solid Modeling of Continuous and Intermittent Drying of *Pinus radiata* Sapwood Below the Fiber Saturation Point. *Drying Technology: An International Journal* 2008, 26, 844-854.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. In *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. SILVA, J. S. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000; 107–138.

SILVA, L. S.; REIS, G. G.; MANCINI, M. C.; CALÇADA, L. A. Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Massa na Secagem de Sementes de Agrião e Agrião D'água em Leito Fixo e Leito Fluidizado: Modelo a Duas Fases. *Revista Universitária Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*. RJ, EDUR, v. 23, n 1-2, 2004 p.18-33.

SILVA, J. de S; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D. *Tecnologias de Secagem e Armazenagem Para a Agricultura Familiar*. Viçosa, MG. 2005

SILVA, J. de S; BERBERT, P. A.; AFONSO, A. D. L.; RUFATO, S. Qualidade dos Grãos. In *Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. SILVA, J. S. Viçosa: Aprenda Fácil. Segunda Edição. Viçosa, MG. 2008. p. 63 – 104.

SILVA, V.; FIGUEIREDO, A.R.; COSTA, J.J.; GUINÉ, R.P.F. Experimental and mathematical study of the discontinuous drying kinetics of pears. *Journal of Food Engineering* 2014, 134, 30–36

SILVESTON, P. L.; HANIKA, J. Periodic Operation of Three-Phase Catalytic Reactors. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 82. December 2004. p. 1105 – 1141.

SILVESTON, P. L.; HUDGINS, R. R. Periodic pressure forcing of catalytic reactions. *Chemical Engineering Science* 2004, 59, 4055-4064.

SIMAL, S.; ROSSELLO, C. Heat and mass transfer model for potato drying. *Chemical Engineering Science* 1994, 44 (22), 3739–3744.

SPERANDIO, D. Simulação de Secagem de Produtos Agrícolas em Camadas Fixas e Fluxos Cruzados Sob Efeito de Entalpia Constante. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual de Maringá, 2005.

SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, 43. p. 1689-1708. 2002.

THOMKAPANICH, O.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S. Study of Intermittent Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of Heat-Sensitive Material. *Drying Technology* 2007, 25, 205-223.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying – A New Model. *Transactions of the ASAE* 1968, 11 (4), 582–586.

TUKAC, V.; HANIKA, J.; CHYBA, V. Periodic state of wet oxidation in trickle-bed reactor. *Catalysis Today* 79-80 (2003) 427-431.

TUKAC, V.; SIMICKOVÁ, M.; CHYBA, V.; LEDERER, J.; KOLENA, J.; HANIKA, J.; JIRICNY, V.; STANEK, V.; STAVÁREK, P. The behavior of pilot trickle-bed reactor under periodic operation. *Chemical Engineering Science* 62 (2007) p. 4891-4895.

VEGA-GÁLVEZ, A.; AH-HEN, K.; CHACANA, M.; VERGARA, J.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; GARCÍA-SEGOVIA, P.; LEMUS-MONDACA, R.; DI SCALA, K. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture, and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry* 2012, 132, 51–59.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* 2008, 5th edition, John Wiley & Sons, Inc.

WONGKIA, A.; SURIYE, K.; NONKHAMWONG, A.; PRASERTHDAM, P.; ASSABUMRUNGRAT, S. Catalytic performance improvement of styrene hydrogenation in trickle bed reactor by using periodic operation. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2013, 30 (3), 593-597.

YIN, H-J.; Y., Z.; C., A-Q.; Z., A. Experimental research on a novel cold storage defrost method based on air bypass circulation and electric heater. *Energy* 2012, 37, p. 623-631.

ZHANG, Q.; LITCHFIELD J.B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology: An International Journal* 1991, 9 (2), 383-395.