

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO

Rafael Oliveira Defendi

Engenheiro Químico, UEM-PR, 2010

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo C. da M. Lima

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mário M. Jorge

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo R. Paraíso

Dissertação de Mestrado submetida à
Universidade Estadual de Maringá,
como parte dos requisitos necessários
à obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química, área de
Desenvolvimento de Processos.

Maringá – PR – Brasil

Fevereiro 2013

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

D313s Defendi, Rafael Oliveira
Secagem periódica de soja em leito fixo/ Rafael
Oliveira Defendi. - Maringá, 2013.
87 f., il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta
Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Química, 2013.

1. Modelagem e simulação. 2. Secagem de soja. 3.
Leito fixo. 4. Operação periódica I. Lima, Oswaldo
Curty da Motta, orient. II. Jorge, Luiz Mario de
Matos, coorient. III. Paraíso, Paulo Roberto,
coorient. IV. Universidade Estadual de Maringá.
Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia
Química. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Química. III. Título.

CDD 22. ED. 660.2842

JLM-000740

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

Esta é a versão final da Dissertação de Mestrado apresentada por Rafael Oliveira Defendi perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 22 de fevereiro de 2013.

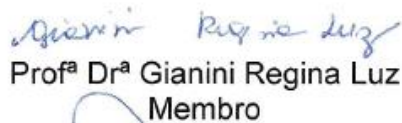
COMISSÃO JULGADORA



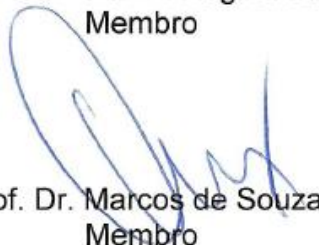
Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge
Coorientador



Profª Drª Gianini Regina Luz
Membro



Prof. Dr. Marcos de Souza
Membro

DEFENDI, RAFAEL OLIVEIRA

Secagem Periódica de Soja em Leito Fixo [Paraná] 2013

87 p. 29,7 cm (PEQ/UEM, M.Sc., Engenharia Química,
2013)

Dissertação – Universidade Estadual de Maringá – PEQ

1. Modelagem e Simulação

2. Secagem de Soja

3. Leito Fixo

4. Operação Periódica

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todas as pessoas que possam se beneficiar com este trabalho e em especial ao meu sobrinho, Gustavo.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À meus professores e amigos Luiz Mário, Oswaldo e Paulo por toda orientação, sugestão, ajuda e conselho.

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

À Marilza por todo suporte com suas atividades relacionadas ao PEQ.

À COCAMAR por ter disponibilizado a soja.

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

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, às minhas irmãs, ao meu sobrinho e a toda família pelo amor e felicidade que me trazem.

À todos os meus amigos, em especial à Mayara, ao Junior, ao Robson, à Lígia, à Gisely, à Thauana, à Larissa, às Camilas, ao Fábio, ao Vinícius, ao Rodrigo, ao Osório, à Lixia, à Huihui, à Jessica, à Driéli, à Daniele, à Carla, à Bárbara, ao Wandemberg, ao André, ao Gabriel e aos que estudaram comigo na UEM.

À Cristina Cairo pela ajuda no meu autoconhecimento.

E a mim mesmo por mais esta conquista.

SECAGEM PERIÓDICA DE SOJA EM LEITO FIXO

AUTOR: RAFAEL OLIVEIRA DEFENDI

ORIENTADOR: PROF. DR. OSWALDO CURTY DA MOTTA LIMA

CO-ORIENTADORES: PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

Dissertação de Mestrado; 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 22 de fevereiro de 2013.

RESUMO

A produção e exportação de grãos brasileiras ocupam uma posição de destaque no cenário mundial, como é o exemplo da soja que lidera em segundo lugar neste ranking. Um dos principais gastos inerentes a produção desses produtos está concentrado na secagem de grãos. Uma alternativa para redução dos gastos energéticos deste processo está na aplicação da operação periódica que pode levar a maiores rendimentos e potencializar os transportes de massa e de energia. Da literatura, observa-se que há um estudo concentrado dessa operação na modulação da vazão de reagentes líquidos em reatores catalíticos de leito gotejante, onde já foi provado que esta operação pode conduzir a maiores conversões em comparação com a operação em regime permanente.

Neste contexto, objetiva-se nesse trabalho estudar a operação periódica de secagem de soja em leito fixo por meio de um modelo em comparação com experimentos realizados em operação convencional em um leito de escala de laboratório a fim de se avaliar as vantagens de cada operação. Além disso, buscou-se propor e validar um modelo que descreva o perfil de temperatura do ar de secagem no sistema de seu aquecimento por meio de resistências elétricas, como também propor e validar um modelo que estime o coeficiente global de transferência de massa validado em comparação a resultados obtidos pelo levantamento da cinética de secagem de soja em camada delgada.

A metodologia foi dividida em quatro etapas, sendo a primeira o estudo do aquecimento do ar de secagem por meio de resistências elétricas relacionando o perfil de temperatura do ar em estado estacionário com a voltagem aplicada no aquecedor e com as condições do experimento como a vazão do ar e a temperatura ambiente. A partir de um balanço de energia na caixa do aquecedor, propôs-se um modelo

matemático validado por meio de dados experimentais pelo qual foi possível estimar a voltagem necessária para se aquecer o ar até uma temperatura específica. A segunda etapa consistiu no levantamento da cinética de secagem de soja em camada delgada coletando-se a massa de água perdida com o tempo. Dos resultados obtidos, ajustou-se um modelo que relaciona o coeficiente global de transferência de massa com a umidade da soja e com a temperatura do gás de secagem. Em seguida, realizaram-se experimentos de secagem de soja em leito fixo em operação convencional e simulou-se o sistema por meio do modelo heterogêneo a duas fases comparando os resultados com os dados experimentais da umidade e da temperatura do gás. Por fim, usaram-se os modelos validados na simulação da operação periódica da secagem de soja em leito fixo em iguais condições de gastos energéticos da operação convencional, comparando assim os rendimentos de cada processo.

Dos resultados obtidos, observou-se que o modelo de aquecimento do ar por resistências elétricas em regime permanente representou o comportamento da temperatura do gás com um desvio máximo em torno de 2,2%. Enquanto isso, o modelo para estimativa do coeficiente global de transferência de massa representou adequadamente o comportamento do sistema para a região onde o transporte de massa no interior da soja limita o processo. Contudo, para os primeiros minutos de secagem, onde os efeitos externos têm mais influência sobre o sistema, este modelo não se ajustou idealmente. Quanto ao modelo a duas fases, este se mostrou ideal para descrever o comportamento da umidade da soja e da temperatura do gás e da soja para o sistema de secagem em leito fixo. Por fim, a simulação da secagem em operação periódica apontou que em alguns casos de modulação da temperatura do ar, dependendo da amplitude, do período e da etapa limitante do processo inerente a umidade da soja, a operação periódica pode levar a menores gastos energéticos ou maiores rendimentos.

PERIODIC DRYING OF SOYBEAN IN FIXED BED

AUTHOR: RAFAEL OLIVEIRA DEFENDI

SUPERVISOR: PROF. DR. OSWALDO CURTY DA MOTTA LIMA

PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

Master Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL. E46 – 09; CEP 87020-900, Maringá – PR, Brazil, presented on 22th February 2013.

ABSTRACT

Brazilian production and export of grains occupy a prominent position, as is the case of soybean which leads second place in the world ranking. One of the principal expenses in this products production is concentrated in grain drying. An alternative to reducing energy costs in this process is in the application of periodic operation which can lead to higher throughput and enhance the mass and energy transport. It is observed from the literature that there is a concentrated study of this operation in liquid stream modulation of trickle-bed reactors, which has shown that this operation can lead to higher conversions in comparison with the steady state one.

In this context, one of the aims of this work is to study the periodic drying operation of soybeans in fixed bed using a mathematical model in comparison to conventional drying operation experiments made on laboratory scale in order to assess the benefits of each operation. Furthermore, other aims are to develop and validate a model that can describe the air temperature profile on its heating system by electrical resistances and to propose and validate a model that can estimate the global mass transfer coefficient validated by means of data obtained from drying kinetic experiments of soybeans on thin layer.

The methodology was divided into 4 steps. The first one was to study the drying air heating system by electrical resistances relating the air temperature profile in steady state to the applied voltage on the heater and to the experimental conditions such as air flow and room temperature. It was proposed a mathematical model validated by means of experimental data and based on a balance energy made in the box heater which enabled to estimate the voltage needed to heat the air into a specific temperature. The

second step was the soybeans drying kinetics on a thin layer study by measuring the water mass loss over time. It was adjusted a model by means of experimental data that described the global mass transfer coefficient as a function of the soybean moisture and the drying gas temperature. Then conventional drying operation of soybeans in fixed bed experiments were made and the results of the simulation of the two phases heterogeneous model were compared with gas moisture and temperature experimental data. Finally, in the last step it was simulated the periodic operation by means of the validated models in the same condition of conventional operation energy expenditure in order to compare the throughputs of each process.

The obtained results showed that the air heating by electrical resistances model in steady state described the gas temperature profile with a maximum deviation around 2.2%. Meanwhile, the model used to estimate the global mass transfer coefficient described ideally the drying system behavior in the region where the mass transfer inside the soybean limits the process. However, this model has not fitted well during the first drying minutes where external effects are more significant over the system. Moreover, the two phases model showed to be appropriate to describe the soybean moisture and the soybean and gas temperature profiles for drying in fixed bed. Eventually the periodic operation simulation indicated that in some cases the modulation of the air temperature can lead to lower energy expenditures and higher yields depending on the amplitude, the period and the limiting process stage inherent to the soybean moisture.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa e Objetivos	1
1.2 Estrutura da Dissertação	2

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Secagem e Armazenagem de Grãos	4
2.2 Terminologias	5
2.3 Transferência de Calor Envolvida no Processo de Secagem	7
2.4 Modelos Matemáticos para Secagem de Grão em Leito Fixo	9
2.4.1 Modelo a Duas Fases	9
2.4.2 Modelo Pseudo-Homogêneo	11
2.4.3 Modelo a Três Fases	13
2.5 Coeficiente Global de Transferência de Massa	14
2.6 Soluções Numéricas Para os Modelos Matemáticos	15

CAPÍTULO 3

3. AQUECIMENTO DO AR DE SECAGEM	18
3.1 Introdução e Objetivos	18
3.2 Materiais e Métodos	19
3.2.1 Equipamentos	19
3.2.2 Procedimento Experimental	20
3.2.3 Modelo Matemático	21
3.3 Resultados e Discussão	23

3.3.1 Resultados e Validação do Modelo	23
3.4 Conclusão	25

CAPÍTULO 4

4. CINÉTICA DE SECAGEM DA SOJA.....	26
4.1 Introdução e Objetivos	26
4.2 Materiais e Métodos	27
4.2.1 Equipamentos	27
4.2.2 Procedimento Experimental	29
4.2.3 Modelo Matemático	30
4.3 Resultados e Discussão	32
4.3.1 Resultados	32
4.3.2 Validação do Modelo	36
4.3.3 Simulação do Sistema	43
4.3.4 Sensibilidade dos Parâmetros Ajustados	45
4.4 Conclusão	48

CAPÍTULO 5

5. SECAGEM CONVENCIONAL EM LEITO FIXO	50
5.1 Introdução e Objetivos	50
5.2 Materiais e Métodos	50
5.2.1 Equipamentos	50
5.2.2 Procedimento Experimental	51
5.3 Resultados e Discussão	53
5.3.1 Resultados	53
5.3.2 Simulação do Modelo a Duas Fases	54
5.3.3 Sensibilidade dos Parâmetros	62

5.4 Conclusão	68
----------------------------	-----------

CAPÍTULO 6

6. SECAGEM PERIÓDICA EM LEITO FIXO	69
6.1 Introdução e Objetivos	69
6.2 Metodologia	70
6.3 Resultados e Discussão	71
6.3.1 Simulação da Secagem Periódica	71
6.3.2 Comparação com a Secagem Convencional	75
6.4 Conclusão	80

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÃO GERAL.....	81
--------------------------------	-----------

CAPÍTULO 8

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
--	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.4.1.1 – Equações do Modelo a Duas Fases	10
Figura 2.6.1 – Discretização do Modelo a Duas Fases	17
Figura 3.2.1.1 – Sistema dos Equipamentos Utilizados	19
Figura 3.2.1.2 – Esquema do Aquecedor	20
Figura 3.3.1.1 – Temperatura na Saída do aquecedor Experimental e Calculada pelo Modelo	25
Figura 4.2.1.1 – Esquema do Secador de Bandeja	28
Figura 4.2.1.2 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 1	28
Figura 4.2.1.3 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 2	29
Figura 4.3.1.1 – Gráfico de K pela Ys obtido pela solução numérica do modelo	33
Figura 4.3.1.2 – Gráfico da velocidade de secagem pelo tempo	34
Figura 4.3.1.3 – Gráfico de K pela Ys a 50 °C	34
Figura 4.3.1.4 – Gráfico de K pela Ys a 61 °C	35
Figura 4.3.1.5 – Gráfico K pela Ys para diferentes velocidades do ar de secagem	35
Figura 4.3.1.6 – Gráfico K pela Ys para diferentes temperaturas do ar de secagem	36
Figura 4.3.2.1 – Parâmetro a1 em função da temperatura	37
Figura 4.3.2.2 – Parâmetro a3 em função da temperatura	38
Figura 4.3.2.3 – Gráfico de K em função de Ys a 30 °C	39
Figura 4.3.2.4 – Gráfico de K em função de Ys a 50 °C	39
Figura 4.3.2.5 – Gráfico de K em função de Ys a 70 °C	40
Figura 4.3.2.6 – Gráfico de K em função de Ys a 40 °C	40
Figura 4.3.2.7 – Gráfico de K em função de Ys a 60 °C	41
Figura 4.3.2.8 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b1	41
Figura 4.3.2.9 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b2	42
Figura 4.3.2.10 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b3	42

Figura 4.3.3.1 – Simulação do Experimento 3	44
Figura 4.3.3.2 – Simulação do Experimento 4	44
Figura 4.3.4.1 – Análise da sensibilidade do aumento de 30% nos parâmetros a 40°C.....	46
Figura 4.3.4.2 – Análise da sensibilidade da redução de 30% nos parâmetros a 40°C.....	46
Figura 4.3.4.3 – Análise da sensibilidade do aumento de 30% nos parâmetros a 70°C.....	47
Figura 4.3.4.4 – Análise da sensibilidade da redução de 30% nos parâmetros a 70°C.....	47
Figura 5.3.1.1 – Massa específica da soja seca	54
Figura 5.3.2.1 – Simulação do Perfil de Umidade da Soja para o Experimento 1	57
Figura 5.3.2.2 – Simulação do Perfil de Umidade do Ar para o Experimento 1	58
Figura 5.3.2.3 – Simulação do Perfil de Temperatura da Soja para o Experimento 1 ..	58
Figura 5.3.2.4 – Simulação do Perfil de Temperatura do Ar para o Experimento 1	59
Figura 5.3.2.5 – Ys do Experimento 1	60
Figura 5.3.2.6 – Ys do Experimento 2	60
Figura 5.3.2.7 – Ys do Experimento 3	61
Figura 5.3.2.8 – Ys do Experimento 4	61
Figura 5.3.2.9 – Ys do Experimento 5	61
Figura 5.3.2.10 – Ys do Experimento 6	61
Figura 5.3.2.11 – Ys do Experimento 7	61
Figura 5.3.3.1 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 1.....	64
Figura 5.3.3.2 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 1.....	64
Figura 5.3.3.3 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 2.....	65
Figura 5.3.3.4 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 2.....	65

Figura 5.3.3.5 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 3.....	66
Figura 5.3.3.6 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 3.....	66
Figura 6.3.1.1 – Modulação da Temperatura de Alimentação do Gás	72
Figura 6.3.1.2 – Simulação do Perfil de Umidade da Soja para a Operação Periódica .	72
Figura 6.3.1.3 – Simulação do Perfil de Umidade do gás para a Operação Periódica ..	73
Figura 6.3.1.4 – Simulação do Perfil de Temperatura da Soja para a Operação Periódica.....	73
Figura 6.3.1.5 – Simulação do Perfil de Temperatura do Gás para a Operação Periódica.....	74
Figura 6.3.2.1 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C, Y_{s0} em 0,25, Amp de 1°C e Pe de 12 min.....	77
Figura 6.3.2.2 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C, Y_{s0} em 0,10, Amp de 20°C e Pe de 24 min.....	77
Figura 6.3.2.3 – Simulação a \overline{Tga} em 35 °C, Y_{s0} em 0,10, Amp de 20°C e Pe de 24 min.....	79
Figura 6.3.2.4 – Simulação \overline{Tga} em 35°C, Y_{s0} em 0,10, Amp de 10°C e Pe de 120 min.....	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1.1 – Umidade Recomendada de Armazenagem dos Grãos	4
Tabela 3.2.2.1 – Condições dos Experimentos	20
Tabela 3.3.1.1 – Parâmetro Ajustado e Desvios	24
Tabela 4.1.1 – Parâmetros ajustados	27
Tabela 4.2.2.1 – Condições dos Experimentos	30
Tabela 4.3.1.1 – Propriedades obtidas experimentalmente na cinética de secagem	32
Tabela 4.3.2.1 – Parâmetros ajustados para função exponencial	37
Tabela 4.3.2.2 – Influência da Temperatura sobre os parâmetros	41
Tabela 4.3.3.1 – Desvios calculados nas simulações dos modelos	43
Tabela 4.3.4.1 – Desvios calculados para a sensibilidade dos parâmetros	48
Tabela 5.2.1.1 – Posição dos Termopares	51
Tabela 5.2.2.1 – Condições experimentais	52
Tabela 5.3.1.1 – Dados experimentais	53
Tabela 5.3.2.1 – Parâmetros da equação (5.3.2.5)	55
Tabela 5.3.2.2 – Parâmetros da equação (5.3.2.7)	55
Tabela 5.3.2.3 – Desvios do modelo a duas fases	60
Tabela 5.3.3.1 – Desvios referentes a variação em 30% das propriedades do sistema ..	63
Tabela 6.2.1 – Condições da Simulação das Operações Periódicas e Convencionais ..	71
Tabela 6.3.2.1 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,25 para modulação 1	75
Tabela 6.3.2.2 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,15 para modulação 1	76
Tabela 6.3.2.3 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1	76
Tabela 6.3.2.4 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,25 para modulação 2	77
Tabela 6.3.2.5 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 2	78
Tabela 6.3.2.6 – Simulação a \overline{Tga} em 40 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1	78
Tabela 6.3.2.7 – Simulação a \overline{Tga} em 35 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1	78

NOMENCLATURAS

A	área da seção transversal	(m ²)
Água _{evcal}	massa de água evaporada calculada pelo modelo	(kg)
Água _{evexp}	massa experimental de água evaporada	(kg)
Amp	amplitude	(°C)
As	área superficial do aquecedor	(m ²)
As _{grão}	área superficial do grão	(m ²)
A1	parâmetro da equação 4.1.2	(kg/(m ³ .s))
a1	parâmetro da equação 4.3.2.1	(s ⁻¹)
A2	parâmetro da equação 4.1.2	(kg/(m ³ .K.s))
a2	parâmetro da equação 4.3.2.1	(s ⁻¹)
a3	parâmetro da equação 4.3.2.1	(adimensional)
B	parâmetro do modelo do aquecedor	(J/(s.K))
B1	parâmetro da equação 4.1.3	(kg/(m ³ .s))
b1	parâmetro da equação 4.3.2.5	(s ⁻¹)
B2	parâmetro da equação 4.1.3	(kg/(m ³ .K.s))
b2	parâmetro da equação 4.3.2.5	(s ⁻¹)
b3	parâmetro da equação 4.3.2.5	(s ⁻¹)
C	parâmetro do modelo do aquecedor	(J/(s.K))
C _{pa}	calor específico do gás de secagem	(kJ/kg.°C)
c _{par}	calor específico do ar	(kJ/(kg.°C))
C _{pcaixa}	calor específico da caixa do aquecedor	(J/(kg.K))
C _{pf}	calor específico do fluido	(kJ/(kg.°C))
C _{pl}	calor específico do líquido	(kJ/(kg.°C))
C _{ps}	calor específico do sólido seco	(kJ/(kg.°C))

C_{pv}	calor específico do vapor	$(\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$
c_1	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
c_2	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
c_3	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
c_4	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
c_5	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
c_6	parâmetro da equação 4.3.4.1	$(\text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
E	energia do sistema	(J)
E_c	gasto energético da operação convencional	(kJ)
E_p	gasto energético da operação periódica	(kJ)
f	taxa de secagem por volume de partículas	$(\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}))$
freq	frequência	(s^{-1})
G_g	fluxo mássico do gás	$(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$
$\langle H \rangle$	entalpia média pela massa seca do componente	(kJ/kg)
h	coeficiente global de transferência de calor	$(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
h_a	coeficiente de transferência de calor	$(\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}))$
H_g	entalpia do gás pela sua massa seca	(kJ/kg)
H_s	entalpia do sólido pela sua massa seca	(kJ/kg)
K	coeficiente volumétrico de transferência de massa por massa específica de sólido seco	(s^{-1})
k_{eff}	condutividade térmica efetiva	$(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
k_s	coeficiente global de transferência de massa	$(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$
$K_{s,a}$	coeficiente volumétrico de transferência de massa	$(\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}))$
$m_{\text{água}}$	Massa de água	(kg)
\dot{m}_{ar}	vazão mássica do ar	(kg/s)
m_{caixa}	massa da caixa do aquecedor	(kg)

M_{gs}	massa do gás seco	(kg)
$MM_{\text{água}}$	massa molar da água	(g/mol)
MM_{ar}	massa molar do ar	(g/mol)
m_{ss}	massa do sólido seco	(kg)
$N_{\text{água}}$	fluxo mássico de água	(kg/(m ² .s))
$n_{\text{água}}$	número de mols de água	(mol)
n_{ar}	número de mols de ar	(mol)
P	pressão do sistema	(N/m ²)
$P_{\text{água}}$	pressão parcial do vapor de água	(kPa)
P_e	período	(s)
P_{sat}	pressão de saturação do vapor de água	(kPa)
qT	quantidade de calor transferida	(kJ)
R	resistência elétrica	(Ω)
r	raio	(m)
t	tempo	(s)
T_{ambiente}	temperatura ambiente	(°C)
T_c	temperatura crítica	(K)
T_e	temperatura do ar na entrada do aquecedor	(°C)
T_g	temperatura do gás	(°C)
T_{ga}	temperatura do gás na alimentação	(°C)
$\overline{T_{ga}}$	temperatura média do gás na alimentação	(°C)
T_{gap}	temperatura do gás na alimentação para a operação periódica	(°C)
T_{gcal}	temperatura do gás calculada pelo modelo	(°C)
T_{gexp}	temperatura do gás experimental	(°C)
T_{gsat}	temperatura do gás saturado	(°C)
T_r	temperatura de referência	(°C)

T_R	temperatura reduzida	(adimensional)
T_s	temperatura do ar na saída do aquecedor	(°C)
T_{sa}	temperatura de alimentação do sólido	(°C)
T_{sb}	temperatura final do sólido	(°C)
T_{s0}	temperatura da soja inicial	(°C)
T_v	temperatura de vaporização do líquido	(°C)
T_{va}	temperatura final do vapor	(°C)
UR	umidade relativa do ar	(adimensional)
V	voltagem	(V)
v_r	componente de velocidade radial	(m/s)
V_{sp}	volume do sistema particulado	(m ³)
v_z	componente de velocidade axial	(m/s)
X	umidade em base úmida	(adimensional)
Y	umidade em base seca	(adimensional)
Y_a	umidade do sólido na alimentação	(adimensional)
$y_{\text{água}}$	fração molar da água	(adimensional)
Y_b	umidade do sólido final	(adimensional)
Y_g	umidade do gás	(adimensional)
Y_{ga}	umidade do gás na alimentação	(adimensional)
Y_{gap}	umidade do gás na alimentação da operação periódica	(adimensional)
Y_{gcal}	umidade do gás calculada pelo modelo	(adimensional)
Y_{gexp}	umidade do gás experimental	(adimensional)
Y_{gl}	umidade na forma líquida	(adimensional)
Y_{gsat}	umidade do gás saturado	(adimensional)
Y_{gv}	umidade na forma vapor	(adimensional)
Y_s	umidade do sólido	(adimensional)

\bar{Y}_s	umidade média de soja do leito	(adimensional)
Y_{scal}	umidade da soja calculada pelo modelo	(adimensional)
Y_{se}	umidade de equilíbrio do sólido	(adimensional)
Y_{sexp}	umidade da soja obtida experimentalmente	(adimensional)
$Y_{smodelo}$	umidade da soja calculada pelo modelo	(adimensional)
$Y_{ssimulado}$	umidade da soja calculada pelo modelo com os parâmetro modificados	(adimensional)
Y_{s_0}	umidade do sólido inicial	(adimensional)
z	posição no leito	(m)
α	parâmetro da equação 4.1.1	(kg/(m ³ .s))
β	parâmetro da equação 4.1.1	(kg/(m ³ .s))
ε	porosidade	(adimensional)
λ	calor latente de vaporização	(kJ/°C)
ρ_f	densidade do fluido	(kg/m ³)
ρ_{ss}	massa específica do sólido seco	(kg/m ³)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e Objetivos

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos. Dados fornecidos pelo Ministério da Agricultura mostram que em 2010 o Brasil foi o maior produtor e exportador de café, o segundo maior produtor e exportador de soja e terceiro maior exportador e quarto maior produtor de milho. O valor das exportações de café, soja e milho foram respectivamente de 5.764, 17.701 e 2.136 bilhões de dólares. Desde 1960 até 2010, a produção brasileira de grãos aumentou de 17,2 para 150,8 milhões de toneladas, o que resultou em um crescimento de 774%.

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. 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. Além disso, segundo Silva *et al.* (2005), de uma forma geral, os pequenos cafeicultores e produtores de grãos têm poucas possibilidades de comercializar a produção diretamente com os consumidores, vendendo seus produtos aos atravessadores por preços baixos, os quais transportam esses produtos até centros de comercialização para que recebam tratamento especial sendo vendido a bons preços. Dentre esses tratamentos especiais se enquadra o processo de secagem.

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 periódica. O estudo sobre esta operação é recente e existe pouca referência na literatura. 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 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, os objetivos deste trabalho são:

- propor um modelo matemático que descreva o comportamento térmico do sistema de aquecimento de ar por resistências elétricas operando em regime permanente;
- validar o modelo do aquecedor elétrico em relação a medidas experimentais;
- a partir do modelo do aquecedor validado visa-se estimar a voltagem aplicada ao aquecedor a fim de obter-se uma determinada temperatura na alimentação do secador de soja;

- levantar experimentalmente a cinética de secagem de soja em um secador de bandeja para validar um modelo que estime o coeficiente de transferência de massa como uma função da umidade do sólido e da temperatura do gás de secagem;
- propor um modelo do secador de leito fixo que descreva o perfil de temperatura e de umidade da soja e do ar ao longo da posição e do tempo;
- simular a operação convencional a partir do modelo de secagem de soja em leito fixo comparando os resultados com dados experimentais;
- simular a secagem de soja em leito fixo em operação periódica por meio dos modelos validados e dos modelos da literatura, afim de comparar as vantagens e desvantagens de cada operação.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em oito capítulos, sendo o primeiro referente a introdução do trabalho onde 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 armazenamento de grãos, os modelos matemáticos da secagem de grãos em leito fixo e o método matemático da diferenças finitas para solução das equações dos modelos.

Dando continuidade, os quatro capítulos em sequência representam o corpo da dissertação e são escritos na forma de artigos apresentando uma breve introdução e revisão literária, 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 a operação em regime permanente que descreve a temperatura do ar na saída do aquecedor em função da voltagem aplicada nas resistências, da temperatura ambiente, da vazão mássica e do calor específico 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, é proposto um modelo que relaciona o coeficiente global de transferência de massa como uma função da temperatura do ar e da umidade da soja. Além disso, usam-se resultados da literatura para ampliar a faixa de validade do modelo e também é feito um estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros.

O capítulo 5 foca na realização de experimentos de secagem da soja em leito fixo visando simular o sistema por meio do modelo a duas fases a partir dos dados experimentais da umidade e da temperatura do ar. Adicionalmente, é feito um estudo do impacto da ordem de grandeza das propriedades do sistema a fim de se verificar o peso das considerações tomadas na resolução dos modelos.

Partindo dos modelos validados e em relação a dados experimentais, o capítulo 6 se destina a simular a operação periódica de secagem de soja em leito fixo comparando os resultados com as simulações da operação convencional em mesma situação de gastos energéticos, analisando-se assim os rendimentos referentes às umidades finais de cada processo. Por fim os dois últimos tópicos consistem respectivamente nas conclusões gerais do trabalho e as referências bibliográficas consultadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Secagem e Armazenagem de Grãos

Como visto na Introdução, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos. 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), uma armazenagem sem risco é aquela em que os grãos são secos até teores de umidade seguros conforme indicado na tabela 2.1.1. 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 2.1.1 – 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 ineficazes contra o ataque de insetos, roedores, pássaros, ácaros e o 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 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, como visto anteriormente, 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. 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 é a redução do gasto energético do processo com o uso da operação periódica, que pode potencializar os transportes de massa e de energia envolvidos no processo e aumentar o rendimento.

2.2. Terminologias

McCabe (1993), de uma forma geral diz que a secagem de um sólido significa a 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 baixos 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 uma evaporação.

A remoção de líquido pode ser feita mecanicamente por centrifugação ou por pressão e termicamente pelo processo de evaporação (McCabe, 1993). O foco deste trabalho é o processo de secagem devido a um gradiente 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), segue abaixo algumas definições:

Difusão interna. Devido a gradientes de concentração, há transporte de massa de líquido ou de vapor por meio de um sólido. Esse transporte é definido como difusão interna.

Escoamento capilar. O escoamento capilar é definido como o escoamento do líquido que ocorre nos interstícios de um sólido ou mesmo sobre sua superfície devido a atração molecular entre o sólido e o líquido.

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

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

$$Y = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{ss}}} \quad (2.2.1)$$

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

$$X = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{ss}} + m_{\text{água}}} \quad (2.2.2)$$

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. Representa a relação entre a quantidade de vapor de água sobre a quantidade de ar.

Umidade relativa (UR). É definida como a porcentagem de pressão parcial do vapor de água no ar (p) em relação a pressão de vapor de água em condições de equilíbrio (ps: pressão de saturação), como mostra a expressão que segue abaixo:

$$UR = \frac{p}{p_s} \quad (2.2.3)$$

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. Já o caso indireto é aquele onde 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 que são:

- 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.

Adicionando a isso, 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 a temperatura do sólido é constante, a saturação do sólido é atingida 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 e há um aumento da temperatura do sólido. 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 (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 de vapor a partir da superfície. (Perry e Green, 1998)

McCabe (1993) propõe que para o cálculo da taxa de transferência de calor do processo de secagem leva-se em conta que o calor fornecido ao sistema tem que 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. Cada termo energético para o cálculo desta taxa apresentado por McCabe (1993) está representado abaixo:

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

$$Cps(Tsb - Tsa) \quad (2.3.1)$$

Onde Cps é o calor específico do sólido, Tsb 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:

$$Ya.Cpl.(Tv - Tsa) \quad (2.3.2)$$

Onde 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:

$$(Ya - Yb).λ \quad (2.3.3)$$

Onde Yb 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:

$$Yb.Cpl.(Tsb - Tv) \quad (2.3.4)$$

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:

$$(Ya - Yb).Cpv.(Tva - Tv) \quad (2.3.5)$$

Onde Cpv é o calor específico do vapor e Tva é a temperatura final do vapor.

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

$$\frac{q_T}{m_{ss}} = Cps(Tsb - Tsa) + Ya.Cpl.(Tv - Tsa) + (Ya - Yb).λ + Yb.Cpl.(Tsb - Tv) + (Ya - Yb).Cpv.(Tva - Tv) \quad (2.3.6)$$

2.4. Modelos Matemáticos para Secagem de Grãos em Leito Fixo

2.4.1. 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 (2.3.6) 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 de 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 quanto as 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 a seguir:

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 2.4.1.1 – Equações do Modelo a Duas Fases (Mancini *et al.*, 2002)

As considerações adotadas deste modelo por uma significativa parte dos autores como Coutinho *et al.* (2009), Lima (2001) e Calçada (1994) e que também serão tomadas 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, que é considerada apenas formada por ar e vapor de água;
- Desprezam-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;
- Despreza-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:

$$\frac{\partial Y_g}{\partial z} = \frac{f}{G_g} \quad (2.4.1.1)$$

Onde 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:

$$f = K_s a \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (2.4.1.2)$$

Onde 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.

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

$$G_g \cdot (c_{p_{ar}} + Y_g \cdot c_{p_v}) \cdot \frac{\partial T_g}{\partial z} = -ha(T_g - T_s) \quad (2.4.1.3)$$

Onde $c_{p_{ar}}$ é o calor específico do ar, c_{p_v} é o calor específico do vapor, T_s é a temperatura do sólido 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:

$$ha = 4286,5 \cdot \left[\frac{G_g \cdot (T_g + 273)}{P} \right]^{0,6011} \quad (2.4.1.4)$$

Onde 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:

$$\frac{\partial Y_s}{\partial t} = - \frac{f}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_{ss}} \quad (2.4.1.5)$$

Onde Y_s é a umidade do sólido em base seca, 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 a 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:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{ss} \cdot (c_{p_s} + c_{p_l} \cdot Y_s) \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = ha(T_g - T_s) - f(c_{p_v}(T_g - T_s) + \lambda) \quad (2.4.1.6)$$

2.4.2. 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 estes 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 vem sendo 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 ser 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:

$$\rho_f \cdot C_p f \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_{z0} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.4.2.1)$$

Onde ρ_f é a densidade do fluido, $C_p f$ é o calor específico do fluido, v_{z0} é a velocidade axial em r (raio) = 0 e k_{eff} é a condutividade térmica efetiva. Este modelo foi tomado depois que a diferença de temperatura entre o gás e as partículas sólidas é 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 que segue abaixo:

$$\rho_f \cdot C_p f \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.4.2.2)$$

Onde 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 propriedades 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 mostra Fregolente *et al.* (2004) pela equação que segue abaixo:

$$k_r \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = G \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.4.2.3)$$

Onde k_r é a condutividade térmica efetiva radial, k_a 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 c_p 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.

2.4.3. Modelo a Três Fases

Durante o processo de secagem de materiais particulados, existe a possibilidade em dadas 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 2.4. 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 2.4.1. Contudo, a propriedade 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 propriedades 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. Quando a umidade relativa vale 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:

$$Y_{gv} = Y_g \quad e \quad Y_{gl} = 0 \quad (2.4.3.1)$$

Gás saturado:

$$T_g = T_{gsat}, \quad Y_{gv} = Y_{gsat} \quad e \quad Y_{gl} = Y_g - Y_{gsat} \quad (2.4.3.2)$$

2.5. Coeficiente Global de Transferência de Massa

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 a transferência de energia quanto ao transporte de massa que podem limitar o processo nos diferentes estágios da secagem. Da literatura, uma parte dos autores concluiu que a maior resistência encontra-se no transporte de massa no interior do sólido, pois a vazão do ar faz pouca influência no processo de secagem como se observa nos estudos de Mancini (1996), Barrozo *et al.* (1993) e Luz *et al.* (2006).

Uma propriedade intrínseca a 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.

Alguns autores como Mancini (1996) e Barrozo (1995) realizaram experimentos em camada delgada e posteriormente obtiveram bons resultados na aplicação dos modelos em cada espessa. A camada espessa, ao contrário da camada delgada, tem uma espessura de leito suficiente para que haja um perfil de umidade e temperatura do gás de secagem. Outros autores validaram um modelo empírico para estimativa do coeficiente global de transferência de massa frente a dados experimentais realizadas 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 estar corrigindo outras falhas da estimativa de outras propriedades não relacionadas à

transferência de massa, uma vez que há muitas variáveis envolvidas como aponta o modelo a duas fases.

O modelo base que a maioria dos autores utiliza para ajustar um modelo em camada delgada para a determinação do coeficiente global de transferência de massa é tomado em analogia à lei de Newton do resfriamento como reporta Calado (1993) sobre a expressão proposta por Lewis (1921) para a taxa de secagem:

$$\frac{dY_s}{dt} = -K(Y_s - Y_{se}) \quad (2.5.1)$$

Esta expressão mostra a taxa de secagem como uma função da umidade do sólido, da umidade de equilíbrio do sólido e de uma variável K relacionada com o coeficiente global de transferência de massa. Caso K seja constante, facilmente encontra-se uma solução analítica para o modelo representado pela equação (2.5.1). Contudo, a maioria dos autores referenciados neste trabalho e que trabalharam com secagem em camada delgada, ou mesmo em camada espessa, propuseram equações lineares empíricas com K em função da umidade do sólido e da temperatura do gás (que usualmente é tomada como igual a temperatura do sólido em estudos em camada delgada). Em outros casos, alguns autores também relacionaram a umidade inicial do sólido e a vazão do gás na equação linear empírica para estimativa de K, pois observaram que estas propriedades também influenciam no transporte de massa do processo.

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 simplificar 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 em alguns casos discretizar as derivadas espaciais e integrar no tempo. Além disso, Benetti acrescenta que este método está baseado na diferenciação de funções polinomiais interpolativas, onde os operadores são determinados segundo a expansão em série de Taylor. Abaixo segue 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:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)\Delta x^2}{2!} + \frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (2.6.1)$$

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

$$f(x - \Delta x) = f(x) - f'(x)\Delta x + \frac{f''(x)\Delta x^2}{2!} - \frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} - \dots \quad (2.6.2)$$

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 (2.6.1) em relação a equação (2.6.2), como se observa abaixo:

$$f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) = 2f'(x)\Delta x + 2\frac{f'''(x)\Delta x^3}{3!} + \dots \quad (2.6.3)$$

Isolando $f'(x)$, obtém-se:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} + 2\frac{f'''(x)\Delta x^2}{3!} + \dots \quad (2.6.4)$$

Pode-se desprezar os termos após o primeiro termo do lado direito da equação (2.6.4). 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:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} + 0[\Delta x^2] \quad (2.6.5)$$

O método das diferenças finitas para frente se baseia na expansão de Taylor representada pela equação (2.6.1). Da mesma forma, pode-se isolar o valor de $f'(x)$ e considerar apenas os dois primeiros termos da expansão:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} + 0[\Delta x] \quad (2.6.6)$$

Analogamente, o método das diferenças finitas para trás se baseia na expansão de Taylor representada pela equação (2.6.2). Isolando o valor de $f'(x)$ e tomando apenas os dois primeiros termos da expansão, obtém-se:

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x-\Delta x)}{\Delta x} + 0[\Delta x] \quad (2.6.7)$$

Para o caso de equações diferenciais de 2º ordem, para discretizá-las pelo método das diferenças finitas, soma-se as equações (2.6.1) e (2.6.2). Realizando esta operação, isolando o valor de $f''(x)$ e tomando apenas os primeiros termos da expansão, obtém-se:

$$f''(x) = \frac{f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) - 2f(x)}{\Delta x^2} + 0[\Delta x^2] \quad (2.6.8)$$

Este método de discretização pelas diferenças finitas foi aplicado por vários autores para resolver os modelos de secagem de grãos, como pode se destacar os trabalhos de Dalpasquale *et al.* (2012), Romero *et al.* (2010), Coutinho *et al.* (2009) 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). Para este caso, o sistema é dividido em uma malha com n pontos como descrito pela figura 2.6.1.

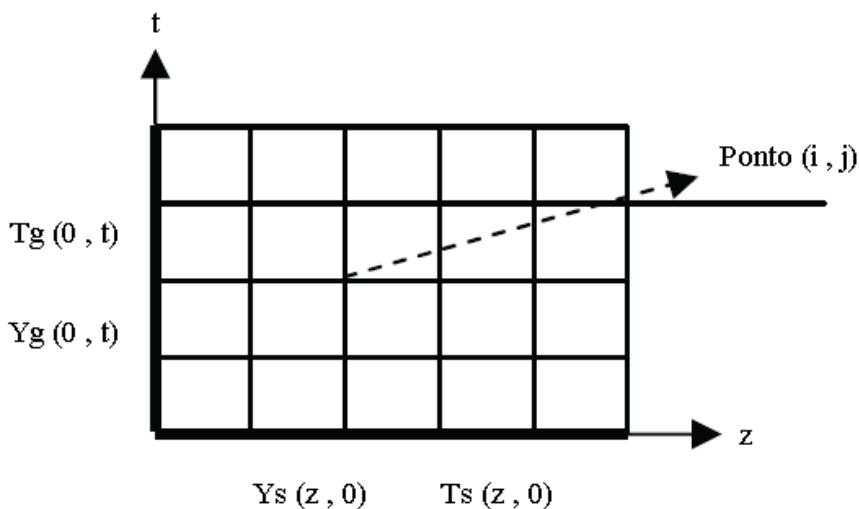


Figura 2.6.1 – Discretização do Modelo a Duas Fases

Assim, a malha é dividida em intervalos no tempo e no espaço suficientes para os resultados apresentar adequadamente o comportamento do sistema. Os pontos são calculados a partir das condições de contorno (eixo t) e das condições iniciais (eixo z). Enquanto isso, outros autores, como o caso de Dalpasquale *et al.* (2009), preferem usar uma combinação do método das diferenças finitas com o método numérico de Newton para resolver o sistema algébrico não linear que resulta na aplicação do método implícito/explicito das diferenças finitas, o que elimina a restrição do número de divisões de intervalos do tempo necessário para boa representatividade.

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.

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, onde 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 são muito utilizados em processos industriais, geralmente para aquecer fluidos como a água em sistemas onde se necessita trocadores de calor e ar na secagem de materiais sólidos. 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 (2008), a quantidade de calor fornecida num 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 que é proporcionada pelo controle ideal do processo. Assim, modelar, simular e validar o desempenho de sistemas de aquecimento é extremamente importante para otimização destes processos.

O controle da temperatura nos aquecedores elétricos é feito por meio do controle 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 deste trabalho é propor um modelo estático de um aquecedor elétrico operando em regime permanente que relaciona o perfil de temperatura do ar na saída do aquecedor com a voltagem aplicada e as condições do meio em que o aquecedor está inserido e 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 leito fixo em escala de bancada. Além disso, busca-se aplicar o modelo na simulação da temperatura de entrada do ar no processo de secagem de soja em leito fixo que será abordado nos próximos capítulos.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Equipamentos

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 sem recheio, um psicrômetro digital, termopares tipo K (precisão de $\pm 2,2 \text{ }^\circ\text{C}$) e um cronômetro. O sistema envolvido está representado na Figura 3.2.1.1.

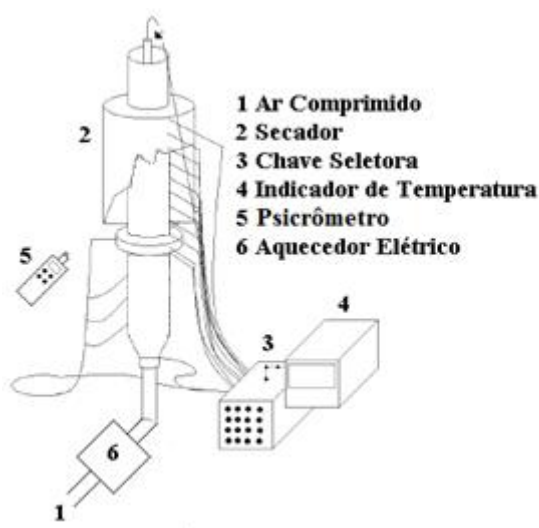


Figura 3.2.1.1 – Sistema dos Equipamentos Utilizados.

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 segue para o leito do secador, onde há vários termopares situados em diferentes posições. O termopar utilizado neste experimento é o situado logo na saída do aquecedor como esquematizado na figura 3.2.1.2.

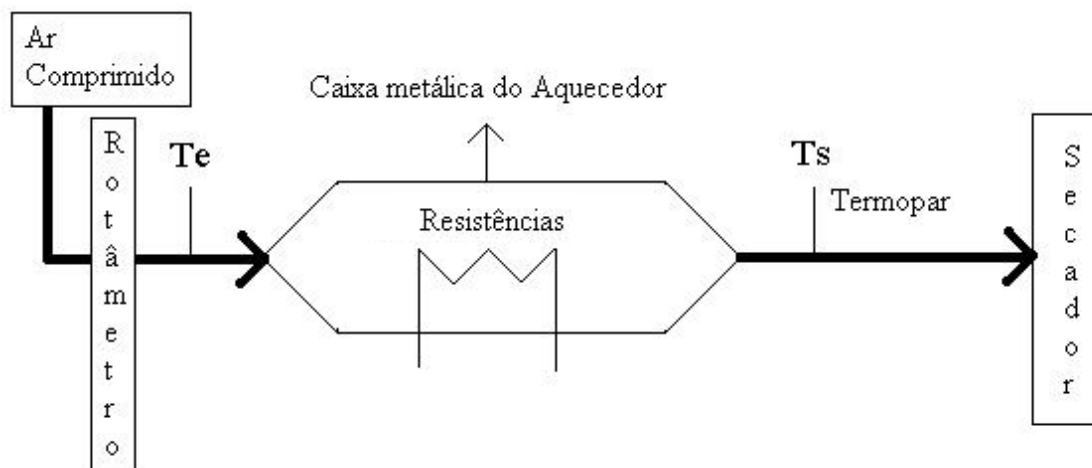


Figura 3.2.1.2 – Esquema do Aquecedor

3.2.2 Procedimento Experimental

Tabela 3.2.2.1 – Condições dos Experimentos

Vazão do Ar em 100 L/min		Vazão do Ar em 200 L/min	
Experimento	Voltagem (%)	Experimento	Voltagem (%)
1	6	14	9
2	6	15	10
3	7	16	10
4	9	17	13
5	9	18	15
6	17	19	18
7	20	20	29
8	22	21	29
9	22	22	30
10	25	23	35
11	25	24	35
12	25	25	35
13	26		

O procedimento experimental consistiu nos seguintes passos:

- 1) regulou-se a vazão de ar em 100 L/min;
- 2) mediu-se a temperatura de entrada do ar no aquecedor (T_e) e do ar ambiente com o psicrômetro;
- 3) acionou-se a resistência regulando a voltagem na posição de 6% que equivale a 6,6 V;

- 4) mediu-se T_s (temperatura do ar na saída do aquecedor) 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;
- 5) repetiram-se os itens 1, 2, 3 e 4 mudando as condições de voltagem e vazão de ar como apresentadas pela Tabela 3.2.2.1.

3.2.3 Modelo Matemático

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

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Acúmulo de} \\ \textit{Energia} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \textit{Entrada de} \\ \textit{Energia no} \\ \textit{Sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \textit{Saída de} \\ \textit{Energia do} \\ \textit{Sistema} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \textit{Geração de} \\ \textit{Energia} \end{array} \right] \quad (3.2.3.1)$$

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:

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Entrada de} \\ \textit{Energia no} \\ \textit{Sistema} \end{array} \right] = \dot{m}_{ar} c_{p_{ar}} (T_e - T_s) = -\dot{m}_{ar} c_{p_{ar}} (T_s - T_e) \quad (3.2.3.2)$$

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Saída de} \\ \textit{Energia do} \\ \textit{Sistema} \end{array} \right] = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ambiente}) \quad (3.2.3.3)$$

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Geração de} \\ \textit{Energia} \end{array} \right] = \frac{V^2}{R} \quad (3.2.3.4)$$

$$\left[\begin{array}{c} \textit{Acúmulo de} \\ \textit{Energia} \end{array} \right] = 0 \quad (3.2.3.5)$$

Onde \dot{m}_{ar} é a vazão mássica do ar, $c_{p_{ar}}$ é o calor específico do ar, T_e é a temperatura do ar na entrada do secador, T_s é a temperatura do ar na saída do aquecedor, h é o coeficiente global de transferência de calor, A_s é a área superficial da caixa do aquecedor, $T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente, V é a voltagem aplicada e R é o valor da resistência do aquecedor.

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 a ser usada na lei de resfriamento de Newton. Já a geração de energia é fornecida pelo calor proveniente pela resistência do aquecedor. Por fim, o acúmulo de energia do sistema é nulo, pois se considera o estado de regime permanente. Substituindo cada termo no balanço global de energia, obtém-se:

$$0 = -\dot{m}_{air} \cdot cp_{air} \cdot (Ts - Te) - h \cdot As \cdot (Ts - Tambient) + \frac{V^2}{R} \quad (3.2.3.6)$$

A equação (3.2.3.6) representa a equação do modelo. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma resultando no modelo proposto por Coutinho *et al.* (2004):

$$\frac{V^2}{R} = B(T_s - T_e) + C \cdot (T_s - Tambiente) \quad (3.2.3.7)$$

Onde B e C são os parâmetros do modelo a serem determinados dados por:

$$B = \dot{m}_{ar} \cdot cp_{ar} \quad e \quad C = h \cdot As \quad (3.2.3.8)$$

O valor da massa específica e calor específico do ar (estimados na temperatura média do sistema) pode ser obtido 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.

O valor do parâmetro C é calculado em 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 no momento em que se atingiu o regime permanente.

Para isso, utilizou-se o software Matlab[®] que por meio de programação relacionou-se os dados experimentais com a equação do modelo. Calculou-se o valor de V^2/R com os dados experimentais de voltagem e com dados experimentais das temperaturas, comparando assim os lados esquerdo e direito da equação (3.2.3.7). O lado direito da equação necessita de uma suposição inicial para o parâmetro C. Essa suposição foi tomada com o valor de 3 W/K, pois tem ordem de grandeza próxima ao parâmetro B. Além disso, criou-se uma função objetivo (3.2.3.9) que calcula o somatório da diferença dos quadrados entre os valores dos dois lados da equação (3.2.3.7). Por meio da função 'fminsearch' encontrou-se o melhor valor de C para minimizar a função objetivo (3.2.3.9), o que representa o melhor valor de C para que os dois lados da equação (3.2.3.7) tenham os mais próximos valores.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Função} \\ \text{Objetivo} \end{array} \right] = \sum \left(\frac{V^2}{R} - (B \cdot (T_s - T_e) + C \cdot (T_s - Tambient)) \right)^2 \quad (3.2.3.9)$$

Adicionado a isso, estimou-se o valor de h por meio do parâmetro C e comparou-o com valores da literatura. De acordo com Perry e Green (1998), o valor de h em trocadores de calor onde ar (corrente fria) e vapor (corrente quente) trocam calor por convecção natural está em torno de 6 a 17 W/(m².K). 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/(m².K). 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/(m².K). 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/(m².K).

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 para o estado de regime permanente.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Resultados e Validação do Modelo

O valor ajustado para o parâmetro C com a tentativa de minimização da função objetivo foi de 1,1 J/(s.K), o que resultou em um valor de 10 W/(m².K) para coeficiente convectivo de transferência de calor que esteve dentro da ordem de magnitude esperada. O valor de C também pode ser calculado substituindo os dados experimentais na equação (3.2.3.7), que ao ser rearranjada resulta em:

$$C = \frac{\frac{v^2}{R} - B(T_s - T_e)}{(T_s - T_{ambiente})} \quad (3.3.1.1)$$

Os valores calculados do parâmetro C por meio da equação (3.3.1.1) estão apresentados na tabela 3.3.1.1, cuja média esteve em torno do valor de 1,1 J/(s.K). Com este valor ajustado, pode-se estimar a temperatura do ar na saída do aquecedor e compará-la com os valores experimentais por meio do cálculo do desvio. Os desvios foram calculados conforme a equação (3.3.1.3) e a temperatura na saída do aquecedor rearranjando a equação (3.2.3.7).

$$T_s = \frac{\frac{v^2}{R} + B.T_e + C.T_{ambiente}}{B + C} \quad (3.3.1.2)$$

$$Desvio = \frac{|T_s - T_{exp}|}{T_{exp}} \cdot 100\% \quad (3.3.1.3)$$

Tabela 3.3.1.1 – Parâmetro Ajustado e Desvios

Experimento	Ts (°C)	T ambiente (°C)	C (J/(sK))	Ts Calculada (°C)	Desvio (%)
1	25	23,1	0,997	24,94	0,25
2	25	23,1	0,997	24,94	0,25
3	30	27,2	0,766	29,70	1,00
4	27	23,3	1,465	27,43	1,61
5	32	27,8	1,050	31,93	0,21
6	42	27,3	1,110	42,05	0,11
7	44	23,0	1,013	43,41	1,34
8	51	27,4	1,245	52,10	2,15
9	53	27,8	1,038	52,50	0,95
10	56	23,4	1,032	55,29	1,26
11	61	28,0	0,995	59,89	1,81
12	60	27,2	1,014	59,09	1,51
13	62	27,7	1,118	62,20	0,32
14	29	26,7	1,567	29,21	0,72
15	30	27,2	1,646	30,30	0,99
16	31	27,5	1,464	30,60	1,30
17	32	26,8	1,134	32,03	0,11
18	33	26,1	1,152	33,07	0,21
19	36	26,5	1,390	36,54	1,49
20	53	26,3	1,032	52,35	1,23
21	54	27,2	0,956	53,25	1,39
22	55	26,6	1,005	54,48	0,95
23	64	26,7	1,189	64,64	1,01
24	64	26,5	1,161	64,44	0,69
25	65	27,3	1,133	65,24	0,38
Média			1,147		0,93

Estes resultados indicam que o modelo pode ser usado para estimar a temperatura de saída no aquecedor com um desvio máximo de 2,2 % e um desvio médio próximo a 1,0 %. Para faixa de temperatura analisada nos experimentos, de 25 a 65 °C, estes valores de desvio estão dentro da precisão do termopar fornecida pelo fabricante que é de $\pm 2,2$ °C. A figura (3.3.1.1) mostra os valores da temperatura na saída do aquecedor calculada pelo modelo em função dos valores experimentais.

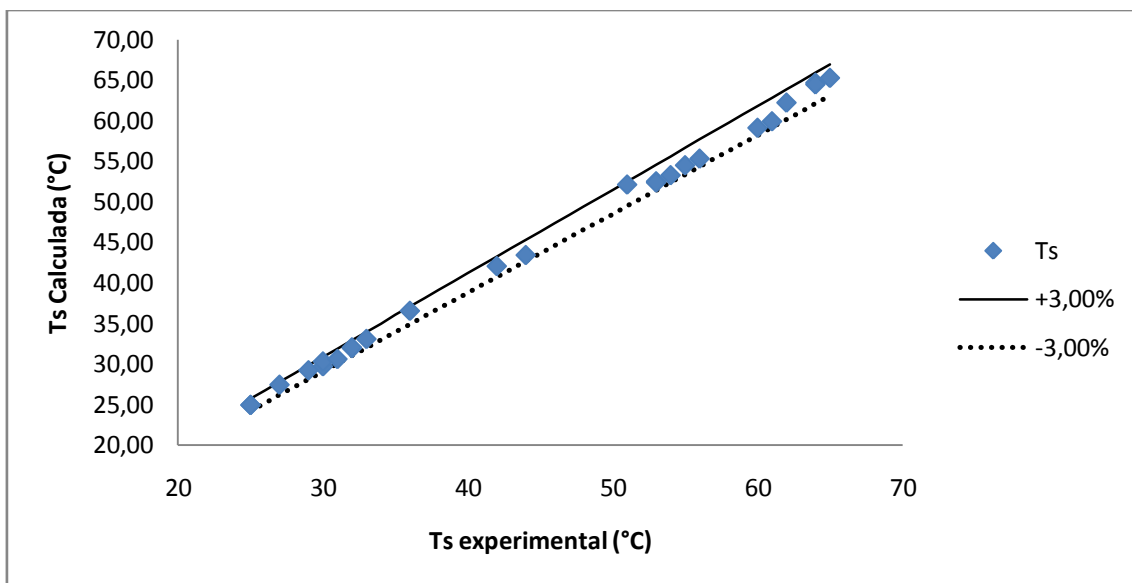


Figura 3.3.1.1 – Temperatura na Saída do aquecedor Experimental e Calculada pelo Modelo

3.4 Conclusão

Os resultados obtidos revelaram que o modelo representa adequadamente o comportamento do sistema operando em regime permanente 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 $1,1 \text{ J}/(\text{s}\cdot\text{K})$, resultando em um valor do coeficiente convectivo de transferência de calor em torno de $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, situando-se dentro da ordem de grandeza encontrada na literatura. O modelo validado representou a temperatura de saída no aquecedor com um desvio máximo de $2,2 \%$ estando dentro da precisão do termopar fornecida pelo fabricante.

4. CINÉTICA DE SECAGEM DA SOJA

4.1 Introdução e Objetivos

O processo de secagem de sólidos pode envolver várias etapas limitadas por diferentes efeitos. Assim, o estudo da cinética de secagem é de extrema importância, pois por meio deste é possível avaliar os efeitos limitantes e caracterizar as etapas do processo. 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_s/dt contra o tempo ou contra a umidade do sólido.

O primeiro período apresentado pelos autores é o período a velocidade constante, onde 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 pela contração.

Uma propriedade intrínseca ao processo de secagem de sólidos é o coeficiente global de transferência de massa, que pode ser obtido pela determinação da cinética de secagem. Mancini (1996) em ensaios de secagem em camada delgada e Coutinho *et al.* (2009) em secagem de soja em leito fixo validaram um modelo que relaciona o coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_s a$) como função da temperatura do gás e da umidade do sólido, como mostrado abaixo:

$$K_s a = \alpha \cdot Y_s - \beta \quad (4.1.1)$$

Onde,

$$\alpha = A1 + A2 \cdot T_g \quad (4.1.2)$$

$$\beta = B1 + B2 \cdot T_g \quad (4.1.3)$$

Em que T_g é dada em Kelvin e $K_s a$ em $\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})$. Os valores de A1, A2, B1 e B2 ajustados por Mancini (1996) e Coutinho (2009) estão apresentados na tabela que segue abaixo:

Tabela 4.1.1 – Parâmetros ajustados

	A1	A2	B1	B2
Coutinho	22,56	-0,0473	24,59	-0,07155
Mancini	6,427	-0,0156	1,632	-0,00447

Outros estudos apontam que o coeficiente global de transferência de massa pode depender da vazão do gás de secagem como mostrado por Silva *et al.* (2004) no estudo da secagem de sementes de agrião em leito fixo. Contudo, uma parte dos autores validou modelos de secagem de grãos em leito fixo com $K_s a$ como função apenas da temperatura do gás e da umidade do sólido ou em alguns casos também em função da umidade inicial do sólido. Estes estudos foram feitos na secagem de grão de bico por Elias *et al.* (2002), na secagem de feijão por Mancini *et al.* (2002, B) e na secagem de milho por Mancini *et al.* (2002, A). Além disso, Luz *et al.* (2006) na secagem de farelo de soja, como outros autores que estudaram a influência da vazão na secagem de grãos, mostraram que a velocidade do gás não interferiu no processo em camada delgada.

Neste contexto, o principal objetivo desse capítulo é propor e validar um modelo que estime o valor do coeficiente global de transferência de massa no processo de secagem em camada delgada como função da umidade da soja e da temperatura do gás para posteriormente aplicar este modelo na solução do modelo a duas fases na secagem de soja em leito fixo. Além disso, busca-se estudar a sensibilidade dos parâmetros do modelo ajustado e analisar as etapas do processo de secagem bem como os efeitos que limitam cada etapa.

4.2 Materiais e Métodos

4.2.1 Equipamentos

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 raio 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 (4.2.1.1) e o secador pelas figuras (4.2.1.2) e (4.2.1.3).

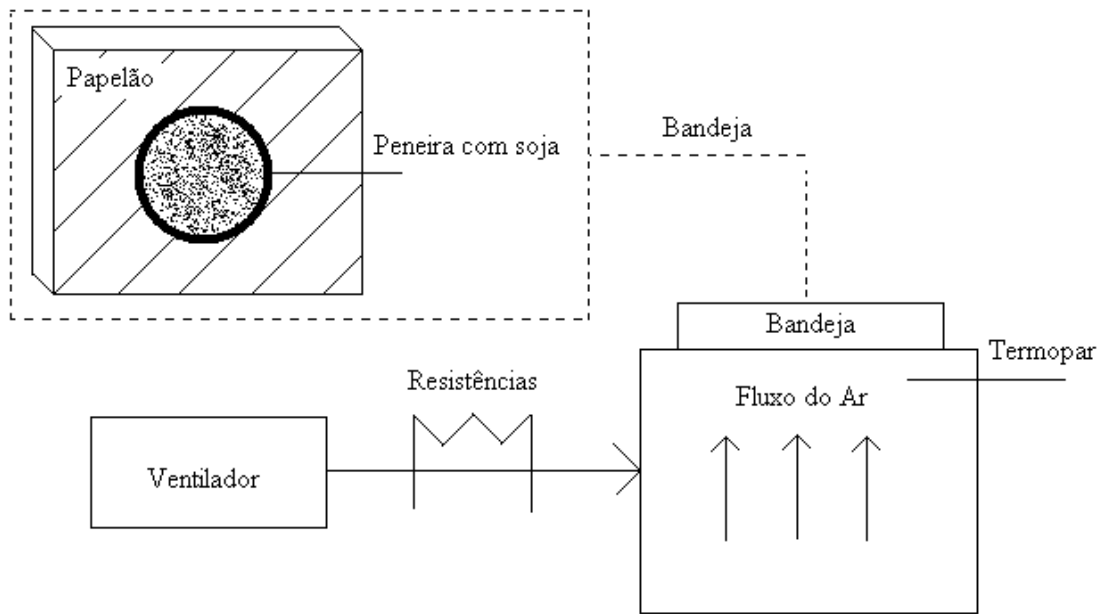


Figura 4.2.1.1 – Esquema do Secador de Bandeja

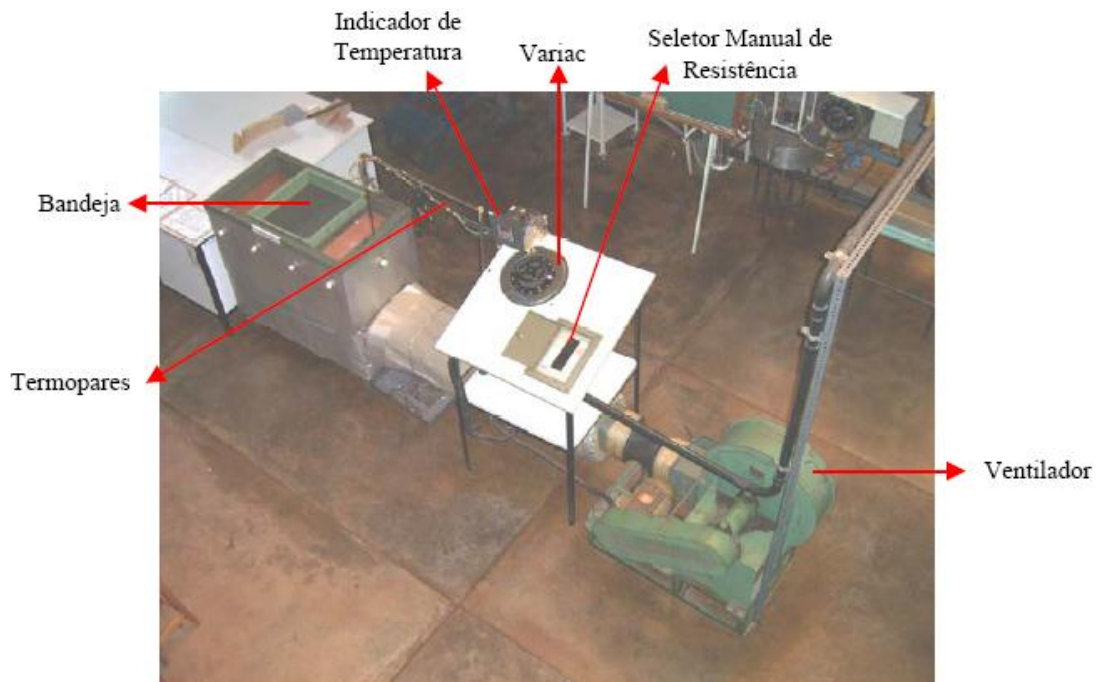


Figura 4.2.1.2 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 1 (Luz, 2006)

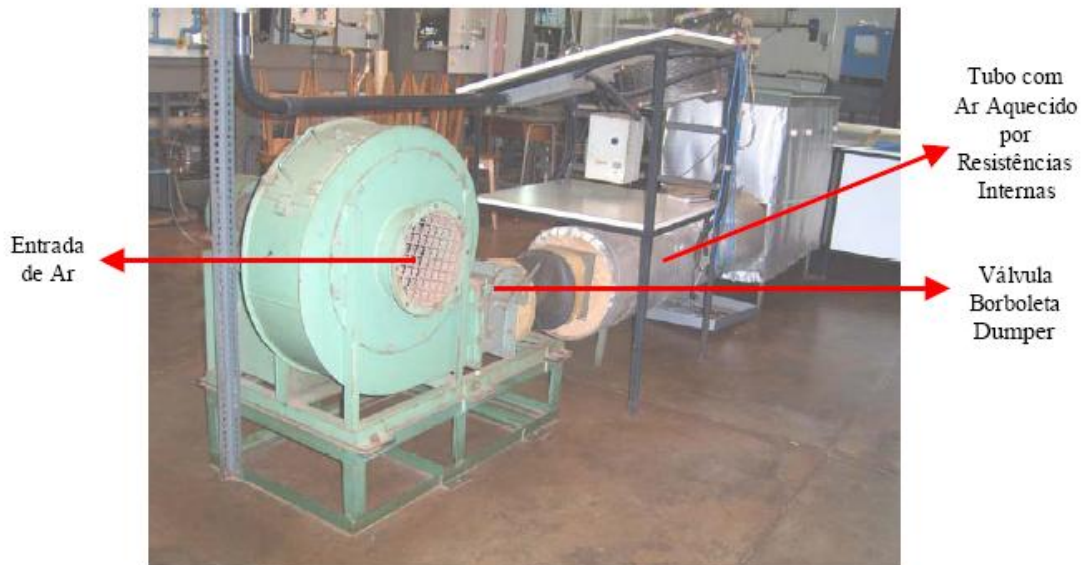


Figura 4.2.1.3 – Foto dos equipamentos sob perspectiva 2 (Luz, 2006)

4.2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu nos seguintes passos:

- 1) liga-se o ventilador e ajusta-se a velocidade do ar sobre a peneira em 0,6 m/s;
- 2) em seguida, liga-se as resistências de forma que a temperatura do ar sobre a peneira atinja 33 °C em estado permanente;
- 3) mede-se a massa da peneira até que se atinja um valor constante com o tempo;
- 4) mede-se com o psicrômetro a temperatura e umidade relativa tanto do ambiente quanto do ar aquecido;
- 5) pesa-se duas amostras de soja que são levadas em estufa a 105 °C por 24 horas;
- 6) cobre-se a superfície da peneira com uma fina camada de soja e mede-se a massa do sistema peneira mais soja;
- 7) coloca-se a peneira com soja sobre a bandeja e o papelão e aciona-se o cronômetro, dando início a secagem da mesma;
- 8) a massa de soja mais a peneira é medida com o tempo durante 4 horas;
- 9) após a secagem, pesa-se duas amostras de soja seca e leva-se essas amostras a estufa a 105 °C por 24 horas;

10) após o tempo de estufa, retiram-se todas as amostras de soja da estufa transferindo-as a um dissecador para resfriarem até a temperatura ambiente e medem-se suas massas em seguida.

Os procedimentos dos itens de 1 a 10 são repetidos mudando as condições experimentais como mostradas na tabela 4.2.2.1.

Tabela 4.2.2.1 – Condições dos Experimentos

Experimento	Tg (°C)	v (m/s)	Tempo de secagem (h)
1	33	0,6	4
2	40	0,6	4
3	50	0,6	2
4	50	0,6	2
5	50	1,2	2
6	50	1,8	2
7	61	0,6	2
8	61	0,6	2
9	70	0,6	3

4.2.3 Modelo Matemático

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:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Entrada de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Massa} \\ \text{do sistema} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Geração de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} \quad (4.2.3.1)$$

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:

$$\begin{bmatrix} \text{Acúmulo de} \\ \text{Massa} \\ \text{no sistema} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \text{Saída de} \\ \text{Massa} \\ \text{do sistema} \end{bmatrix} \quad (4.2.3.2)$$

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 vezes a área superficial do grão como representado abaixo:

$$\frac{dm_{\text{água}}}{dt} = -N_{\text{água}} \cdot A_{S_{\text{grão}}} \quad (4.2.3.3)$$

Onde $N_{\text{água}}$ é o fluxo mássico de água que sai do sistema dado por:

$$N_{\text{água}} = k_s \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.2.3.4)$$

Em que k_s é o coeficiente global de transferência de massa, cuja unidade é dada em $[M.L^{-2}T^{-1}]$. Substituindo a equação (4.2.3.4) na equação (4.2.3.3), obtém-se:

$$\frac{dm_{\text{água}}}{dt} = -k_s \cdot A_{S_{\text{grão}}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.2.3.5)$$

Sabe-se que

$$m_{\text{água}} = Y_s \cdot m_{ss} \quad (4.2.3.6)$$

Substituindo a equação (4.2.3.6) na equação (4.2.3.5), obtém-se:

$$\frac{d(Y_s \cdot m_{ss})}{dt} = -k_s \cdot A_{S_{\text{grão}}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.2.3.7)$$

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

$$\frac{dY_s}{dt} = -\frac{k_s \cdot A_{S_{\text{grão}}}}{m_{ss}} \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.2.3.8)$$

A área superficial do grão é difícil de se medir. Assim, assume-se a seguinte variável K :

$$K = \frac{k_s \cdot A_{S_{\text{grão}}}}{m_{ss}} = [T^{-1}] \quad (4.2.3.9)$$

Assim, a equação do modelo será dada por:

$$\frac{dY_s}{dt} = -K \cdot (Y_s - Y_{se}) \quad (4.2.3.10)$$

Essa equação é análoga a equação da variação da umidade do sólido com o tempo para o modelo a duas fases no processo de secagem de grãos em leito fixo:

$$\frac{dY_s}{dt} = -\frac{k_{sa} \cdot (Y_s - Y_{se})}{(1-\varepsilon) \cdot \rho_{ss}} \quad (4.2.3.11)$$

A relação entre K e o coeficiente volumétrico de transferência de massa é dada por:

$$K = \frac{k_{sa}}{\rho_{ss}} \quad (4.2.3.12)$$

A equação do modelo (4.2.3.10) pode ser resolvida analiticamente uma vez que se conhece K como função de Y_s em dada temperatura. Caso o valor de K seja constante com a umidade da soja para dada temperatura, pode-se integrar a equação do modelo da seguinte forma:

$$\int_{Y_{so}}^{Y_s} \frac{dY_s}{(Y_s - Y_{se})} = -K \cdot \int_0^t dt \quad (4.2.3.13)$$

Cuja solução resulta em:

$$\ln \left(\frac{Y_s - Y_{se}}{Y_{so} - Y_{se}} \right) = -K \cdot t \quad (4.2.3.14)$$

Caso K seja uma função de Y_s para dada temperatura, a equação do modelo pode ser integrada da seguinte forma:

$$\int_{Y_{so}}^{Y_s} \frac{dY_s}{(Y_s - Y_{se}) \cdot f(Y_s)} = - \int_0^t dt \quad (4.2.3.15)$$

Dependendo do tipo de equação de $f(Y_s)$, integrar analiticamente a equação (4.2.3.15) pode ser muito difícil. Para resolver este problema, pode-se usar um método numérico de diferenças finitas abordado na revisão bibliográfica. Aplicando o método das diferenças finitas para frente na equação do modelo (4.2.3.10), obtém-se:

$$K = \frac{Y_{s_{i+1}} - Y_{s_i}}{\Delta t} \cdot \left(- \frac{1}{(Y_{s_i} - Y_{se})} \right) \quad (4.2.3.16)$$

Com os dados experimentais da umidade da soja com o tempo pode-se calcular o valor de K para cada ponto experimental e pode-se propor e validar uma equação para K em função de Y_s e da temperatura como será abordado nos próximos itens.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Resultados

As propriedades de umidade da soja inicial (em base seca), umidade relativa do ar de secagem e massa inicial da soja na peneira obtidas experimentalmente estão apresentadas na tabela (4.3.1.1). A umidade de equilíbrio da soja foi calculada pela equação de Silva (2008) apresentada no capítulo 5.

Tabela 4.3.1.1 – Propriedades obtidas experimentalmente na cinética de secagem

Experimento	Y_s inicial	UR (%)	Y_{se}	Massa soja inicial (g)
1	0,165	35,6	0,0830	89,36
2	0,168	24,5	0,0610	107,31
3	0,154	13,5	0,0386	118,25
4	0,179	13,5	0,0386	116,58
5	0,155	17,2	0,0459	115,96
6	0,163	17,0	0,0455	108,18
7	0,164	07,6	0,0253	113,44
8	0,170	06,5	0,0228	108,56
9	0,149	00,1	0,0014	102,79

Os valores de K calculados pela equação (4.2.3.16) com os dados experimentais estão apresentados no gráfico da figura (4.3.1.1)

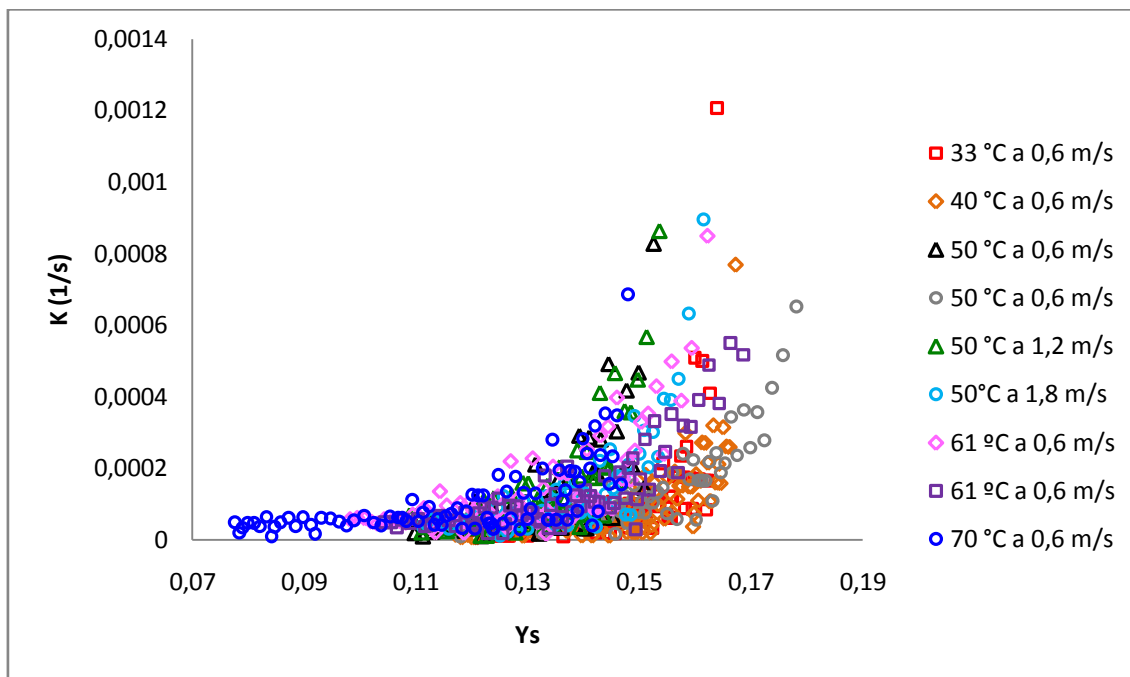


Figura 4.3.1.1 – Gráfico de K pela Y_s obtido pela solução numérica do modelo

Dos resultados obtidos observa-se a ausência do período de velocidade constante no início da secagem na faixa de umidade estudada. Isso pode indicar que deve ocorrer a insaturação na superfície da soja logo nos primeiros minutos de secagem. Assim, os efeitos provenientes da transferência de calor não serão dominantes, uma vez que o movimento da umidade dentro do sólido não deve ocorrer o rápido suficiente para saturar a superfície.

Contudo, há indícios dos dois períodos descritos por Perry e Green (1998): a zona de secagem das regiões insaturadas e a zona em que o movimento interno da umidade é controlante. A passagem de uma zona a outra é observada com a mudança da inclinação da curva de secagem, que no início (umidades mais altas) é mais acentuada. Vale ressaltar que essa passagem não é facilmente detectada em um ponto específico, visto o comportamento da curva. Entretanto, o período de secagem das regiões insaturadas ocorre apenas nos primeiros minutos da secagem como mostra o gráfico da figura (4.3.1.2)

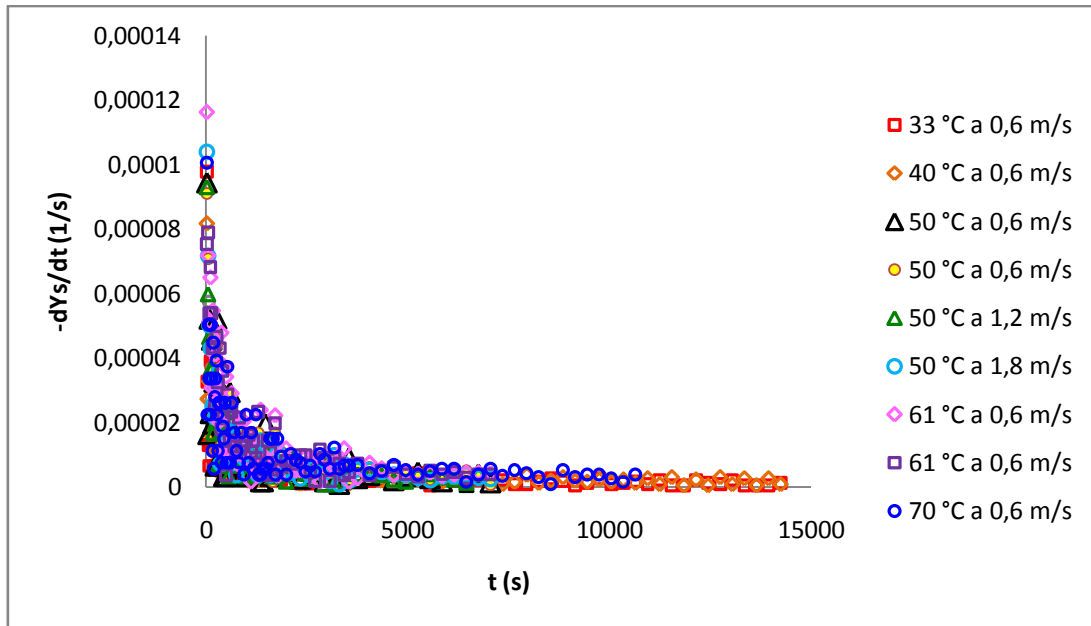


Figura 4.3.1.2 – Gráfico da velocidade de secagem pelo tempo

Estes resultados indicam que os efeitos de transferência de massa inerentes ao movimento interno da umidade da soja é o que controla a cinética de secagem na faixa de umidade estudada. Além disso, observa-se pelas figuras (4.3.1.3) e (4.3.1.4) que a zona de secagem das regiões insaturadas parece não depender da umidade do sólido, mas sim de fatores externos, ou seja, talvez essa zona esteja mais relacionada com o transporte de calor para evaporar a quantidade de água que está adsorvida na superfície da soja e após os primeiros minutos de secagem, quando toda água adsorvida é transferida para fase gasosa e toda superfície fica insaturada, vem a predominar os efeitos internos de transferência de massa.

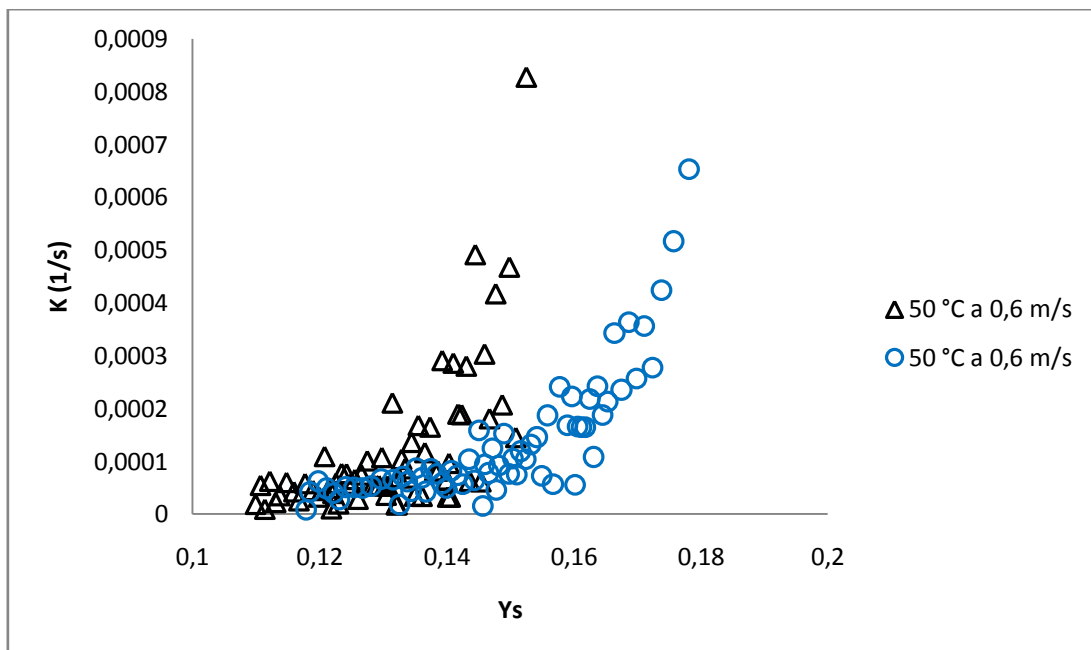


Figura 4.3.1.3 – Gráfico de K pela Ys a 50 °C

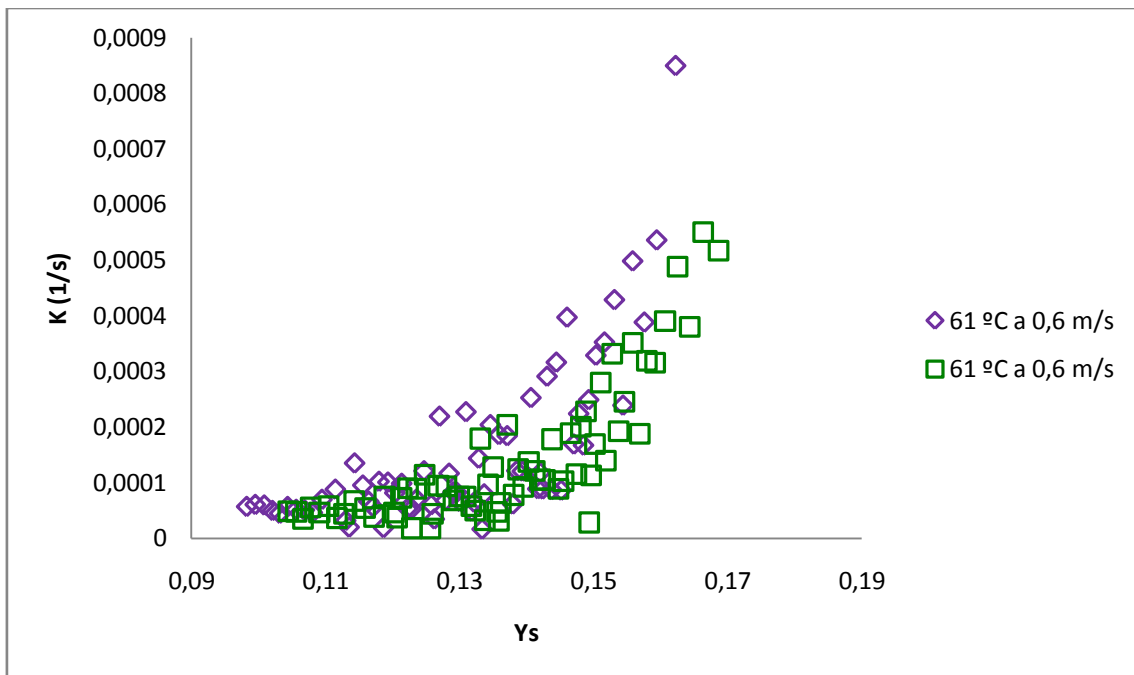


Figura 4.3.1.4 – Gráfico de K pela Ys a 61 °C

Além disso, observou-se que a vazão do ar não interferiu significativamente no valor de K como observado no gráfico da figura (4.3.1.5). Contudo há indícios de que o valor de K depende da temperatura como observado na figura (4.3.1.6), mesmo que os efeitos de transporte de massa sejam os que mais influenciem na velocidade de secagem como visto anteriormente. Isso é observado, pois o valor de K tende a aumentar levemente com o aumento da temperatura.

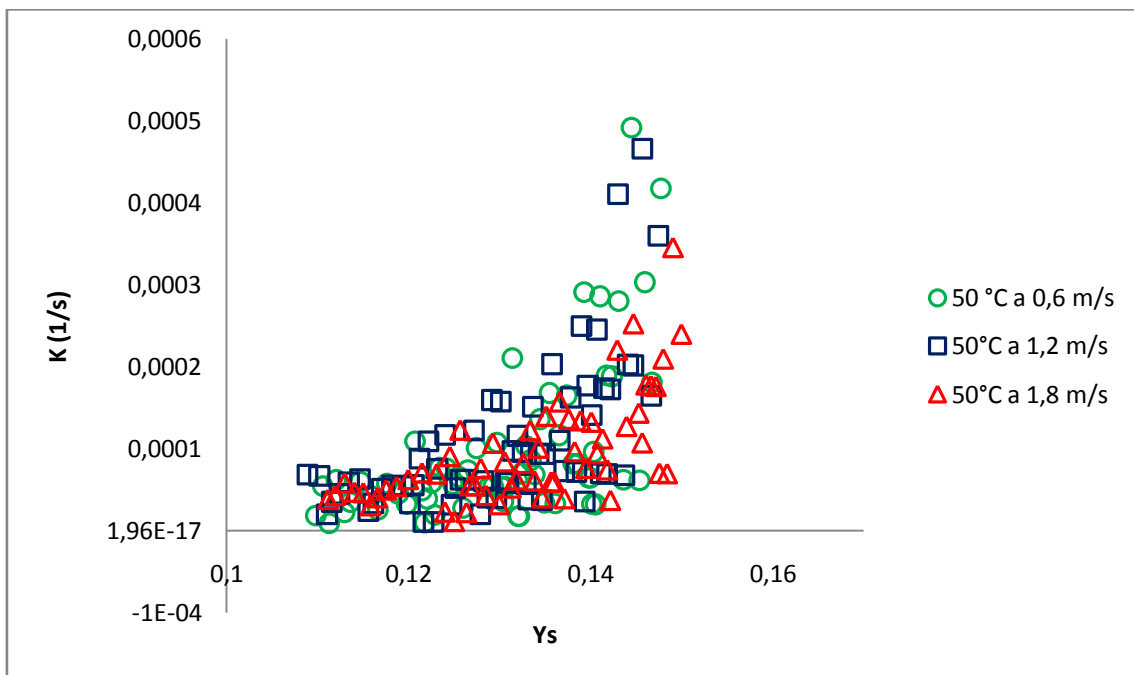


Figura 4.3.1.5 – Gráfico K pela Ys para diferentes velocidades do ar de secagem

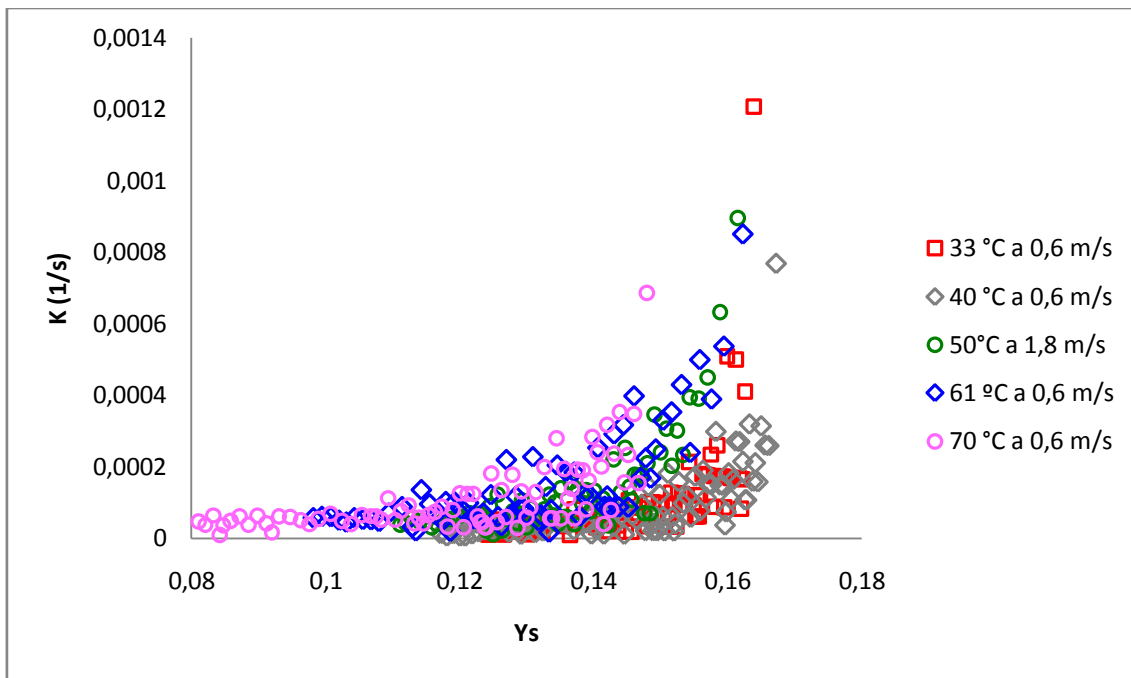


Figura 4.3.1.6 – Gráfico K pela Ys para diferentes temperaturas do ar de secagem

4.3.2 Validação do Modelo

Dos resultados obtidos, observou-se que K não é constante durante o processo de secagem, mas sim mostrou ser uma função da temperatura e da umidade do sólido. Para uma dada temperatura, observou-se que K tende a ser uma função de Ys do tipo exponencial. Partindo dessa percepção, primeiramente adotou-se a seguinte expressão:

$$K = a1 + a2 \cdot e^{a3 \cdot Ys} \quad (4.3.2.1)$$

Substituindo a equação (4.3.2.1) na equação do modelo (4.2.3.10), obtém-se:

$$\frac{dYs}{dt} = -(a1 + a2 \cdot e^{a3 \cdot Ys}) \cdot (Ys - Yse) \quad (4.3.2.2)$$

O valor da umidade de equilíbrio da soja (Yse) pode ser determinado pela equação (5.3.2.10) referente a literatura apresentada por Silva *et al.* (2008). A equação (4.3.2.2) pode ser resolvida numericamente por meio do software Matlab® com a rotina “ode45”, uma vez que se assumem valores para os parâmetros a1, a2 e a3. Para validar esses parâmetros em relação aos dados experimentais, criou-se a seguinte função objetivo com a finalidade de encontrar o menor valor dessa função por meio da rotina “fminsearch”:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Função} \\ \text{Objetivo} \end{array} \right) = \sum (Yscal - Ysexp)^2 \quad (4.3.2.3)$$

Onde Y_{exp} são os valores da umidade da soja experimentais e Y_{scal} os valores calculados por meio do modelo. O programa vai ajustar os parâmetros do modelo conforme os valores assumidos inicialmente para os parâmetros. Assim, para manter um padrão de ordem de magnitude de cada parâmetro, resolveu-se fixar o valor de a_2 em $2,5 \cdot 10^{-9}$ e os chutes iniciais de a_1 e a_3 foram tomados respectivamente como 1×10^{-5} e 70. Esses valores foram tomados em virtude da tendência dos parâmetros ajustados que o programa apresentou. A tabela (4.3.2.1) apresenta o valor dos parâmetros ajustados para cinco experimentos em diferentes temperaturas:

Tabela 4.3.2.1 – Parâmetros ajustados para função exponencial

Experimento	a_1	a_3	T (°C)
1	$4,906 \cdot 10^{-6}$	69,98	33
2	$1,316 \cdot 10^{-5}$	68,40	40
6	$2,524 \cdot 10^{-5}$	75,50	50
7	$4,844 \cdot 10^{-5}$	76,41	61
9	$4,465 \cdot 10^{-5}$	78,12	70

Os experimentos selecionados na tabela 4.3.2.1 foram aqueles que resultaram em parâmetros que melhor apontam variação linear com a temperatura como mostram os gráficos das figuras que seguem abaixo:

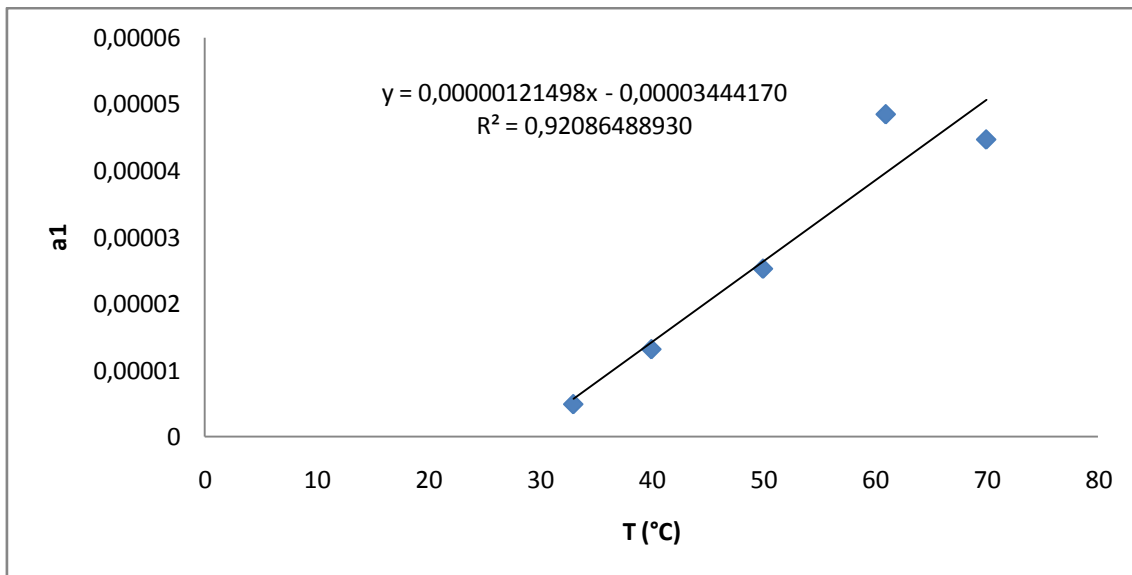


Figura 4.3.2.1 – Parâmetro a_1 em função da temperatura

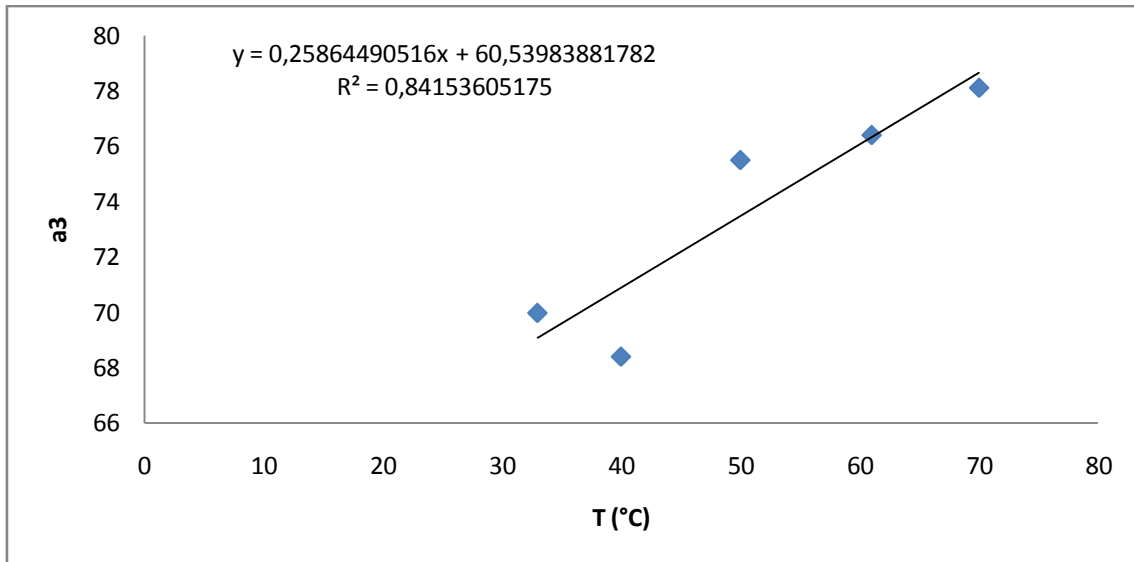


Figura 4.3.2.2 – Parâmetro a_3 em função da temperatura

Assim, o modelo ajustado que relaciona K como função de Y_s e da temperatura, que neste capítulo será chamado de modelo exponencial, é dado por:

$$K = (1,21 \cdot 10^{-6} \cdot Tg - 3,44 \cdot 10^{-5}) + 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot e^{(0,259 \cdot Tg + 60,5) \cdot Y_s} \quad (4.3.2.4)$$

Em que K é dada em s^{-1} e Tg é em $^{\circ}C$. Esta equação é válida apenas para a faixa de umidade da soja trabalhada que foi em torno de 0,10 a 0,17 em base seca.

As figuras a seguir comparam os valores de K calculados pelo modelo exponencial ajustado pela equação (4.3.2.4) com os valores calculados pelos modelos obtidos por Mancini (1996) em ensaios de secagem em camada delgada e por Coutinho *et al.* (2009) em secagem de soja em leito fixo. Vale ressaltar que os valores K_s da literatura foram divididos pela massa específica da soja seca para se obter K como mostrado pela equação (4.2.3.12). Além disso, a massa específica da soja seca foi tomada constante durante a secagem com o valor de 1130 kg/m^3 . A obtenção deste valor será explicada no capítulo 5.

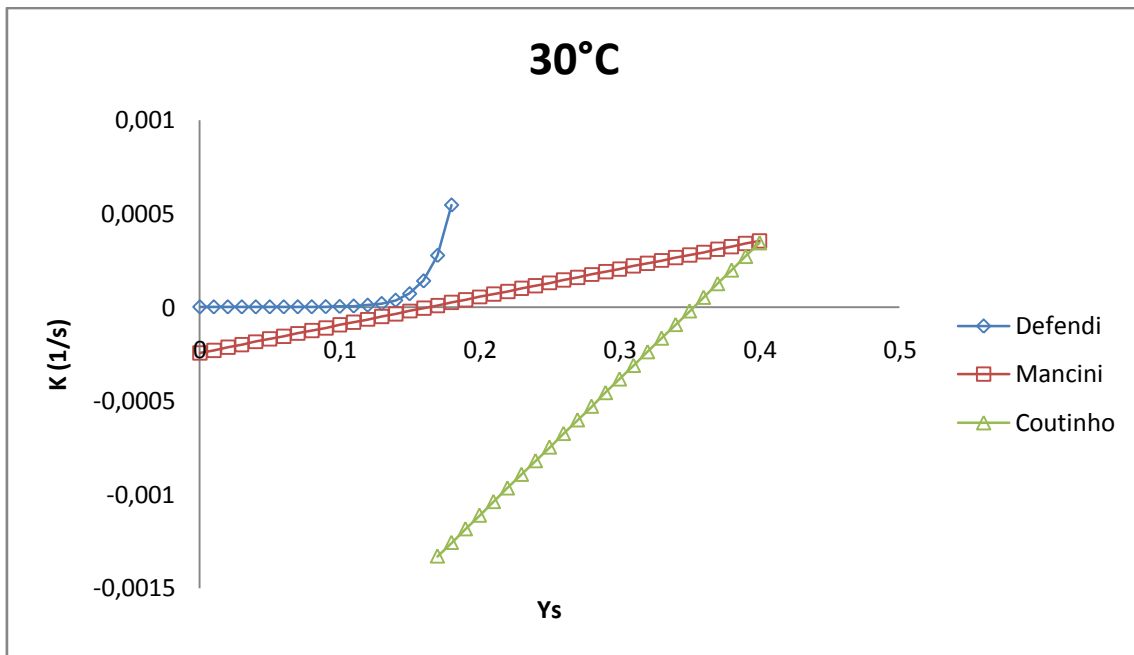


Figura 4.3.2.3 – Gráfico de K em função de Ys a 30 °C

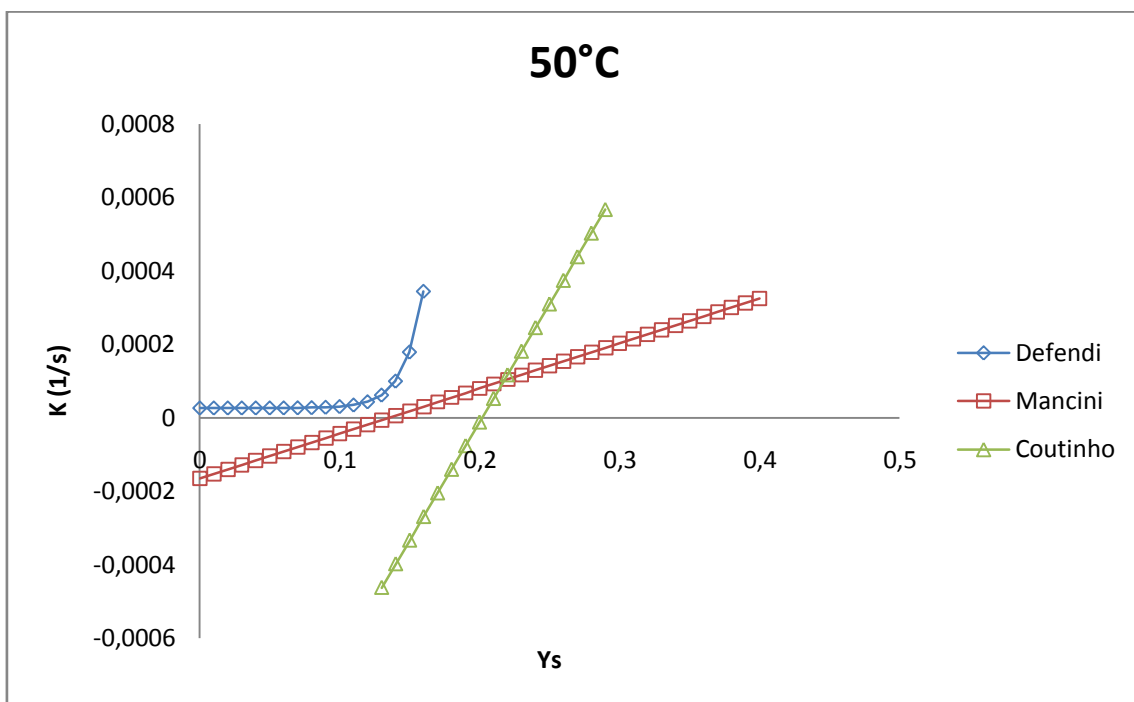


Figura 4.3.2.4 – Gráfico de K em função de Ys a 50 °C

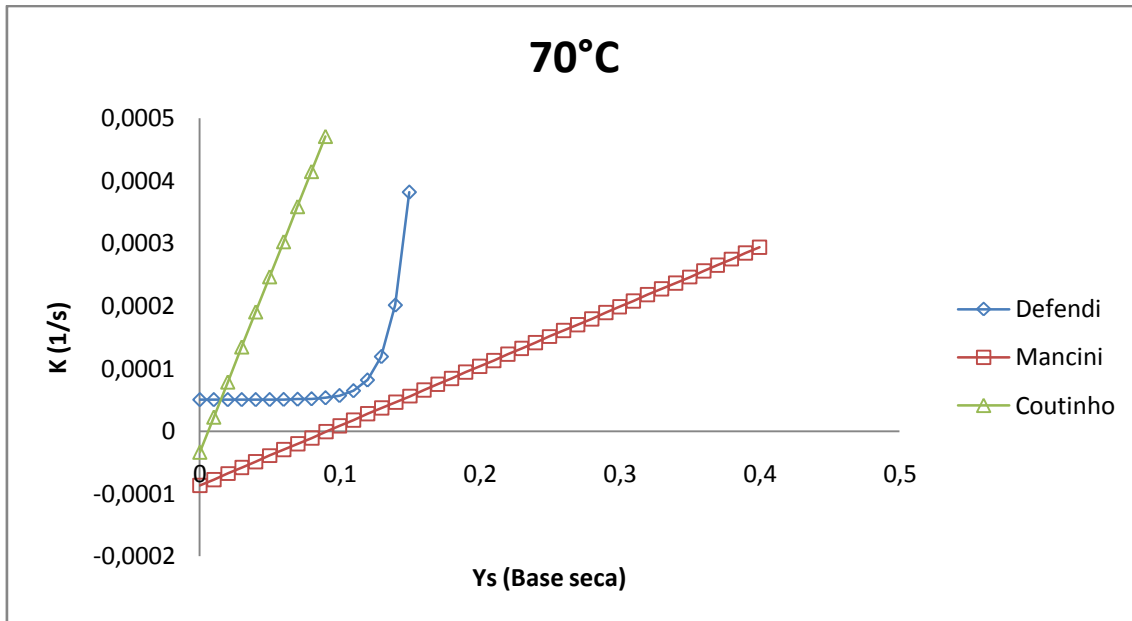


Figura 4.3.2.5 – Gráfico de K em função de Ys a 70 °C

Pelos gráficos obtidos, observa-se que o modelo ajustado neste capítulo não será ideal para umidades maiores que as estudadas experimentalmente, pois o valor de K tende a valores muito altos. Além disso, observou-se que os modelos da literatura também não representam o valor de K para baixas umidades, uma vez que tende a resultados de valores negativos. Contudo, há indícios de que as curvas do modelo exponencial ajustado (equação 4.3.2.4) e do modelo de Mancini (1996) sejam continuação uma da outra a partir do ponto em que elas quase se cruzam. Partindo dessa idéia, buscou-se ajustar uma curva que combine os resultados deste capítulo com os de Mancini. As figuras a seguir mostram o ajuste feito baseando-se numa equação de segundo grau (4.3.2.5) ajustada pelo software Excel®. A tabela (4.3.2.2) apresenta a influência da temperatura nos parâmetros do novo modelo ajustado, que neste capítulo será chamado de modelo híbrido.

$$K = b1.Ys^2 + b2.Ys + b3 \quad (4.3.2.5)$$

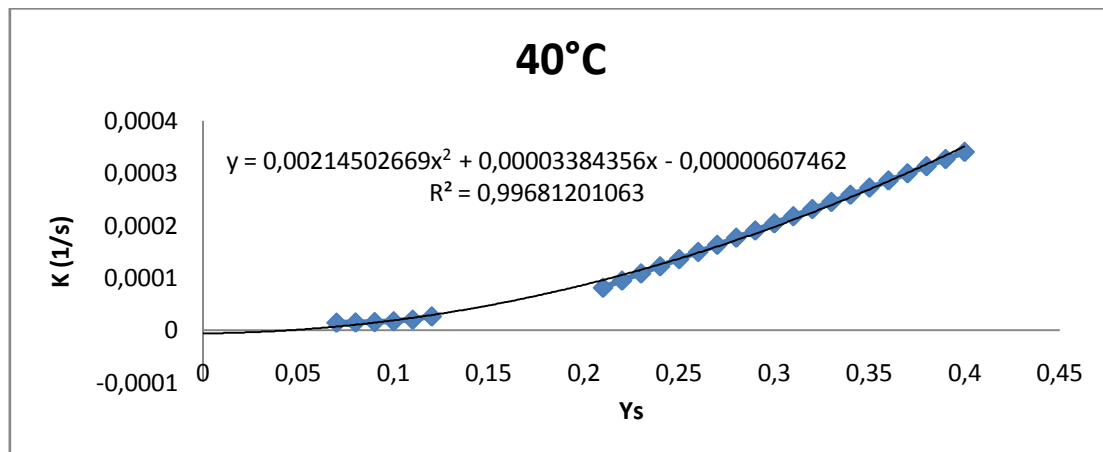


Figura 4.3.2.6 – Gráfico de K em função de Ys a 40 °C

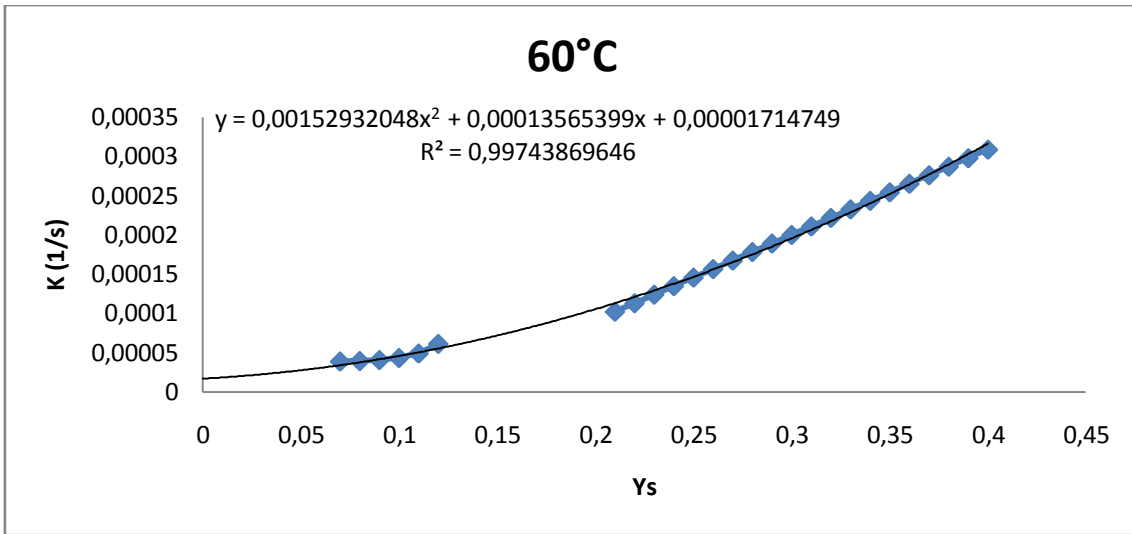


Figura 4.3.2.7 – Gráfico de K em função de Ys a 60 °C

Tabela 4.3.2.2 – Influência da Temperatura sobre os parâmetros

T (°C)	b1	b2	b3
30	$2,371 \cdot 10^{-3}$	$1,740 \cdot 10^{-5}$	$-1,953 \cdot 10^{-5}$
40	$2,145 \cdot 10^{-3}$	$3,384 \cdot 10^{-5}$	$-6,075 \cdot 10^{-6}$
50	$1,836 \cdot 10^{-3}$	$8,619 \cdot 10^{-5}$	$5,235 \cdot 10^{-6}$
60	$1,529 \cdot 10^{-3}$	$1,357 \cdot 10^{-5}$	$1,715 \cdot 10^{-5}$
70	$1,277 \cdot 10^{-3}$	$1,605 \cdot 10^{-5}$	$3,097 \cdot 10^{-5}$

Destes resultados, observa-se que os parâmetros variam linearmente com a temperatura como é observado no gráfico da figura (4.3.2.8), (4.3.2.9) e (4.3.2.10).

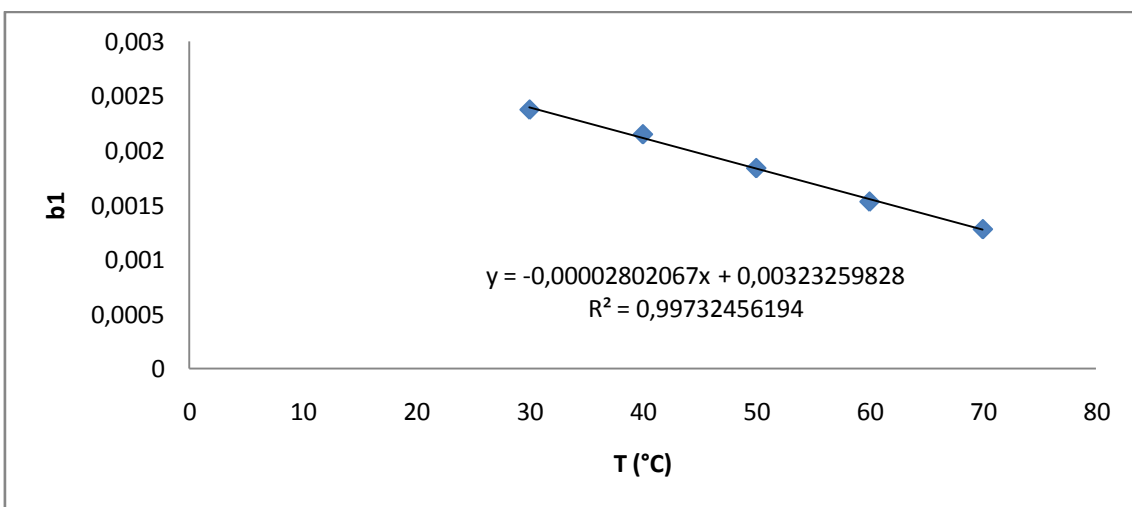


Figura 4.3.2.8 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b1

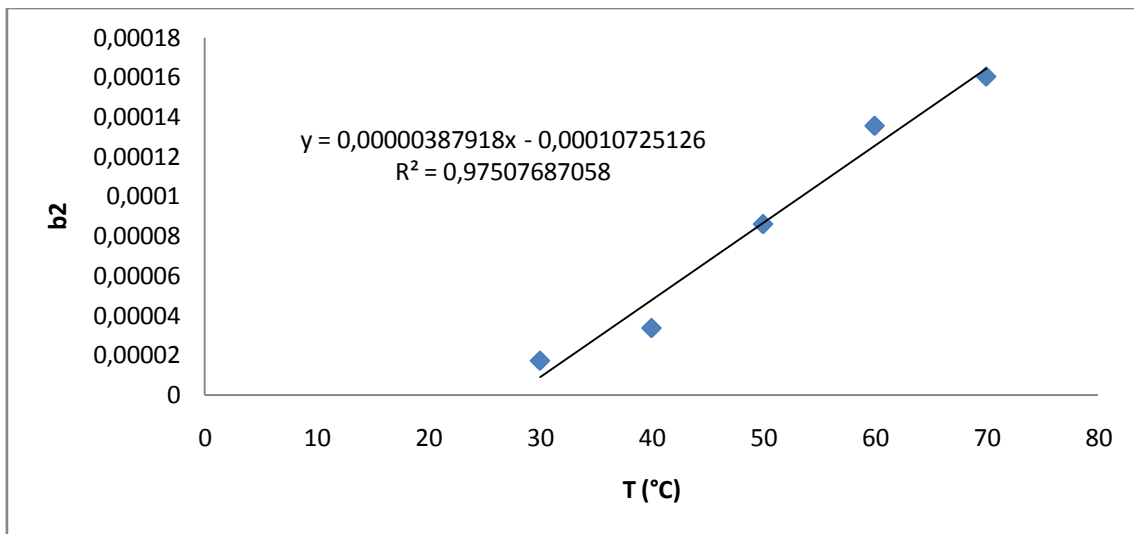


Figura 4.3.2.9 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b2

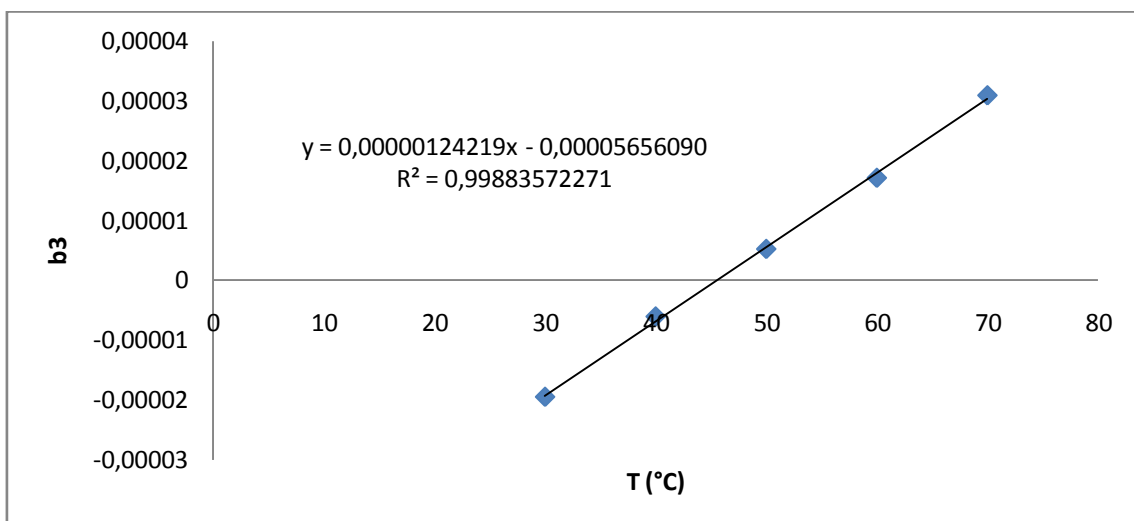


Figura 4.3.2.10 – Influência da Temperatura sobre o parâmetro b3

Assim, a equação ajustada do modelo híbrido considerando os resultados obtidos neste capítulo e os de Mancini (1996) será:

$$K = b1.Y_s^2 + b2.Y_s + b3 \quad (4.3.2.5)$$

$$b1 = -2,8021.10^{-5}.Tg + 3,2326.10^{-3} \quad (4.3.2.5.a)$$

$$b2 = 3,8792.10^{-6}.Tg - 1,0725.10^{-4} \quad (4.3.2.5.b)$$

$$b3 = 1,2422.10^{-6}.Tg - 5,6561.10^{-5} \quad (4.3.2.5.c)$$

Em que T_g é dada em °C e K em s^{-1} .

4.3.3 Simulação do Sistema

Para simular a secagem de soja em camada delgada em base no modelo da equação (4.2.3.10), estudaram-se 3 casos distintos:

Caso 1: Simulou-se a secagem por meio da equação do modelo híbrido ajustado (4.3.2.5) nas mesmas condições que os experimentos realizados.

Caso 2: Simulou-se a secagem por meio da equação do modelo híbrido ajustado (4.3.2.5) nas mesmas condições que os experimentos realizados, mas excluindo os primeiros minutos de secagem referentes a etapa em que o transporte de massa não limita o processo.

Caso 3: Simulou-se a secagem por meio da equação do modelo exponencial ajustado (4.3.2.4) nas mesmas condições que os experimentos realizados.

Para cada caso, calcularam-se os desvios entre a umidade da soja experimental e a umidade calculada pelo modelo por meio da seguinte equação:

$$(Desvio) = \sum \frac{|y_{scal} - y_{sexp}|}{y_{sexp}} \cdot \frac{100\%}{N} \quad (4.3.3.1)$$

Onde N é número de pontos avaliados. Os valores dos desvios encontrados estão apresentados na tabela 4.3.3.1.

Tabela 4.3.3.1 – Desvios calculados nas simulações dos modelos

Experimento	Desvio (%)		
	Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	5,99	2,31	0,89
2	4,98	0,66	2,31
3	8,44	1,98	2,74
4	10,1	1,79	4,80
5	9,91	2,64	3,88
6	10,7	2,92	1,97
7	13,1	2,90	1,10
8	10,9	2,05	3,21
9	5,54	1,49	1,68

As figuras a seguir representam o perfil de umidade da soja com o tempo para os experimentos 3 e 4:

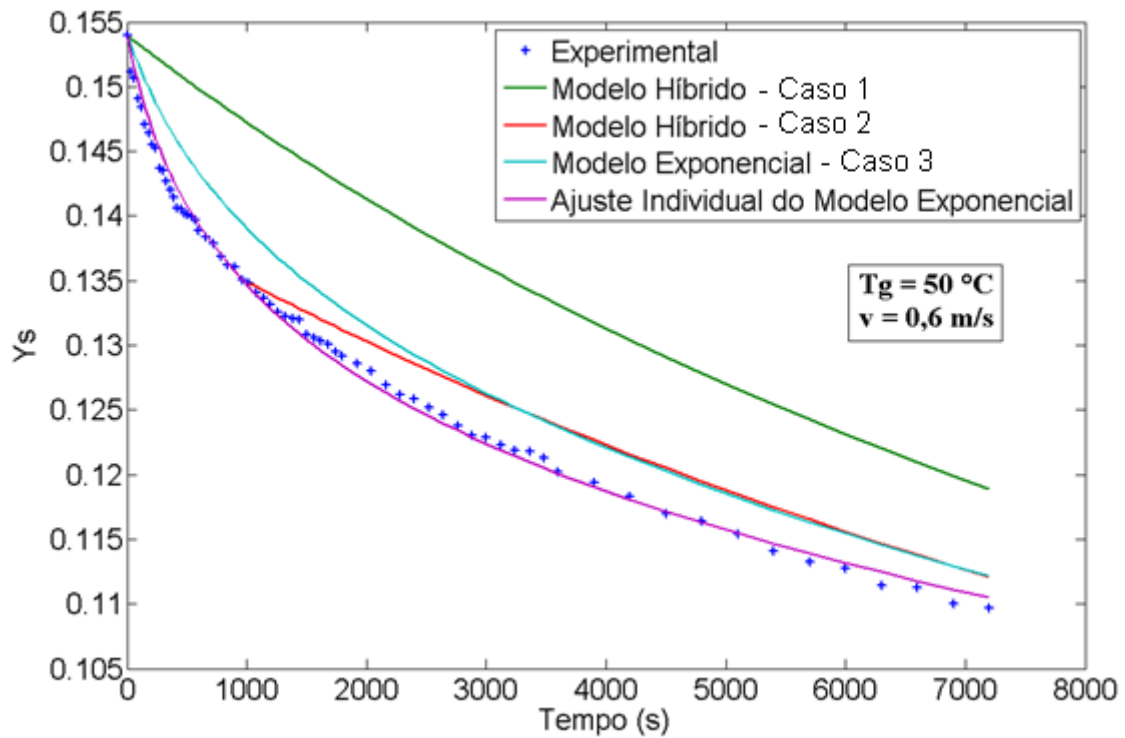


Figura 4.3.3.1 – Simulação do Experimento 3

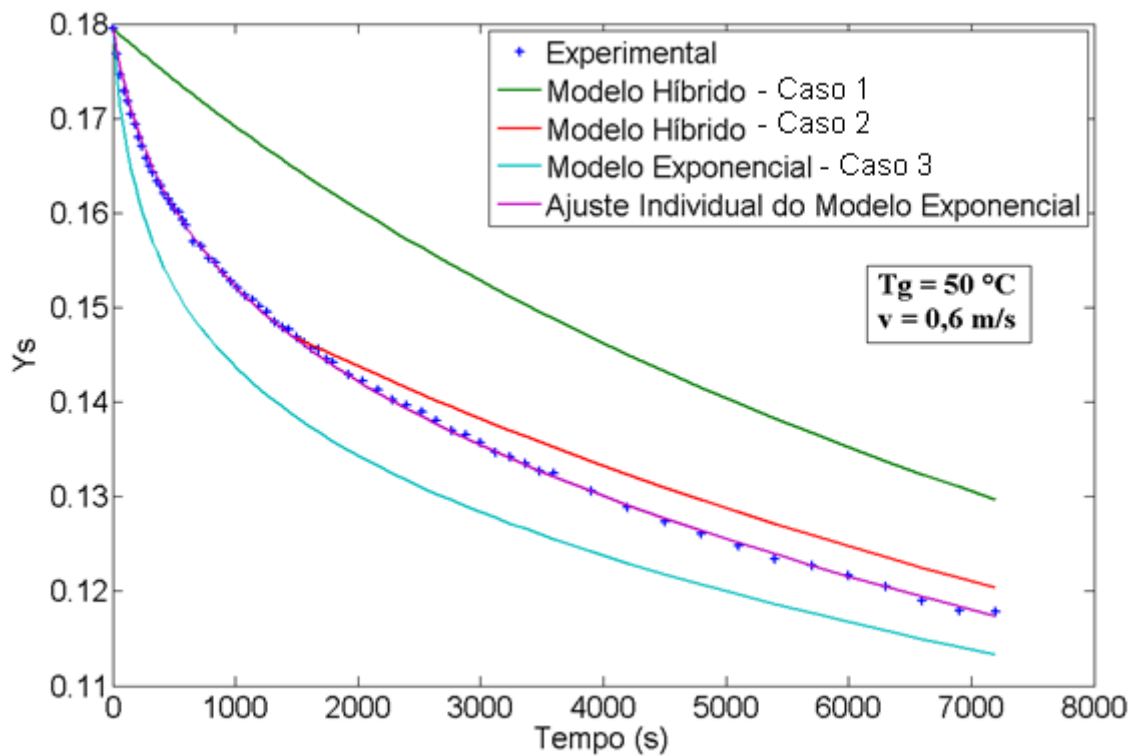


Figura 4.3.3.2 – Simulação do Experimento 4

Onde o ajuste individual é o ajuste dos parâmetros do modelo exponencial individualmente para cada experimento por meio da minimização da função objetivo (4.3.2.3)

Dos resultados obtidos, observa-se que o modelo híbrido da equação (4.3.2.5) aplicado no caso 2 foi o modelo que obteve os menores desvios. Mas este mesmo modelo ao simular todas as etapas da secagem (caso 1) foi o que apresentou os maiores desvios. Isso pode ser explicado pelo fato da equação do modelo ter sido ajustada para o caso em que o transporte interno de massa controla o processo a baixas umidades e para os resultados obtidos por Mancini a umidades superiores a 0,2. Assim, este modelo não contempla o início da secagem em que provavelmente uma quantidade de água adsorvida na superfície da soja seja influenciada mais por efeitos externos do que internos.

Por outro lado, o modelo exponencial ajustado representado pela equação (4.3.2.4), apesar de ter apresentado melhor o perfil de umidade da soja em todas as etapas da secagem, não poderá ser usado para simular casos em que a umidade inicial é maior que 0,17, pois K tende a valores muito superiores ao que é esperado pela literatura. Outro fato que deve ser levado em consideração é que as umidades iniciais da soja em todos os experimentos foram próximas em valor. Caso a etapa de evaporação da água adsorvida na superfície da soja seja mais dependente de fatores externos do que do perfil de concentração de água na soja, o modelo não irá contemplar adequadamente essa etapa da secagem para umidades iniciais diferentes das avaliadas. Esta idéia pode ser sustentada pelos 4 experimentos realizados a 50 °C com diferentes umidades iniciais e diferentes comportamentos de K como função de Y_s para os minutos iniciais da secagem (ver figura 4.3.1.3).

4.3.4 Sensibilidade dos parâmetros ajustados

A equação do modelo híbrido ajustado possui 6 parâmetros, dois parâmetros a mais que as equações da literatura. Isto se deve ao fato de que as equações da literatura assumem o coeficiente de transferência de massa como uma função linear da umidade do sólido. Enquanto isso, neste trabalho assumiu-se K como função quadrática de Y_s , pois se buscou representar a mudança da inclinação da curva da cinética de secagem inerente as etapas da secagem e estender a faixa de validade dessa equação em base na literatura.

Os parâmetros do modelo podem ser representados por:

$$b_1 = c_1.Tg + c_2 \quad (4.3.4.1.a)$$

$$b_2 = c_3.Tg + c_4 \quad (4.3.4.1.b)$$

$$b_3 = c_5.Tg + c_6 \quad (4.3.4.1.c)$$

A análise da sensibilidade desses parâmetros pode ser avaliada alterando o valor de cada parâmetro a fim de se observar as mudanças que ocorrem no perfil de umidade do sólido em cada simulação. Para isso, foram simulados os experimentos realizados a 40 e 70 °C aumentando e diminuindo os parâmetros em 30 %.

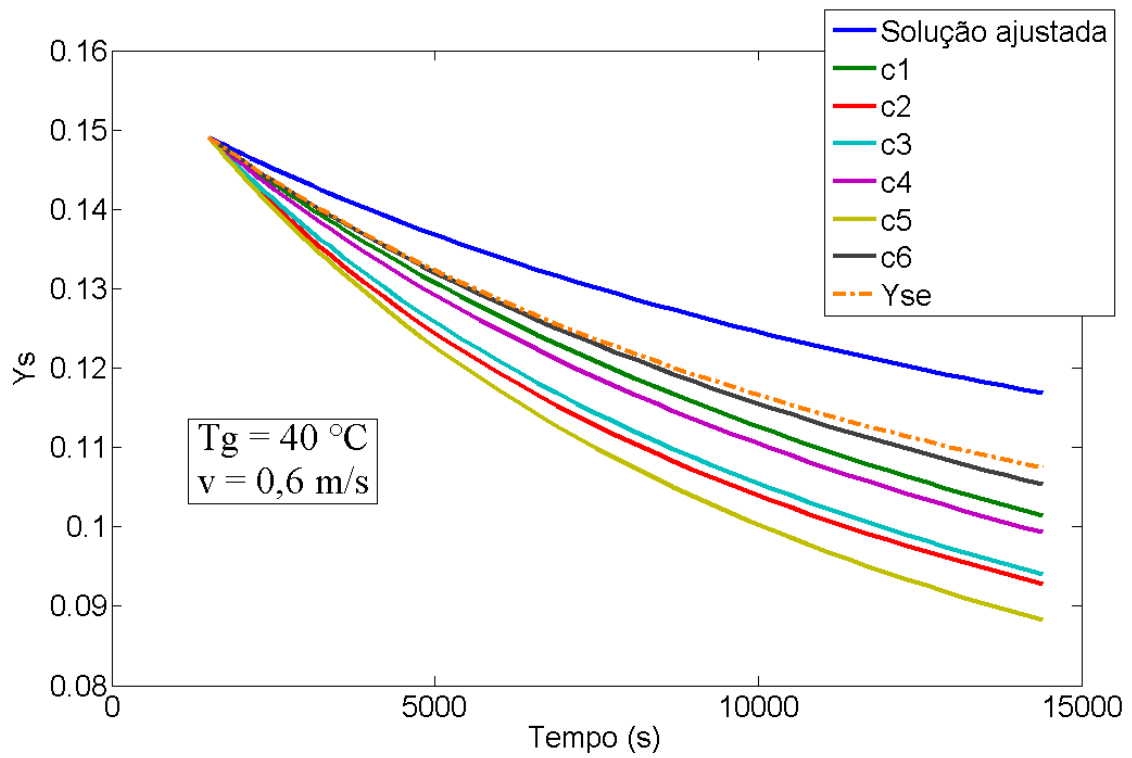


Figura 4.3.4.1 – Análise da sensibilidade do aumento de 30% nos parâmetros a 40 °C

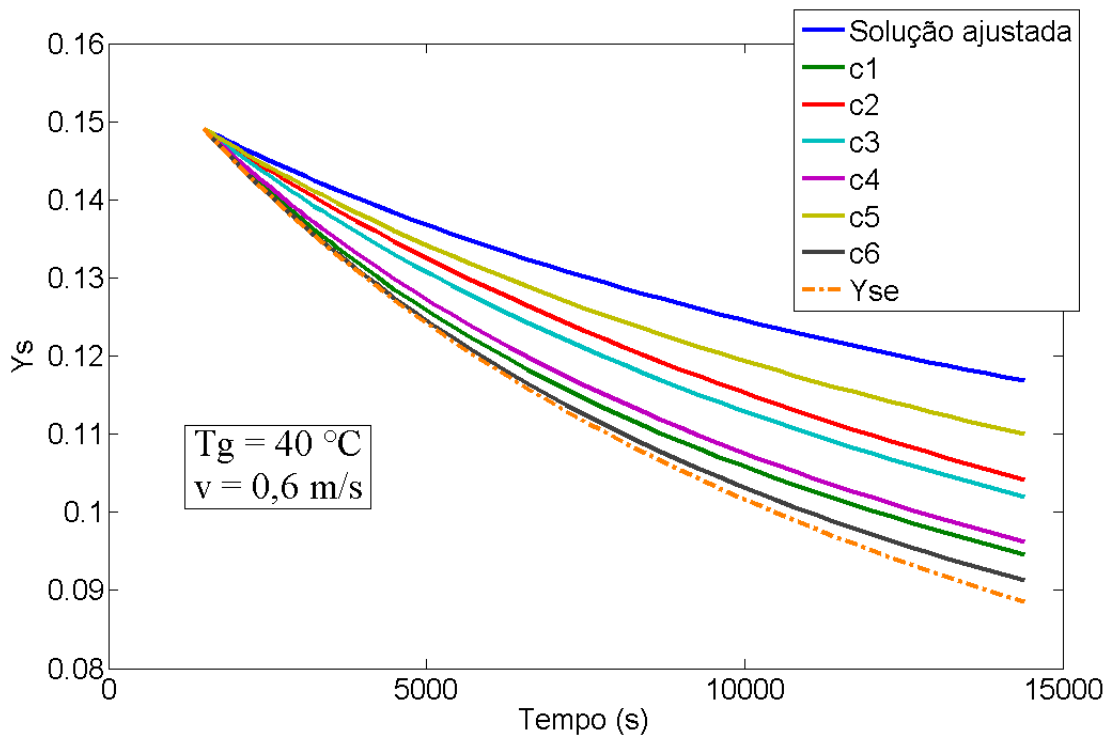


Figura 4.3.4.2 – Análise da sensibilidade da redução de 30% nos parâmetros a 40 °C

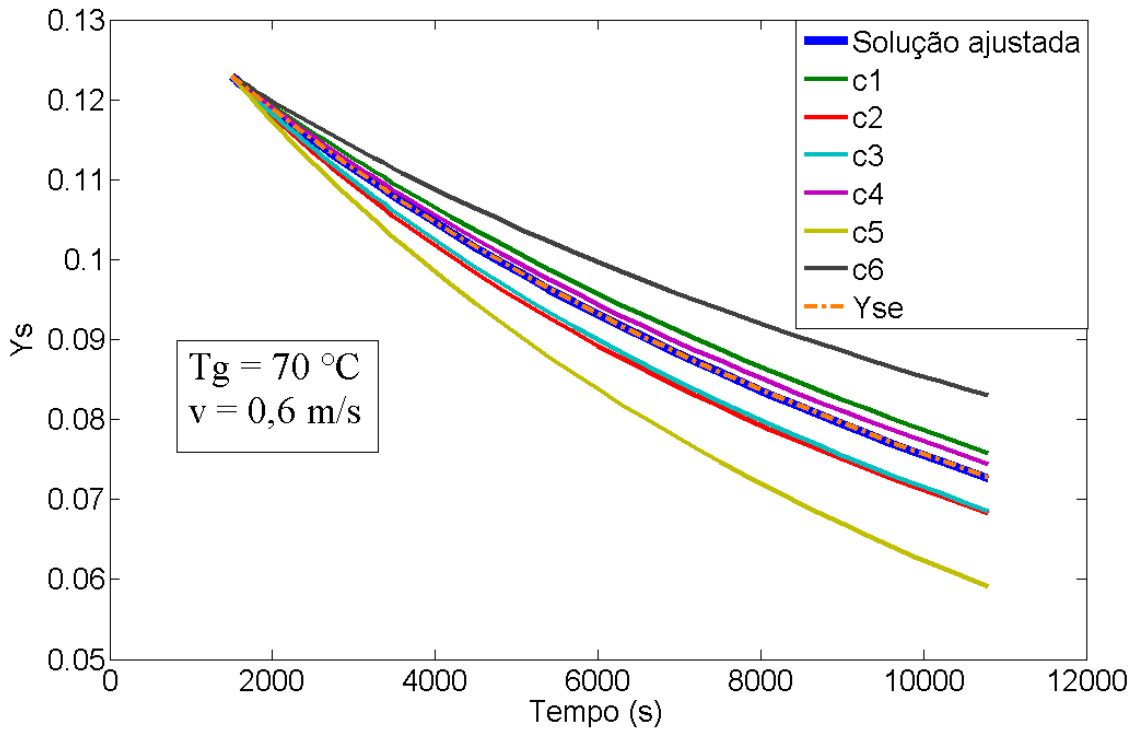


Figura 4.3.4.3 – Análise da sensibilidade do aumento de 30% nos parâmetros a 70 °C

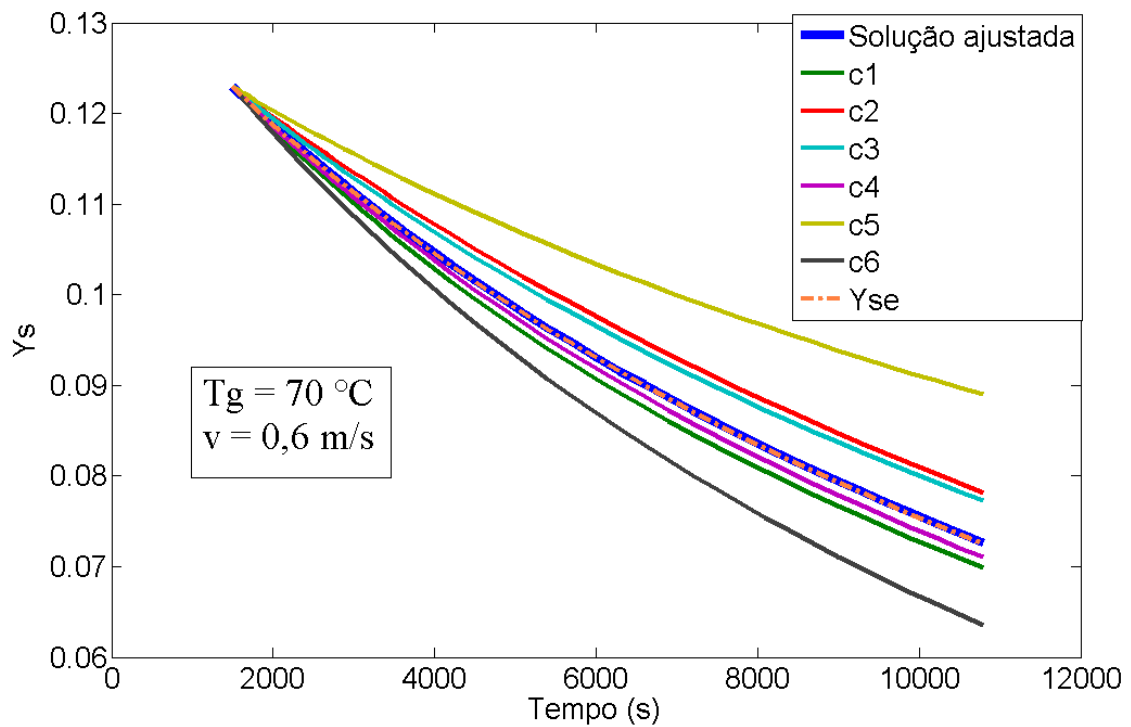


Figura 4.3.4.4 – Análise da sensibilidade da redução de 30% nos parâmetros a 70 °C

Para avaliar a sensibilidade dos resultados obtidos, calcularam-se os desvios entre cada simulação e o valor esperado pelo modelo híbrido ajustado conforme a seguinte equação:

$$(Desvio) = \sum \frac{|Y_{\text{modelo}} - Y_{\text{simulado}}|}{Y_{\text{modelo}}} \cdot \frac{100\%}{N} \quad (4.3.4.2)$$

Onde Y_{modelo} é o valor da umidade da soja calculada pelo modelo híbrido ajustado, Y_{simulado} é o valor da umidade da soja calculada pelo modelo com os parâmetros alterados e N é o número de pontos avaliados. Os valores dos desvios estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4.3.4.1 – Desvios calculados para a sensibilidade dos parâmetros

Parâmetro	Desvios (%)			
	Temperatura a 40°C		Temperatura a 70 °C	
	Aumento de 30%	Redução de 30 %	Aumento de 30%	Redução de 30 %
c1	5,86	9,45	2,07	1,9
c2	10,5	4,50	3,05	3,53
c3	9,59	5,75	2,53	2,74
c4	6,99	8,50	1,06	1,02
c5	12,2	2,56	7,73	8,71
c6	4,47	10,7	5,55	5,13
Y _{se}	3,95	11,4	$7,99 \cdot 10^{-4}$	$7,98 \cdot 10^{-4}$

De forma geral, observou-se que a sensibilidade dos parâmetros tende a diminuir com o aumento da temperatura. Para as simulações realizadas a temperatura de 70 °C, a magnitude dos desvios gerados pelo aumento ou redução de 30% no valor da maioria dos parâmetros esteve na mesma ordem que os desvios calculados nas simulações do modelo ajustado no item anterior. Enquanto isso, os desvios a 40 °C foram mais significativos em quase todas as simulações. Vale ressaltar que nesta temperatura a alteração de 30% do valor da umidade de equilíbrio mostrou influenciar no perfil de umidade. Estes resultados apontam que todos os parâmetros interferem significativamente nos valores estimados pelo modelo, salvo para a umidade de equilíbrio a altas temperaturas. Isso pode ser explicado pelo fato da ordem de grandeza da umidade de equilíbrio a altas temperaturas tender a zero, de forma a não interferir na equação do modelo.

4.4 Conclusão

De acordo com o que foi abordado neste capítulo, observou-se que o processo de secagem possui etapas que dependem tanto de efeitos externos quanto efeitos internos inerentes ao transporte energia e de massa da água da soja. Neste contexto, não se observou a etapa de secagem a velocidade constante no início do processo, sendo que nestes primeiros minutos o coeficiente global de transferência de massa mostrou não depender da umidade do sólido de forma equivalente para todos os experimentos. Isto pode indicar que os primeiros minutos da secagem sejam mais dependentes de fatores externos, o que pode indicar que esta etapa seja limitada pela evaporação de água

adsorvida na superfície da soja. Em seguida, observou-se um decaimento na taxa de evaporação de água de forma que os efeitos internos de transporte de massa indicaram limitar o processo. Nesta etapa, observou-se um comportamento equivalente em todos os experimentos do coeficiente global de transferência de massa como uma função da temperatura e da umidade do sólido.

Em base nos resultados obtidos, dois modelos que relacionam K como função da temperatura do gás de secagem e da umidade da soja foram propostos e validados frente aos dados experimentais, sendo um representado por uma equação exponencial e outro por uma quadrática. O primeiro modelo representou mais adequadamente todas as etapas envolvidas no processo de secagem. Contudo, este modelo apresentou ser eficaz apenas para faixas de umidade inicial da soja entre 0,15 e 0,17, de forma que para valores superiores a isso, o valor de K tende a ordem de grandeza muito superior a esperada pela literatura. Enquanto isso, o segundo modelo que foi ajustado com adição dos resultados apresentados pela literatura contempla uma faixa maior para a umidade da soja, contudo não representa adequadamente os minutos iniciais da secagem inerentes a etapa em que os efeitos externos serem mais predominantes. Para a etapa mais predominante do processo representada pela limitação do processo devido ao transporte de massa interno na soja, este último modelo resultou em menores desvios.

Por fim, o estudo da sensibilidade dos parâmetros do último modelo mostrou que todos os parâmetros interferem de forma significativa na ordem de grandeza de K , sendo que se observou uma tendência de diminuição dessa interferência com o aumento da temperatura. Além disso, observou-se que a umidade de equilíbrio também interfere nos resultados, salvo em temperaturas elevadas onde seu valor tende a zero. Assim, vale ressaltar que o modelo ajustado é validado com o uso da equação usada da literatura para estimativa da Y_{se} .

5. SECAGEM CONVENCIONAL EM LEITO FIXO

5.1 Introdução e Objetivos

Para simulação da operação tanto periódica quanto convencional em leito fixo, faz-se necessário um modelo que represente o perfil de umidade e de temperatura da soja e do ar de secagem. A maioria dos autores validou o modelo a duas fases apresentado por Massarani e Silva Telles (1992) tomando as condições apresentadas no item 2.4.1. da revisão bibliográfica. Este modelo é muito mais utilizado pois ele considera as temperaturas do sólido e do gás diferentes em determinado tempo e posição do leito. Coutinho *et al.* (2009) validaram este modelo no estudo de secagem de soja em leito fixo e Romero *et al.* (2010) utilizaram este modelo para simular a operação periódica. Outros autores validaram este modelo na secagem de grãos em leito fixo como Silva *et al.* (2004) na secagem de semente de agrião, Mancini *et al.* (2002, A) na secagem de milho e Mancini *et al.* (2002, B) na secagem de feijão.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é simular o modelo a duas fases na secagem de soja em leito fixo em operação convencional frente a dados experimentais da umidade e temperatura do gás e posteriormente aplicar esse modelo na simulação da operação periódica no capítulo 6. Além disso, objetivou-se analisar o estudo da sensibilidade paramétrica das propriedades envolvidas no processo.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Equipamentos

Os equipamentos e materiais utilizados foram um compressor que opera a 7 bar, um aquecedor elétrico com resistência de 7,60 Ω , um regulador de tensão (VARIAC) para controlar a voltagem aplicada no aquecedor, um rotâmetro, um secador de leito fixo isolado de 6 cm de diâmetro interno e 30 cm de comprimento, um psicrômetro digital, termopares tipo K (precisão de $\pm 2,2$ °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, bolinhas de isopor, um paquímetro e uma estufa que opera a 105 °C \pm 2°C. O sistema analisado está representado pela Figura 5.2.1.1.

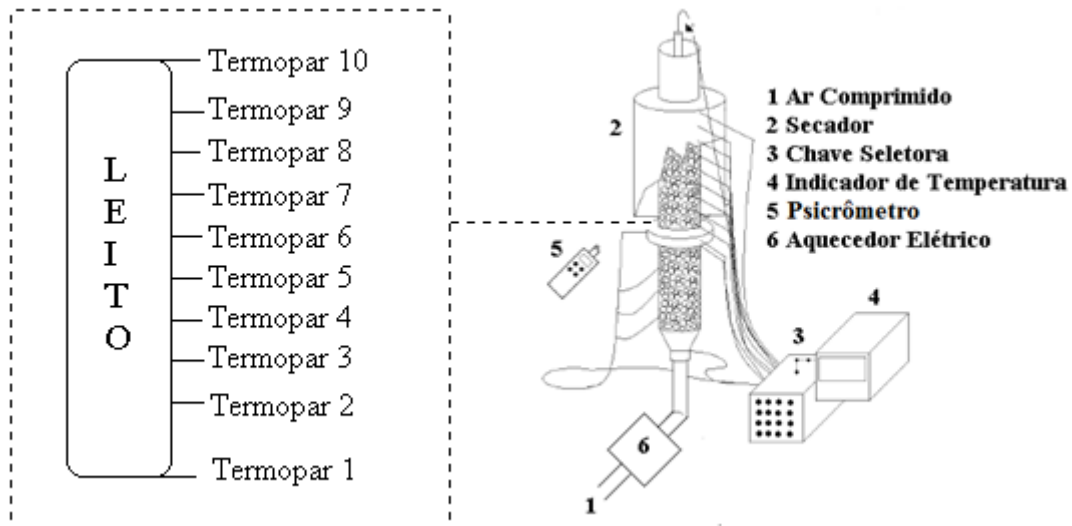


Figura 5.2.1.1 – Sistema dos Equipamentos Utilizados

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 5.2.1.1. O leito é preenchido com soja suportada pelas bolinhas de isopor (material de baixa absorção de umidade). O psicrômetro é usado para medir a temperatura e umidade ambiente e do ar na saída do secador.

Tabela 5.2.1.1 – Posição dos Termopares

Termopar	Posição (cm)	Termopar	Posição (cm)
1	0,0	6	17,3
2	5,3	7	20,3
3	8,3	8	23,3
4	11,3	9	26,3
5	14,3	10	30,0

5.2.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu nos seguintes passos:

- 1) regulou-se a vazão de ar em 100 L/min por meio do rotâmetro;
- 2) mediu-se a temperatura e umidade do ar na entrada do aquecedor e do ar ambiente com o psicrômetro;
- 3) acionou-se a resistência regulando a voltagem na posição para se atingir a temperatura de 51 °C conforme o modelo ajustado pela equação (3.2.3.7);

- 4) mediu-se a temperatura e umidade do ar após seu aquecimento ter atingido regime permanente;
- 5) duas amostras de soja foram pesadas em balança analítica e levadas em estufa por 24 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- 6) foram medidas as dimensões de amostras de grãos de soja por meio do paquímetro medindo suas respectivas massas em balança analítica a fim de se determinar a massa específica do sólido seco e a porosidade do leito;
- 7) preencheu-se com isopor a região inferior ao leito e mediu-se a massa de isopor pela diferença entre a quantidade inicial e a quantidade após sua alimentação;
- 8) preencheu-se o leito desde sua base até seu topo com soja e mediu-se a massa alimentada pela diferença entre a quantidade inicial e a quantidade após o preenchimento;
- 9) ligou-se a tubulação do ar na entrada do secador a fim de se iniciar a secagem da soja acionando-se o cronômetro;
- 10) mediu-se a temperatura do sistema em diferentes posições do leito com o tempo por meio dos termopares e mediu-se a umidade e temperatura do ar na saída do secador com tempo por meio do psicrômetro;
- 11) após 165 minutos, encerrou-se o processo de secagem e mediu-se a massa da soja seca;
- 12) duas amostras de soja seca foram pesadas em balança analítica e levadas em estufa por 24 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- 13) foram medidas as dimensões de amostras de grãos de soja seco por meio do paquímetro medindo suas respectivas massas em balança analítica a fim de se determinar se houve variação da massa específica do sólido seco;
- 14) após 24 horas, retiraram-se todas as amostras de soja da estufa transferindo-as a um dissecador para resfriá-las até a temperatura ambiente e mediram-se suas massas em seguida;
- 15) os itens de 1 a 14 foram repetidos nas condições experimentais apresentadas pela tabela 5.2.2.1.

Tabela 5.2.2.1 – Condições experimentais

Experimento	Vazão do ar (L/min)	Ts (°C)	Tempo de Secagem (min)
1	100	51	165
2	100	51	170
3	100	41	105
4	100	50	136
5	100	40	262
6	200	50	194
7	200	40	120

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Resultados

Os valores da temperatura e da umidade do gás na entrada do secador, da temperatura e umidade da soja inicial, da massa inicial de soja no leito, da água evaporada do processo (diferença entre massa inicial e final da soja no leito) e da temperatura ambiente estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5.3.1.1 – Dados experimentais

Experimento	1	2	3	4
Tga (°C)	48	48	39	45
Yga	0,0019	0,0011	0,0013	0,000
Tso (°C)	27	27	26	26
Yso	0,108	0,109	0,108	0,287
Massa de Soja Inicial (g)	700,0	703,1	702,3	553,1
Água evaporada (g)	19,99	19,27	10,38	63,95
Tambiente (°C)	28,5	28,8	27,9	26,7
Experimento	5	6	7	
Tga (°C)	35	47	40	
Yga	0,0015	0,000	0,000	
Tso (°C)	27	25	24	
Yso	0,244	0,171	0,221	
Massa de Soja Inicial (g)	641,3	612,3	655,6	
Água evaporada (g)	65,72	44,05	49,12	
Tambiente (°C)	26,7	25,4	24,3	

Observou-se que a massa específica da soja e a porosidade do leito variaram durante os experimentos. A figura 5.3.1.1 mostra os valores da massa específica da soja seca para todas as amostras de grãos, as quais foram retiradas em cada experimento tanto antes quanto depois da secagem. O valor da massa específica da soja seca foi calculado dividindo a massa seca do grão de soja pelo seu volume, cujo valor foi calculado a partir da equação do volume de uma esfera usando o diâmetro medido com o paquímetro. Assim, o valor médio para a massa específica da soja seca foi em torno de 1130 kg/m³.

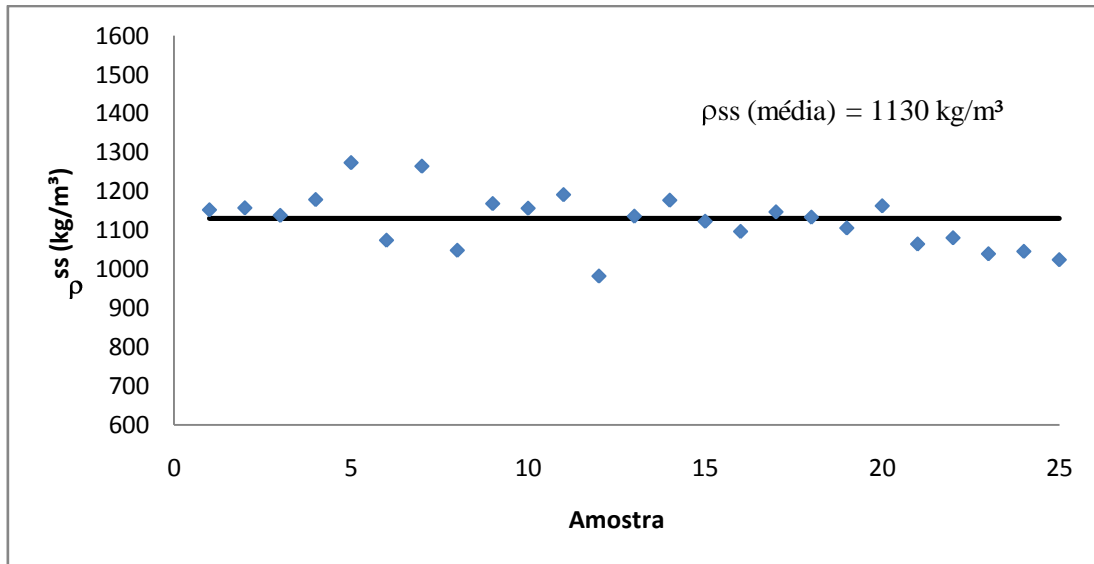


Figura 5.3.1.1 – Massa específica da soja seca

Analogamente, calculou-se uma média para massa específica da soja, dividindo a massa do grão úmido pelo seu volume, a fim de se obter uma porosidade média do leito. O valor dessa porosidade pode ser calculado por meio da expressão (5.3.1.1) que relaciona a fração de vazios no leito por meio da relação entre o volume de soja ocupado no leito pelo volume do leito. O valor médio da porosidade do leito resultou em torno de 0,39 e o volume da soja foi calculado dividindo a massa de soja alimentada no leito pela massa específica da soja média.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{soja}}{V_{leito}} \tag{5.3.1.1}$$

O comportamento obtido do perfil de umidade do ar no topo leito do secador com o tempo será apresentado nos gráficos do próximo item referente a simulação do modelo a duas fases.

5.3.2 Simulação do Modelo a Duas Fases

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

$$Y_{S_{j+1}} = Y_{S_j} - \Delta t \cdot \frac{K_{sa} \cdot (Y_{S_j} - Y_{se_j})}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}} \tag{5.3.2.1}$$

$$T_{S_{j+1}} = T_{S_j} + \Delta t \cdot \frac{ha(T_{g_j} - T_{s_j}) - f(C_{pv}(T_{g_j} - T_{s_j}) + \lambda)}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}(C_{ps} + C_{pl} \cdot Y_{S_j})} \tag{5.3.2.2}$$

$$Yg_{i+1} = Yg_i + \Delta z \cdot \frac{K_s a}{G_g} (Ys_i - Yse_i) \quad (5.3.2.3)$$

$$Tg_{i+1} = Tg_i - \Delta z \cdot \frac{ha(Tg_i - Ts_i)}{G_g(Cpar + Yg_i \cdot Cpv)} \quad (5.3.2.4)$$

Onde i e j 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):

$$Cp = C1 + C2 \cdot \left[\frac{c3}{T \cdot \sinh\left(\frac{c3}{T}\right)} \right]^2 + C4 \cdot \left[\frac{c5}{T \cdot \sinh\left(\frac{c5}{T}\right)} \right]^2 \quad (5.3.2.5)$$

Onde Cp é dado em J/(kmol.K) e os parâmetros para cada espécie são dados conforme a tabela que segue abaixo:

Tabela 5.3.2.1 – Parâmetros da equação (5.3.2.5)

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

$$Cpl = 276370 - 2090,1 \cdot T + 8,125 \cdot T^2 - 0,014116T^3 + 9,3701 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 \quad (5.3.2.6)$$

Onde Cpl é dado em J/(kmol.K) e T em Kelvin.

$$\lambda = C1 \cdot (1 - T_R)^{C2 + C3 \cdot T_R + C4 \cdot T_R^2} \quad (5.3.2.7)$$

Onde λ é dado em J/(kmol) e TR é a temperatura reduzida dada por:

$$T_R = \frac{T}{Tc} \quad (5.3.2.8)$$

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

Tabela 5.3.2.2 – Parâmetros da equação (5.3.2.7)

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

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

$$Cps = 0,391 + 0,461 \frac{Ys}{100+Ys} \quad (5.3.2.9)$$

Em que Cps é dado em cal/(g°C).

A umidade de equilíbrio da soja pode ser estimada pela equação de Silva *et al.* (2008) conforme abaixo:

$$1 - UR = \exp(-0,0000576 \cdot Tg \cdot Yse^{1,52}) \quad (5.3.2.10)$$

Onde UR é dada em decimal, Tg em Kelvin e Yse em porcentagem. Assim, faz-se necessário conhecer o valor da umidade relativa do ar que pode ser determinada pela seguinte relação:

$$UR = \frac{P_{\acute{a}gua}}{P_{sat}} \quad (5.3.2.11)$$

Onde P_{água} é a pressão parcial do vapor de água e P_{sat} 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):

$$P_{sat} = \exp\left(16,3872 - \frac{3885,70}{Tg+230,170}\right) \quad (5.3.2.12)$$

Em que P_{sat} é dada em kPa e Tg em °C. Enquanto isso, a pressão parcial do vapor de água é calculada por:

$$P_{\acute{a}gua} = P \cdot y_{\acute{a}gua} = P \cdot \left(\frac{n_{\acute{a}gua}}{n_{\acute{a}gua} + n_{ar}}\right) = P \cdot \left(\frac{Yg}{Yg + \frac{MM_{\acute{a}gua}}{MM_{ar}}}\right) \quad (5.3.2.13)$$

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 $t = 0 \rightarrow Ts = Ts_0$
- Em $t = 0 \rightarrow Ys = Ys_0$
- Em $z = 0 \rightarrow Tg = Tga$
- Em $z = 0 \rightarrow Yg = Yga$

Onde Ts_0 , Ys_0 , Tga e Yga são respectivamente a temperatura da soja inicial, a umidade da soja inicial, a temperatura de alimentação do gás e a umidade do gás de alimentação. Com base ao que foi discutido anteriormente neste capítulo e na revisão

bibliográfica e por meio da equação de ha apresentada no item 2.4.1 proposta por Boyce (1965) para sistema de aquecimento e resfriamento de grãos e por meio do modelo validado referente a equação (4.3.2.5) para a determinação de $K_{s,a}$, simulou-se os experimentos por meio do software Matlab®. Vale ressaltar que se criou uma malha dividindo o tempo e o espaço em 200 divisões iguais. O número mínimo de divisões necessário vai depender da ordem de grandeza do tempo de análise e da altura do leito. É interessante tomar 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 tempo.

As figuras que seguem abaixo mostram o perfil de umidade e de temperatura da soja e do ar de secagem em relação ao tempo e ao espaço para a simulação do experimento 1.

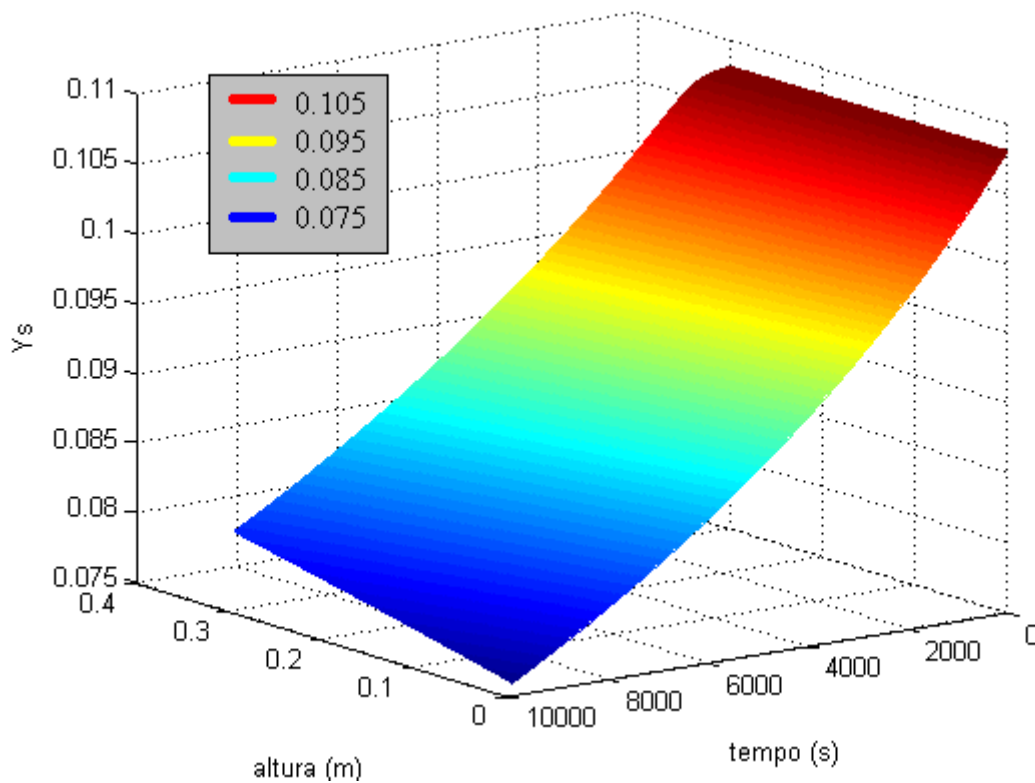


Figura 5.3.2.1 – Simulação do Perfil de Umidade da Soja para o Experimento 1

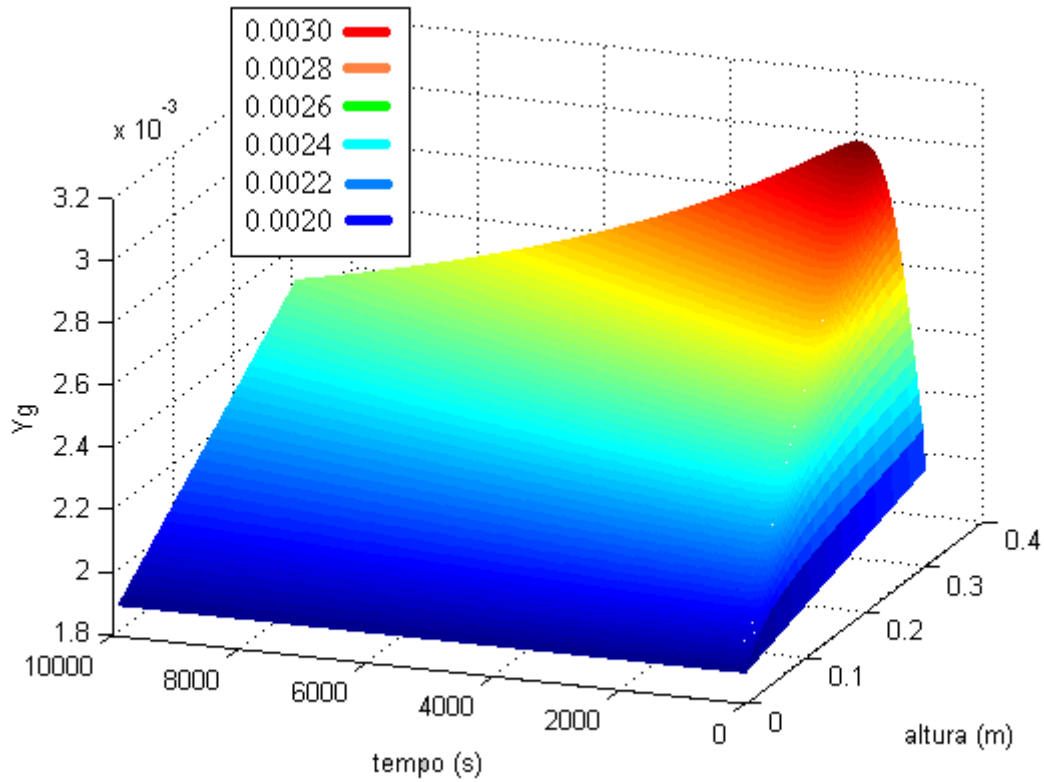


Figura 5.3.2.2 – Simulação do Perfil de Umidade do Ar para o Experimento 1

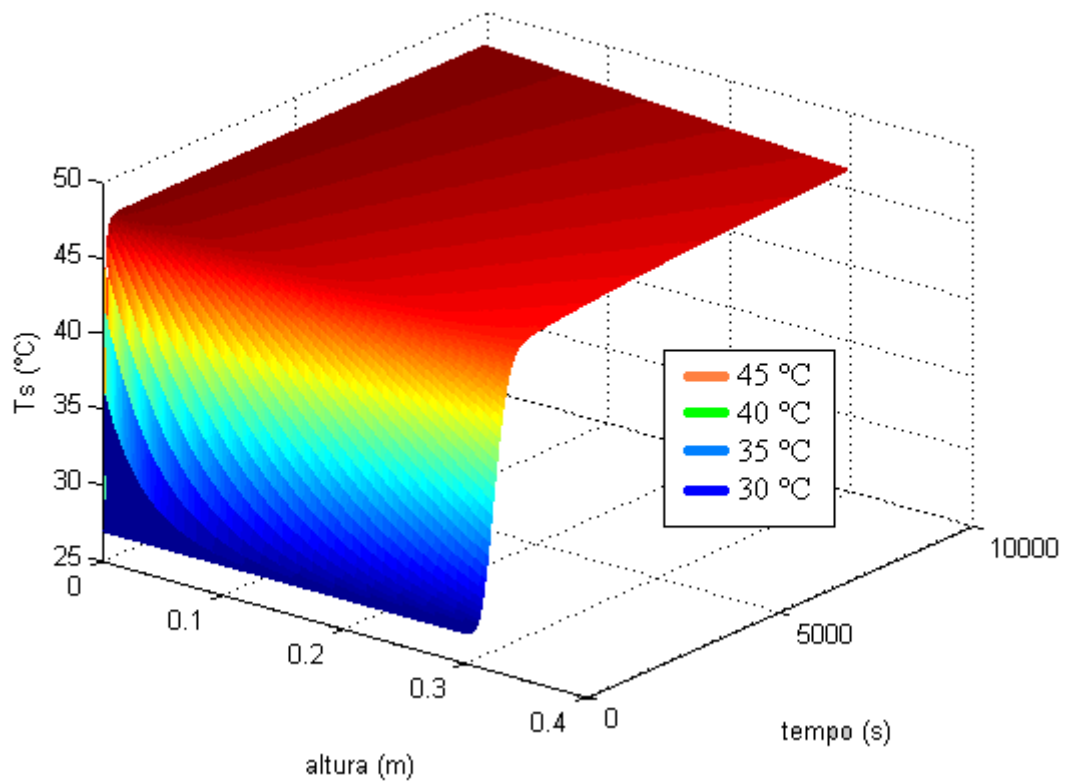


Figura 5.3.2.3 – Simulação do Perfil de Temperatura da Soja para o Experimento 1

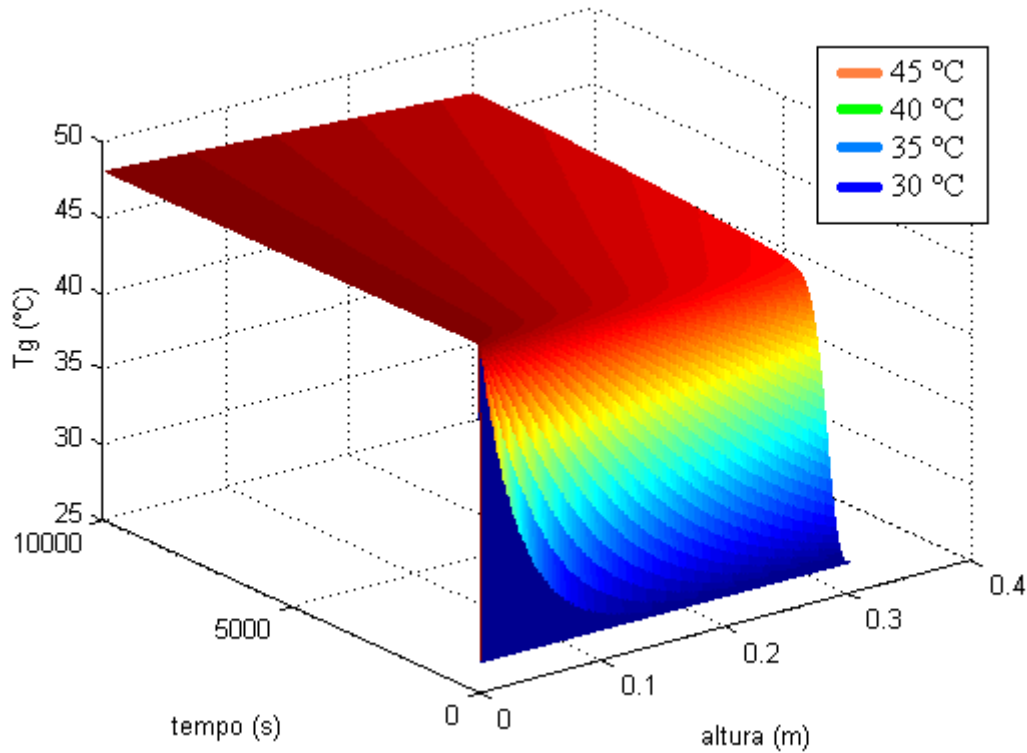


Figura 5.3.2.4 – Simulação do Perfil de Temperatura do Ar para o Experimento 1

Os resultados obtidos nas simulações de cada experimento foram comparados com os dados obtidos experimentalmente por meio do cálculo dos seguintes desvios:

$$(Desvio T) = \sum \frac{|T_{gcal}(i,j) - T_{gexp}(i,j)|}{T_{gexp}(i,j)} \cdot \frac{100\%}{N} \quad (5.3.2.14)$$

Onde T_{gcal} é a temperatura do gás calculada pelo modelo a duas fases, T_{gexp} é a temperatura do gás obtida experimentalmente, N é o número de pontos avaliados, i são índices referentes às posições dos termopares e j são índices referentes a 10, 25, 50 e 100% do tempo de secagem.

$$(Desvio Y) = \sum \frac{|Y_{gcal} - Y_{gexp}|}{Y_{gexp}} \cdot \frac{100\%}{N} \quad (5.3.2.15)$$

Onde Y_{gcal} é a umidade do gás na saída do secador calculada pelo modelo e Y_{gexp} seus respectivos valores obtidos experimentalmente.

$$(Desvio A) = \sum \frac{|\dot{A}gua_{evcal} - \dot{A}gua_{evexp}|}{\dot{A}gua_{evexp}} \cdot 100\% \quad (5.3.2.16)$$

Onde $\dot{A}gua_{evexp}$ é a massa de água evaporada obtida experimentalmente e $\dot{A}gua_{evcal}$ é a massa de água evaporada calculada por meio da simulação do modelo a duas fases, a qual foi obtida multiplicando a diferença entre a umidade inicial da soja e a umidade média do leito (\bar{Y}_s) final pela massa da soja seca alimentada no secador:

$$\dot{A}gua_{evcal} = (Y_{s0} - \bar{Y}_s) \cdot m_{ss} \quad (5.3.2.17)$$

Adicionando-se a isso, a umidade média do leito final foi calculada por meio de uma integral numérica usando a função trapz do Matlab® da umidade da soja em relação a posição e dividindo pela altura do leito:

$$\overline{Y_S} = \frac{\int Y_S dz}{z} \tag{5.3.2.18}$$

Os desvios calculados estão apresentados na tabela que segue abaixo:

Tabela 5.3.2.3 – Desvios do modelo a duas fases

Experimento	Desvio A (%)	Desvio T (%)	Desvio Y (%)
1	6,57	8,68	18,6
2	4,14	8,30	35,2
3	15,5	8,75	25,9
4	6,44	5,01	9,21
5	5,51	2,10	13,9
6	1,78	0,73	96,4
7	5,56	2,06	8,70

Desses dados, observa-se que os maiores desvios foram em relação a umidade do gás na saída do secador. Isto pode ser explicado por meio de três hipóteses, sendo a primeira delas considerando o fato de que o modelo usado para determinação do coeficiente global de transferência de massa não representou adequadamente o início do processo de secagem como visto no capítulo 4. Este argumento pode ser reforçado ao se comparar os dados experimentais e os calculados pelo modelo referentes ao perfil de Y_g na saída do secador com o tempo como mostra as figuras que seguem abaixo:

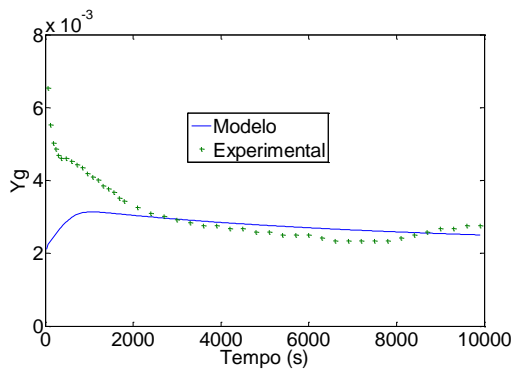


Figura 5.3.2.5 – Y_s do Experimento 1

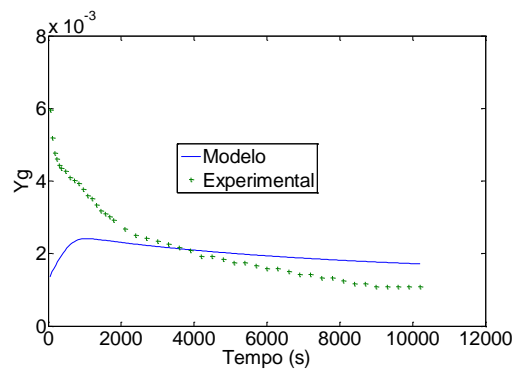


Figura 5.3.2.6 – Y_s do Experimento 2

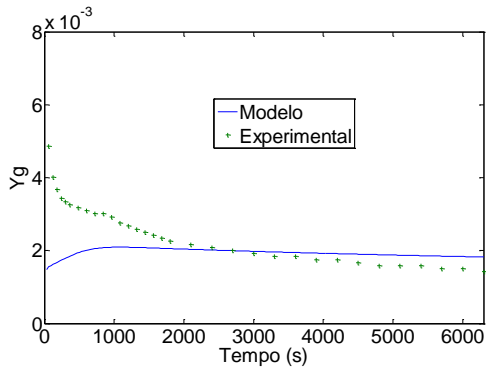


Figura 5.3.2.7 – Ys do Experimento 3

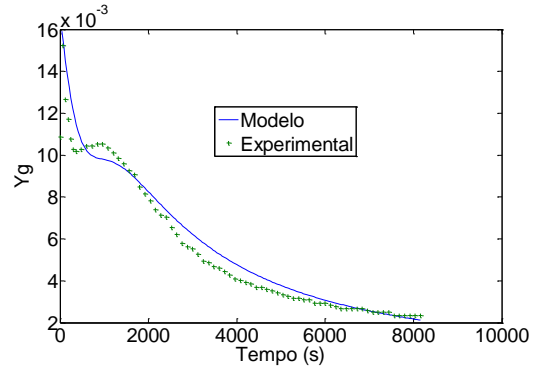


Figura 5.3.2.8 – Ys do Experimento 4

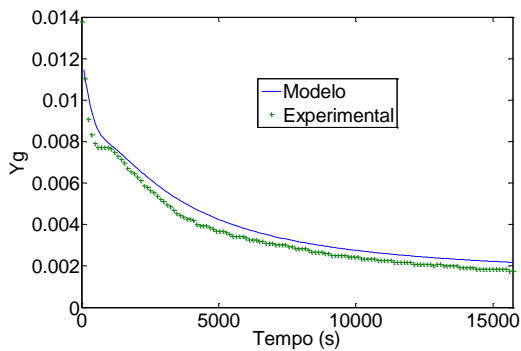


Figura 5.3.2.9 – Ys do Experimento 5

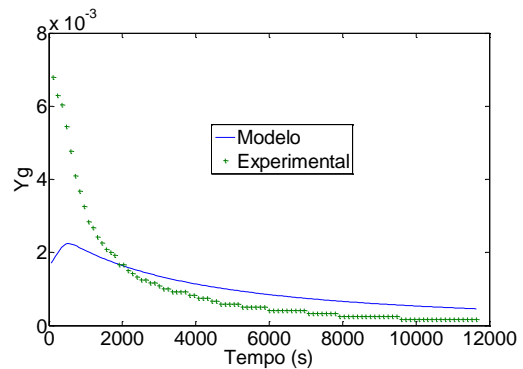


Figura 5.3.2.10 – Ys do Experimento 6

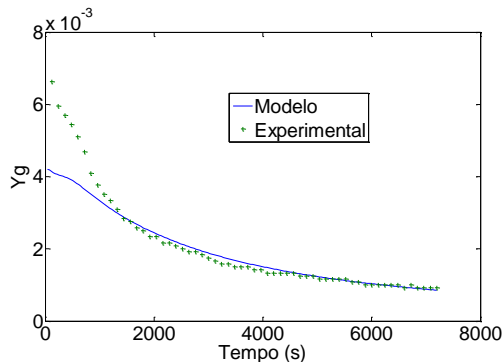


Figura 5.3.2.11 – Ys do Experimento 7

Estes gráficos apontam que o modelo não reproduz adequadamente os primeiros minutos da secagem, salvo para os experimentos 4 e 5 nos quais a umidade inicial da soja era maior que 0,24. Assim, observou-se uma tendência de que quanto maior a umidade inicial, melhor o modelo representa o perfil de umidade do ar na saída do aquecedor. Contudo, após os primeiros minutos da secagem referentes à possível etapa de evaporação da água adsorvida na superfície da soja, o modelo tendeu a representar o perfil da umidade do gás em todas as simulações. Este comportamento foi análogo ao estudado no capítulo 4 no secador de bandeja.

Adicionando-se a isso, caso a etapa do início da secagem seja mais dependente de fatores externos do que da umidade da soja, seria necessário propor um modelo com

K também em função de outras propriedades além da umidade do sólido e a temperatura do gás.

Outra hipótese que pode explicar os desvios é o fato de que ao se medir a umidade do gás no início da secagem, observou-se que seu valor nem sempre era nulo e que este valor não era constante com o tempo, o que representa a possibilidade de entrada de água na linha do ar comprimido por uma fonte desconhecida. Assim tomou-se um valor médio dos valores medidos antes da alimentação do ar no leito do secador. O estudo do impacto do valor dessa umidade nos desvios será estudada próximo item referente a sensibilidade dos parâmetros.

Por fim, outra hipótese que pode explicar o desvio Y no início da secagem é o fato de antes de começar o processo, o psicrômetro estar medindo a umidade ambiente que é muito superior a do ar comprimido. Assim que se injeta ar no leito, leva-se um tempo para o psicrômetro estabilizar a leitura nas novas condições. Neste contexto, os desvios Y foram menores nos experimentos 4 e 5 devido a umidade inicial da soja ser maior que resulta numa quantidade maior de água evaporada de forma que o ar comprimido tende a chegar na umidade ambiente no início do processo de secagem, não interferindo no tempo para se estabilizar a leitura do psicrômetro.

Quanto aos desvios T observa-se que a ordem de grandeza dos maiores valores foi em torno de 8,0 %, o que representa um desvio de aproximadamente 4 °C para as maiores temperaturas (48°C) e de 2 °C para as menores temperaturas (25 °C). Para baixas temperaturas, a magnitude do desvio é coerente uma vez que se encontra próxima da precisão do termopar fornecida pelo fabricante.

Enquanto isso, dentre os desvios A o maior foi de 15,5% que representou 1,6g de diferença na água evaporada calculada pelo modelo e a obtida experimentalmente. Em seguida, obteve-se um desvio de 6,57% que representa uma diferença de 1,3g na água evaporada.

5.3.3 Sensibilidade dos parâmetros

Para a simulação do sistema de secagem de soja em leito fixo por meio do modelo a duas fases foram tomadas algumas considerações como a de que a massa específica da soja seca e a porosidade do leito são constantes com o tempo. Além disso, houve algumas incertezas referentes às medidas experimentais como a da temperatura por meio dos termopares tipo K e da umidade do gás por meio do psicrômetro. A fim de se analisar o impacto inerente a ordem de grandeza de cada propriedade do sistema na simulação do processo de secagem, simulou-se o experimento 5 variando o valor de algumas propriedades em 30% calculando os desvios A, T e Y entre o valor simulado nas condições experimentais e o valor simulado nas condições experimentais com a variação das propriedades como mostrado na tabela 5.3.3.1. As simulações foram realizadas nas condições do experimento 5, pois foram nessas condições que se

obtiveram os menores desvios em relação aos dados experimentais como mostrado no item anterior.

Tabela 5.3.3.1 – Desvios referentes a variação em 30% das propriedades do sistema

Propriedade	Aumento de 30%			Redução de 30%		
	A	T	Y	A	T	Y
c1	4,12	0,81	1,86	3,52	0,7	1,61
c2	10,6	2,28	5,08	18,9	3,64	8,12
c3	3,71	0,59	2,11	4,07	0,65	2,34
c4	3,40	0,55	1,80	3,15	0,52	1,65
c5	9,06	1,22	6,11	9,88	1,33	6,64
c6	13,6	1,87	8,67	12,4	1,72	7,93
Yga	0,73	0,14	13,2	0,75	0,15	13,2
Yse	1,86	0,44	1,72	1,76	0,44	1,81
Tga	12,6	32,7	7,35	12,6	32,4	6,89
ρ_{ss}	1,46	4,65	17,3	1,36	4,85	16,9
ε	5,50	2,31	10,0	4,96	2,00	9,37
Ys ₀	42,4	8,55	26,8	45,8	8,15	24,5
Gg	1,06	3,71	13,1	2,12	6,46	25,0
Ts ₀	0,15	0,31	1,47	0,19	0,39	1,92
P	0,02	0,88	1,17	$5 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,09
ha	$7 \cdot 10^{-4}$	0,09	0,11	$2 \cdot 10^{-6}$	0,14	0,19
Cps	0,03	0,41	0,19	0,03	0,38	0,21
UR	1,29	0,35	1,60	1,33	0,34	1,62

As figuras que seguem abaixo mostram o quanto o perfil da umidade média do leito para as simulações com variação das propriedades se distanciou deste mesmo perfil simulado nas condições do experimento 5. A curva do modelo representa a simulação do sistema sem mudança das propriedades, enquanto que as outras curvas representam a simulação do perfil de umidade com aumento ou redução em 30% nos valores das respectivas propriedades.

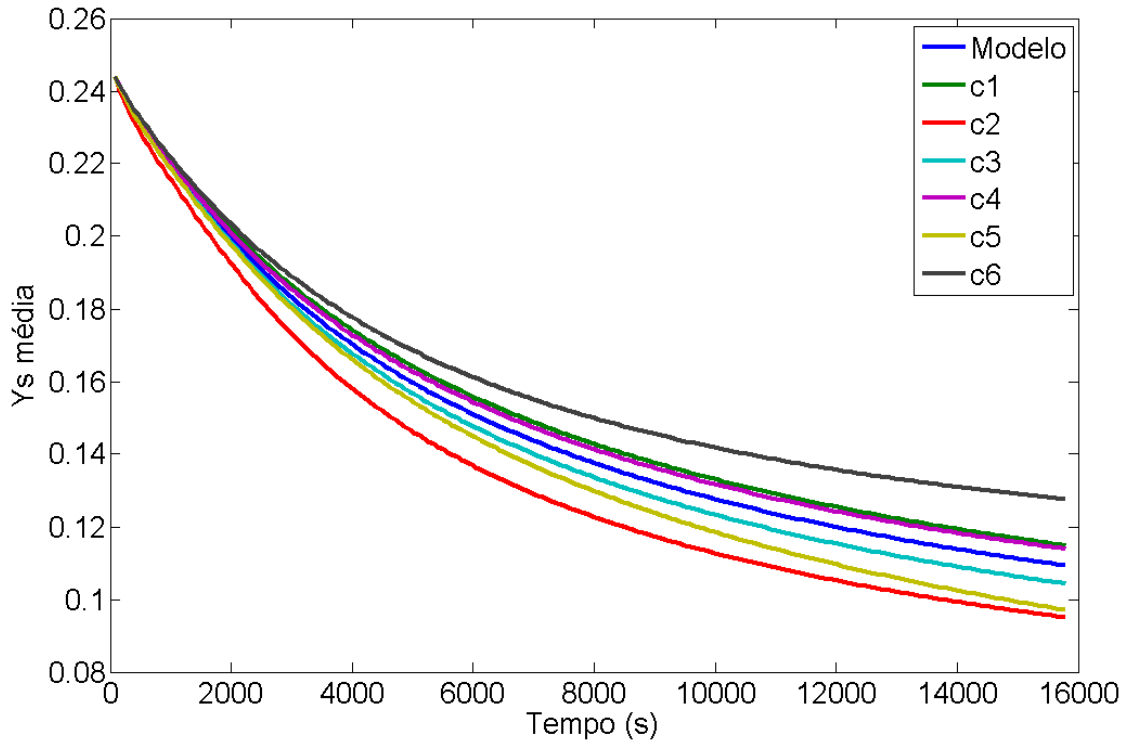


Figura 5.3.3.1 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 1

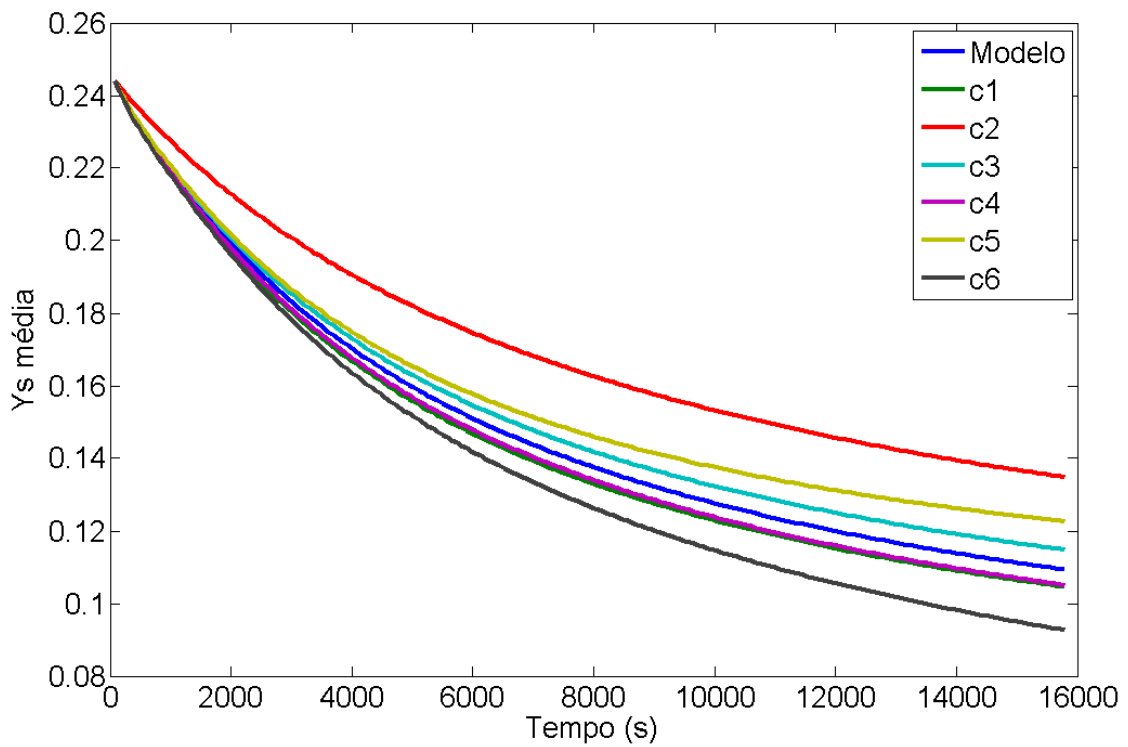


Figura 5.3.3.2 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 1

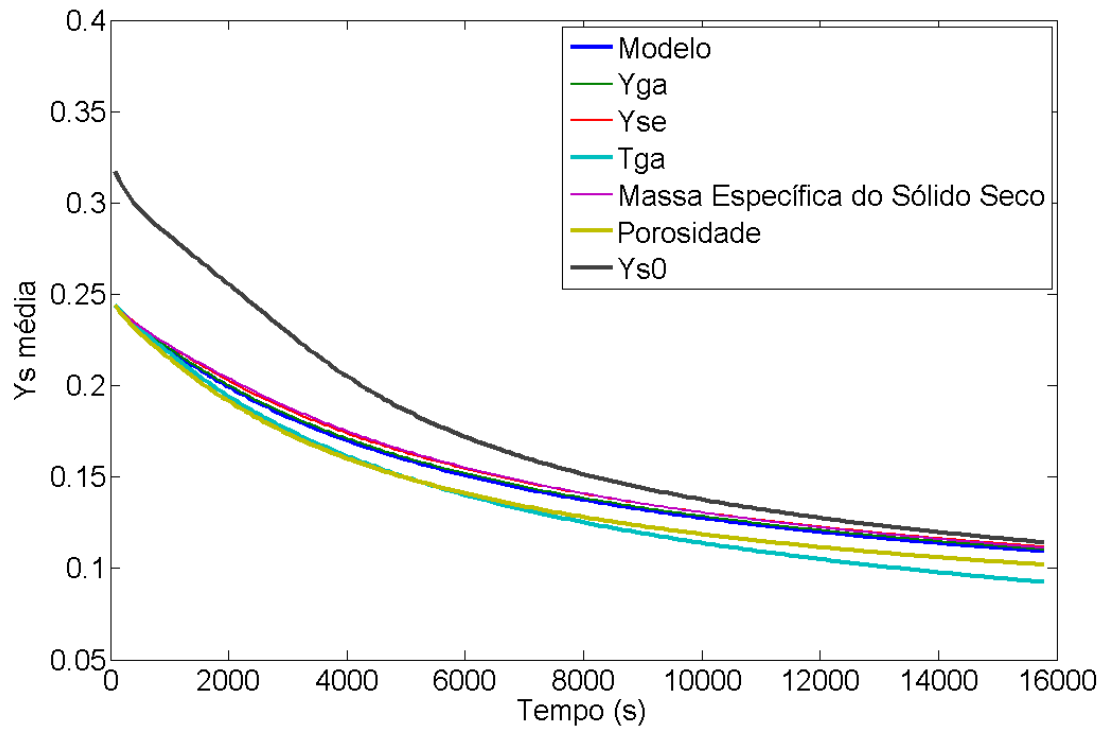


Figura 5.3.3.3 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 2

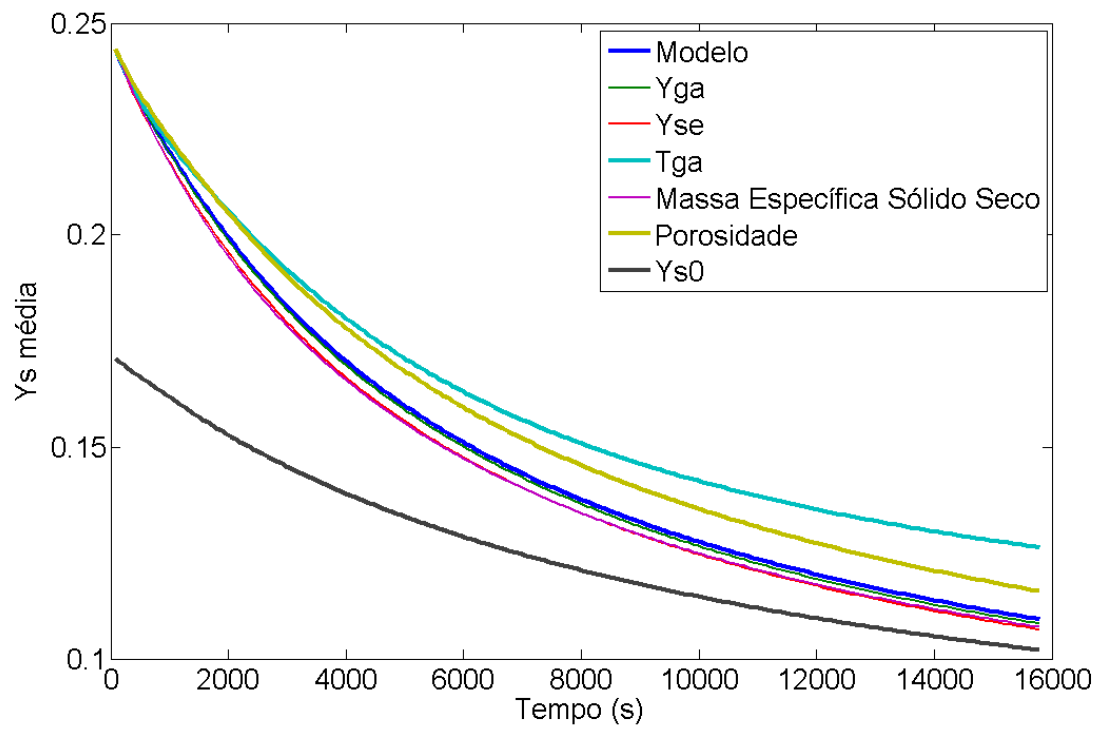


Figura 5.3.3.4 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 2

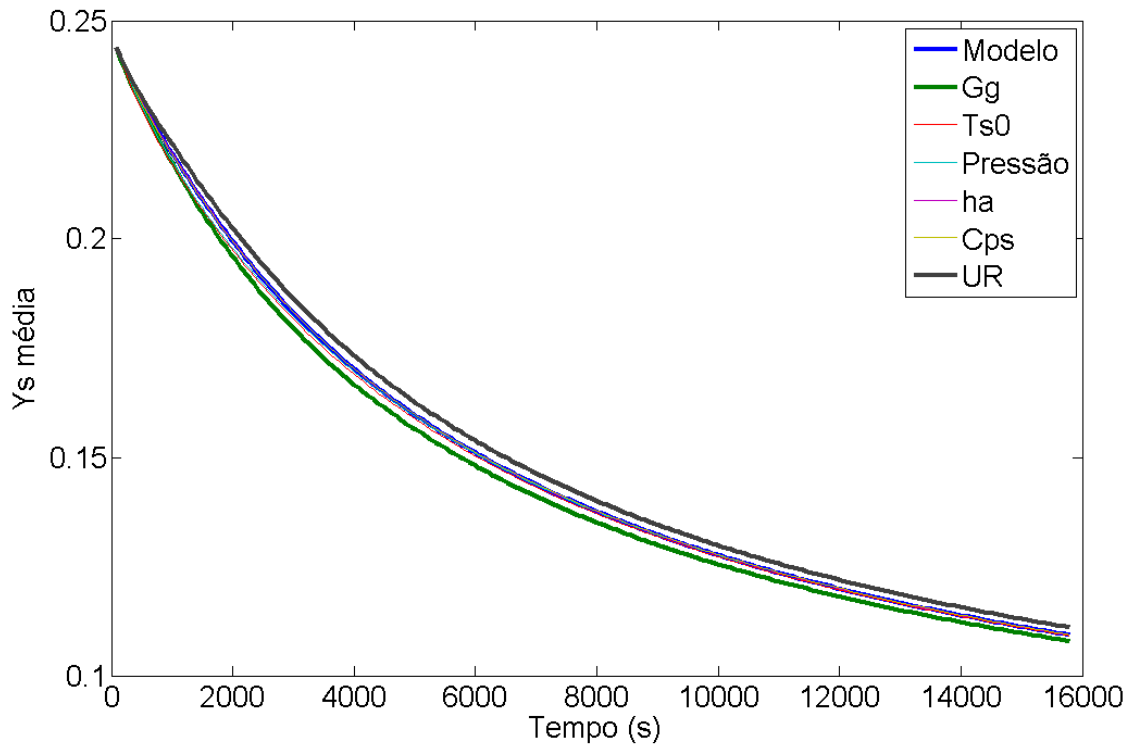


Figura 5.3.3.5 – Aumento de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 3

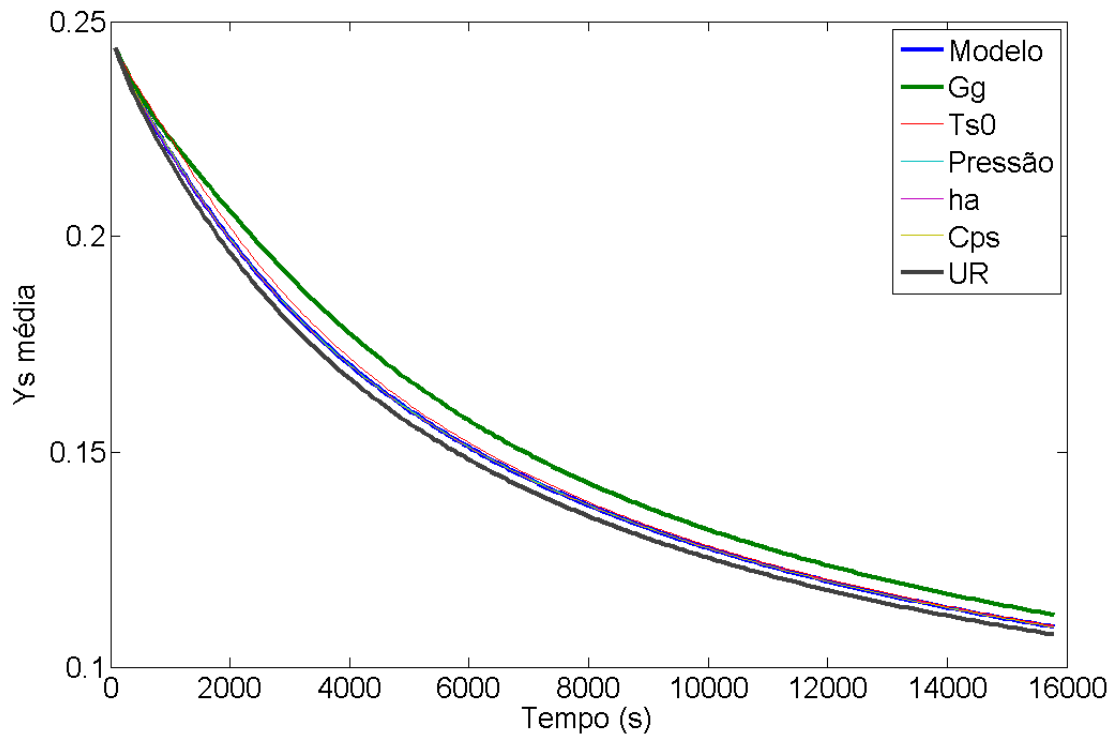


Figura 5.3.3.6 – Redução de 30 % das Propriedades no Modelo a Duas Fases 3

Dos resultados obtidos, observa-se que a variação da ordem de grandeza de algumas propriedades pouco impactou nos perfis e nos desvios calculados, como foi o caso da umidade de equilíbrio da soja, da temperatura inicial da soja, da pressão do sistema, do coeficiente de transferência de calor, do calor específico do sólido e da umidade relativa do ar. Isso aponta que os erros relativos às medidas experimentais dessas propriedades ou mesmo a estimação das mesmas por meio de equações da literatura podem ser considerados desprezíveis. Vale ressaltar que o coeficiente de transferência de calor, que é uma propriedade que relaciona a troca térmica entre a soja e o ar de secagem, foi estimado por uma equação da literatura cujos parâmetros não foram ajustados em base nos dados experimentais, como foi feito no caso do coeficiente global de transferência de massa. Isso mostra o quanto o sistema é mais sensível a K_{sa} do que a h_a . Além disso, após os primeiros minutos da secagem, as simulações mostraram que a temperatura da soja tende a se aproximar da temperatura do gás e como h_a está multiplicado pela diferença dessas duas temperaturas nas equações do modelo a duas fases, isso talvez seja um dos motivos pelos quais este coeficiente pouco interfira no processo mostrando mais uma vez o quanto os efeitos devido ao transporte de massa limitam o processo. Outra preocupação era saber se o valor considerado da umidade de equilíbrio, que também foi estimada por uma equação da literatura e que geralmente é determinada experimentalmente por outros autores, seria razoável para simular o sistema. Com base no estudo da sensibilidade, observou-se que a ordem de grandeza dessa propriedade pouco afetaria em comparação com a sensibilidade de outros parâmetros.

Enquanto isso, as outras propriedades mostraram afetar significativamente nos perfis e desvios dos sistemas simulados. Os parâmetros do modelo para se estimar o coeficiente global de transferência de massa mostraram interferir mais nos desvios A e Y que são inerentes aos balanços de massa do sistema, sendo menos influentes nos perfis de temperatura. Isso aponta que a quantidade de água evaporada no processo pouco interfere no equilíbrio térmico entre a soja e o ar. A propriedade que mais mostrou sensibilidade nos perfis foi a umidade inicial da soja. Isso aponta que para trabalhos futuros seja necessária uma maior precisão na determinação dessa propriedade, uma vez que o tempo entre o momento de recolher uma mostra da soja para ser levada em estufa até o momento em que a soja foi alimentada no sistema pode ter sido suficiente para que a soja perdesse água para o ar ambiente. Além disso, pode ser que haja perfis de umidade inicial da soja alimentada no leito de forma que a umidade determinada pela amostra na estufa tenha representado uma média desse perfil.

Acrescentando a isso, observou-se que o valor da temperatura do gás também foi uma das propriedades que mais influenciou nos desvios. Contudo, a variação de 30% nessa propriedade representa um desvio em torno de 10 °C na leitura pelo termopar. Por outro lado, uma variação de apenas 2 °C (valor dentro da precisão fornecida pelo fabricante) os desvios não são significativos. Além disso, observou-se que a magnitude da massa específica da soja e da porosidade do leito também foram significantes no estudo da sensibilidade da simulação do processo. Para trabalhos futuros, sugere-se que

se valide um modelo para descrever a variação da massa específica da soja em função de sua umidade, para minimizar o erro referente a se tomar ρ_{ss} e ε constantes. Por fim, observou-se que o erro inerente a imprecisão da leitura da umidade do gás por meio do psicrômetro é significativo apenas no perfil da umidade do gás, não sendo expressivo nos desvios T e A e no perfil de umidade média do leito. Isso mostra que este erro não será significativo no cálculo do rendimento do processo em base na eficiência em se atingir certa umidade da soja e nem no cálculo do gasto energético do processo.

5.4 Conclusão

Diante dos dados obtidos experimentalmente e analisados neste capítulo, observou-se que por meio do modelo a duas fases validado foi possível representar o comportamento dos perfis de umidade e temperatura da soja e do ar com desvios máximos em torno de 15% para a quantidade de água evaporada no processo e em torno de 9 % para o perfil de temperatura. Contudo, os desvios referentes ao perfil de umidade do ar no topo do leito foram os mais significativos chegando a variar de 9 a 96%. Esses desvios podem ser indicados pela imprecisão na leitura da umidade do gás no topo e na alimentação do leito e na imprecisão nos primeiros minutos da secagem referentes a estimação do coeficiente global de transferência de massa por meio do modelo validado no item 4. Do estudo da sensibilidade das propriedades do sistema, observou-se que a umidade inicial da soja, a temperatura do gás, a massa específica da soja seca, a porosidade do leito e o fluxo mássico do gás foram os mais sensíveis nas simulações realizadas. Para minimização desses erros, sugere-se para futuros trabalhos que se melhore a precisão da leitura ou estimação dessas propriedades, que se valide um modelo que relacione a massa específica do sólido seco como função de sua umidade e que haja um melhor controle na determinação da umidade inicial da soja.

6. SECAGEM PERIÓDICA EM LEITO FIXO

6.1 Introdução e Objetivos

A abordagem deste capítulo está focada em se aplicar os modelos validados neste trabalho juntamente com os modelos da literatura na simulação das operações periódica e convencional a fim de se avaliar as vantagens inerentes a esses processos.

A operação periódica consiste em se modular propriedades do sistema, como vazão de alimentação de espécies e temperatura de reagentes ou utilidades, em certa frequência e amplitude. O intuito de se utilizar essa operação alternativa é devido ao fato de que esta pode levar a maiores rendimentos, menores gastos energéticos, melhorar a seletividade de reações químicas e potencializar os transportes de massa e de energia envolvidos em processos industriais. Como já foi mencionado, o estudo dessa operação é recente e existe uma restrita literatura sobre o assunto. Dentre os trabalhos publicados nesta área, há um destaque maior ao estudo desta operação em reatores catalíticos.

Lange *et al.* (1999) fizeram um estudo teórico e experimental, onde 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 da performance do reator sob operação periódica excedendo a performance 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.

Com base nesta a visão, o objetivo desse capítulo é simular a operação periódica com modulação da temperatura e comparar seu rendimento em relação a operação convencional em condições de mesmo tempo de secagem e gastos energéticos. Nesta linha de raciocínio, busca-se avaliar como a umidade da soja e a amplitude e períodos da função referente a modulação da temperatura podem impactar no favorecimento de se trabalhar com a operação periódica.

6.2 Metodologia

As simulações da operação periódica foram realizadas usando os mesmos modelos e métodos numéricos usados no capítulo 5 para a secagem convencional. Contudo, foi imposta a modulação da temperatura do gás na entrada no secador conforme as seguintes equações:

$$\text{Modulação 1: } T_{gap} = \text{Amp.} \cdot \text{sen}(\text{freq.} \cdot t \cdot 2\pi) + \overline{T_{ga}} \quad (6.2.1)$$

$$\text{Modulação 2: } T_{gap} = -\text{Amp.} \cdot \text{sen}(\text{freq.} \cdot t \cdot 2\pi) + \overline{T_{ga}} \quad (6.2.2)$$

Onde T_{gap} é a temperatura do gás na alimentação do secador para a operação periódica dada em °C, Amp é a amplitude da função senoidal da temperatura dada também em °C, freq é a frequência da função (inverso do período [Pe], que é o tempo de uma oscilação da função senoidal) dada em s^{-1} e $\overline{T_{ga}}$ é a temperatura média do gás na alimentação. A função seno é calculada neste caso em base radiana. As temperaturas médias do gás foram calculadas por meio de integrais numéricas a partir da seguinte equação:

$$\overline{T_{ga}} = \frac{\int_0^t T_{gap} \cdot dt}{t} \quad (6.2.3)$$

Primeiramente, simulou-se o experimento 1 do capítulo 5 impondo a modulação 1 na temperatura de alimentação do gás e tomando amplitude de 20°C, período de 55 minutos e a temperatura média do gás como a mesma temperatura do gás de alimentação na operação convencional. Em seguida, simulou-se a operação periódica e

convencional nas condições do experimento 5 do capítulo 5 para um tempo de secagem de 4 horas, porém variando algumas propriedades do sistema como descrito na tabela 6.2.1. Vale ressaltar que na simulação da operação convencional usou-se a temperatura média na alimentação do secador da operação periódica como sua temperatura de alimentação.

Tabela 6.2.1 – Condições da Simulação das Operações Periódicas e Convencionais

Condição	\overline{Tga} (°C)	Ys0	Modulação
A	50	0,25	1
B	50	0,15	1
C	50	0,10	1
D	50	0,25	2
E	50	0,10	2
F	40	0,10	1
G	35	0,10	1

Para cada tipo de condição (de A até G), foram realizadas simulações em períodos diferentes tomados em 12, 24, 48, 80 e 120 minutos e para cada período realizaram simulações variando a amplitude em 1, 10 e 20 °C.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1. Simulação da Secagem Periódica

A simulação do experimento 1 em operação periódica está representada pelos perfis de temperatura e umidade da soja e do gás apresentados pelas figuras a seguir. A figura 6.3.1.1 apresenta o perfil de temperatura do gás na entrada do leito, o qual representa uma função senoidal de amplitude de 20 °C e período de 55 minutos. O período foi tomado neste valor, pois foi possível obter 3 períodos no tempo de secagem e pelo fato de gasto energético para aquecer o ar ser equivalente ao gasto energético da operação periódica. Os cálculos referentes ao gasto energético serão apresentados no próximo item.

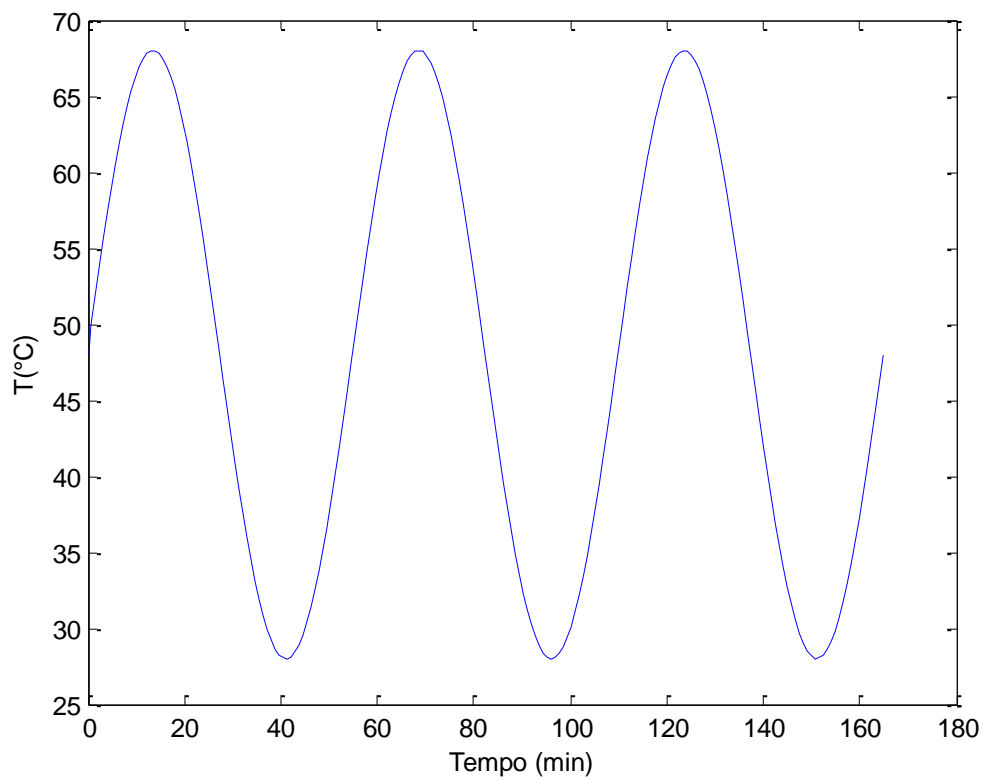


Figura 6.3.1.1 – Modulação da Temperatura de Alimentação do Gás

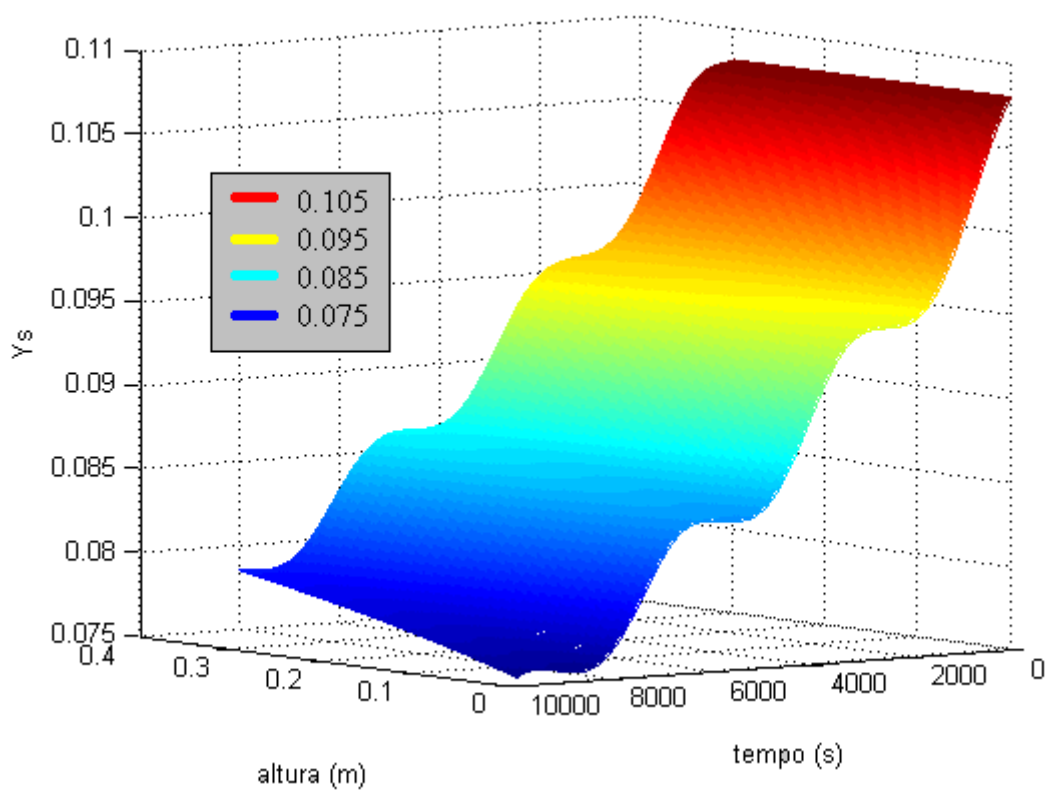


Figura 6.3.1.2 – Simulação do Perfil de Umidade da Soja para a Operação Periódica

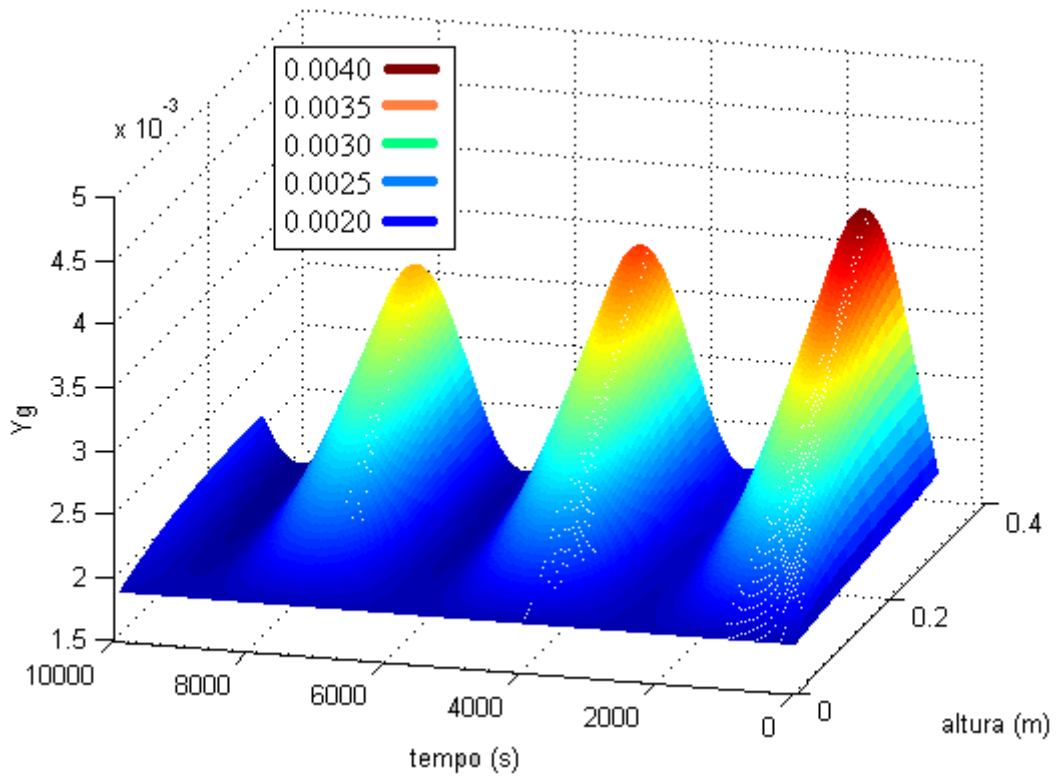


Figura 6.3.1.3 – Simulação do Perfil de Umidade do gás para a Operação Periódica

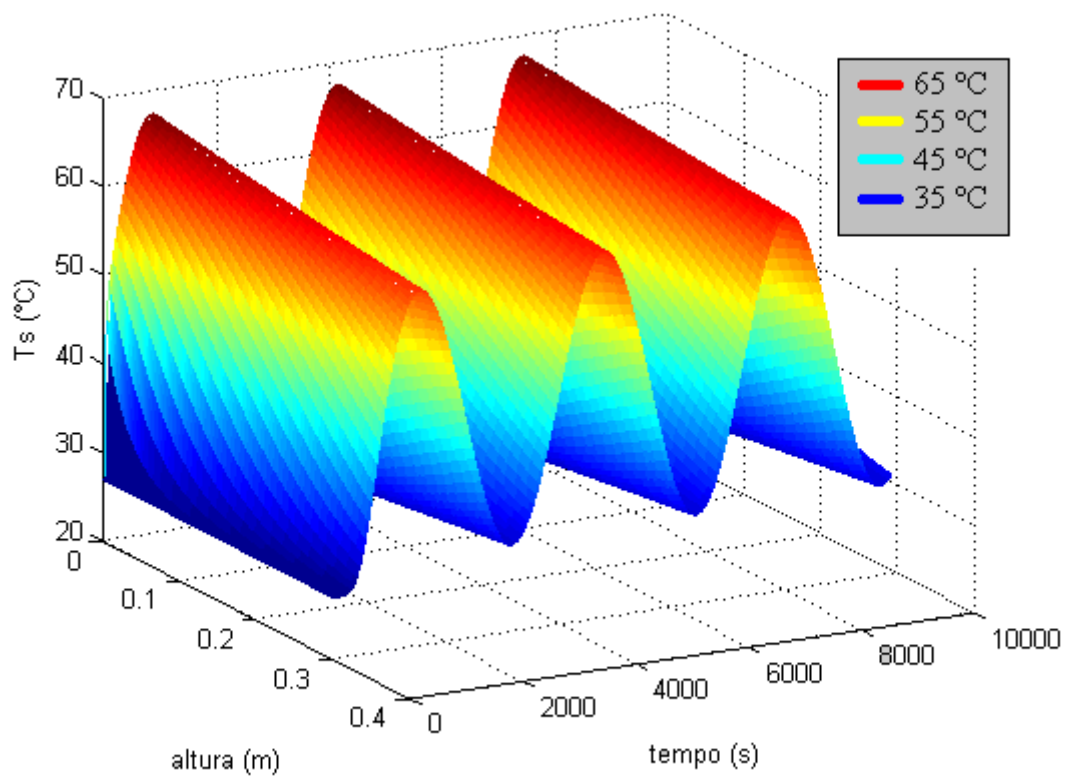


Figura 6.3.1.4 – Simulação do Perfil de Temperatura da Soja para a Operação Periódica

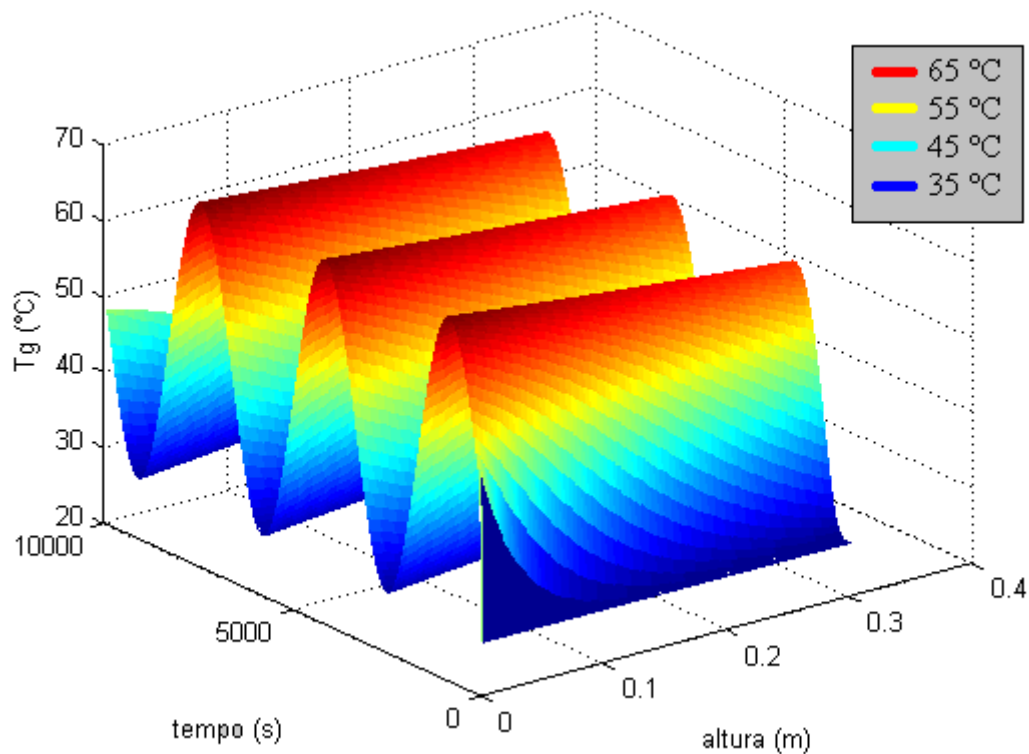


Figura 6.3.1.5 – Simulação do Perfil de Temperatura do Gás para a Operação Periódica

Dos resultados obtidos, observa-se que a imposição da modulação da temperatura do gás na entrada do leito modifica o comportamento da temperatura e umidade da soja e do gás no decorrer da secagem em leito fixo ao se comparar com a operação convencional. Para o perfil de umidade da soja, observa-se que para cada oscilação há uma tendência de um decaimento mais rápido da umidade quanto há aumento na temperatura e uma tendência a desaceleração na velocidade de evaporação da água nos períodos de decaimento da temperatura. Além disso, as oscilações nos perfis de umidade da soja se mostraram mais acentuadas no início do leito tendendo a um perfil similar ao da operação convencional no topo do leito. Este comportamento pode ser explicado devido ao fato da amplitude das oscilações tanto da temperatura do gás quanto a do sólido diminuir ao longo do leito, pois o sistema tende naturalmente ao equilíbrio térmico. Contudo, nas condições simuladas, os perfis de temperatura não chegaram a um valor constante em nenhuma parte do leito devido às perturbações na temperatura de entrada do gás e devido ao leito não ser longo suficiente para se alcançar um equilíbrio termodinâmico. Outro fato interessante é que os valores das temperaturas do sólido e do gás tendem ao mesmo resultado após os primeiros minutos da secagem como na operação convencional. Enquanto isso, o perfil de umidade do gás mostrou aumentar sua oscilação em direção ao topo do leito e diminuir a mesma com o tempo. Este comportamento pode ser indicado pelo fato de o ar receber mais água conforme caminha pelo leito e de a soja caminhar para a umidade de equilíbrio com o passar do tempo, o que acarreta a diminuição na taxa de água evaporada.

6.3.2 Comparação com a secagem convencional

A fim de se comparar as duas operações simuladas, definiram-se dois rendimentos, sendo um comparando a quantidade mássica de água evaporada em cada processo e outro comparando o gasto energético:

$$\text{Rendimento 1} = \frac{\dot{A}gua_{evp} - \dot{A}gua_{evc}}{\dot{A}gua_{evc}} \cdot 100\% \quad (6.3.2.1)$$

Onde $\dot{A}gua_{evp}$ é a massa de água evaporada no processo de secagem em operação periódica e $\dot{A}gua_{evc}$ em operação convencional.

$$\text{Rendimento 2} = \frac{E_c}{E_p} - 1 \quad (6.3.2.2)$$

Onde E_c e E_p são respectivamente os gastos energéticos do processo convencional e periódico que foram calculados pelas equações que seguem:

$$E_c = Gg \cdot A \cdot C_{par} \cdot \overline{Tga} \cdot t \quad (6.3.2.3)$$

Em que A é a área da seção transversal do leito dada em m^2 .

$$E_p = Gg \cdot A \cdot \int_0^t C_{par} \cdot Tgap \cdot dt \quad (6.3.2.4)$$

Onde a integral inerente ao cálculo de E_p foi realizada numericamente por meio da função trapz do Matlab®.

As simulações foram tomadas em condições em que o gasto energético nas duas operações, periódica e convencional, foi o mesmo, ou seja, em casos em que o rendimento 2 resultou em zero. Para isso os períodos foram tomados a fim de se formar um número exato de oscilações até o término da secagem, simulando a operação convencional com Tga igual a \overline{Tga} . Assim, a análise de qual operação é mais vantajosa pode se basear no cálculo do rendimento 1, cujos valores estão apresentados nas tabelas que seguem:

Tabela 6.3.2.1 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,25 para modulação 1

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	0,0041	0,0045	-0,021	-0,055	-0,094
10	0,057	0,079	-0,16	-0,49	-0,87
20	0,15	0,25	-0,17	-0,80	-1,5

Tabela 6.3.2.2 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,15 para modulação 1

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	0,010	0,013	-0,026	-0,077	-0,13
10	0,17	0,28	-0,061	-0,55	-1,1
20	0,50	0,93	0,40	-0,49	-1,5

Tabela 6.3.2.3 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	0,025	0,037	-0,014	-0,077	-0,14
10	0,46	0,80	0,40	-0,17	-0,81
20	1,4	2,7	2,2	1,3	0,13

Destes resultados, observou-se que na temperatura média do gás em 50°C operando na modulação 1, de forma geral, os rendimentos mostraram ser maior quanto menor a umidade inicial da soja, ou seja, isto indica que a operação periódica é mais vantajosa na etapa em que a secagem é limitada pelos transportes internos de massa na soja. Além disso, as simulações mostraram tendências de que para altos valores de período, ou seja, pouco número de oscilação na modulação de Tga, a operação periódica não foi vantajosa. Contudo, não foi observado que quanto maior o período, menor seria o rendimento. Na realidade, os resultados indicaram que para um dado tempo de secagem haverá um período específico em que o rendimento 1 será maximizado, e essa relação não se demonstrou linear.

Quanto a amplitude, para a maioria dos casos observou-se que quanto maior seu valor, maiores são os rendimentos 1, favorecendo assim a operação periódica. Este resultado é similar ao encontrado por Romero *et al.* (2010). Outro resultado similar ao encontrado por estes autores foi o comportamento da operação periódica se aproximar da convencional para amplitudes muito pequenas como mostra a figura (6.3.2.1). Nesta figura, cuja amplitude é de 1°C, observa-se que os perfis de umidade da soja e da umidade média da mesma são equivalentes ao perfil na operação convencional. Enquanto isso, na figura (6.3.2.2), cuja amplitude é de 20°C, o comportamento dos perfis de umidade da operação periódica já se mostram mais oscilatórios, tendendo a valores menores em comparação a operação convencional.

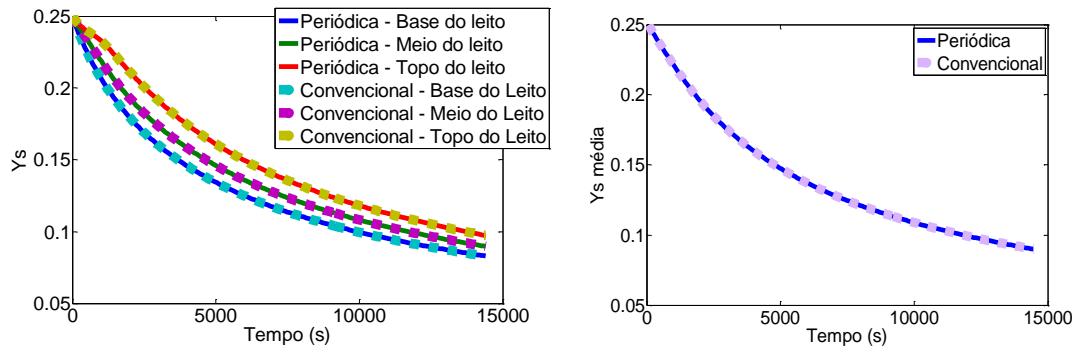


Figura 6.3.2.1 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C, Y_{s0} em 0,25, Amp de 1°C e Pe de 12 min

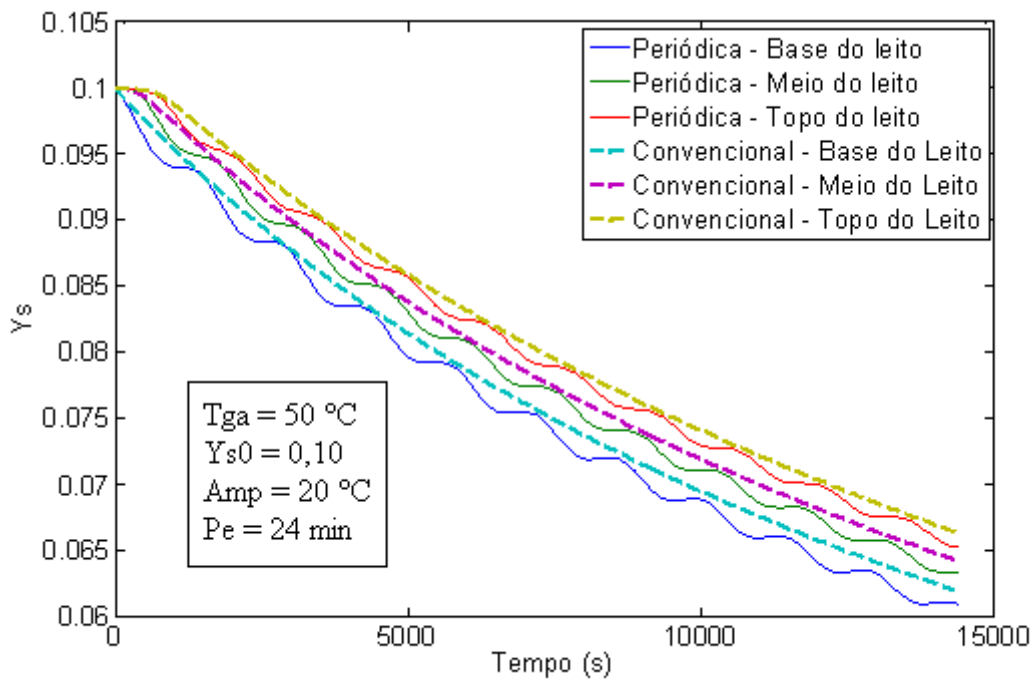


Figura 6.3.2.2 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C, Y_{s0} em 0,10, Amp de 20°C e Pe de 24 min

Tabela 6.3.2.4 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,25 para modulação 2

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	-0,0038	-0,0038	0,022	0,056	0,095
10	-0,023	-0,0053	0,26	0,61	1,0
20	-0,0082	0,068	0,63	1,3	2,1

Tabela 6.3.2.5 – Simulação a \overline{Tga} em 50 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 2

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	-0,021	-0,028	0,025	0,089	0,16
10	0,0013	0,15	0,77	1,4	2,1
20	0,51	1,3	2,8	4,1	5,5

Por outro lado, a operação em modulação 2 mostrou favorecer a operação periódica em períodos altos com baixas quantidades de oscilações, ou seja, em casos em que a secagem começa a baixas temperaturas e depois termina em altas temperaturas. Isto pode indicar que seja mais vantajoso se operar em altas temperaturas quando a secagem é limitada pelo transporte de massa interno na soja e em baixas temperaturas nos minutos iniciais, onde a influência da temperatura talvez não seja tão significativa contra outros fatores externos. Contudo, o impacto da amplitude e do valor da umidade inicial da soja foram análogos ao impacto na operação em modulação 1.

Tabela 6.3.2.6 – Simulação a \overline{Tga} em 40 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	0,046	0,071	-0,029	-0,16	-0,3
10	1,0	1,9	1,2	0,047	-1,3
20	3,5	6,9	6,6	4,8	2,6

Tabela 6.3.2.7 – Simulação a \overline{Tga} em 35 °C e Y_{s0} em 0,10 para modulação 1

Período (min)	12	24	48	80	120
Amplitude (°C)	Redimento 1 (%)				
1	0,074	0,12	-0,049	-0,27	-0,51
10	1,9	3,6	2,6	0,60	-1,7
20	6,8	13,6	13,8	11,0	7,5

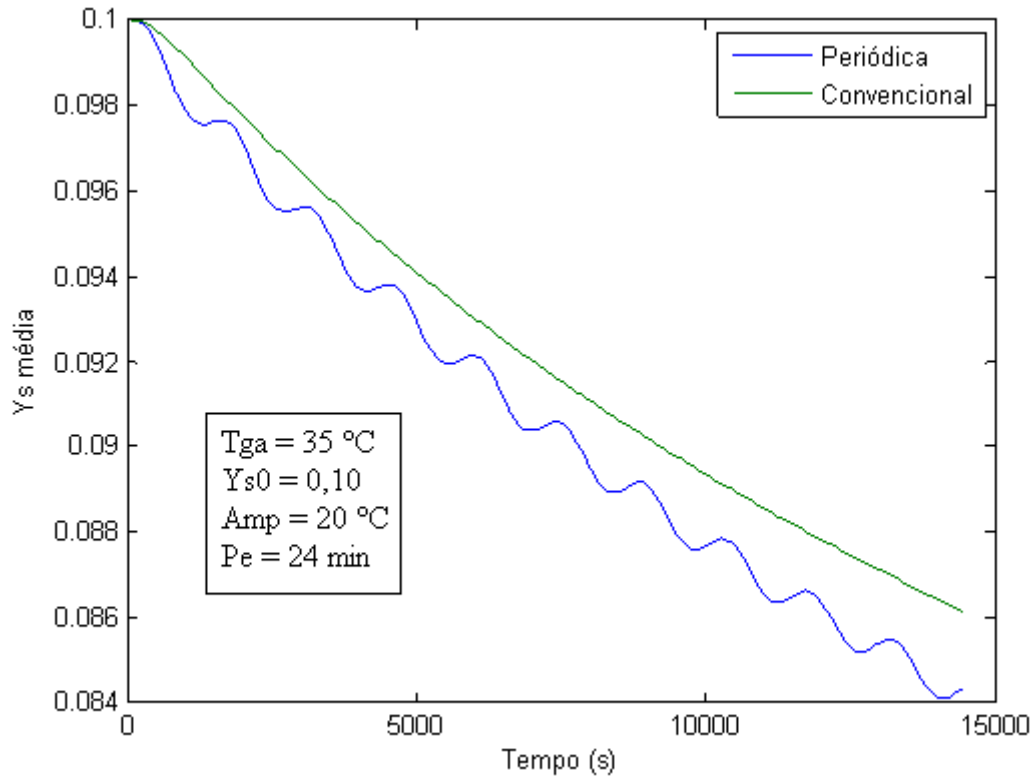


Figura 6.3.2.3 – Simulação a $\overline{T_{ga}}$ em 35 °C , Y_{s0} em 0,10, Amp de 20 °C e Pe de 24 min

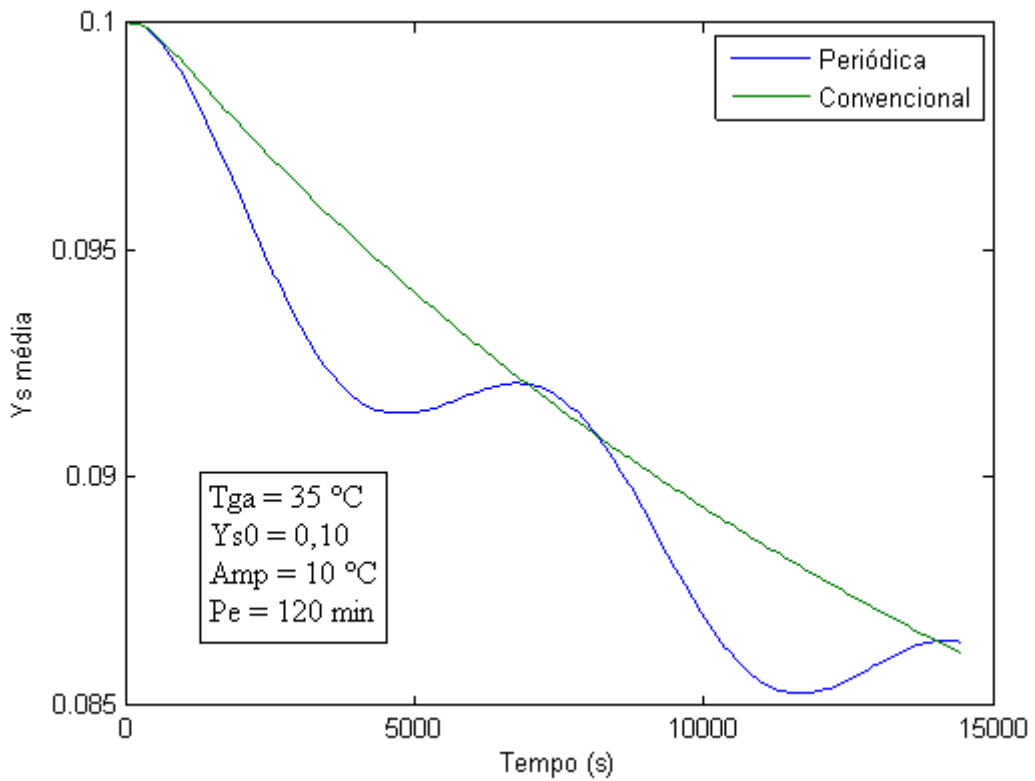


Figura 6.3.2.4 – Simulação $\overline{T_{ga}}$ em 35 °C , Y_{s0} em 0,10, Amp de 10 °C e Pe de 120 min

Os resultados referentes às simulações nas temperaturas médias do gás de alimentação mais baixas mostraram uma tendência de a operação periódica ser mais vantajosa quanto menor for o valor da \overline{Tga} trabalhada. Um fato interessante observado nas simulações a baixas temperaturas, principalmente no caso de \overline{Tga} em 35°C esquematizado pela figura 6.3.2.4, é o comportamento crescente da umidade da soja em alguns momentos da operação periódica. Isto pode ser explicado pelo fato de o modelo para K não ter sido validado a temperaturas menores que 33°C. Assim, com uma amplitude de 20 °C o valor da temperatura do gás chegou até 15 °C nas simulações e em temperaturas baixas o valor de K_s resultou em valores negativos, o que fisicamente significaria um movimento contrário do fluxo da água, ou seja, do gás para a soja. Contudo, analisando a questão do rendimento, caso se considere que a baixas temperaturas o ar não forneça energia suficiente para evaporar a água, observa-se que nas figuras (6.3.2.3) e (6.3.2.4) onde há um aumento da umidade a curva seria representada por uma reta na horizontal, o que aumentaria o rendimento 1. Vale ressaltar também que nas temperaturas muito baixas pode ser que haja mesmo um fluxo contrário de água devido a condensação da água presente no ar. Para este caso, seria interessante usar o modelo a três fases descrito na revisão bibliográfica. Por fim, o impacto da amplitude em simulações a baixas temperaturas mostrou ser análogo ao impacto causado por ela em altas temperaturas.

6.4 Conclusão

Por meio do modelo a duas fases para secagem de grãos em leito fixo foi possível simular a operação periódica com modulação de temperatura e compará-la com a operação convencional, por meio de cálculos de rendimentos que relacionam a eficiência da secagem para simulações com o mesmo gasto energético. Dos resultados obtidos, observou-se que a forma da modulação da temperatura, a amplitude da modulação, o período das oscilações e a umidade inicial da soja são propriedades que impactam nos resultados em se tratando da operação periódica ser ou não mais eficiente.

Altas amplitudes e baixas umidades da soja (região onde o transporte interno de massa limita o processo de secagem) mostraram ser propriedades que favorecem a operação periódica. Enquanto isso, o período é uma propriedade que pode favorecer essa operação dependendo de como é feita a modulação da temperatura e das condições do sistema, de forma que não houve um comportamento claro de como essa propriedade impacta nos rendimentos. Neste contexto, o modelo mostrou-se ideal para futuros estudos da otimização da operação periódica. Além disso, observou-se que o modelo para estimativa do coeficiente global de transferência de massa pode não ser ideal para baixas temperaturas, devido ao fluxo inverso de massa de água resultado nas simulações, sendo necessário validá-lo para faixas mais amplas de temperatura e umidade.

7. CONCLUSÃO GERAL

Para o sistema de aquecimento do ar de secagem, foi possível propor e validar um modelo estático de um aquecedor elétrico operando em regime permanente que relacionou o perfil de temperatura do ar na saída do aquecedor com a voltagem aplicada e as condições do meio em que o aquecedor está inserido com um desvio máximo em torno de 2,2%. Estes resultados estão dentro da ordem de precisão do termopar tipo K fornecida pelo fabricante. Além disso, o coeficiente global de transferência de calor ajustado pelo modelo esteve dentro da ordem de magnitude estimada pela literatura. Estes resultados apontam que este modelo pode ser utilizado para fins de simulação, análise e projeto de aquecedores elétricos.

No estudo do levantamento da cinética de secagem da soja em camada delgada, observou-se que o processo pode ser dividido em etapas limitadas tanto por efeitos externos quanto internos inerentes ao transporte de energia e de massa envolvidos. Os primeiros minutos da secagem se mostraram mais dependentes de fatores externos, enquanto que os outros se mostraram mais limitados pelos fatores internos. O modelo matemático representado por uma equação quadrática para estimação do coeficiente global de transferência de massa foi ajustado com adição dos resultados apresentados pela literatura, contemplando assim uma faixa maior para a umidade de trabalho da soja. Este modelo foi eficaz na determinação de K nas etapas limitadas pelo transporte interno de massa, mas não representou adequadamente os minutos iniciais da secagem inerentes a etapa em que os efeitos externos são mais predominantes. No estudo da sensibilidade dos parâmetros do modelo, observou-se que todos os parâmetros interferem de forma significativa na ordem de grandeza de K, sendo que se observou uma tendência caimento dessa interferência com o aumento da temperatura.

Quanto ao estudo da secagem em operação convencional de soja em leito fixo, notou-se que o modelo a duas fases validade representou o comportamento dos perfis de umidade e temperatura da soja e do ar com desvios máximos em torno de 15% para a quantidade de água evaporada e em torno de 9% para os perfis de temperatura. Contudo, a imprecisão na leitura da umidade do gás no topo e na alimentação do leito e a imprecisão nos primeiros minutos da secagem inerentes a estimação do coeficiente global de transferência de massa apontaram ser os fatores gerados dos desvios referentes aos perfis de umidade do ar no topo do leito. Acrescentando-se a isso, observou-se que a umidade inicial da soja, a temperatura do gás, a massa específica da soja seca, a porosidade do leito e o fluxo mássico do gás foram a propriedades que mais impactam em termos de ordem de grandeza nas simulações dos perfis de umidade e temperatura do sistema.

Por fim, a simulação e comparação das vantagens da secagem de soja em operação periódica com modulação da temperatura de alimentação do gás em leito fixo foram possíveis por meio do modelo a duas fases validado frente a dados experimentais no estudo da secagem convencional. Os resultados apontaram que a operação periódica pode ser mais vantajosa que a operação em regime permanente dependendo da forma da

modulação da temperatura, da amplitude dessa modulação, do período das oscilações e das etapas limitantes do processo inerentes a umidade da soja e das condições do sistema. Numa visão geral, notou-se que altas amplitudes e regiões onde o transporte interno de massa limita o processo de secagem (a baixas umidades) favorecem a operação periódica. Por outro lado, o período não mostrou um comportamento claro de como essa propriedade pode favorecer as operações, mas há indícios de que a otimização dessa propriedade pode favorecer a operação periódica dependendo de como a modulação da temperatura é feita e das condições em que a secagem é realizada.

Em base em tudo que foi obtido e analisado neste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros que se amplie a validação do modelo para estimação do coeficiente global de transferência de massa em maiores faixas de trabalho de umidade da soja e de temperatura e velocidade do gás. Além disso, recomenda-se que o modelo a duas fases seja validado em base de experimentos de secagem de soja em leito fixo realizados em operação periódica e que se use esse modelo para otimizar as melhores condições em que a operação periódica seja mais vantajosa que a operação em regime permanente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

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.

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.

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.

CALADO, V. M. DE A. *Modelagem e Simulação de Secadores em Leitos 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.

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.

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.

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

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

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

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.

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.

LIMA, O. C. da M. *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.

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

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. Cap. 3.2, p 117 – 155. A

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. Cap. 5.1, p 253 – 287. B

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.

MCCABE, W. L. *Unit Operations of Chemical Engineering*. Editora McGraw-Hill, 1993. 5ª Edição.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO disponível em:

<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/soja> Data de Acesso: 18/11/2012

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO disponível em:

http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Sala%20de%20Imprensa/Publica%C3%A7%C3%B5es/graficos_portugues_corrigido2.pdf Data de Acesso: 18/11/2012

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

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)

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

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.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. Editora LTC, 7ª Edição. Rio de Janeiro, 2007.
- 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 Açafrão e Açafrão 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. *Qualidade dos Grãos. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas*. Editora Aprenda Fácil. Segunda Edição. Viçosa, MG. 2008. p. 63 – 104.
- 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.
- 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
- 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.
- TUKAC, V.; HANIKA, J.; CHYBA, V. *Periodic state of wet oxidation in trickle-bed reactor*. Catalysis Today 79-80 (2003) 427-431.