

EMÍLIO DE SOUZA SANTOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ EM
LEITO FIXO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S237s
2011

Santos, Emílio de Souza, 1985-
Simulação computacional de secagem de frutos de café
em leito fixo / Emílio de Souza Santos. – Viçosa, MG, 2011.
xvi, 70f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Paulo Cesar Corrêa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 60-62.

1. Café - Secagem. 2. Métodos de simulação. 3. Modelica.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 633.736

EMÍLIO DE SOUZA SANTOS

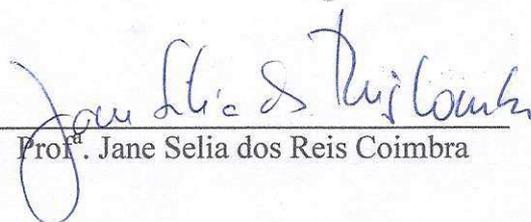
**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SECAGEM DE FRUTOS DE CAFÉ EM
LEITO FIXO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de novembro de 2011.



Prof.^a. Maria del Carmen Jarén Ceballos

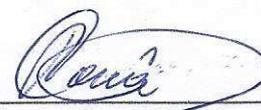


Prof.^a. Jane Selia dos Reis Coimbra



Prof. Brian Lynn Steward

(Co-orientador)



Prof. Paulo Cesar Corrêa

(Orientador)

As minhas mães Silvana Campos de Sousa Ramos e Deliria Pereira Santos pelo amor e dedicação essencial para minha vida, sem elas não existiria ferramentas para construir, nem razão para buscar o sucesso.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A minha tia Deliria Pereira Santos, pela eterna dedicação e apoio para todo sucesso em minha vida.

A minha mãe Silvana Campos de Souza, pelo amor e carinho incondicional.

A minha flor Juana Lucini, pelo amor intenso, mimos e carinhos.

A minha família, pela união, apoio e orações.

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação, conselhos, ensinamentos, apoio e amizade para que eu conseguisse concluir mais um sucesso em minha vida profissional.

Aos professores Brian Lynn Steward e Daniel Marçal de Queiroz, pelo auxílio e sugestões.

Aos grandes amigos Vicente, Valdir, Henrique e Afrânio, pelo amor e amizade.

Aos amigos Isaque Visa, Márcio Andrade e Fernanda Baptestini pelo auxílio na elaboração da dissertação.

Aos amigos de laboratório, pelo companheirismo e apoio essencial para a condução do trabalho.

Aos amigos da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco (Codevasf), pelo incentivo e ajuda durante a construção da dissertação.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), pela companhia e conforto durante o período de estudos.

Aos amigos Fanfarrões de Muriaé e do CS Brasília, pela descontração e diversão.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela ajuda na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

À Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que de alguma forma contribuíram para que esta importante etapa de minha vida se realizasse.

BIOGRAFIA

EMÍLIO DE SOUZA SANTOS, filho de Lírío Ferreira Santos e Silvana Campos de Sousa Ramos, nasceu na cidade de Muriaé, estado de Minas Gerais, em 31 de outubro de 1985.

Em março de 2005 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa (MG), graduando-se em janeiro de 2010. No período de agosto de 2008 a janeiro de 2010, foi bolsista de iniciação científica CNPq, auxiliando e desenvolvendo pesquisas com o grupo de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas da UFV.

Em março de 2010 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de *Magister Scientiae*, em novembro de 2011.

Ultimamente EMÍLIO SANTOS é Analista em Desenvolvimento Regional da Companhia de Desenvolvimento do Vale dos São Francisco e Parnaíba (CODEVASF), em Brasília (DF).

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE SÍMBULOS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1. <i>Linguagem Modelica</i>	5
2.2. <i>Modelagem</i>	6
2.3. <i>Dados experimentais</i>	14
2.4. <i>Validação do modelo</i>	15
2.5. <i>Análise de sensibilidade modelo</i>	15
2.6. <i>Comparação entre os modelos</i>	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
3.1. <i>Avaliação do modelo proposto</i>	19
3.2. <i>Comparação entre os modelos</i>	25
3.3. <i>Análise de sensibilidade dos parâmetros</i>	35
3.3.1. <i>Análise geral</i>	35
3.3.2. <i>Análise específica de cada parâmetro</i>	37
3.3.3. <i>Análise comparativa entre os modelos</i>	54
4. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE A	63
APÊNDICE B	69

RESUMO

SANTOS, Emílio de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Novembro de 2011. **Simulação Computacional de Secagem de Frutos de Café em Leito Fixo.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Co-Orientadores: Brian Lynn Steward e Daniel Marçal de Queiroz.

Objetivou-se com este trabalho: modelar o processo de secagem de frutos de café em leito fixo, considerando a variação de algumas propriedades do produto e do fluxo de ar; validar este novo modelo por meio da comparação dos resultados simulados com resultados obtidos experimentalmente; analisar a sensibilidade dos parâmetros do modelo; e comparar o desempenho do modelo proposto com um modelo tradicional (modelo de Michigan). Um modelo de secagem em camada fina foi desenvolvido, baseado no balanço de calor e de massa entre o produto e o ar de secagem, considerando a variação das propriedades do produto e do fluxo de ar durante o processo. Assim, um modelo de secagem em camada espessa foi criado conectando-se quatro modelos de secagem em camada fina. O modelo proposto foi implementado em linguagem *Modelica*, simulado utilizando-se o software *OpenModelica*[®] 1.6.0, e validado analisando-se a magnitude dos valores do erro médio relativo e o índice de desempenho dos resultados simulados em relação aos valores experimentais. O modelo proposto foi comparado com o modelo de Michigan, analisando o desempenho estatístico e o viés relativo de cada modelo. Finalmente, com o objetivo de simplificar a estrutura e de se entender a dinâmica do modelo proposto, compreendendo também as considerações que o diferenciam do modelo de Michigan, foi realizada a análise de sensibilidade diferencial e subjetiva dos parâmetros e variáveis do modelo. O modelo proposto apresentou um erro médio relativo menor que 10 % e um índice de desempenho maior que 85 % para todos os testes simulados, indicando uma representação satisfatória das condições simuladas. Porém o modelo de Michigan apresentou um erro médio relativo maior que 10 % e/ou um índice de desempenho menor que 85 % para todos os testes simulados, indicando que o modelo não representa satisfatoriamente as condições simuladas. Foi verificado com a análise de viés que o modelo proposto superestima ligeiramente os valores de teor de água, ao contrario do modelo de Michigan que subestima expressivamente os valores simulados. Após a análise de sensibilidade dos parâmetros e variáveis, concluiu-se que: a) o modelo proposto não é sensível a variação das propriedades físicas do produto, com exceção do calor latente de vaporização da

água no interior do produto; b) provavelmente o modelo proposto tende a superestimar os valores do teor de água devido à variação das propriedades do ar e do calor latente de vaporização da água no interior do produto, além da consideração do período de temperatura constante do produto no início do processo; c) provavelmente o modelo proposto tende a subestimar os valores do teor de água devido à consideração da contração da camada de produto e variação da pressão e fluxo de massa do ar.

ABSTRACT

SANTOS, Emílio de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2011. **Computational Simulation of Fixed-bed Drying of Coffee Berries.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Co-Advisers: Brian Lynn Steward and Daniel Marçal de Queiroz.

The aims of this work were to: model fixed-bed drying of coffee berries considering the product and air flow properties variation; validate this new model by comparing the simulation results with the experimental data; analyze the sensitivity of each model parameter; and compare the performance of the proposed model with a traditional model (Michigan Model). A thin-layer drying model was developed, based on mass and heat balance between the drying air and the product. Moreover, it was considered the product and air flow properties variation during the process. Thus a thick layer drying model was created by connecting four thin-layer models. The proposed model was implemented in *Modelica* language and simulated using *OpenModelica*[®] 1.6.0. The proposed model was validated by the analysis of model performance index and relative standard deviation between the experimental data and simulated results. The proposed model was compared with the Michigan model by the analysis of the statistical performance and relative bias of each model. Finally, in order to simplify the model structure and understand its dynamics, including the consideration that it is different of the Michigan model, it was done the differential and subjective model parameter and variable sensitivity analysis. The proposed model presented values of relative standard deviation lower than 10 % and values of performance index higher than 85 % for all simulated tests, indicating satisfactory representation of the studied phenomena. However, the Michigan model presented values of relative standard deviation higher than 10 % and/or values of performance index lower than 85 % for all simulated tests, indicating that the model does not satisfactorily represent of the studied phenomena. It was verified by the bias analysis that the proposed model slightly overestimates the moisture content values, unlike the Michigan model that significantly underestimates the values. After the model parameter and variable sensitivity analysis, it was concluded that: a) the proposed model is not sensitive to the product physical properties variation, excluding the water latent heat inside the product; b) probably the proposed model tends to overestimate the moisture content value due to the variation of the air properties and of the water latent heat inside the product, as well as the

consideration of the constant temperature period during the process' begin; c) probably the proposed model tends to underestimate the moisture content value due to the consideration of the product layer shrinkage and the air flow and pressure variation.

LISTA DE SÍMBOLOS

Subíndices

am	ar ambiente
a	entrada
b	saída
i	inicial

Índices

c_{ar}	calor específico do ar seco, $1006,9 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
c_p	calor específico do produto, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
c_v	calor específico do vapor de água, $1875,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
d	índice de Willmott, adimensional
d_p	diâmetro médio da partícula, m
dx	espessura diferencial da camada, m
f	fator de fricção, adimensional
H	razão de mistura do ar, kg de água kg^{-1} de ar seco
h	entalpia do ar úmido, kJ kg^{-1}
h_{lp}	calor de latente de vaporização da água no produto, kJ kg^{-1}
h_{lw}	calor latente de vaporização da água na temperatura de referência, $2502,535 \text{ kJ kg}^{-1}$
i	índice de desempenho, adimensional
k	constante de secagem, s^{-1}
k_h	coeficiente de transferência de calor, $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
k_r	constante de secagem de referência, h^{-1}
L	espessura da camada de produto; m
M	teor de água do produto, kg de água kg^{-1} de matéria seca
dM/dt	taxa de secagem do produto, kg de água kg^{-1} de matéria seca s^{-1}
M_e	teor de água de equilíbrio do produto, kg de água kg^{-1} de matéria seca
m''	fluxo de massa de ar, $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
m_v''	fluxo de massa de vapor, $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
MM_{ar}	massa molar do ar, $28,97 \text{ kg kmol}^{-1}$
n	número de observações experimentais
p	pressão do ar, Pa

p_f	perda de pressão por fricção, Pa
p_{sat}	pressão de vapor de saturação de referência, Pa
p_v	pressão de vapor do ar, Pa
p_{vsat}	pressão de vapor de saturação do ar, Pa
R	constante universal dos gases, $8314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
r	coeficiente de correlação, adimensional
$R', A,$ $B, C, D,$ $F \text{ e } G$	coeficientes empíricos da equação de Keenan e Keyes
RB	viés relativo, adimensional
Re	número de Reynolds modificado, adimensional
rh	umidade relativa do ar, adimensional
RSD	erro médio relativo, adimensional
$S_{X,\beta}$	coeficiente de sensibilidade da variável X para a variação de β
T	temperatura do ar, K
T_0	temperatura de referência, 273,15 K
T_c	temperatura do ar de entrada no volume de controle, °C
T_p	temperatura do produto, K
dT_p/dt	taxa de variação da temperatura do produto, K
T_s	temperatura do ar de secagem, K
v	volume unitário do fruto de café, m^3
V	velocidade do ar, m s^{-1}
V_r	velocidade do ar de referência, m s^{-1}
X	valor da variável resposta para o caso base
X'	valor da variável resposta para a variação de β
Y	valor observado experimentalmente
\hat{Y}	valor predito pelo modelo
\square	média dos valores experimentais
μ_{ar}	viscosidade dinâmica do ar, Pa s
β	valor do parâmetro analisado para o caso base
β'	valor variado do parâmetro
ε	porosidade do produto, adimensional
ρ_{ar}	massa específica do ar úmido, kg m^{-3}
ρ_p	massa específica volumétrica do produto, kg m^{-3}

LISTA DE TABELAS

- pg. 14** **Tabela 1.** Condições ambientais e de secagem do café do experimento de Corrêa (1982).
- pg. 16** **Tabela 2.** Condições ambientais, iniciais e de secagem do café para o caso base.
- pg. 24** **Tabela 3.** Índice de Willmott, coeficiente de correlação, índice de desempenho, erro médio relativo e viés relativo do modelo proposto para cada teste simulado.
- pg. 30** **Tabela 4.** Índice de Willmott, coeficiente de correlação, índice de desempenho, erro médio relativo e viés relativo do modelo MSU para cada teste simulado.
- pg. 31** **Tabela 5.** Índice de desempenho e erro médio relativo do modelo proposto, do modelo MSU e a diferença absoluta entre os modelos, para cada teste simulado.
- pg. 36** **Tabela 6.** Coeficientes de sensibilidade S_M , S_{rh} , S_{Tp} , S_T e S_t do modelo proposto devido à variação dos parâmetros analisados.
- pg. 55** **Tabela 7.** Tendência de variação dos parâmetros/variáveis, resposta na taxa de secagem e teor de água, e coeficiente de sensibilidade do teor de água em resposta a variação parâmetros/variáveis analisados.
- pg. 56** **Tabela 8.** Valores mínimos, valores máximos, amplitude relativa e coeficiente de sensibilidade corrigido dos parâmetros rh , T_p , h_{lp} , V , L e p .

LISTA DE FIGURAS

- pg. 06** **Figura 1.** Volume de controle considerado no modelo de camada delgada.
- pg. 13** **Figura 2.** Esquema da hierarquia do modelo de secagem em leito fixo.
- pg. 18** **Figura 3.** Volume de controle considerado no modelo de camada delgada do modelo MSU (a) em comparação ao modelo proposto (b).
- pg. 19** **Figura 4.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.1.
- pg. 20** **Figura 5.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.2.
- pg. 20** **Figura 6.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.3.
- pg. 21** **Figura 7.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.1.
- pg. 21** **Figura 8.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.2.
- pg. 22** **Figura 9.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.3.
- pg. 22** **Figura 10.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.1.
- pg. 23** **Figura 11.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.2.
- pg. 23** **Figura 12.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.3.
- pg. 25** **Figura 13.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.1.
- pg. 26** **Figura 14.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.2.
- pg. 26** **Figura 15.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.3.
- pg. 27** **Figura 16.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.1.
- pg. 27** **Figura 17.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.2.

- pg. 28** **Figura 18.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.3.
- pg. 28** **Figura 19.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.1.
- pg. 29** **Figura 20.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.2.
- pg. 29** **Figura 21.** Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.3.
- pg. 32** **Figura 22.** Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 40.1, 40.2 e 40.3.
- pg. 33** **Figura 23.** Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 50.1, 50.2 e 50.3.
- pg. 34** **Figura 24.** Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 60.1, 60.2 e 60.3.
- pg. 38** **Figura 25.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar de secagem (T_s).
- pg. 39** **Figura 26.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água inicial do produto (M_i).
- pg. 40** **Figura 27.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na velocidade do ar de entrada (V).
- pg. 41** **Figura 28.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na espessura inicial da camada (L_i).
- pg. 42** **Figura 29.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na

temperatura inicial do produto (T_{pi}).

- pg. 44** **Figura 30.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na constante de secagem (k).
- pg. 45** **Figura 31.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água de equilíbrio (M_e).
- pg. 46** **Figura 32.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no coeficiente de transferência de calor (k_h).
- pg. 47** **Figura 33.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor latente de vaporização da água do produto (h_{ip}).
- pg. 48** **Figura 34.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar ambiente (T_{amb}).
- pg. 49** **Figura 35.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na umidade relativa do ar ambiente (rh_{amb}).
- pg. 50** **Figura 36.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão de vapor do ar ambiente (p_{vamb}).
- pg. 51** **Figura 37.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão do ar ambiente (p_{amb}).

- pg. 52** **Figura 38.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na massa específica do ar (ρ_{ar}).
- pg. 53** **Figura 39.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor específico do ar (c_{ar}).
- pg. 54** **Figura 40.** Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor latente de vaporização da água (h_{lw}).

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a contribuição da produção cafeeira para a formação econômica foi uma constante durante muito tempo, mas devido à diversificação das exportações, a participação relativa diminuiu. Mesmo assim, o café continua sendo um importante produto, representando 2,9 % das exportações brasileiras (MDIC, 2010), sendo o Brasil o maior exportador mundial, participando em 34,62 % do total das exportações de café em 2010 (SEBRAE, 2011). Além disto, o consumo interno só tem aumentado, fazendo do Brasil o segundo maior consumidor de café no mundo. Neste contexto Minas Gerais se apresenta como o maior produtor de café do país, com cerca de 50 % da produção nacional (CONAB, 2010). O parque cafeeiro mineiro abrange mais de 80 mil propriedades e aproximadamente 60 % dos municípios.

O café após a colheita apresenta uma alta perecibilidade, devido ao alto teor de água e açúcares. Para seu armazenamento e futuro processamento, o café passa por uma intensa operação de secagem. A secagem é a operação mais utilizada para a conservação de produtos agrícolas, a qual necessita de uma grande quantidade de energia, conseqüentemente gerando assim um alto custo de operação (Dincer, 1998).

Devido à tradição e ao baixo custo, a secagem em terreiros ainda é muito utilizada para a secagem de café, principalmente no estado de Minas Gerais. No entanto, esta técnica é extremamente dependente do clima, e favorece a contaminação de microrganismos e insetos (Toğrul, 2005), o que pode diminuir a qualidade da bebida do café. Além de não apresentar estes dois problemas, a secagem artificial apresenta algumas vantagens em relação ao terreiro, como: menor tempo de secagem, o uso de menor área, possibilita o planejamento da colheita. Porém, a secagem artificial deve ser controlada para manter a qualidade final do café, evitando-se temperaturas do ar de secagem superior a 45 °C (Sfredo et al., 2005).

A secagem é definida como uma operação de remoção de água do produto devido à transferência simultânea de calor e de massa. O sistema deve suprir a energia para a evaporação da água do produto e proporcionar meios de remoção desta água (Henderson et al., 1997). Como resultado, o ar de secagem após passar por uma camada delgada de produto, tem sua temperatura diminuída e sua umidade relativa aumentada. Em contra partida, o produto tem diversas propriedades físicas alteradas, devido à remoção de água e aumento na temperatura. Conseqüentemente, a secagem em leito

fixo é um sistema dinâmico complexo, considerando que a cinética da secagem irá mudar devido às alterações nas propriedades do ar de secagem e do produto, tanto temporal quanto espacialmente.

A modelagem é definida como o processo de projetar modelos que representem um sistema físico generalizado. A simulação é definida como uma particularização de um modelo com o propósito de avaliar casos específicos do sistema. Assim a simulação representa uma importante ferramenta, oferecendo informação para a otimização e correção de falhas, com o objetivo de reduzir o custo tanto do manejo, quanto de projetos do sistema em estudo.

Diversos modelos foram criados com o objetivo de simular a secagem em leite fixo. O modelo mais conhecido é o de MSU (Michigan State University), que consiste num sistema de quatro equações diferenciais resultantes do balanço de massa e de energia em um volume de controle (Dalpasquale e Sperandio, 2010). As considerações do modelo MSU tornam-no de fácil aplicação para diferentes produtos, aproximando o calor latente de vaporização do produto à da água livre e desconsiderando a variação das propriedades físicas do ar e do produto durante o processo. Porém Dalpasquale et al. (2009) demonstraram que a desconsideração das equações psicrométricas na simulação de secagem pode distorcer os balanços de energia e de massa do processo de secagem.

Com o avanço da tecnologia de computadores e desenvolvimento de softwares, modelos mais complexos puderam ser implementados, aproximando cada vez mais os resultados simulados da realidade. Alguns exemplos recentes de modelos de secagem foram desenvolvidos por: Izadifar e Mowla (2003), os quais introduziram os conceitos de convecção simultânea de calor e de massa e de difusão interna de massa no modelo; Zare et al. (2006) que propôs um modelo de secagem em camada fina considerando a variação das propriedades do ar e do produto; Guiné et al. (2007), que basearam seu modelo na teoria da difusão líquida, considerando a contração do produto e a variação das propriedades termofísicas do produto ao longo da secagem; Lecorvaisier et al. (2010), os quais incluíram no modelo os fenômenos dinâmicos de turbulência do ar.

Um dos fatores que torna os sistemas de secagem ainda mais complexos são os diferentes tipos de mecanismos utilizados como motores, ventiladores, transportadores, trocadores de calor e controladores. Cada mecanismo realiza operações específicas no sistema, mas ao mesmo tempo, possui seu desempenho afetado pela dinâmica de todo o sistema. A simulação deste tipo de sistema geralmente é realizada simulando-se cada mecanismo individualmente. Isto é devido à dificuldade de se criar um único modelo

que abranja todos os domínios físicos envolvidos no processo, e.g., elétrico, mecânico, termodinâmico, hidráulico, químico, e de controle.

Modelica é uma linguagem de programação que permite a especificação de modelos matemáticos para a representação de sistemas dinâmicos (Mattsson et al., 1998). Esta linguagem possui algumas características que a torna uma poderosa ferramenta para a modelagem e simulação de sistemas físicos. Ela é baseada em equações, o que facilita a implementação de modelos matemáticos para a linguagem computacional. Ela é uma linguagem orientada a objetos, baseada no conceito de unificação e conexão de classes, facilitando o reuso de modelos gerais (de baixo nível) em modelos mais complexos (de alto nível). Ela possui a capacidade de modelagem em multidomínios, e.g., elétrico-mecânico. Assim modelos oriundos de diferentes domínios físicos podem ser herdados e/ou conectados para a criação de um complexo modelo de alto nível (Fritzson, 2003).

Portanto, a linguagem *Modelica* apresenta algumas vantagens ao descrever sistemas de secagem: a) como a linguagem é baseada em equações há facilidade em descrever o fenômeno de secagem, pois todo balanço, propriedades do fluido de secagem e do produto a ser seco são descritos na literatura por equações matemáticas; b) com o conceito de unificação de classes (*herança*) os modelos básicos que descrevem o processo não precisam ser reescritos ao criar modelos de secadores distintos; c) com o conceito de conexão de classes é possível criar um único modelo capaz de descrever secadores tipo leito fixo, fluxo concorrente e fluxo contra-concorrente, apenas alterando a direção do fluxo de ar e de produto; d) com a capacidade de modelagem em multidomínio é capaz de criar um modelo que descreva todo o sistema, e.g., ventiladores, resfriadores, transportadores; e) as propriedades de produtos distintos podem ser criadas em diferentes submodelos, armazenada em um pacote específico e utilizadas (herdadas) por diferentes modelos de secagem.

A modelagem em linguagem *Modelica* já foi utilizada em diversas pesquisas como por: Pujana-Arrese et al. (2010), para a modelagem de braços mecânicos pneumáticos; Sodja e Zupančič (2009), para a modelagem de processos térmicos em construções; Slätteke (2006), para a modelagem de sistemas controlados de secagem de papel.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho:

- ✓ Modelar o processo de secagem de frutos de café em leito fixo considerando a variação de algumas propriedades físicas do produto e do fluxo de ar de secagem.
- ✓ Implementar o modelo de simulação de secagem em leito fixo na linguagem *Modelica*.
- ✓ Validar o modelo matemático implementado por meio da comparação de resultados simulados com dados experimentais.
- ✓ Analisar a performance do modelo proposto em relação modelo MSU por meio da comparação dos índices estatísticos de desempenho obtidos por ambos os modelos em relação aos dados experimentais.
- ✓ Analisar a sensibilidade dos parâmetros e variáveis do modelo proposto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais.

2.1. Linguagem Modelica

Modelica é uma linguagem de modelagem matemática a qual se baseia nos conceitos de *orientação de objetos* para estruturação dos modelos para representação de sistemas físicos. Nesta linguagem os diversos componentes e mecanismos associados a fenômenos físicos são definidos por uma *classe* específica. A cada *classe* são associadas a *variáveis*, as quais representam propriedades da classe. O comportamento de cada *classe* é descrita por *equações*, as quais podem ser escritas de forma algébrica, matricial e diferencial.

Um dos maiores benefícios da orientação de objetos é a característica de *estender* as propriedades (variáveis) e o comportamento (equações) de uma classe para outra (Fritzson, 2003). Este processo é conhecido como *herança*, em que as características de uma ou mais *classes bases* são estendidas a uma *subclasse*. A hierarquização dos modelos é realizada por níveis, em que as classes são classificadas com um nível acima da classe herdada de maior nível.

Uma característica específica da linguagem *Modelica* é a de *conexão*, que representa a conservação entre as variáveis comuns das classes conectadas. Ao se conectar duas classes suas variáveis potenciais são igualadas, e suas variáveis de fluxo são somadas a zero.

Outro conceito importante da orientação de objetos é a restrição de classe. As classes são organizadas em tipos, as quais possuem características de linguagem específicas. Os tipos de classes utilizados neste trabalho são: *conector*, classe utilizada para conectar variáveis de outras classes; *modelo*, classe restrita a função conectar; *record*, classe utilizada para armazenamento de dados e parâmetros; e *pacote*, classe utilizada para armazenamento de classes.

2.2. Modelagem

O leito fixo de frutos de café foi considerado como uma camada espessa composta por um número finito de camadas delgadas. O volume de controle que delimita cada camada delgada possui uma área transversal fixa A , e uma espessura variável L . A dinâmica da secagem em cada volume de controle foi aproximado às teorias de secagem em camada delgada. Na Figura 1 está apresentado um esquema do modelo de camada delgada.

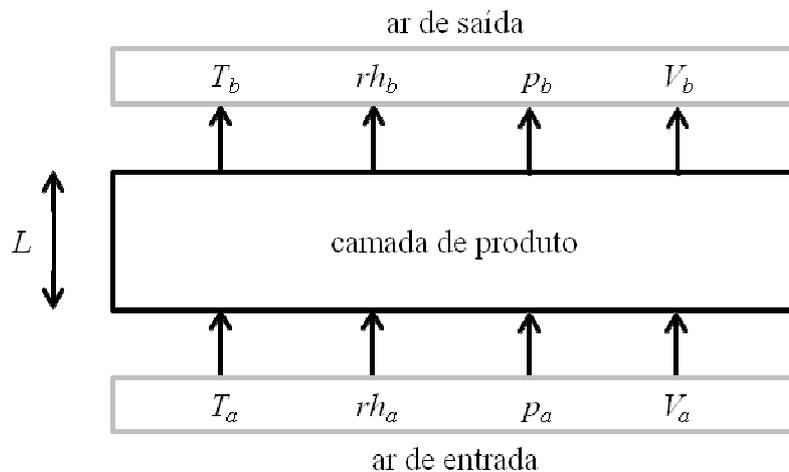


Figura 1. Volume de controle considerado no modelo de camada delgada.

Os conectores do modelo de camada delgada foram assumidos como variáveis do ar de secagem, como apresentado na Figura 1. A *variável de fluxo* dos conectores é a velocidade do ar (V), proporcional ao fluxo de massa. As *variáveis potenciais* são temperatura (T), pressão (p) e umidade relativa (rh). O sub-índice a denota que as variáveis são de entrada e o sub-índice b denota que estas são variáveis de saída.

Modelos de primeiro nível foram criados contendo os conectores e as equações psicrométricas do ar. Os modelos de entrada e saída do ar ambiente, nomeados *Input* e *Output*, necessitam apenas de um conjunto de conectores, entrada ou saída. Para estes modelos foram criado um modelo de primeiro nível nomeado *PartialOnePort*, contendo apenas um conjunto de conectores. Já os demais modelos possuem variáveis tanto de entrada quanto de saída. Para estes modelos foi criado um modelo de primeiro nível nomeado *PartialTwoPort*.

A pressão de vapor de saturação foi descrita em função da temperatura pela equação empírica de Keenan e Keyes (Henderson et al., 1997). A pressão de vapor de

saturação foi utilizada para calcular a umidade relativa do ar na saída do volume de controle.

$$\ln\left(\frac{p_{vsat}}{R'}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \quad \text{Eq. 1}$$

em que: p_{vsat} é a pressão de vapor de saturação do ar, Pa; T é a temperatura do ar, K; R' , A , B , C , D , F e G são os coeficientes de ajuste do modelo.

A pressão de vapor, razão de mistura, entalpia e massa específica do ar foram calculadas utilizando de equações psicrométricas básicas, formuladas a partir da lei da mistura de gases perfeitos de Dalton e no princípio de conservação de massa e de energia.

$$H = \frac{p_v}{1.605(p - p_v)} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\rho_{ar} = \frac{(1 + H)(p - p_v) MM_{ar}}{RT} \quad \text{Eq. 3}$$

$$p_v = rh p_{vsat} \quad \text{Eq. 4}$$

$$h = c_{ar}(T - T_0) + H [h_{lw} + c_v(T - T_0)] \quad \text{Eq. 5}$$

em que: H é a razão de mistura do ar, kg de água kg⁻¹ de ar seco; p é a pressão do ar, Pa; p_v é a pressão de vapor do ar, Pa; ρ_{ar} é a massa específica do ar úmido, kg m⁻³; MM_{ar} é a massa molar do ar, 28,97 kg kmol⁻¹; R é a constante universal dos gases, 8314 J mol⁻¹ K⁻¹; rh é a umidade relativa do ar, adimensional; h é a entalpia do ar úmido, kJ kg⁻¹; h_{lw} é o calor latente de vaporização da água livre na temperatura de referência, 2502,535 kJ kg⁻¹; T_0 é a temperatura de referência, 273,15 K; c_{ar} é o calor específico do ar seco, 1006,9 J kg⁻¹ K⁻¹; e c_v é o calor específico do vapor de água, 1875,7 J kg⁻¹ K⁻¹.

Neste mesmo modelo foi calculado o fluxo de massa de ar e de vapor que serão utilizados nos modelos de maior nível, nos quais serão realizados os balanços de calor e de massa.

$$m'' = \rho_{ar} V \quad \text{Eq. 6}$$

$$m_v'' = \left(\frac{H}{H+1} \right) m'' \quad \text{Eq. 7}$$

em que: m'' é o fluxo de massa de ar, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$; m_v'' é o fluxo de massa de vapor, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$; e V é a velocidade do ar, m s^{-1} .

A consideração da variação das propriedades do ar e do fluxo de massa de ar durante a secagem é um dos diferenciais do modelo proposto em relação ao modelo MSU.

Outro modelo de primeiro nível foi criado contendo as equações matemáticas que descrevem a variação das propriedades físicas do produto em função do teor de água. Este modelo foi nomeado *CoffeeFruit*, e foi inserido num pacote nomeado *Product*, que pode ser usado para armazenar modelos contendo propriedades de outros produtos.

Os valores do calor específico, massa específica volumétrica, porosidade e volume, foram descritos utilizando as equações 8 a 11 ajustadas por Afonso Júnior (2001). O diâmetro médio aproximado da partícula foi calculado utilizando a equação (Eq. 12), considerando o fruto de café como uma esfera perfeita.

$$c_p = 0.9447 + 3.6197 M - 1.9920 M^2 \quad \text{Eq. 8}$$

$$\rho_p = 420.8490 + 198.8201 M - 53.8475 M^2 \quad \text{Eq. 9}$$

$$\varepsilon = 10^{-3} (432.324 + 114.307 M - 32.317 M^2) \quad \text{Eq. 10}$$

$$v = 10^{-9} (621.46 + 152,78 M + 12.417 M^2) \quad \text{Eq. 11}$$

$$v = \frac{\pi d_p^3}{6} \quad \text{Eq. 12}$$

em que: M é o teor de água do produto, $\text{kg de água kg}^{-1}$ de matéria seca; c_p é o calor específico do produto, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; ρ_p é a massa específica volumétrica do produto, kg m^{-3} ; ε é a porosidade do produto, adimensional; v é o volume unitário do fruto de café, m^3 ; e d_p é o diâmetro médio da partícula, m .

A constante de secagem do café em camada delgada foi calculada utilizando a equação 13, proposta por Young e Dickens (Henderson et al., 1997). Esta equação relaciona um valor da constante de secagem, para uma condição qualquer, com um valor obtido experimentalmente, considerado como referência. A constante de secagem de referência foi considerada sendo igual à equação 14, proposta por Afonso Júnior (2001). Como a equação 14 já está em função da temperatura e umidade relativa, o valor da razão entre as pressões de vapor de saturação será considerada igual a 1. A velocidade do ar de secagem de referência é de $0,2166 \text{ m s}^{-1}$, valor da velocidade do ar no experimento de Afonso Júnior (2001).

$$k = 3600 k_r \left(\frac{P_{sat}}{P_{satr}} \right)^{0.46} \left(\frac{V}{V_r} \right)^{0.7} \quad \text{Eq. 13}$$

$$k_r = -0.1196 + 1.4180 \cdot 10^{-3} T_c + 6.9938 \cdot 10^{-5} T_c^2 + 0.6545 rh - 0.5369 rh^2 - 7.5170 \cdot 10^{-3} T_c rh \quad \text{Eq. 14}$$

em que: k é a constante de secagem, s^{-1} ; k_r é a constante de secagem de referencia, h^{-1} ; P_{satr} é a pressão de vapor de saturação de referência, Pa; V_r é a velocidade do ar de referência, m s^{-1} ; T_c é a temperatura do ar de entrada no volume de controle, $^{\circ}\text{C}$.

Os valores de calor de vaporização da água do café foram descritos utilizando as equações ajustadas por Afonso Júnior (2001). A equação de equilíbrio higroscópico utilizada foi a de Henderson Modificada (ASAE, 2001), tal modelo foi escolhido por ser um dos recomendados pela “American Society of Agricultural and Biological Engineers” (ASABE), e é amplamente utilizada por pesquisadores e engenheiros de todo o mundo. Os coeficientes do modelo foram ajustados por Corrêa et al. (2010),

$$h_{lp} = (2502.49 - 2.43 T_c) (1 + 7.7866 \cdot 10^6 \exp(-19.6621 M_e^{0.0499})) \quad \text{Eq. 15}$$

$$1 - rh = \exp(-0.0001 (46.8549 + T_c) M_e^{1.8299}) \quad \text{Eq. 16}$$

em que: h_{lp} é a calor de latente de vaporização da água no produto, kJ kg^{-1} ; e M_e é o teor de água de equilíbrio do produto, $\text{kg de água kg}^{-1}$ de matéria seca.

A consideração da variação das propriedades físicas do produto durante a secagem é um dos diferenciais do modelo proposto em relação ao modelo MSU. Além

disto, o modelo proposto considera o calor latente da água do produto, diferente do modelo MSU que considera o calor latente da água livre.

Um modelo de primeiro nível, nomeado *Layer*, foi criado para a entrada das variáveis iniciais da camada de produto, basicamente a espessura inicial da camada (L_i), teor de água inicial (M_i) e temperatura inicial do produto (T_{pi}). A espessura inicial da camada estabelecida para a modelagem deve ser a mínima possível, a qual depende do produto, para que os modelos de secagem em camada delgada sejam aplicáveis.

O modelo de segundo nível que representa as condições ar ambiente, nomeado *Input*, herda o modelo *PartialOnePort* e contém a programação para a entrada dos valores das variáveis do ar ambiente. O modelo de segundo nível que representa a saída do ar no secador, nomeado *Output*, herda o modelo *PartialOnePort*.

Um modelo de segundo nível foi criado para modelar o aquecedor do ar, nomeado *Heater*. Tal modelo herda o modelo *PartialTwoPort* e contém a programação para a entrada do valor da temperatura de secagem (T_s), que é igual à temperatura do ar de saída do aquecedor (T_b). Outra condição é que a pressão de vapor de entrada é igual à de saída, já que não há outra entrada de massa de vapor no volume de controle. Essas duas condições são suficientes que o modelo calcule o ponto de estado termodinâmico do ar na saída do aquecedor (conector *b*).

O modelo de segundo nível para a descrição da secagem em camada delgada foi nomeado *DryLayer*. Tal modelo herda o modelo *PartialTwoPort*, *CoffeeFruit* e *Layer*. Além disso, o modelo conterá as equações de balanço de calor e de massa do processo. A equação exponencial, proposta por Sherwood (Henderson et al., 1997), foi utilizada para descrever a secagem da camada delgada de produto. Esta equação assume que a taxa de secagem do produto é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e o teor de água de equilíbrio.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad \text{Eq. 17}$$

em que: dM/dt é a taxa de secagem do produto, kg de água kg^{-1} de matéria seca s^{-1} .

No modelo *DryLayer* foi negligenciado a transferência de calor por condução entre os frutos, e por radiação e condução entre os frutos e as paredes do secador. Além disso, foi assumido que todo calor fornecido pelo ar por convecção é usada para a evaporação do teor de água do produto e para aquecer o produto. Assim as mudanças

nas propriedades do ar e do produto são relacionadas com as equações de balanço de massa (Eq. 18) e de calor (Eq. 19 e 20). O coeficiente de transferência de calor por convecção foi calculado utilizando a equação empírica de Barker (Eq. 21), apresentada por (Brooker et al., 1992).

$$m''_{vb} - m''_{va} = -\frac{dM}{dt} \frac{\rho_p L}{1+M} \quad \text{Eq. 18}$$

$$m''_b h_b - m''_a h_a = -k_h (T_a - T_p) \quad \text{Eq. 19}$$

$$m''_b h_b - m''_a h_a = \begin{cases} \frac{dM}{dt} \frac{\rho_p L}{1+M} h_{lp} & \text{se } |h'(T_a - T_p)| \leq \left| \frac{dM}{dt} \frac{\rho_p L}{1+M} h_{lp} \right| \\ \frac{dM}{dt} \frac{\rho_p L}{1+M} h_{lp} - \rho_p L c_p \frac{dT_p}{dt} & \text{se } |h'(T_a - T_p)| > \left| \frac{dM}{dt} \frac{\rho_p L}{1+M} h_{lp} \right| \end{cases} \quad \text{Eq. 20}$$

$$k_h = 0,9918 c_{ar} m''_a \left(\frac{3600 d_p m''_a}{0,06175 + 16,510^{-5} T_c} \right)^{-0,34} \quad \text{Eq. 21}$$

em que: T_p é a temperatura do produto, K; dT_p/dt é a taxa de variação da temperatura do produto, K; L é a espessura da camada de produto; m ; e k_h é o coeficiente de transferência de calor, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

A equação 20 é uma função definida em duas partes, condicionando o balanço de calor. Matematicamente o fluxo de calor requerido pelo produto para a mudança de fase da água pode ser maior que o calor fornecido pelo ar, principalmente no início do processo devido à alta taxa de secagem. Para equilibrar o balanço, o produto transferiria calor por condução para a mudança de fase da água, diminuindo sua temperatura. Porém fisicamente isso não ocorre, pois no início do processo o gradiente de temperatura do produto é muito pequeno, sendo assim o calor sensível do produto seria desprezível. Assumiu-se que a temperatura da superfície do produto permanece constante, sendo todo calor transferido utilizado pelo produto para evaporação da massa de água superficial, até que o calor transferido seja maior que o calor latente do produto. Assim a primeira parte da equação 20 limita a taxa de secagem, sendo esta proporcional a quantidade de calor transferida pelo ar. Esta consideração é um diferencial do modelo proposto em relação ao modelo MSU.

A variação na pressão do ar foi calculada utilizando-se a equação 22, a qual considera que a variação total de pressão é igual à variação da pressão de vapor mais a

perda de pressão devido à fricção entre o ar e o produto. A perda por fricção foi calculada utilizando a equação de Darcy (Eq. 23), e o fator de fricção foi calculado utilizando a equação de Ergun (Eq. 24) (Henderson et al., 1997). A consideração da variação da pressão do ar, devido à fricção e o aumento na pressão de vapor, é outro diferencial do modelo proposto em relação ao modelo MSU.

$$p_b - p_a = (p_{vb} - p_{va}) - p_f \quad \text{Eq. 22}$$

$$p_f = f \rho_{ar,a} \frac{L}{d_p} \frac{V_a^2}{2} \quad \text{Eq. 23}$$

$$f = \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left(3.5 + \frac{300(1 - \varepsilon)}{Re} \right) \quad \text{Eq. 24}$$

$$Re = \frac{\rho_{ar,a} V_a d_p}{\mu_{ar,a}} \quad \text{Eq. 25}$$

em que: p_f é a perda de pressão por fricção, Pa; f é o fator de fricção, adimensional; Re é o número de Reynolds modificado, adimensional; $\mu_{ar,a}$ é a viscosidade dinâmica do ar, Pa s.

Para o cálculo da variação da espessura da camada foi utilizado à equação 26. Tal equação considera a conservação da massa seca e que a contração da camada do produto é apenas no sentido na espessura, já que a área transversal do secador é fixa. O sub-índice i denota-se inicial. A consideração da contração da camada de produto durante a secagem é outro diferencial do modelo proposto em relação ao modelo MSU.

$$\frac{\rho_v L}{1 + M} = \frac{\rho_{v,i} L_i}{1 + M_i} \quad \text{Eq. 26}$$

Vários modelos *DryLayer* podem ser conectados para se formar um modelo de terceiro nível, modelando-se assim um leito fixo espesso de produto. Na Figura 2 está apresentado um esquema do modelo de secagem em leito fixo, mostrando a hierarquia do modelo.

Para descrever o sistema de secagem em leito fixo de frutos de café, foi criado um modelo composto por 4 modelos *DryLayer* conectados, cada um representando uma camada, além de um modelo *Input*, *Output* e *Heater*. Este modelo em linguagem *Modelica* foi implementado e simulado utilizando-se o software *OpenModelica*® 1.6.0.

Todos os parâmetros utilizados no modelo foram ajustados por outros autores, não necessitando do modelo proposto ser calibrado aos dados experimentais.

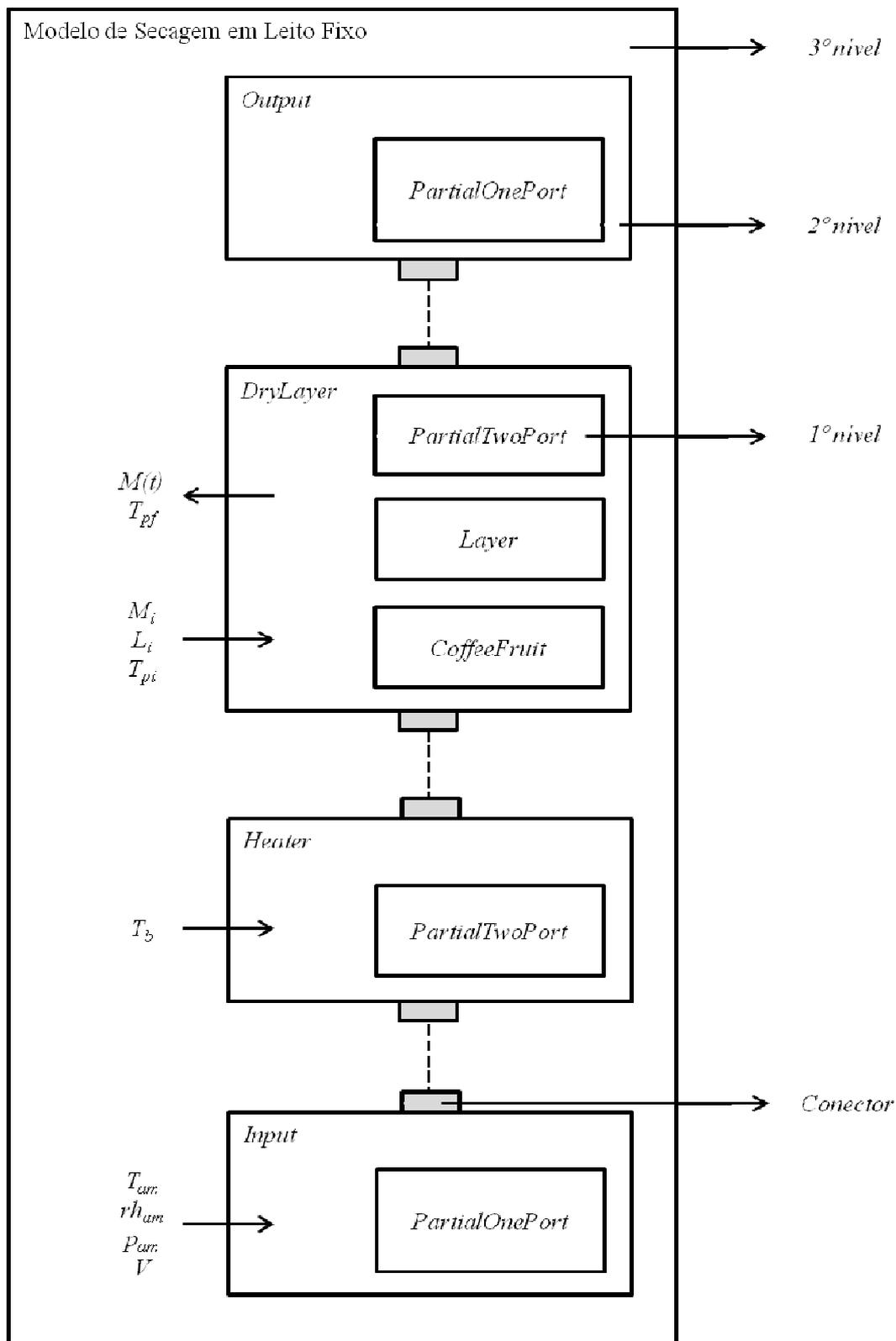


Figura 2. Esquema da hierarquia do modelo de secagem em leito fixo.

2.3. Dados experimentais

Os dados experimentais da dissertação de Corrêa (1982) foram utilizados para a validação do modelo proposto, e como condições iniciais e dados de entrada da simulação. No experimento foram utilizados frutos de café (*Coffea arábica* L.) da variedade Mundo Novo colhido por derrça manual, e pré-secos em terreiro. O café foi então seco em um secador experimental, constituído de três câmaras com dimensões de 0,57 x 0,35 x 0,64 m.

O café foi seco com um ar de secagem com temperatura de 40, 50 e 60 °C. Para cada temperatura foram realizados 3 testes, com condições variadas do ar ambiente e diferentes teores de água iniciais do produto, totalizando 9 testes experimentais. Na tabela 1 estão apresentadas as condições do ar ambiente e de secagem, além do teor de água inicial do café para cada teste.

Tabela 1. Condições ambientais e de secagem do café do experimento de Corrêa (1982).

<i>Teste</i>	T_s (°C)	T_{am} (°C)	rh_{am} (%)	p_{am} (kPa)	V_{am} (m min ⁻¹)	M_i (% b.s.)
40.1	40	23,5	55,9	93,843	8,60	17,91
40.2	40	25,4	52,7	93,683	8,81	20,41
40.3	40	20,2	67,7	94,216	8,27	20,25
50.1	50	22,9	48,0	94,376	9,20	38,56
50.2	50	23,2	62,2	93,750	8,82	18,56
50.3	50	19,8	69,6	94,136	8,72	18,10
60.1	60	22,9	57,7	93,790	7,10	17,45
60.2	60	16,7	45,7	94,083	8,27	32,32
60.3	60	24,3	43,9	93,817	8,81	19,70

em que: T_s é a temperatura do ar de saída do aquecedor; T_{am} é a temperatura do ar ambiente; rh_{am} é a umidade relativa do ar ambiente; p_{am} é a pressão do ar ambiente; V_{am} é a velocidade do ar na entrada do secador; M_i é o teor de água inicial do café.

As amostras de café foram retiradas em tempos pré-determinados nas alturas de 0,10, 0,25, 0,40 e 0,55 m, para a determinação do teor de água. Para a simulação e validação foi considerado que cada amostra foi retirada no centro da camada, então a primeira (C1) e terceira (C3) camada possuem 0,20 m de espessura, e a segunda (C2) e quarta (C4) camada possuem 0,10 m de espessura. Devido à heterogeneidade do teor de

água em cada camada e dos os efeitos transientes no início do processo, foi utilizado como valor inicial o valor de teor de água em cada camada correspondente ao tempo experimental de 0,5 horas.

2.4. Validação do modelo

O desempenho do modelo, para a descrição do teor de água em função do tempo de secagem, foi avaliado pela análise do índice de desempenho (Eq. 27), erro médio relativo (Eq. 29) e o viés relativo (Eq. 30). O índice de desempenho (i) avalia o desempenho do modelo multiplicando um adimensional que corresponde a precisão do modelo, dado pelo coeficiente de correlação (r), e um adimensional correspondente a exatidão do modelo, dado pelo índice de Willmott (eq. 28) (Willmott et al.,1985).

$$i = r d \quad \text{Eq. 27}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{\sum_{j=1}^n (|Y_j - \bar{Y}| + |\hat{Y}_j - \bar{Y}|)^2} \right] \quad \text{Eq. 28}$$

$$RSD = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|Y_j - \hat{Y}_j|}{Y_j} \quad \text{Eq. 29}$$

$$RB = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{Y_j - \hat{Y}_j}{Y_j} \quad \text{Eq. 30}$$

em que: i é o índice de desempenho; r é o coeficiente de correlação; d é o índice de Willmott; RSD é o erro médio relativo; RB é o viés relativo; Y é o valor observado experimentalmente; \hat{Y} é o valor predito pelo modelo; \bar{Y} é a média dos valores experimentais; e n é o número de observações experimentais.

2.5. Análise de sensibilidade modelo

A sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros e das variáveis foi avaliada utilizando os métodos de análise de sensibilidade diferencial global e subjetiva. A análise subjetiva consiste em uma avaliação qualitativa do comportamento dos resultados. A análise diferencial global consiste na classificação dos parâmetros e das variáveis utilizando-se o coeficiente de sensibilidade (Eq. 31). O coeficiente de

sensibilidade representa a razão entre a variação de uma variável resposta em relação à variação do parâmetro em análise (perturbação) enquanto todas as outras condições permanecem constantes (Hamby, 1994). A variação dos parâmetros é realizada em relação a um *caso base*, onde todas as condições são consideradas constantes, incluindo o parâmetro/variável em análise.

$$S_{X,\beta} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{|X_j - X'_j|}{X_j} \frac{\beta_j}{|\beta_j - \beta'_j|} \right] \quad \text{Eq. 31}$$

em que: $S_{X,\beta}$ é o coeficiente de sensibilidade da variável X para a variação de β ; X é o valor da variável resposta para o caso base; X' é o valor da variável resposta para a variação de β ; β é o valor do parâmetro analisado para o caso base; β' é o valor variado do parâmetro.

O coeficiente de sensibilidade foi calculado com base na resposta do teor de água (S_M), da umidade relativa do ar (S_{rh}), da temperatura do produto (S_{Tp}) e da temperatura do ar (S_T) devido à variação de $\pm 20\%$ cada parâmetro/variável do modelo (β), considerando o valor médio do coeficiente obtido nas quatro camadas. Um coeficiente de sensibilidade global (S_I) do modelo foi calculado como a média entre os quatro coeficientes de sensibilidades obtidos. O nível de variação de $\pm 20\%$ foi escolhido devido à alta amplitude de variação dos parâmetros e variáveis analisadas, e com o objetivo de uma melhor visualização das figuras para facilitar a análise subjetiva. Na tabela 2 estão apresentadas as condições do ar ambiente e de secagem, além do teor de água inicial do café para o caso base.

Tabela 2. Condições ambientais, iniciais e de secagem do café para o caso base.

	T_s (°C)	T_{am} (°C)	rh_{am} (%)	p_{am} (kPa)	V_{am} (m min ⁻¹)	M_i (% b.s.)	L_i cm
<i>caso base</i>	40	22	60,0	94,000	8,50	32,0	20

Diferente da avaliação da variação dos parâmetros, que são constantes em função do tempo, as variáveis possuem uma complexidade maior. Com o objetivo de um melhor entendimento físico da análise, esta foi simplificada, multiplicando-se os fatores 0,8 e 1,2 a variável analisada, correspondente a uma variação de -20% e

+ 20 %, respectivamente. A porcentagem de variação não é exatamente 20 %, mas esta variação é contabilizada na análise, devido à consideração da última parte do somatório da equação 31.

2.6. Comparação entre os modelos

O modelo MSU consiste em um modelo composto por quatro equações de balanço de calor e de massa realizado em um volume diferencial, dois balanços para o ar e dois balanços para o produto. O modelo MSU é descrito detalhadamente por Brooker et al. (1992). O modelo de secagem em leito fixo MSU foi implementado em linguagem *Modelica* e simulado para as mesmas condições experimentais. Para o cálculo das propriedades do ar de entrada foi utilizado as Equações de 2 a 6, o fluxo de massa do ar e massa específica foram consideradas constantes. O calor específico e massa específica do produto foram consideradas como os valores iniciais calculadas com base nas equações 8 e 9, respectivamente.

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\rho_p}{m_a''(1+M)} \frac{\partial M}{\partial t} \quad \text{Eq. 32}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h'(T_a - T_p)}{m_a''(c_{ar} + c_v H)} \quad \text{Eq. 33}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad \text{Eq. 34}$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{h'(T_a - T_p)}{\rho_p L c_p} + m_a'' \frac{\partial H}{\partial t} \frac{(h_{lv} + c_v (T - T_p))}{\rho_p L c_p} \quad \text{Eq. 35}$$

em que: dx é a espessura diferencial da camada, m.

O modelo proposto possui algumas considerações que o diferencia do modelo MSU, que consiste na consideração: a) da variação interativa das propriedades do ar devido à variação da massa de vapor, pressão e temperatura do ar (Eq. 2 a 4); b) variação do fluxo de massa de ar (Eq. 6); c) da variação das propriedades físicas do produto (Eq. 8 a 12); d) do calor latente de vaporização da água do produto (Eq. 15); e) balanço de calor definida em duas partes (Eq. 19); f) variação da pressão do sistema devido à variação da pressão de vapor e fricção (Eq. 22); g) da contração volumétrica da camada de produto (Eq. 26).

Na Figura 3a está apresentado um esquema do modelo de camada delgada utilizado no modelo MSU, enquanto a Figura 3b está apresentando um esquema para o modelo proposto, enfatizado na cor cinza estão algumas variáveis do modelo proposto que são diferentes do modelo MSU.

A comparação do desempenho entre o modelo proposto e o MSU foi realizada analisando o índice de desempenho e o erro médio relativo obtido por cada modelo ao descrever as condições de cada teste. Além disto, os parâmetros relativos as considerações listadas acima foram avaliados utilizando a análise de sensibilidade com o objetivo de se identificar os fatores que diferenciam o modelos proposto do modelo MSU.

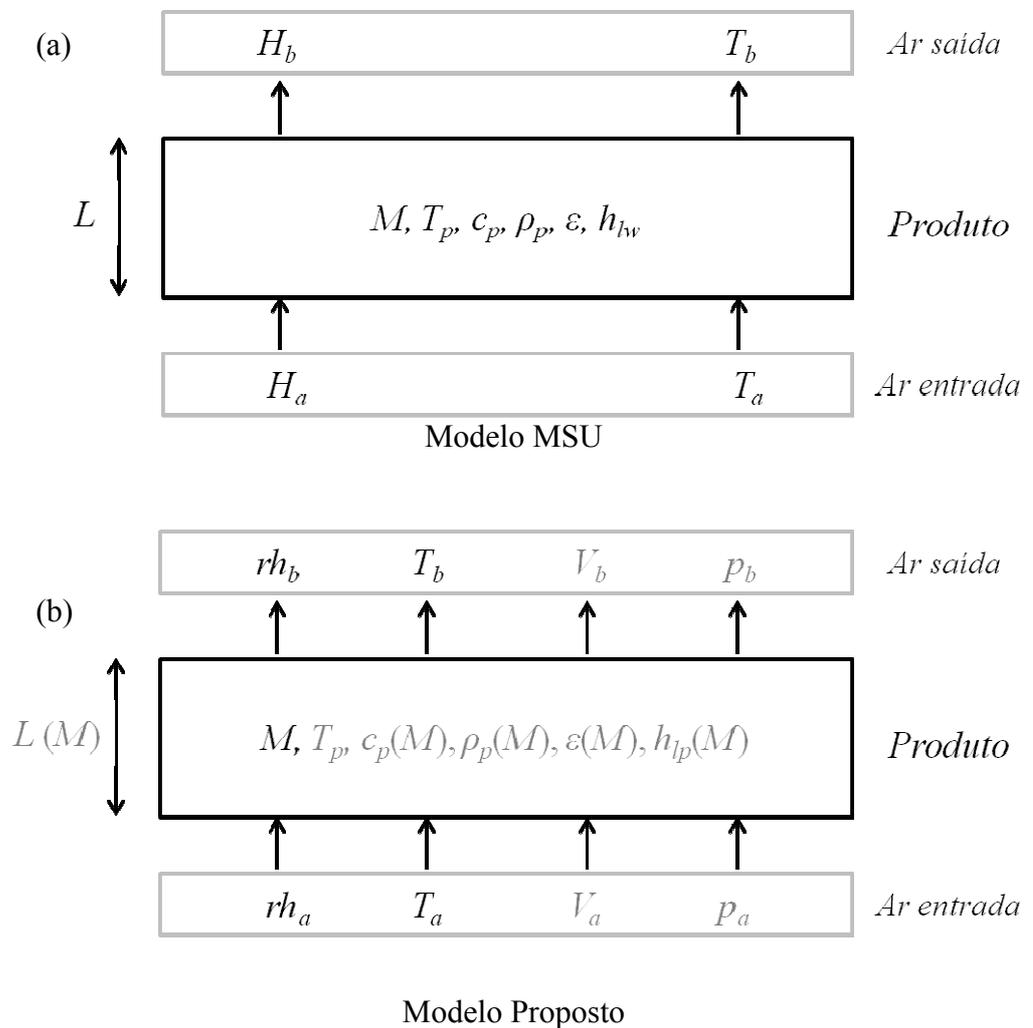


Figura 3. Volume de controle considerado no modelo de camada delgada do modelo MSU (a) em comparação ao modelo proposto (b).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Avaliação do modelo proposto

Nas figuras 4 a 12 estão apresentados os valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e os valores preditos (pre) pela simulação usando o modelo proposto para todos os testes.

Pode ser observado nas figuras 4 a 12 que a capacidade de secagem aumentou com o aumento da temperatura. Isto ocorre devido ao aumento da difusão massa de água no interior do produto e devido ao aumento da diferença de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ar de secagem.

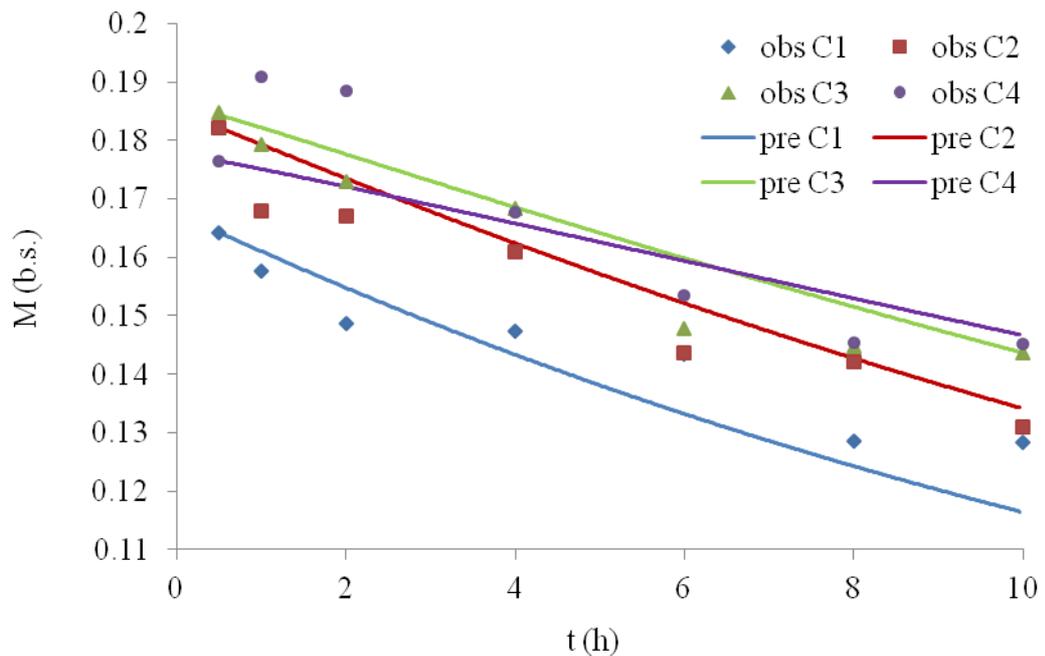


Figura 4. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.1.

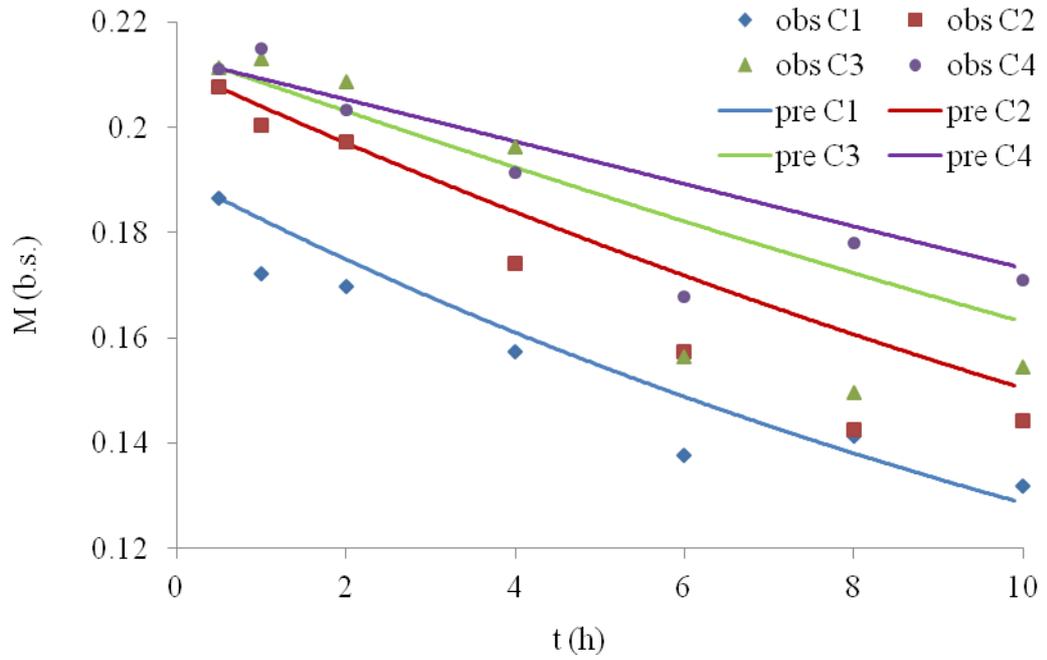


Figura 5. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.2.

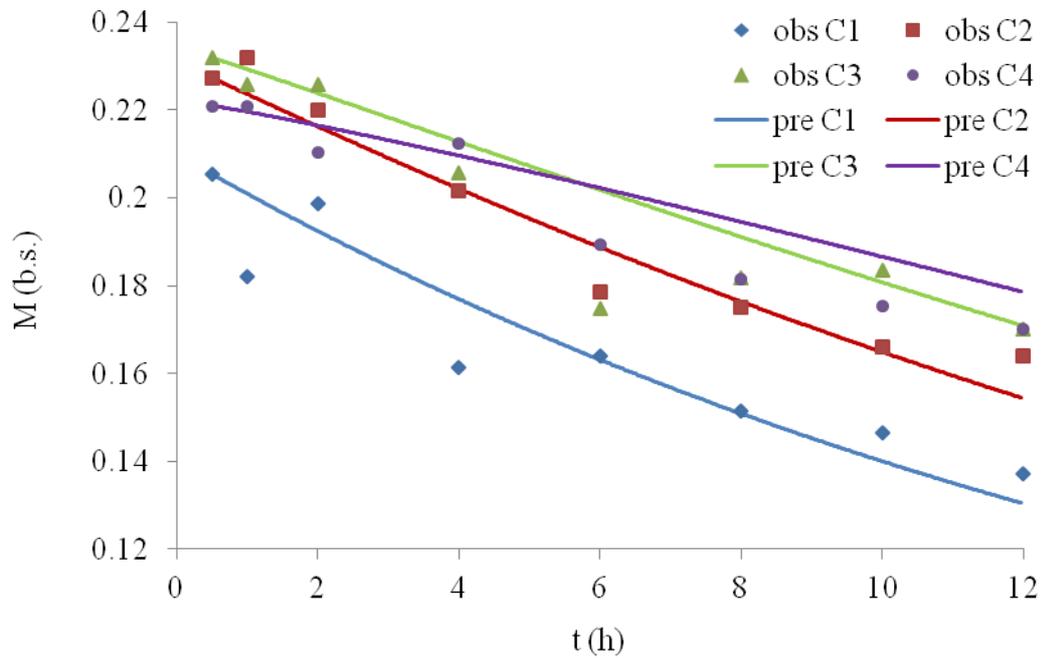


Figura 6. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 40.3.

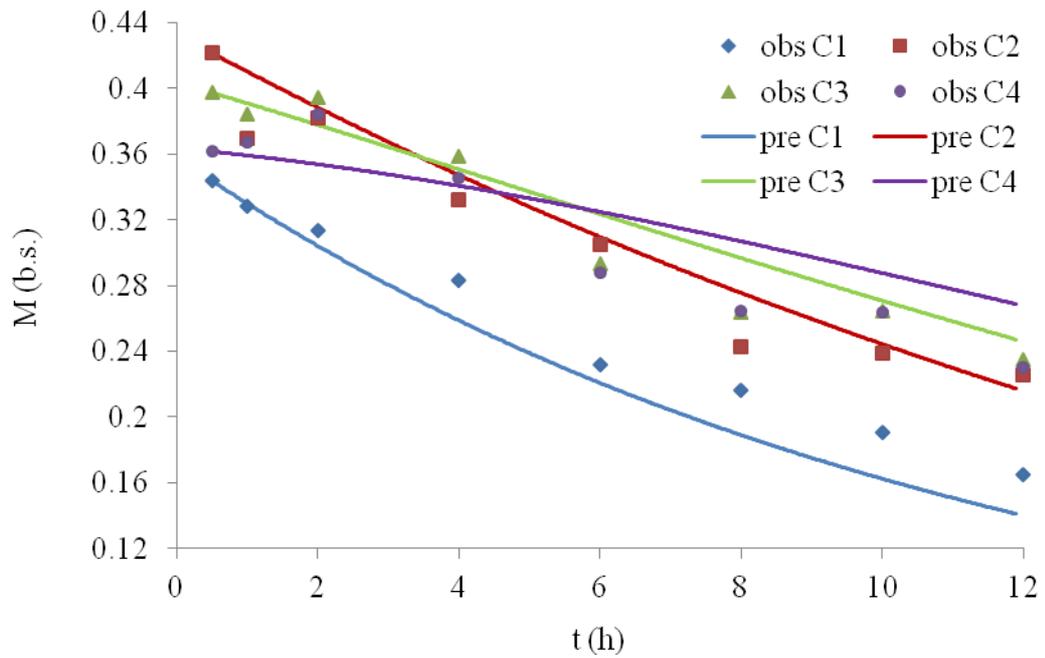


Figura 7. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.1.

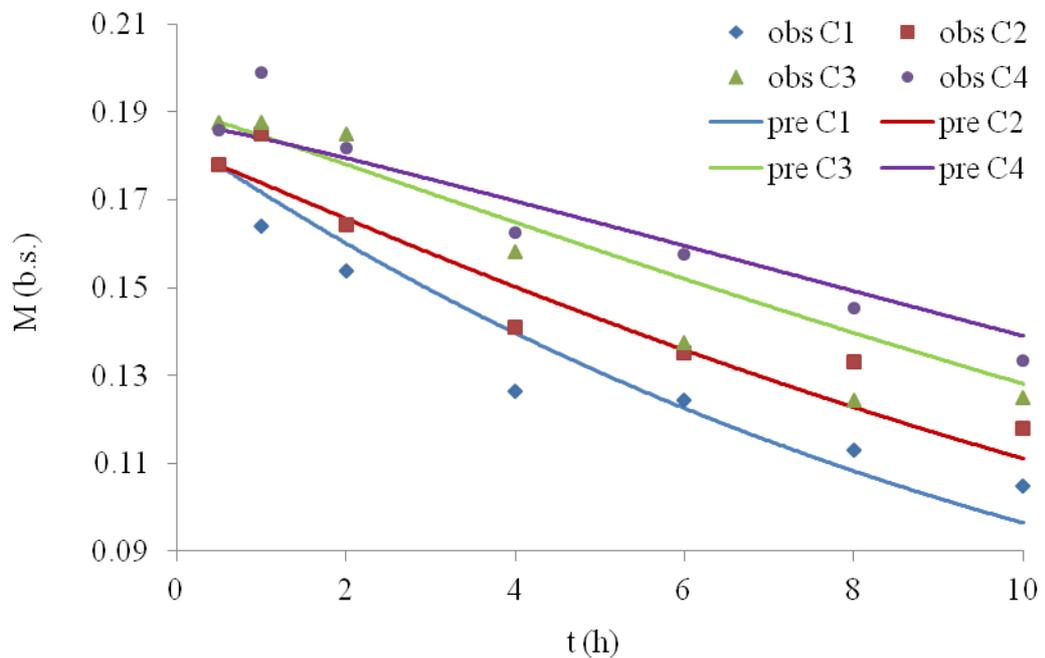


Figura 8. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.2.

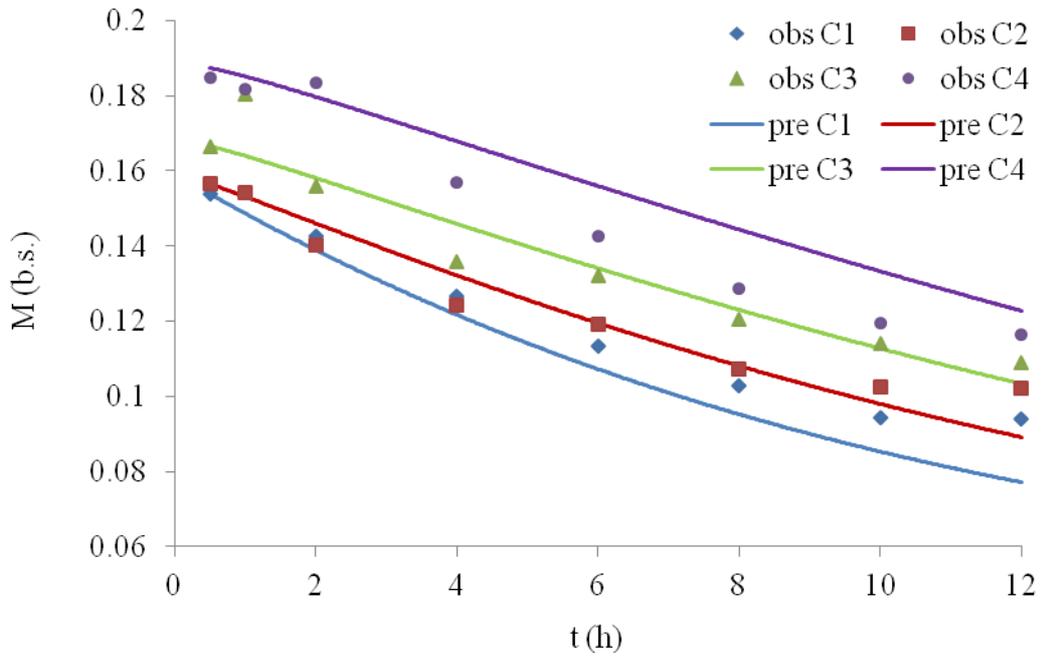


Figura 9. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 50.3.

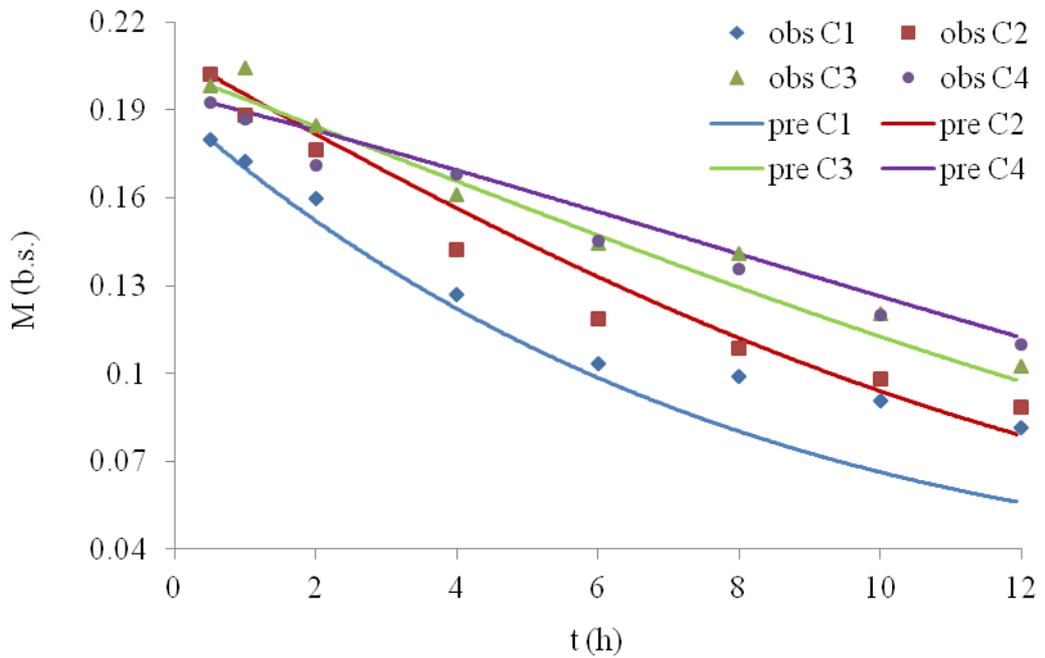


Figura 10. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.1.

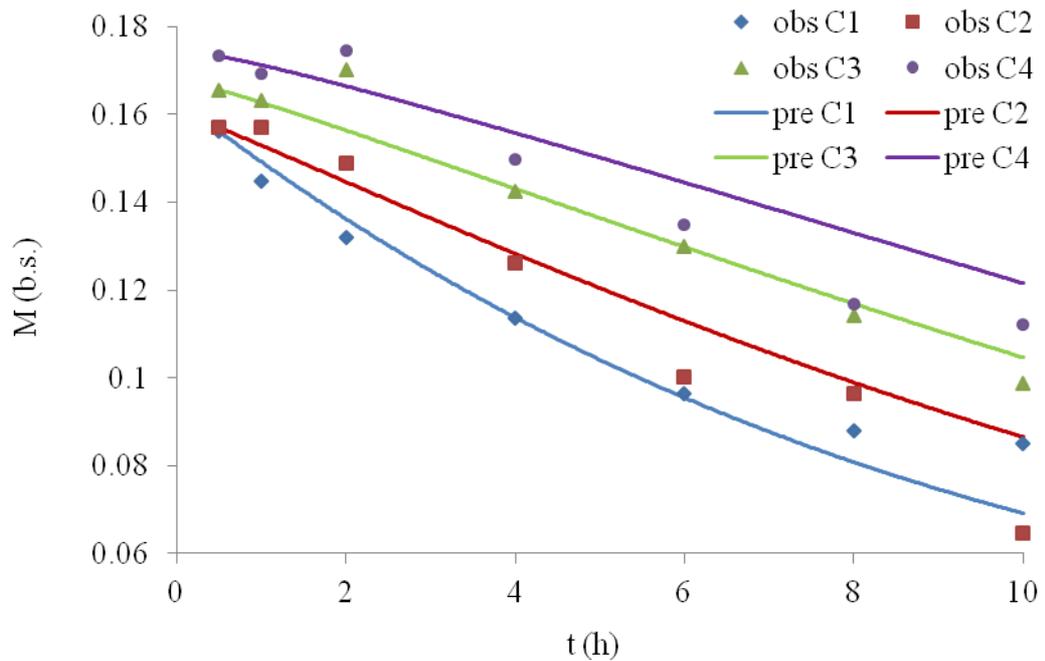


Figura 11. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.2.

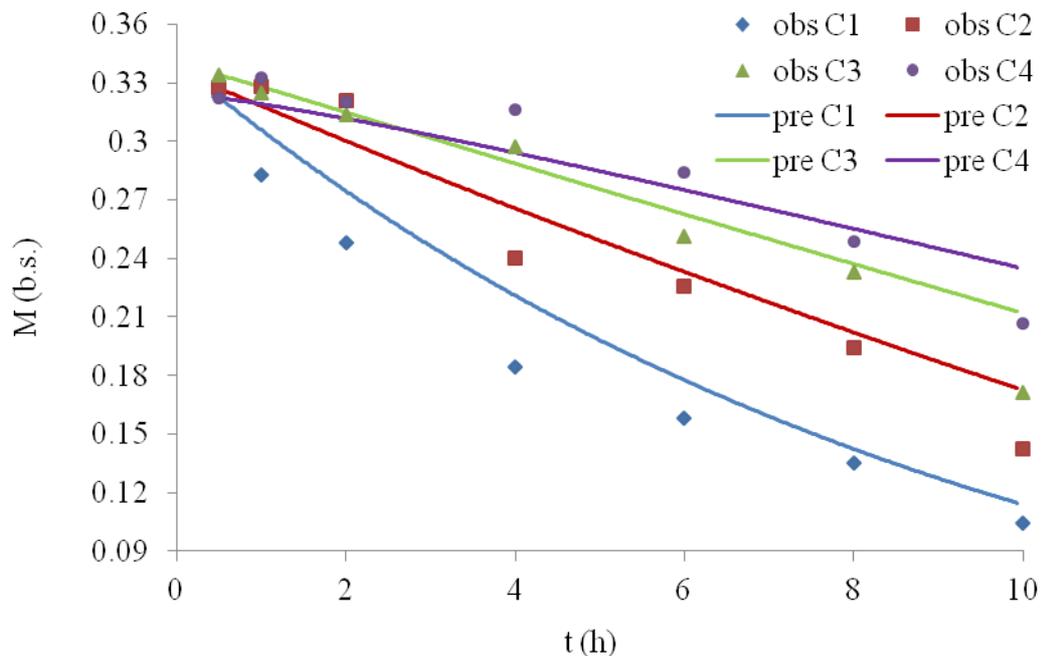


Figura 12. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo proposto para cada camada (C) do teste 60.3.

Segundo Vossen (1979) o café deve ser armazenado com um baixo teor de água, mantendo assim uma baixa atividade de água no interior do produto, evitando a perda de qualidade e de matéria seca, principalmente devido à respiração do produto e a proliferação de microorganismos. Segundo normas do MAPA (2003) os grãos de café

cru não podem ser comercializados com um teor de água maior que 12,5 % b.u. (aproximadamente 14,3 % b.s.). Além disso, os frutos de café secos facilitam o processo de descascamento.

Para as condições experimentais dos três teste a 40 °C, verifica-se que o tempo de secagem não é suficiente para atingir um teor de água seguro de armazenamento para o café em todas as camadas. Uma secagem complementar ou o aumento do tempo de secagem é recomendado para atingir um teor de água seguro de armazenamento. A simulação do processo, considerando todas as condições de operação, é uma ferramenta para mensurar o tempo correto de secagem.

Na tabela 3 estão apresentados os parâmetros estatísticos de avaliação de desempenho do modelo proposto para a descrição das condições experimentais de cada teste.

Tabela 3. Índice de Willmott, coeficiente de correlação, o índice de desempenho, erro médio relativo e viés relativo do modelo proposto para cada teste simulado.

Teste	<i>d</i> (%)	<i>r</i> (%)	<i>i</i> (%)	<i>RSD</i> (%)	<i>RB</i> (%)
40.1	94,55	92,07	87,05	3,41	-0.54
40.2	93,62	94,75	88,71	4,53	-3.58
40.3	96,48	95,12	91,77	3,36	-1.68
50.1	97,01	95,35	92,49	5,79	-1.42
50.2	97,44	95,93	93,48	4,16	-0.77
50.3	97,38	96,33	93,81	4,18	-0.60
60.1	97,62	96,63	94,33	5,24	0.49
60.2	97,53	97,92	95,51	6,66	-1.95
60.3	98,37	97,77	96,18	5,21	-4.57

Observa-se na tabela 3 que todos os testes simulados usando o modelo proposto apresentaram o erro médio relativo menor que 10 %, indicando uma representação satisfatória do fenômeno estudado (Chen e Morey, 1989; Madamba et al., 1996; Mohapatra e Rao, 2005). Além disso, os testes simulados apresentaram um índice de desempenho maior que 85 %, indicando precisão e exatidão do modelo proposto para descrever o sistema nas condições estudadas (Camargo e Sentelhas, 1997). Baseado nos parâmetros estatísticos analisados o modelo proposto descreve satisfatoriamente a

secagem em leito fixo de frutos de café, na faixa de condições iniciais e de contorno estudadas.

Zare et al. (2006) propôs um modelo de secagem em camada fina considerando a variação das propriedades do ar e do produto. O modelo de Zare et al. obteve um erro quadrado médio variando entre 7,50 a 8,85 %, ao simular a secagem em camada fixa de arroz em casca em diferentes temperaturas, vazão de ar e espessura de camada. Os autores observaram que o modelo sempre tendia a superestimar a taxa de secagem do produto ao longo do período de secagem, alcançando erros de até 15 %. Os autores concluíram que as fontes de erros provavelmente foram devidas a imprecisão das equações de secagem em camada fina e equilíbrio higroscópico, além dos erros de medição dos dados experimentais.

3.2. Comparação entre os modelos

Nas figuras 13 a 21 estão apresentados os valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e os valores preditos (pré) pela simulação usando o modelo MSU para todos os testes.

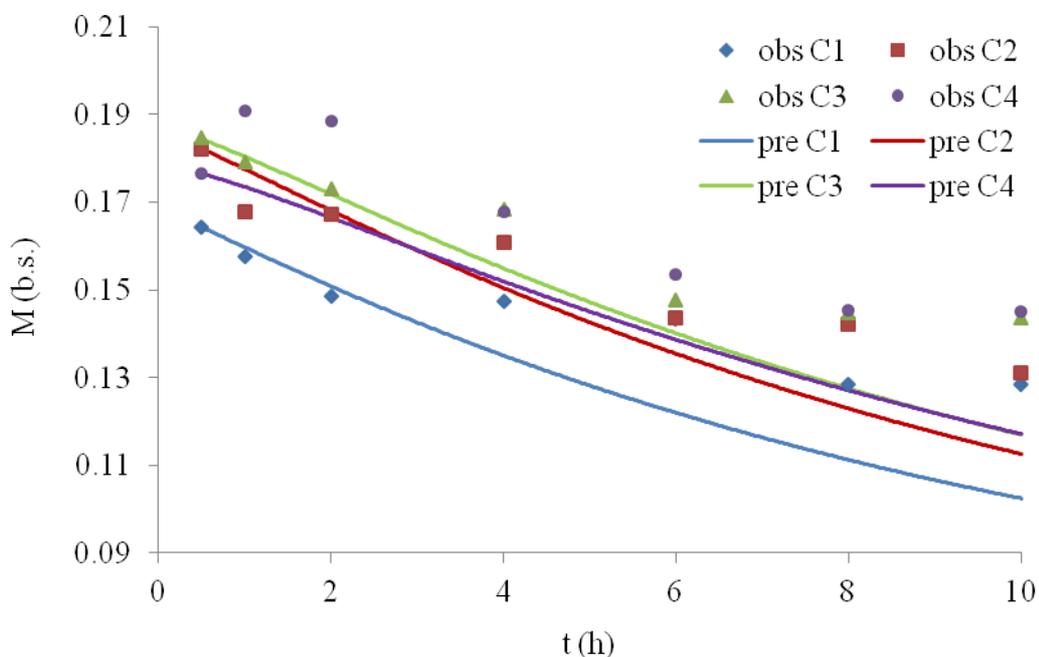


Figura 13. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.1.

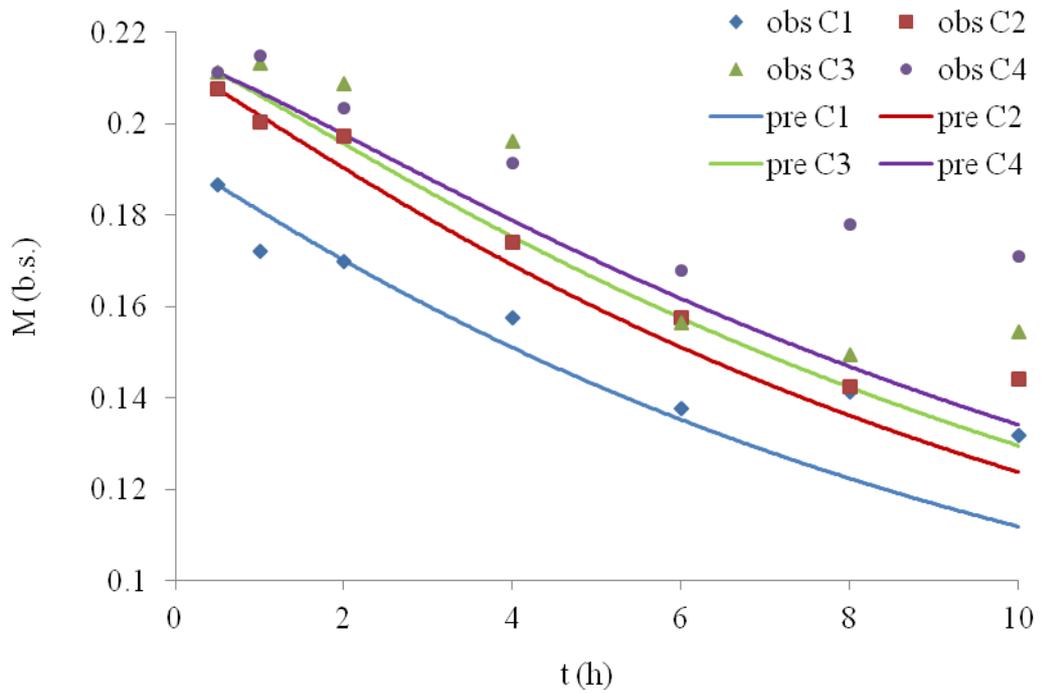


Figura 14. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.2.

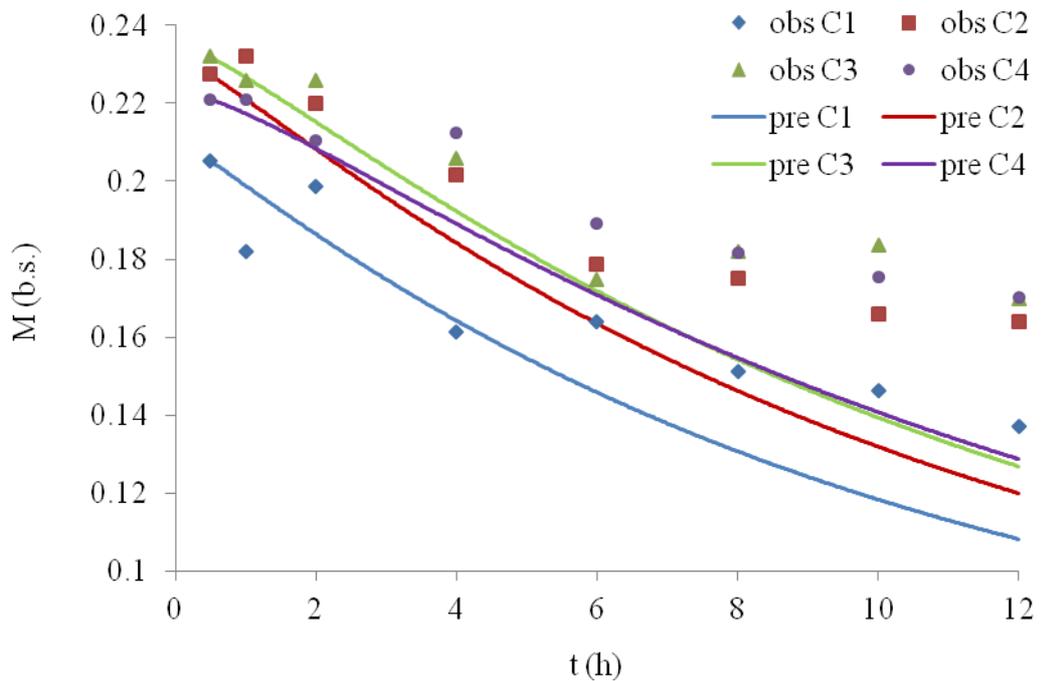


Figura 15. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 40.3.

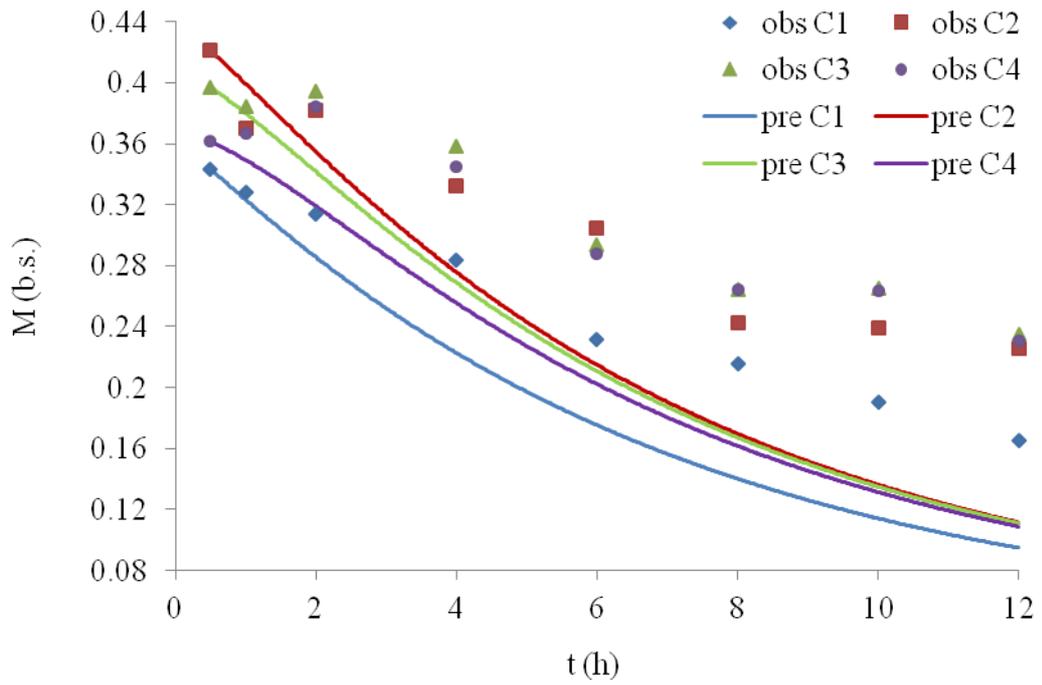


Figura 16. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.1.

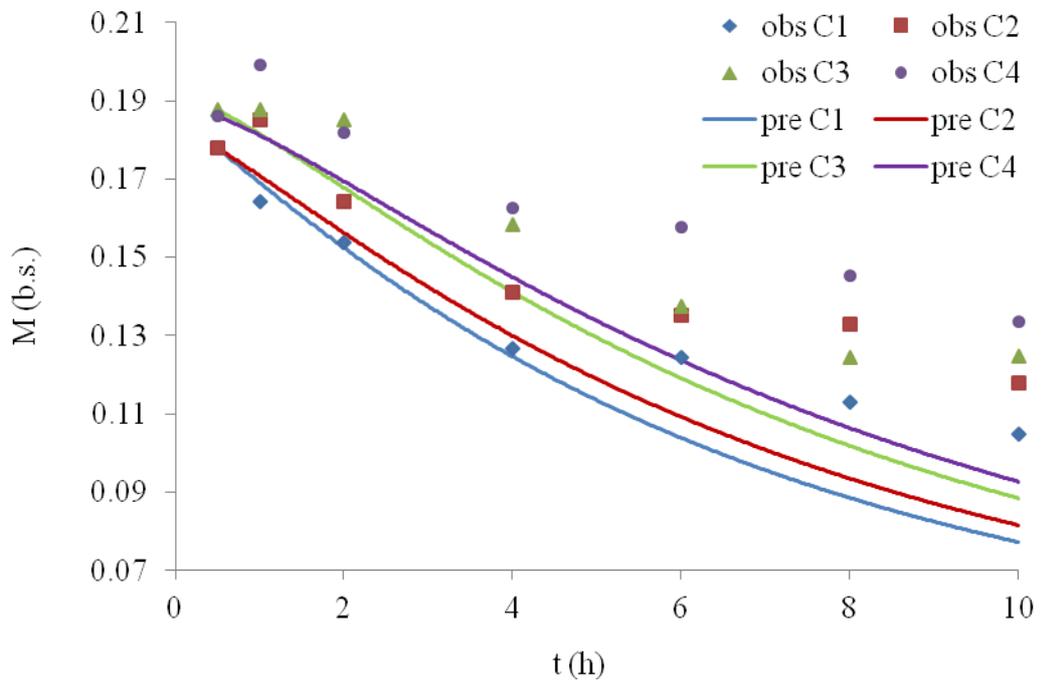


Figura 17. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.2.

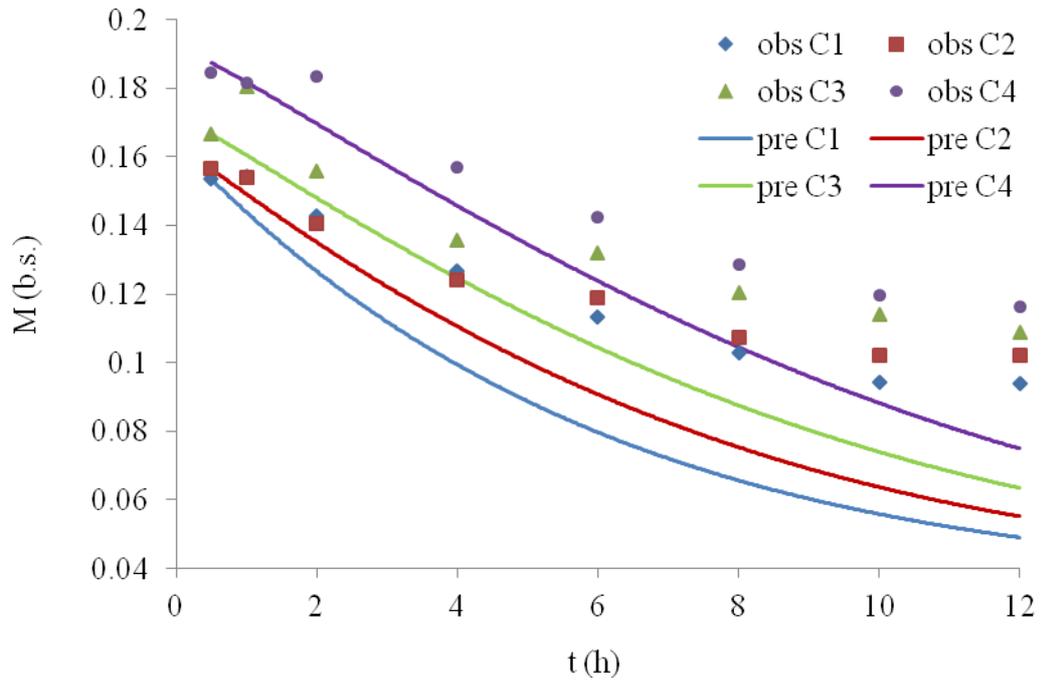


Figura 18. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 50.3.

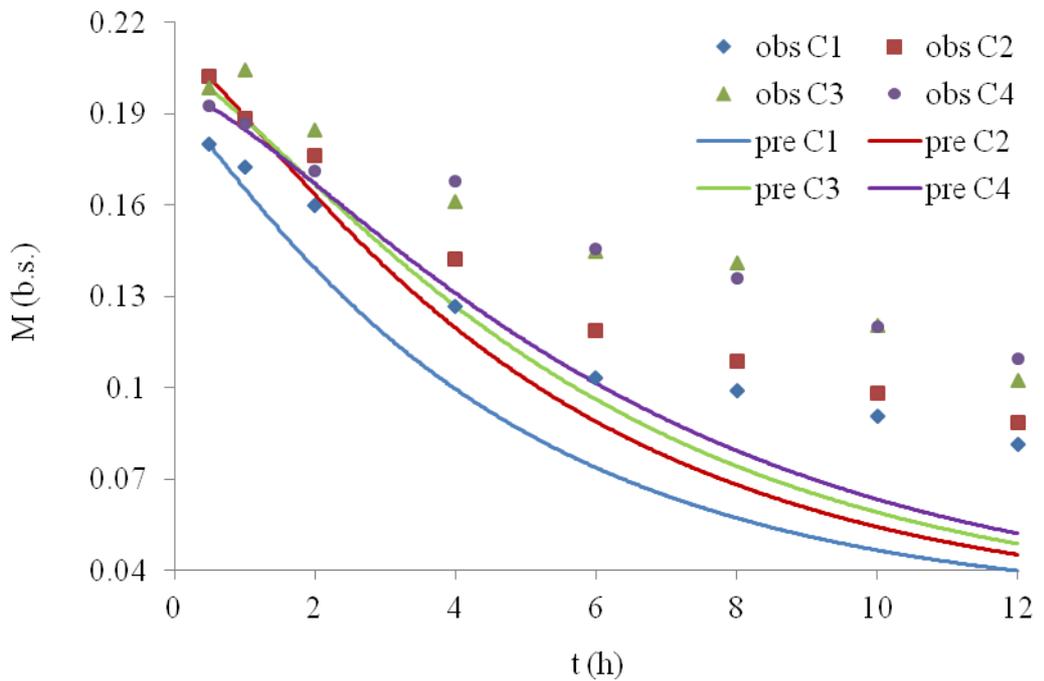


Figura 19. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.1.

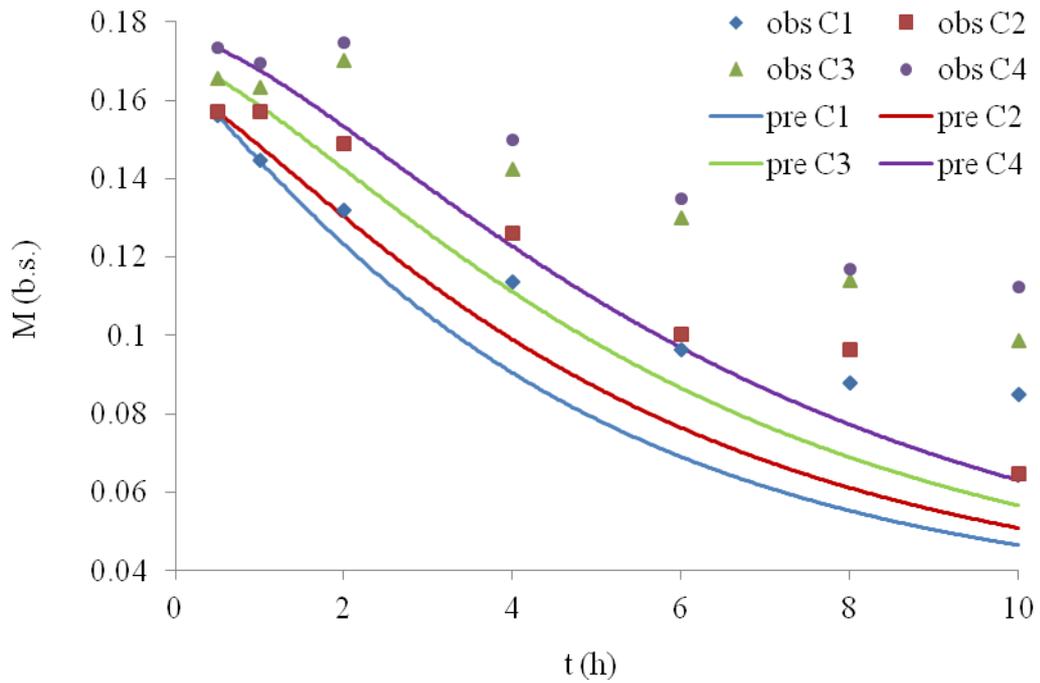


Figura 20. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.2.

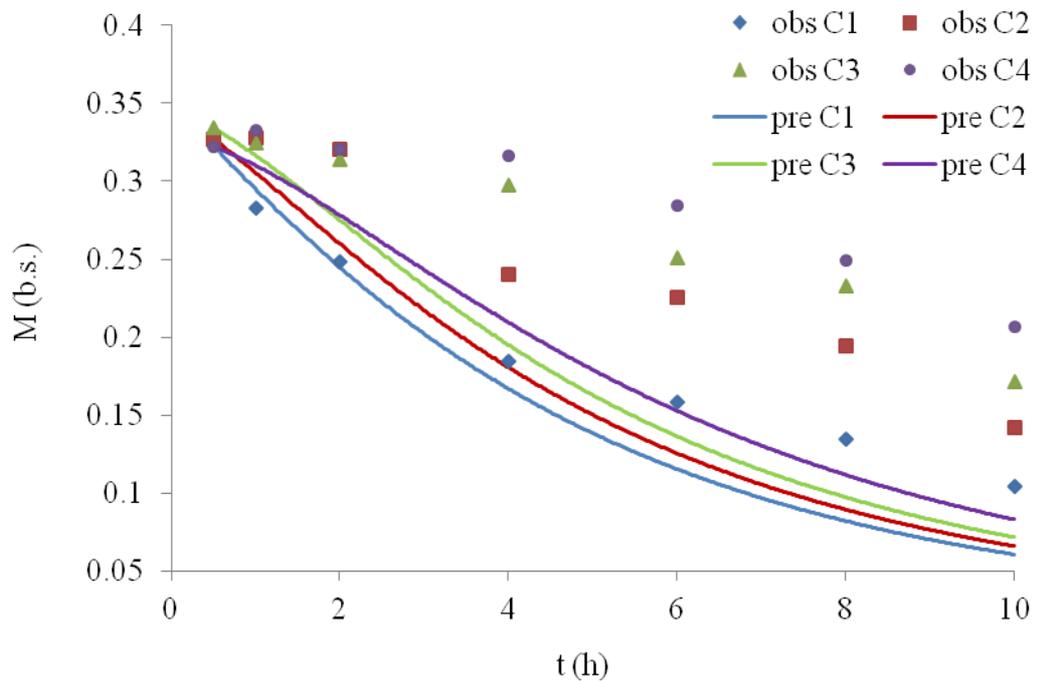


Figura 21. Valores de teor de água observados experimentalmente (obs) e preditos (pre) pelo modelo MSU para cada camada (C) do teste 60.3.

Observa-se nas figuras 13 a 21 que o modelo MSU tende a superestimar a taxa de secagem, conseqüentemente subestimando o teor de água, devido às considerações inerentes do modelo. Cada consideração que o diferencia o modelo proposto do modelo

MSU foi avaliada no item 3.3.3., tal avaliação foi baseada na análise de sensibilidade dos parâmetros/variáveis do modelo proposto.

Na tabela 4 estão apresentados os parâmetros estatísticos de avaliação de desempenho do modelo MSU para a descrição das condições experimentais de cada teste.

Tabela 4. Índice de Willmott, coeficiente de correlação, o índice de desempenho, erro médio relativo e viés relativo do modelo MSU para cada teste simulado.

Teste	<i>d</i> (%)	<i>r</i> (%)	<i>i</i> (%)	<i>RSD</i> (%)	<i>RB</i> (%)
40.1	86,72	92,96	80,62	7,96	7.26
40.2	92,80	94,23	87,45	5,99	5.51
40.3	84,85	93,67	79,48	8,41	7.69
50.1	79,04	94,66	74,82	20,91	20.01
50.2	87,75	95,14	83,48	12,86	12.64
50.3	82,05	98,10	80,49	15,62	14.92
60.1	84,04	96,85	81,39	21,58	21.27
60.2	85,55	94,92	81,21	19,78	19.78
60.3	81,35	88,14	71,70	26,83	26.53

Observa-se na tabela 4 que todos os testes simulados usando o modelo MSU apresentaram o erro médio relativo maior que 10 % e/ou índice de desempenho maior que 85 %, indicando que o modelo não descreve o fenômeno satisfatoriamente, apresentando baixa precisão e/ou exatidão (Chen e Morey, 1989; Madamba et al., 1996; Mohapatra e Rao, 2005; Camargo e Sentelhas, 1997). Além disso, observa-se que o erro médio relativo é maior para os testes com maior temperatura de secagem, tal diferença não foi observada nos resultados do modelo proposto.

Brooker et al. (1992) afirmam que o modelo MSU pode apresentar erros de até 20 % devido à: imprecisão das equações de secagem em camada fina; imprecisão da equação de equilíbrio higroscópico, principalmente para níveis de umidade relativa acima de 90%; além dos erros de medição dos dados experimentais.

Dalpasquale et al. (2009) obteve erros de aproximadamente 8 % do tempo final de secagem, ao simular a secagem em camada fixa de milho em diferentes temperaturas de secagem e teor de água inicial do produto. Os autores observaram que quanto maior a taxa de secagem, maior seria o erro do modelo MSU, e concluíram que este fato se deve

a convergência da simulação numérica. O café possui uma taxa de secagem maior que a do milho, devido às características físico-químicas do produto. Além disto, nos modelos analisados neste trabalho a constante de secagem foi descrita em função da temperatura, quanto maior a temperatura, maior é a constante de secagem, o que pode acarretar grande variação no valor do teor de água caso o modelo seja tendencioso.

Na tabela 5 estão apresentados os valores do índice de desempenho e do erro médio relativo do modelo proposto e do modelo MSU, além da diferença absoluta destes parâmetros estatísticos entre os dois modelos.

Tabela 5. Índice de desempenho e erro médio relativo do modelo proposto, do modelo MSU e a diferença absoluta entre os modelos, para cada teste simulado.

Teste	Proposto		MSU		Diferença	
	<i>i</i> (%)	<i>RSD</i> (%)	<i>i</i> (%)	<i>RSD</i> (%)	<i>i</i> (%)	<i>RSD</i> (%)
40.1	87,05	3,41	80,62	7,96	6,43	4,55
40.2	88,71	4,53	87,45	5,99	1,26	1,46
40.3	91,77	3,36	79,48	8,41	12,29	5,05
50.1	92,49	5,79	74,82	20,91	17,67	15,12
50.2	93,48	4,16	83,48	12,86	10,00	8,70
50.3	93,81	4,18	80,49	15,62	13,32	11,44
60.1	94,33	5,24	81,39	21,58	12,94	16,34
60.2	95,51	6,66	81,21	19,78	14,30	13,12
60.3	96,18	5,21	71,70	26,83	24,48	21,62

Observa-se na tabela 5 que todos os valores do índice de desempenho e do erro médio relativo do modelo proposto são melhores que o do modelo MSU, indicando que o modelo proposto possui melhor desempenho, gerando resultados simulados mais precisos, exatos e com menor erro.

Nas figuras 22, 23 e 24 estão apresentadas os gráficos de correspondência entre os valores observados experimentalmente e os valores simulados usando o modelo proposto e MSU, para os teste com temperatura de 40, 50 e 60 °C, respectivamente.

Com base nas tabelas 3 e 4, o modelo proposto apresentou baixos valores negativos do viés relativo, o que representa que o modelo superestima ligeiramente os valores de teor de água. Tal fato é observado nos gráficos de correspondência,

principalmente nas camadas superiores. Já o modelo MSU apresentou altos valores positivos do viés relativo, o que representa que o modelo subestima expressivamente os valores do teor de água. Observa-se nos gráficos de correspondência que o modelo MSU apresenta valores mais subestimados no final da secagem, aproximadamente depois que o produto perdeu metade do teor de água, e nas camadas superiores.

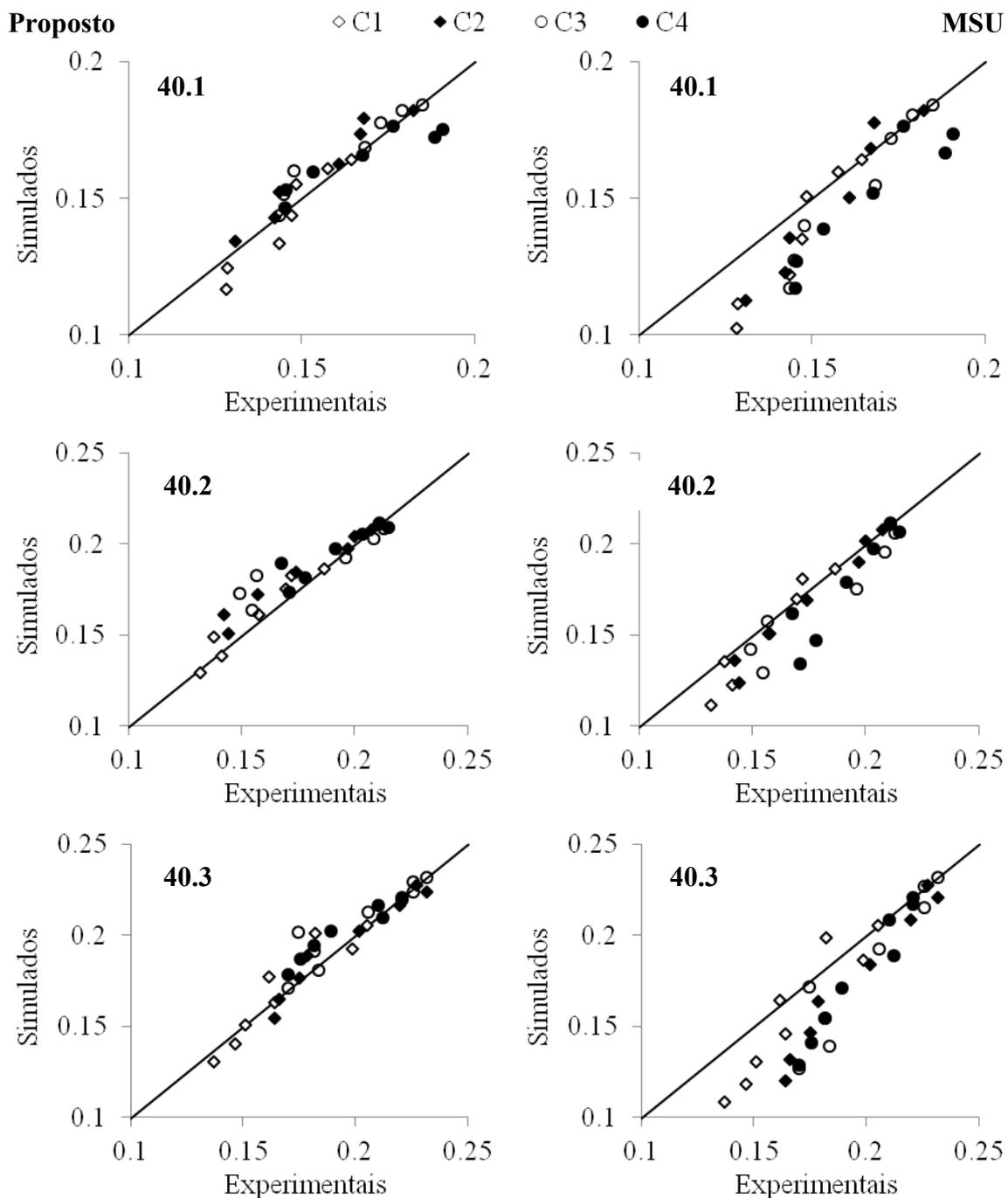


Figura 22. Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 40.1, 40.2 e 40.3.

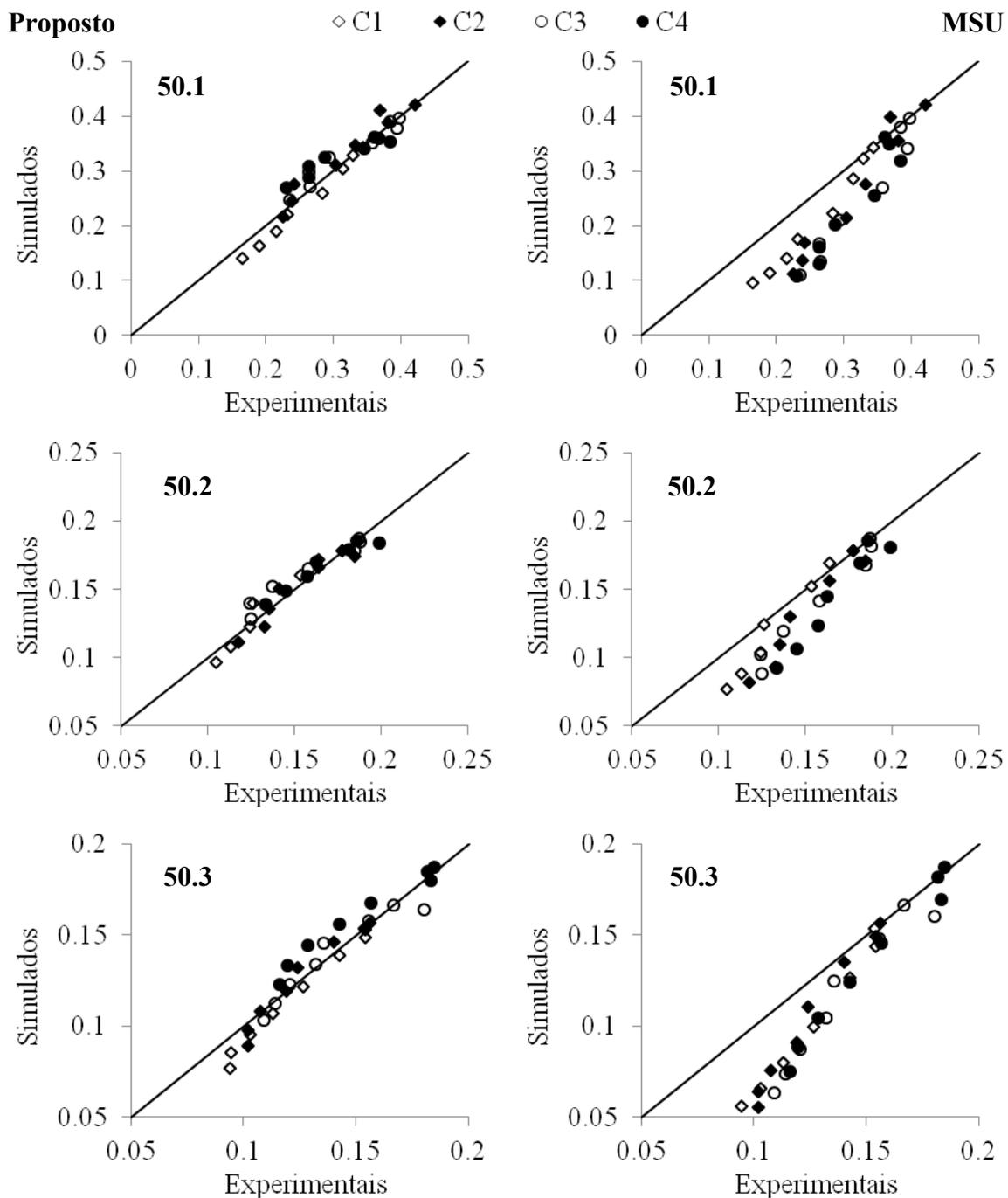


Figura 23. Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 50.1, 50.2 e 50.3.

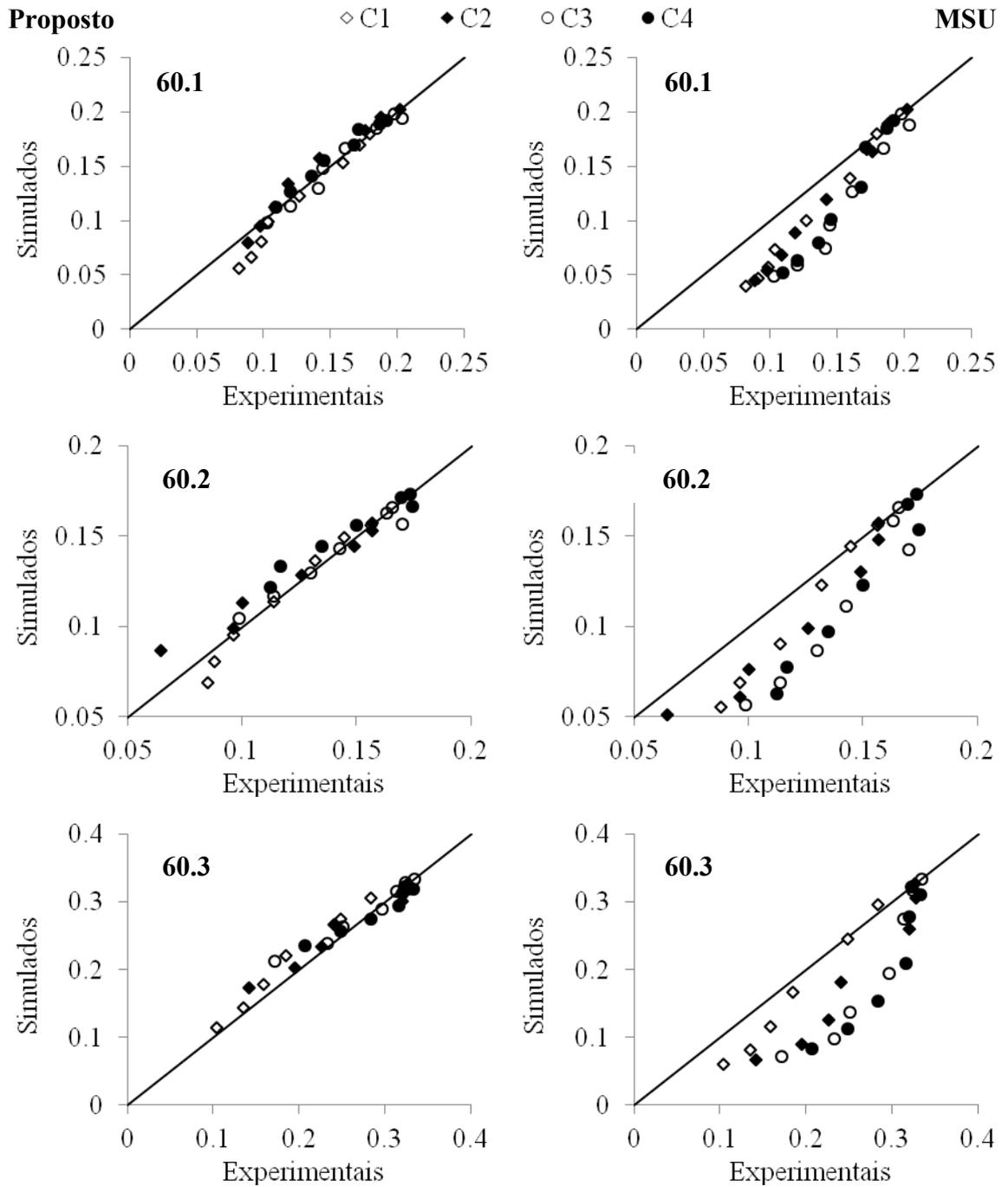


Figura 24. Valores simulados pelo modelo proposto e pelo modelo MSU em relação aos valores experimentais observados para os testes 60.1, 60.2 e 60.3.

3.3. Análise de sensibilidade dos parâmetros

3.3.1. Análise geral

Na tabela 6 estão apresentados todos os coeficientes de sensibilidade do modelo proposto, com relação à resposta do teor de água (S_M), umidade relativa do ar (S_{rh}), temperatura do produto (T_p) e temperatura do ar (S_T) devido à variação de cada parâmetro/variável analisados (β), organizados em ordem decrescente do valor do coeficiente de sensibilidade S_M .

Observa-se na tabela 6 que todos os parâmetros que representam condições iniciais e de entrada do modelo (M_i , L_i , T_{pi} , T_s , V_s , rh_{amb} , p_{vamb} , T_{amb} , p_{amb}), com exceção da L_i , T_{pi} e p_{amb} , apresentaram valores do coeficiente de sensibilidade do teor de água (S_M) maiores que 30 %, representando uma alta sensibilidade do teor de água à variação destes parâmetros. A espessura inicial da camada, a temperatura inicial do produto e a pressão do ar ambiente apresentarão uma considerável sensibilidade do teor de água (27,58 %, 15,64 % e 23,34 %, respectivamente).

O teor de água de equilíbrio e a constante de secagem (M_e e k) apresentaram altos valores do coeficiente de sensibilidade (32,19 % e 34,30 %, respectivamente), representando uma alta sensibilidade do teor de água a variação destes parâmetros. O coeficiente de transferência de calor por convecção (k_h) apresentou um baixo valor do coeficiente de sensibilidade do teor de água (6,69 %). O equilíbrio higroscópico e os coeficientes de transferência de calor e de massa são dependentes do regime de escoamento e das propriedades do fluido e da partícula. Neste modelo os coeficientes de transferência são descritas por equações empíricas, nas quais já são consideradas as características do ar e do escoamento normais a operação deste tipo de sistema. A modificação destes parâmetros no modelo basicamente é relacionado as características do produto, o que resultaria na modificação das equações empíricas da equação de equilíbrio higroscópico e constante de secagem.

Tabela 6. Coeficientes de sensibilidade S_M , S_{rh} , S_{Tp} , S_T e S_t do modelo proposto devido à variação dos parâmetros analisados.

β	S_M (%)	S_{rh} (%)	S_{Tp} (%)	S_T (%)	S_t (%)
T_s	119,11	170,24	75,93	85,03	115,16
M_i	91,26	46,80	27,65	50,43	46,30
T_{am}	46,44	112,99	7,18	20,82	43,27
V_{am}	38,37	44,12	22,94	31,69	34,28
K	34,30	14,83	6,56	9,51	15,38
M_e	32,19	11,38	5,69	8,04	13,51
rh_{am}	31,04	82,17	7,17	13,76	31,19
p_{vam}	30,93	82,11	4,35	13,79	30,44
ρ_{ar}	30,67	46,81	22,61	28,56	29,87
L_i	27,58	42,77	27,17	30,97	28,85
p_{am}	23,34	33,78	20,66	24,01	24,32
c_{ar}	19,90	29,98	24,15	25,74	22,85
T_{pi}	15,64	17,03	44,99	33,49	22,10
h_{lw}	14,15	18,98	6,50	9,83	12,73
k_h	6,69	7,22	11,98	12,80	7,58
h_{lp}	5,29	9,98	17,26	15,21	9,56
d_p	0,74	0,80	1,37	1,46	0,85
c_p	0,35	0,68	1,15	1,02	0,64
c_v	0,23	0,32	0,11	0,17	0,21
ε_p	0,05	0,08	0,01	0,03	0,04
p_f	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
ρ_p	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01

Todas as propriedades físicas do ar úmido (ρ_{ar} , c_{ar} , h_{lw} , c_v), com exceção da c_v , apresentaram valores do coeficiente de sensibilidade do teor de água maiores que 14 %, representando uma significativa sensibilidade do teor de água à variação destes parâmetros. A sensibilidade do teor de água não é significativa a variação do calor específico do vapor. As propriedades do ar e do vapor são descritas por valores e

equações há tempos desenvolvidas e comprovadas por diversos estudos, seus valores são descritos na literatura, não justificando a alteração destes valores no modelo.

Todas as propriedades físicas do produto (h_{lp} , c_p , d_p , ε_p , ρ_p), com exceção do h_{lp} , apresentaram valores do coeficiente de sensibilidade menor que 1,0 %, representando uma sensibilidade não significativa do teor de água a variação destes parâmetros. A mesma análise é válida para a perda de carga por fricção (p_f). A variação destes parâmetros podem ser negligenciados no modelo com o objetivo de simplificar o modelo, sugerindo-se utilizar valores iniciais como constantes no modelo. A única propriedade física do produto que apresentou uma sensibilidade considerável foi o calor latente da água no produto (h_{lp}).

3.3.2. Análise específica de cada parâmetro

A temperatura de secagem (T_s) apresentou o maior valor de S_M , igual a 119,11 %, valor maior que 100%. Este índice representa a grande dependência do processo de secagem com a temperatura. Isso ocorre principalmente devido à relação direta entre a temperatura e o gradiente de pressão de vapor, resultando em maior transferência de massa de vapor do produto para o ar. Com o aumento da temperatura, a umidade relativa do ar diminui e a pressão de vapor no interior do produto aumenta, aumentando conseqüentemente o gradiente de pressão de vapor. Na equação exponencial (Eq. 17), este aumento no gradiente é representado pela diminuição no teor de água de equilíbrio e possivelmente na constante de secagem.

Além disto, observa-se na tabela 6 que os coeficientes S_M e S_{rh} são maiores que os coeficientes S_{Tp} e S_T para a variação da temperatura de secagem. Esta diferença mostra que os fenômenos de transferência de massa são proporcionalmente mais sensíveis a temperatura que os fenômenos de transferência de calor, para as condições simuladas. Possivelmente isto ocorre porque o aumento do gradiente de temperatura é devido apenas ao aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto o aumento do gradiente de pressão de vapor simultaneamente é devido à redução da umidade relativa do ar e o aumento da pressão de vapor no produto.

Na figura 25 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar de secagem (T_s). Observa-se na figura 25 que com o aumento da temperatura, o teor de água do produto diminui em uma maior taxa, devido ao aumento na constante de secagem e na diferença entre a pressão de vapor do ar e do produto. Ao contrario do teor de água, a temperatura

do produto aumenta em uma maior taxa, devido ao aumento no coeficiente de transferência de calor e na diferença de temperatura entre o ar e o produto. Além disso, observa-se que o período temperatura constante do produto diminui, devido à rápida evaporação da camada superficial de água do produto.

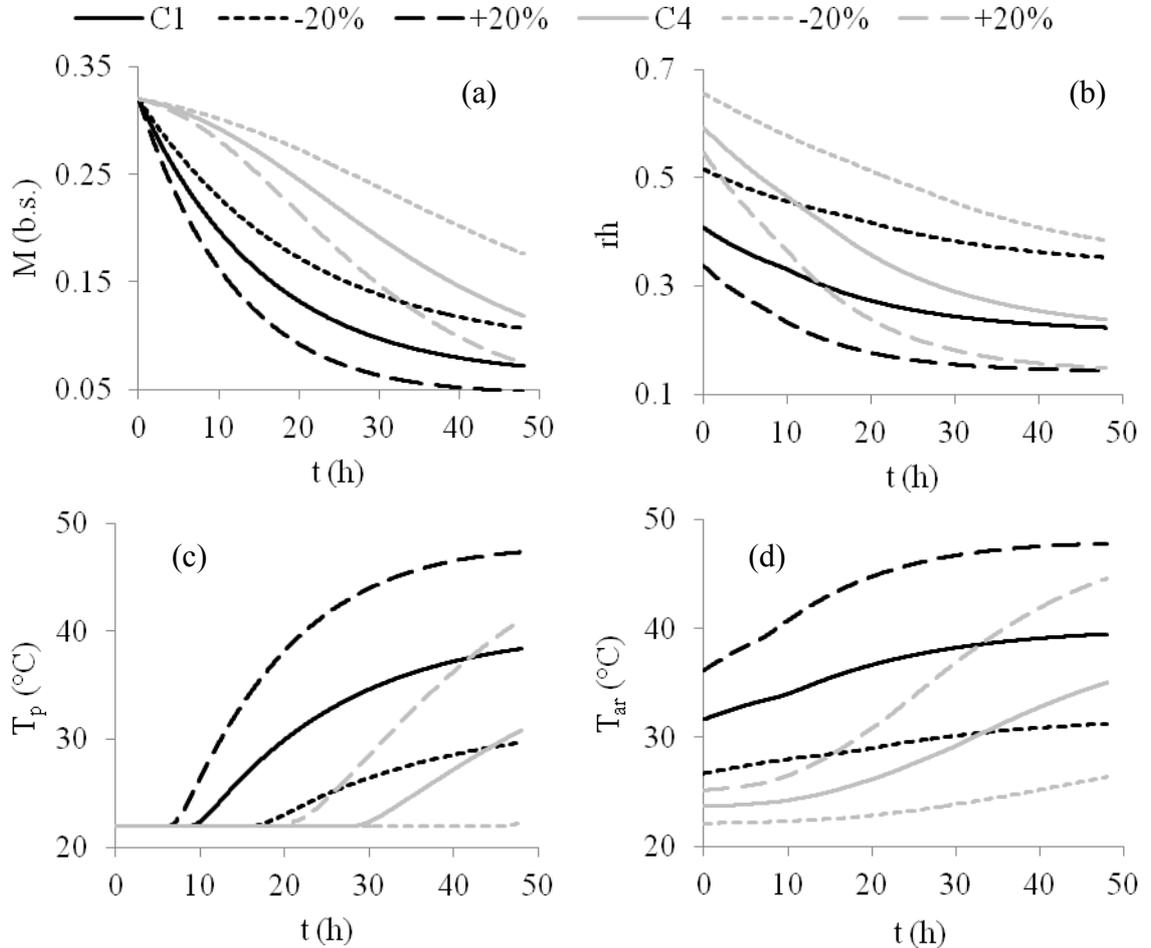


Figura 25. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar de secagem (T_s).

O teor de água inicial (M_i) apresentou um valor de S_M igual a 91,26 %, valor próximo a 100 %. Inicialmente o coeficiente S_{M,M_i} é 100 %, pois o valor inicial da variável resposta é o próprio parâmetro M_i , porém durante a secagem o teor de água varia devido à outros fatores, variando o valor de S_{M,M_i} .

Na figura 26 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água inicial (M_i). Observa-se na figura 26 que a taxa de secagem é diretamente proporcional ao teor de água inicial, isto ocorre devido à proporcionalidade da taxa de secagem em relação à

diferença entre o teor de água e o teor de água de equilíbrio (Eq. 17). Observa-se na figura 26c que o período de temperatura constante do produto tem uma relação direta com o teor de água inicial, provavelmente isto é devido à maior difusão interna de água no produto capaz de repor a camada superficial de água.

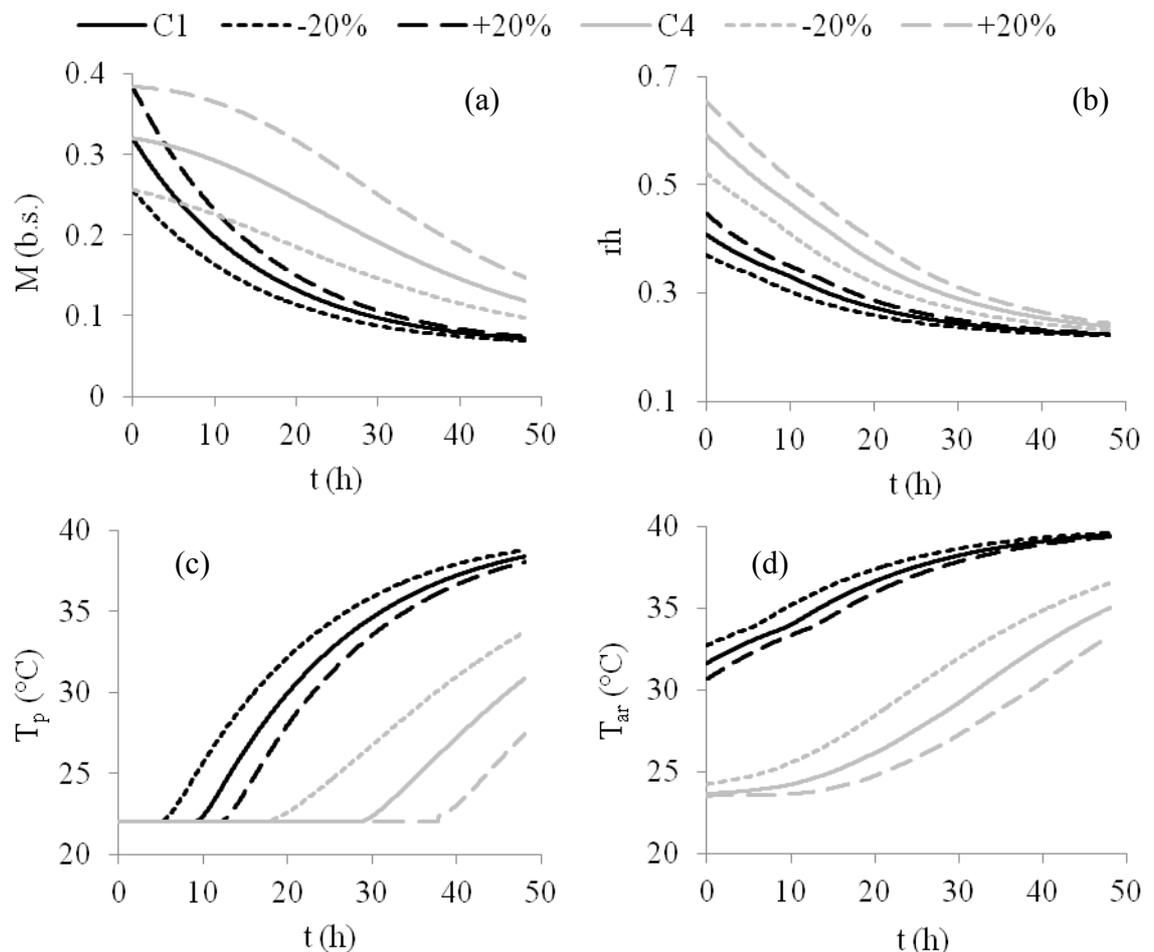


Figura 26. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água inicial do produto (M_i).

A velocidade do ar de entrada (V_{am}) apresentou um valor de S_t , igual a 34,28 %, representando que os fenômenos de transferência de calor e massa são muito sensíveis a variação deste parâmetro. No modelo proposto tanto o coeficiente de transferência de calor quanto à constante de secagem são função da velocidade. Além disso, quanto maior a velocidade, maior é a vazão de ar, aumentando a quantidade de calor possível de ser transferido para o produto, com o objetivo de evaporar a água e/ou aquecer o produto.

Na figura 27 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na velocidade do ar de entrada (V_{am}). Observa-se na figura 27 que a taxa de secagem e a taxa de variação de temperatura do produto possuem uma relação direta com a velocidade. A proporcionalidade da taxa de secagem é dada pela constante de secagem (Eq. 17), que no modelo proposto é função da velocidade. Além disso, a proporcionalidade da taxa de calor é dada pelo coeficiente de transferência de calor (Eq. 20), que também é função da velocidade. Quanto maior a velocidade maior é a turbulência do ar aumentando assim os coeficientes de transferência de massa e de calor, este fenômeno é representado neste modelo por equações empíricas de *Young e Dickens* e de *Baker* (Eq. 13 e 21).

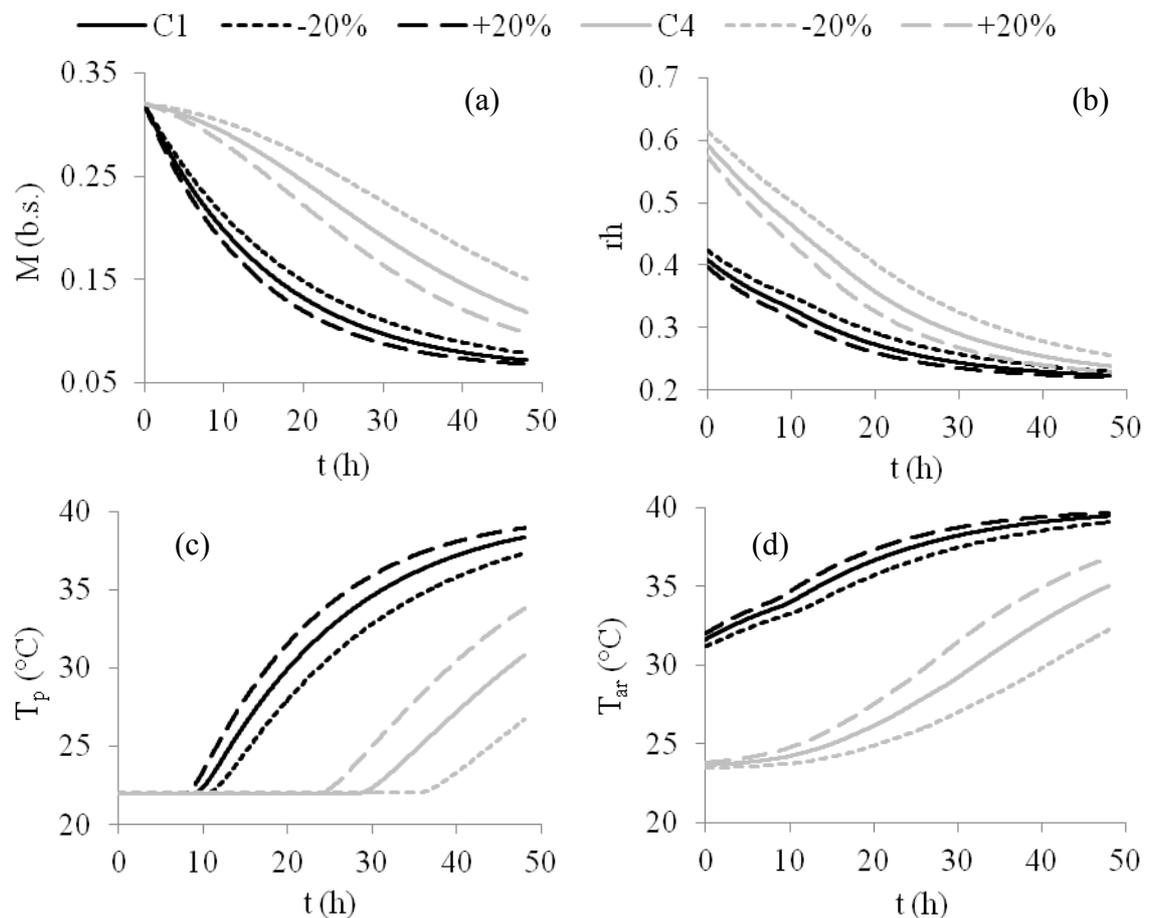


Figura 27. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na velocidade do ar de entrada (V_{am}).

A espessura inicial da camada (L_i) apresentou um valor de S_M igual a 27,58 %, representando que o fenômeno de secagem é consideravelmente sensível a variação

deste parâmetro. A espessura da camada é diretamente relacionada à quantidade de produto que há no secador, já que a massa específica do produto permanece constante.

Na figura 28 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na espessura inicial da camada (L_i). As condições do ar de secagem e as propriedades do produto são as mesmas para o caso base e para os casos de perturbação. O ar está na sua capacidade máxima de secagem ao passar na camada inicial de produto (baixa rh e alta T), porém o processo de secagem é limitado pelas características do produto. Assim, observa-se na figura 28a que a primeira camada não há variação no teor de água.

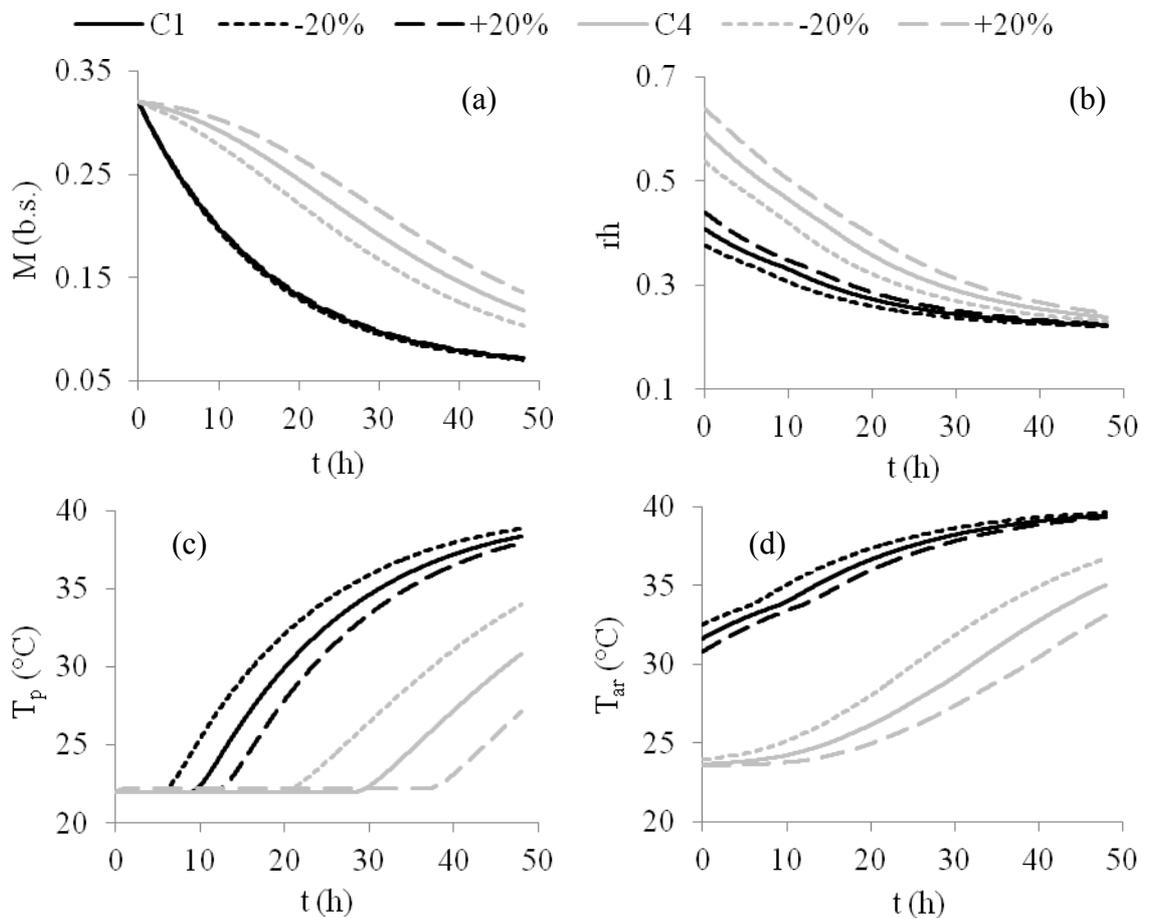


Figura 28. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na espessura inicial da camada (L_i).

Porém, caso a camada seja mais espessa, esta camada representará uma camada com uma maior massa de produto, o que resulta em uma maior transferência de calor e de massa de vapor. Conseqüentemente o ar irá receber uma maior massa de vapor e ceder mais calor, resultando em aumento na umidade relativa (Fig. 28b) e diminuição na

temperatura do ar (Fig. 28d). O ar mais úmido e com menor temperatura tem uma capacidade de secagem menor, o que acarreta em diminuição na taxa de secagem nas camadas superiores (Fig. 28a). Mesmo com maior quantidade de calor cedida pelo ar, o calor transferido é menor para cada unidade de massa, já que a camada tem maior massa, e maior quantidade de massa de água evaporada. Conseqüentemente, haverá uma menor parcela de calor sensível, resultando em uma menor variação na temperatura do produto (Fig. 28c).

A temperatura inicial do produto (T_{pi}) apresentou um valor de S_i igual a 27,86 %, representando que o fenômeno de secagem é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro. Na figura 29 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura inicial do produto (T_{pi}).

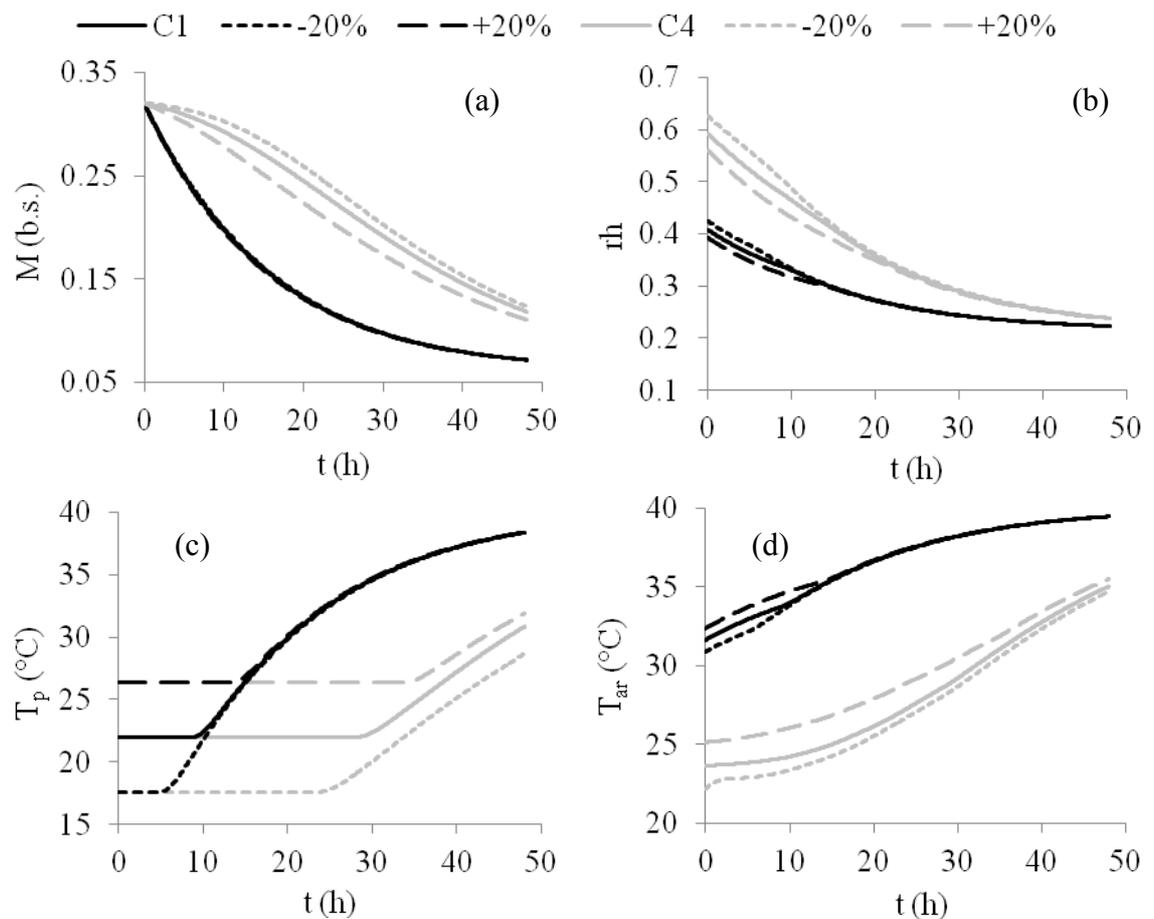


Figura 29. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura inicial do produto (T_{pi}).

Foi considerado no modelo proposto que a temperatura inicial do produto é igual a da temperatura ambiente, porém para avaliar a sensibilidade apenas do parâmetro T_{pi} , foi variada apenas a temperatura inicial do produto. O calor transferido por convecção é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre o ar e o produto (Eq. 20), quanto maior a T_p menor será o calor transferido, o que diminui a capacidade de secagem.

A constante de secagem (k) apresentou valores de S_M e S_{rh} superior aos valores de S_{Tp} e S_T (34,30 %, 14,83 %, 6,56 % e 9,51, respectivamente), representando que o fenômeno de transferência de massa é mais sensível a variação da variável k , que os fenômenos de transferência de calor. A constante de secagem representa um coeficiente de transferência de massa, este coeficiente varia com o tipo de produto e tipo de secador, devido à mudança na interação ar-produto. A constante de secagem geralmente é descrita por equações empíricas em função de outros parâmetros, desenvolvida para cada tipo de produto (Henderson et al., 1997). No modelo proposto a variação de k foi descrita pela equação de Afonso Júnior (2001) adaptada, em função da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

Na figura 30 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ da constante de secagem (k). Na equação de Sherwood (Eq. 17) a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o teor de água do produto e o teor de água de equilíbrio, e esta proporcionalidade é dada pela constante de secagem. Quanto maior a constante de secagem maior será a taxa de secagem, como observado na primeira camada (Fig. 30a). Porém, quanto maior a taxa de secagem maior quantidade de massa de vapor será transferido para o ar, deixando o ar mais úmido, assim conseqüentemente com uma menor capacidade de secagem, como observado na última camada. Depois de um determinado período, as camadas inferiores secarão com uma menor taxa, conseqüentemente o ar passara com maior capacidade de secagem nas camadas superiores, e o produto com uma constante de secagem maior secará a uma taxa maior que no caso base.

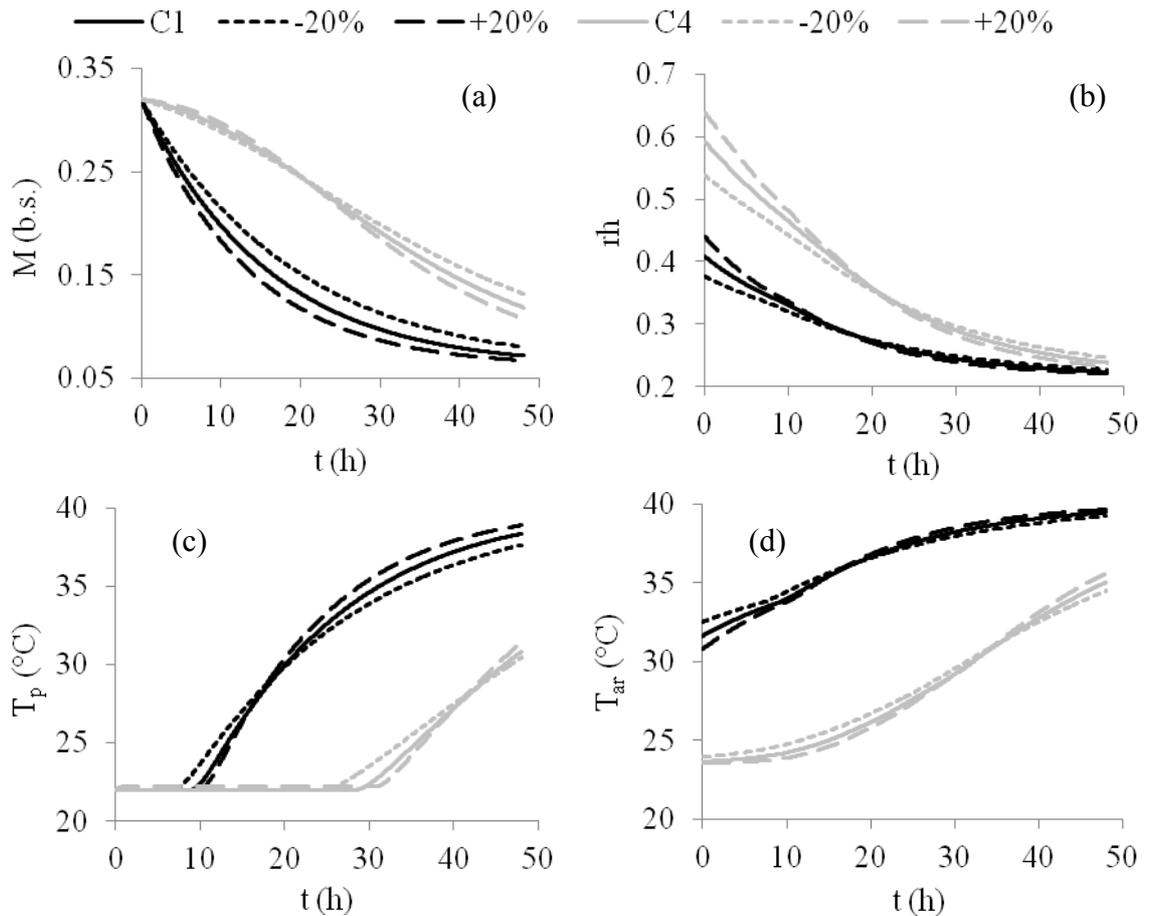


Figura 30. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na constante de secagem (k).

O teor de água de equilíbrio (M_e) apresentou valor de S_M quase seis vezes superior ao de S_{Tp} (32,19 % e 5,69, respectivamente), representando que o fenômeno de transferência de massa é mais sensível a variação desta variável que os fenômenos de transferência de calor. Como já discutido acima, a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o teor de água do produto e o teor de água de equilíbrio. Logo esta variável afeta diretamente a transferência de massa e indiretamente a transferência de calor.

Na figura 31 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água de equilíbrio do produto (M_e). O teor de água de equilíbrio possui uma relação inversa com a taxa de secagem. Quanto maior o teor de água de equilíbrio menor será a taxa de secagem, como pode ser observado na figura 31a.

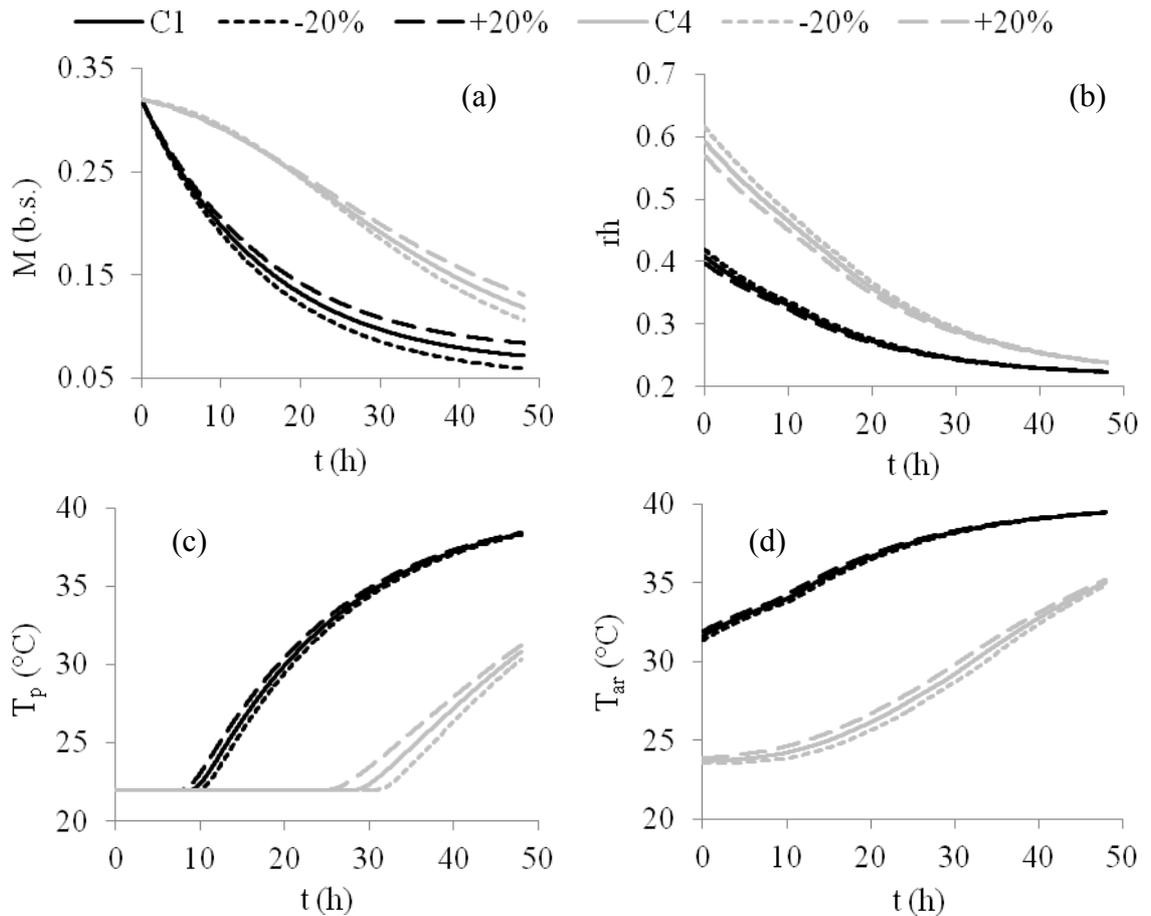


Figura 31. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no teor de água de equilíbrio (M_e).

O coeficiente de transferência de calor (k_h) apresentou valores de S_{T_p} e S_T aproximadamente duas vezes superiores aos valores de S_M e S_{rh} (11,98 %, 12,8 %, 6,69 % e 7,22 %, respectivamente), representando que o fenômeno de transferência de calor é mais sensível a variação desta variável que os fenômenos de transferência de massa. Porém a k_h apresentou um valor de S_i igual a 7,58 % que representa uma baixa, mas significativa, sensibilidade da operação de secagem com a variação da variável k_h .

Na figura 32 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ coeficiente de transferência de calor por convecção (k_h). A taxa de transferência de calor por convecção para o produto é proporcional a diferença de temperatura entre o produto e o ar, e essa proporcionalidade é dada pelo coeficiente k_h (Eq. 20). Com o aumento do coeficiente de transferência aumenta-se o calor transferido para uma mesma diferença de temperatura, por isso observa-se uma baixa variação na temperatura do ar (Fig. 32d). O calor cedido para o

produto é utilizado para evaporar a água do produto e para aquecê-lo. Porém, como as condições do ar e do produto são as mesmas, a transferência de água do produto para o ar continua praticamente a mesma (Fig. 32a). Logo, o calor excedente transferido será utilizado como calor sensível, observando-se uma maior variação na temperatura do produto (Fig 32c).

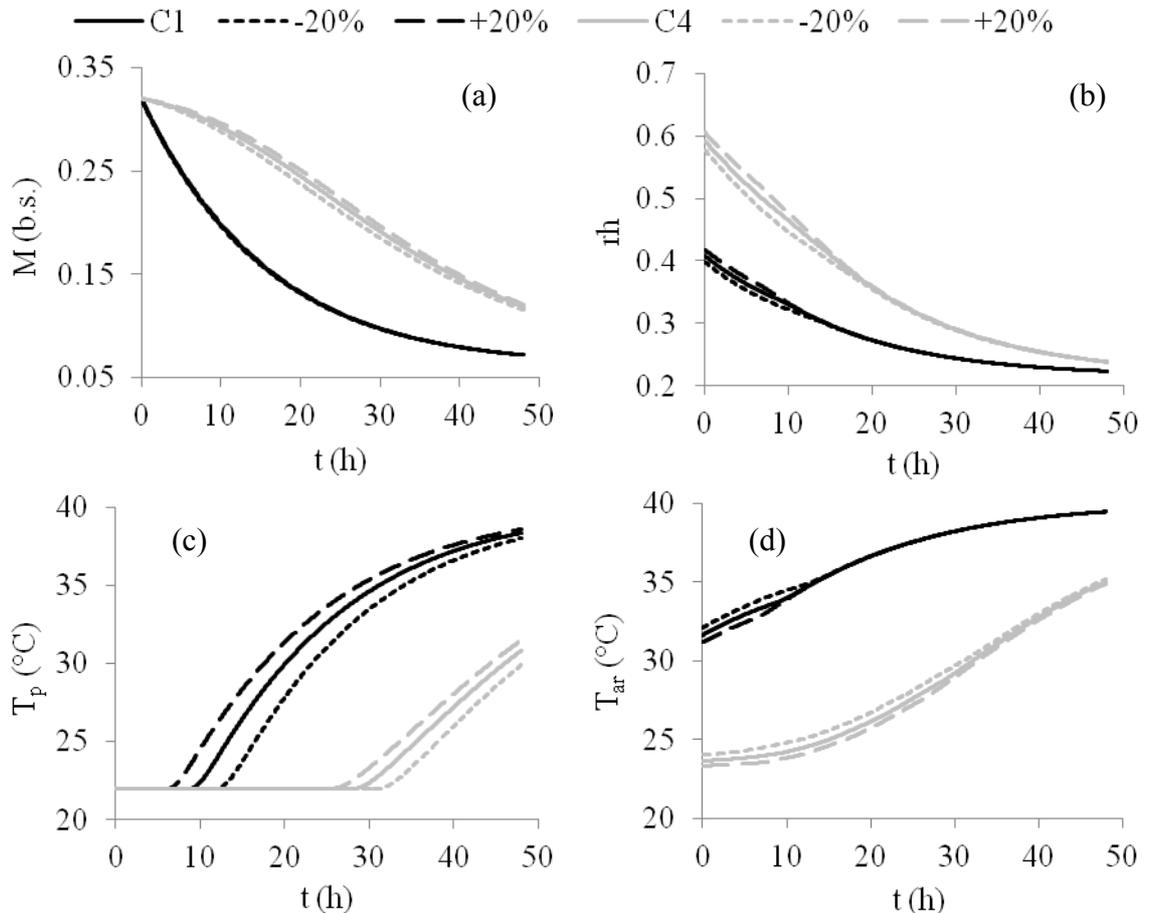


Figura 32. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no coeficiente de transferência de calor (k_h).

O calor latente de vaporização da água no interior do produto (h_{lp}) apresentou valores de S_{Tp} e S_T superiores aos valores de S_M e S_{rh} (11,98 %, 12,8 %, 6,69 % e 7,22 %, respectivamente), representando que o fenômeno de transferência de calor é mais sensível a variação desta variável que os fenômenos de transferência de massa. Porém o h_{lp} apresentou um valor de S_i igual 9,56 % que representa uma baixa, mas significativa, sensibilidade da operação de secagem com a variação da variável h_{lp} . Das

propriedades físicas do produto, este foi a única variável que possuiu um valor do coeficiente de sensibilidade significativo.

Na figura 33 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ do calor latente de vaporização da água do produto (h_{lp}). O h_{lp} representa a quantidade de calor necessária para evaporar uma unidade de massa de água no interior do produto. Quanto maior o h_{lp} , mais quantidade de calor o sistema tem que prover para evaporar a mesma quantidade de água. Assim como observado no item acima, as condições do ar e do produto são as mesmas, assim a transferência de massa de água do produto para o ar continua praticamente a mesma (Fig. 33a). Logo, se o h_{lp} for maior, uma maior quantidade do calor transferido será utilizada para evaporar a mesma quantidade de massa de água, diminuindo o calor sensível e conseqüentemente a temperatura do produto, como observado na figura 33c.

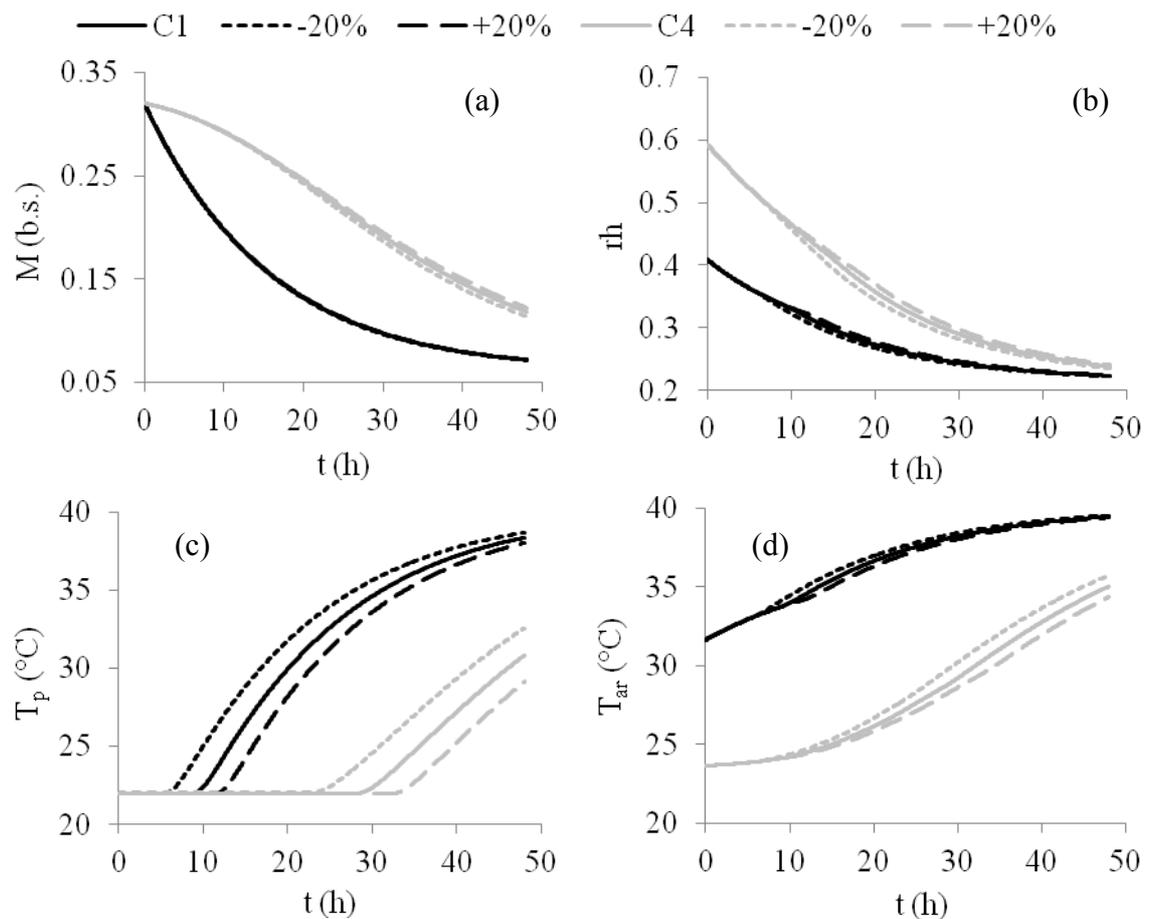


Figura 33. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor latente de vaporização da água do produto (h_{lp}).

A temperatura do ar ambiente (T_{am}) apresentou um valor de S_M igual a 46.44 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro.

Na figura 34 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar ambiente (T_{am}). Foi considerado no modelo proposto que a temperatura inicial do produto é igual a da temperatura ambiente, para avaliar a sensibilidade apenas do parâmetro T_{am} , a temperatura inicial do produto foi considerada igual entre todos os casos. A temperatura define o estado termodinâmico do ar ambiente, quanto maior a temperatura, maior será a pressão de vapor do ar correspondente a uma mesma umidade relativa. Como a pressão de vapor do ar ao passar em um aquecedor é a mesma, o ar com uma temperatura ambiente maior terá uma capacidade de secagem menor.

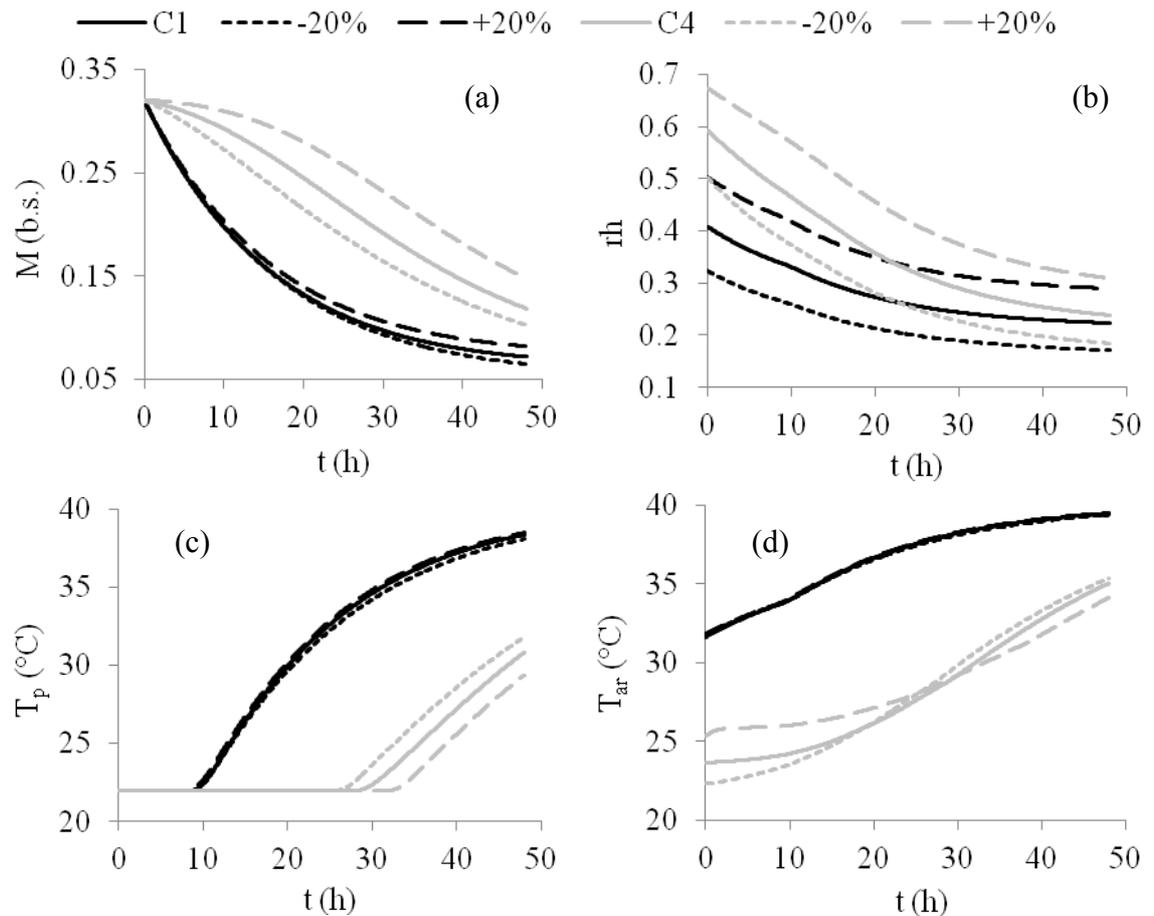


Figura 34. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na temperatura do ar ambiente (T_{am}).

A umidade relativa do ar ambiente (rh_{am}) apresentou um valor de S_M igual a 31,04 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro.

Na figura 35 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na umidade relativa do ar ambiente (rh_{am}). O ar ambiente é aquecido com o objetivo de aumentar a pressão de vapor de saturação, e diminuir a umidade relativa. Como no aquecedor a pressão do ar é praticamente constante, sua pressão de vapor também permanece constante. Se o ar ambiente possuir uma umidade relativa maior, o ar de secagem possuirá uma maior pressão de vapor. Nas camadas iniciais esta diferença na pressão de vapor não afetará significativamente a secagem, porém nas camadas finais esta diferença na pressão de vapor, e conseqüentemente na umidade relativa, afeta a capacidade de secagem do ar.

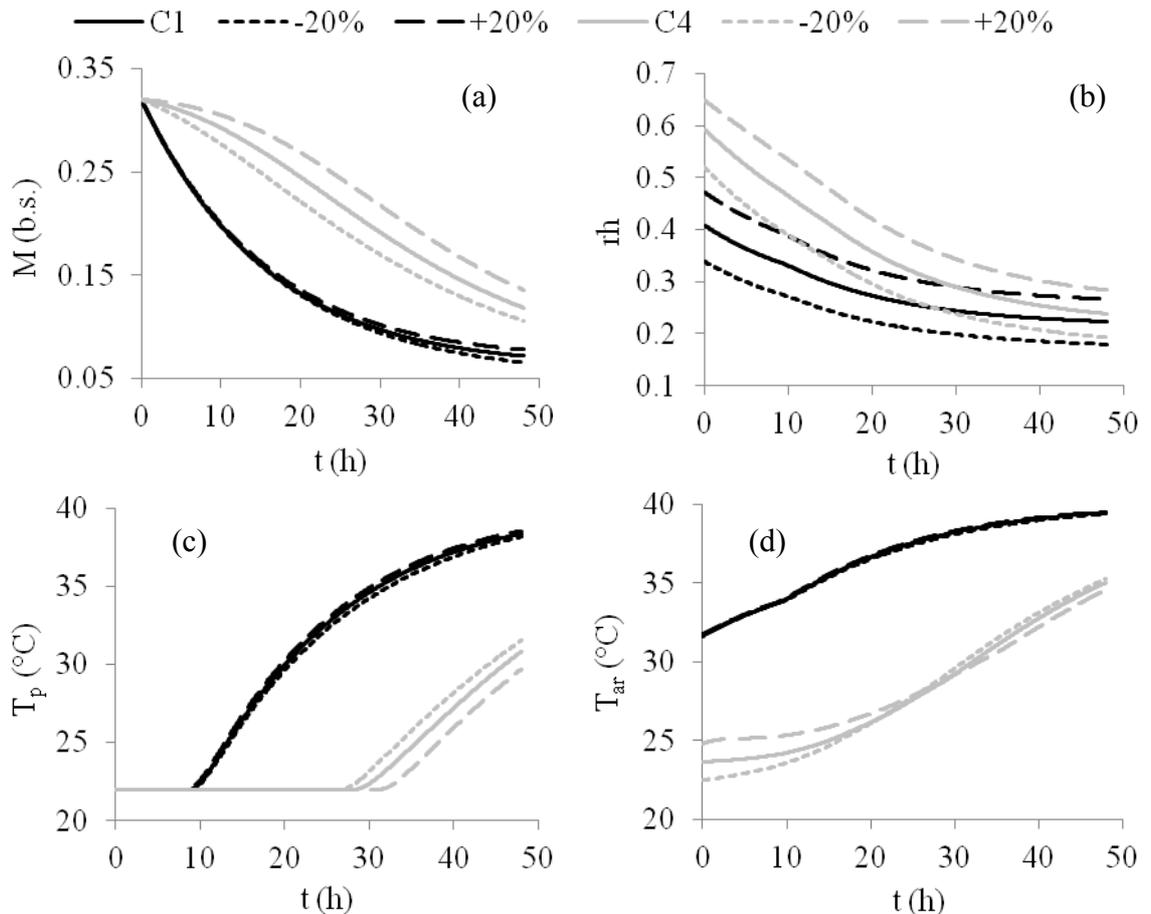


Figura 35. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na umidade relativa do ar ambiente (rh_{am}).

A pressão de vapor do ar ambiente (p_{vam}) apresentou um valor de S_M igual a 30.93 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro.

Na figura 36 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão de vapor do ar ambiente (p_{vam}). A pressão de vapor do ar ambiente teve praticamente a mesma variação da umidade relativa do ar ambiente, apresentando todos os coeficientes de sensibilidade com valores próximos, e mesmos gráficos da resposta das variáveis respostas. Isso acontece porque com a temperatura constante entre os casos simulados, umidade relativa apenas fica em função da pressão de vapor (Eq. 4).

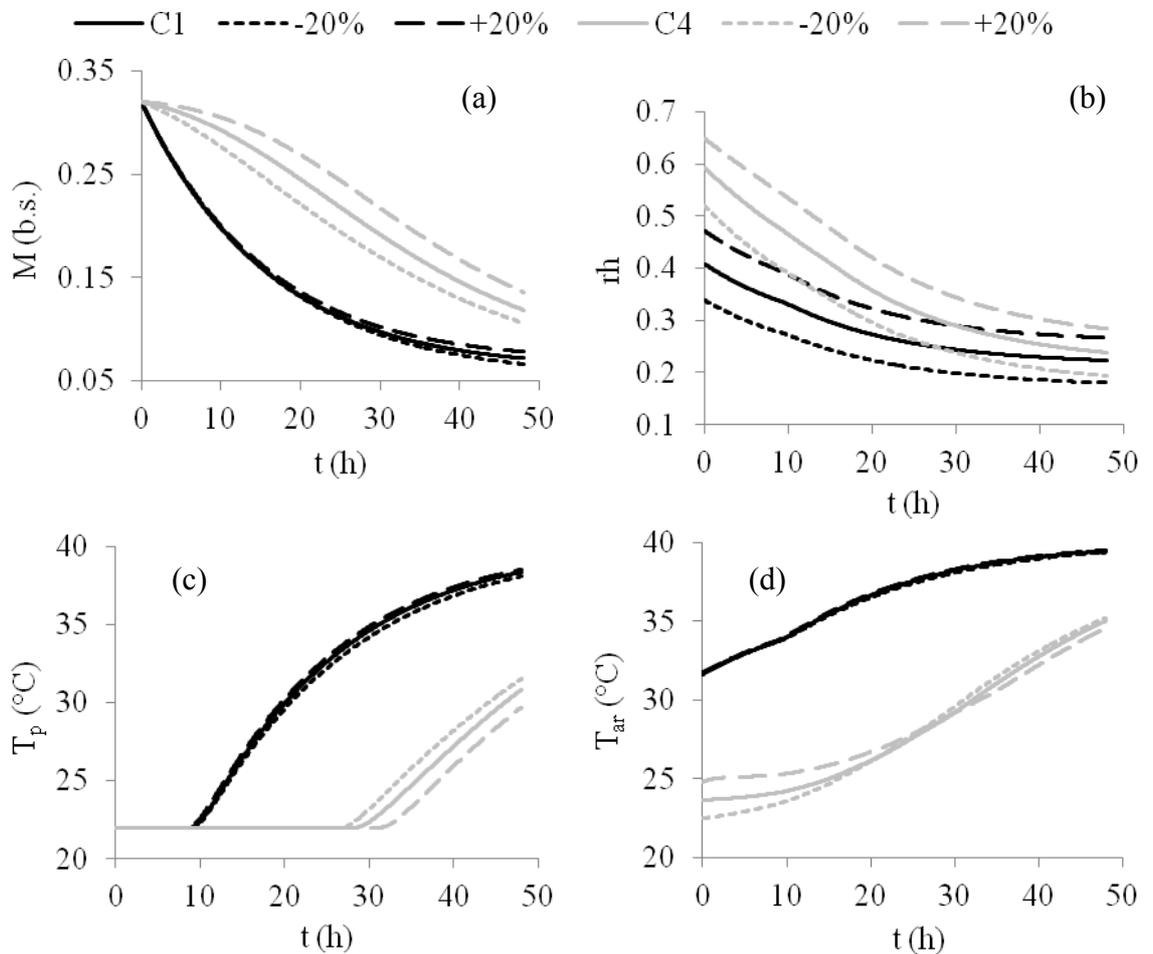


Figura 36. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão de vapor do ar ambiente (p_{vam}).

A pressão do ar ambiente (p_{am}) apresentou um valor de S_M igual a 23,34 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro.

Na figura 37 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão do ar ambiente (p_{am}). Assim como a temperatura, a pressão define o estado termodinâmico do ar. A pressão tem uma relação direta com a massa específica (Eq. 3), conseqüentemente quanto maior a pressão, maior será o fluxo de massa de ar, que resultará em maior capacidade de secagem. Além disso, a pressão tem uma relação inversa com a razão de mistura (Eq. 2), quanto menor a razão de mistura maior será a capacidade de secagem do ar.

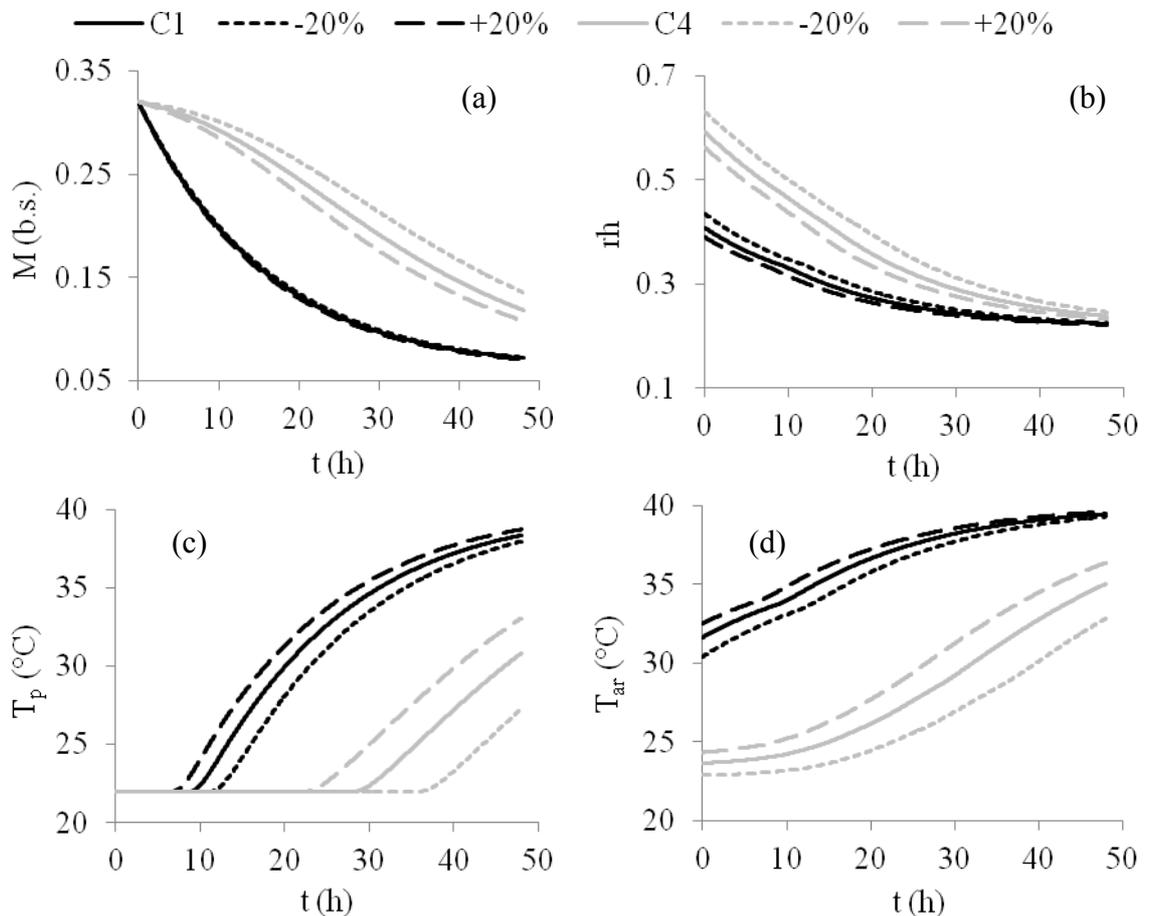


Figura 37. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na pressão do ar ambiente (p_{am}).

A massa específica do ar (ρ_{ar}) apresentou um valor de S_M igual a 30,67 %, representando que o teor de água é consideravelmente sensível a variação desta variável.

Na figura 38 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na massa específica do ar (ρ_{ar}). A massa específica tem uma relação direta com o fluxo de massa de ar, o que altera os fenômenos de transferência de calor e de massa também indiretamente. Quanto maior a massa específica maior serão as transferências de calor e de massa.

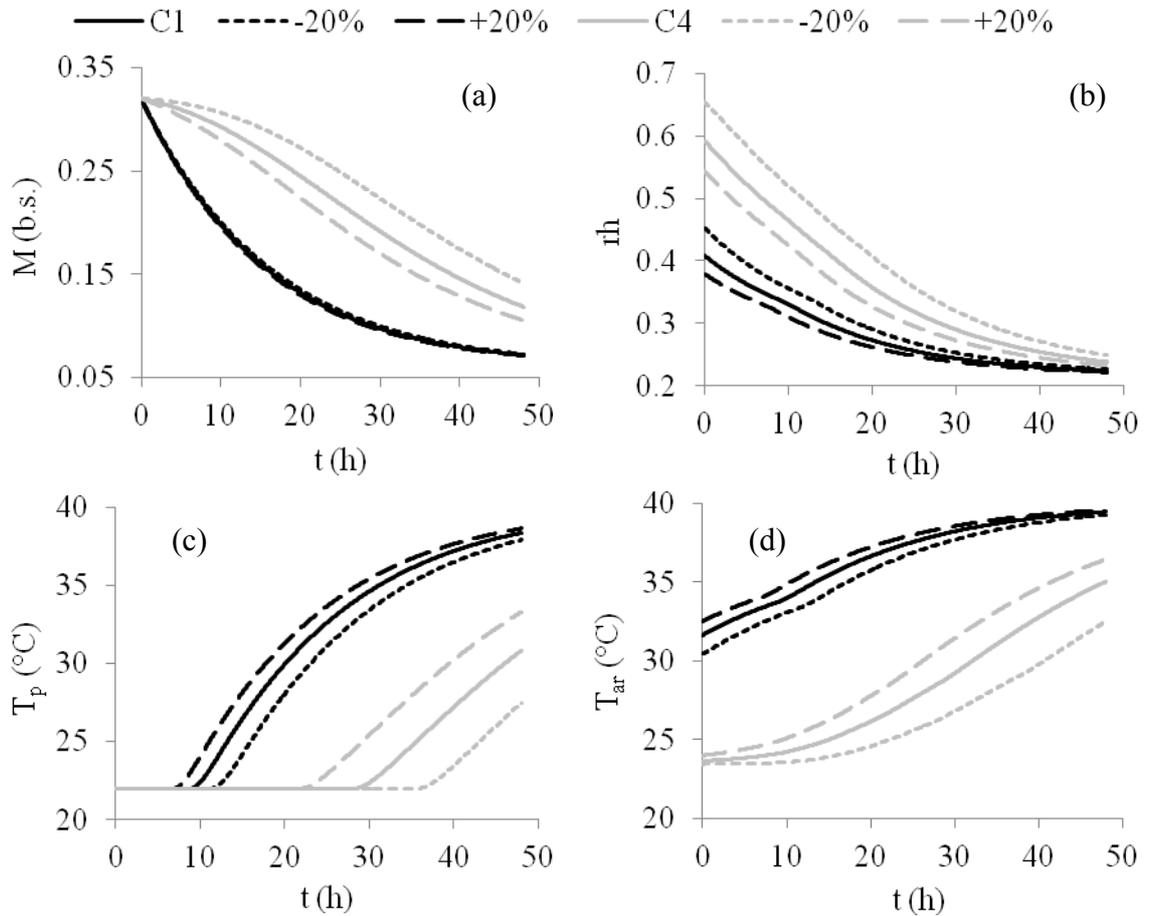


Figura 38. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ na massa específica do ar (ρ_{ar}).

O calor específico do ar (c_{ar}) apresentou um valor de S_M igual a 19,90 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação desta variável.

Na figura 39 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor específico do ar (c_{ar}). O calor específico tem uma relação direta com a entalpia do ar (Eq. 5). Caso o calor específico seja maior, o ar diminuirá menos a temperatura para uma mesma quantidade de calor transferido (Fig. 39d). Conseqüentemente na próxima camada, a diferença entre a

temperatura do ar e do produto será maior, transferindo mais calor para o produto, evaporando mais água (Fig. 39a) e aumentando mais a temperatura do produto (Fig 39c). Porém com uma temperatura maior, o ar possui uma pressão de vapor de saturação maior e uma umidade relativa menor (Fig. 39b).

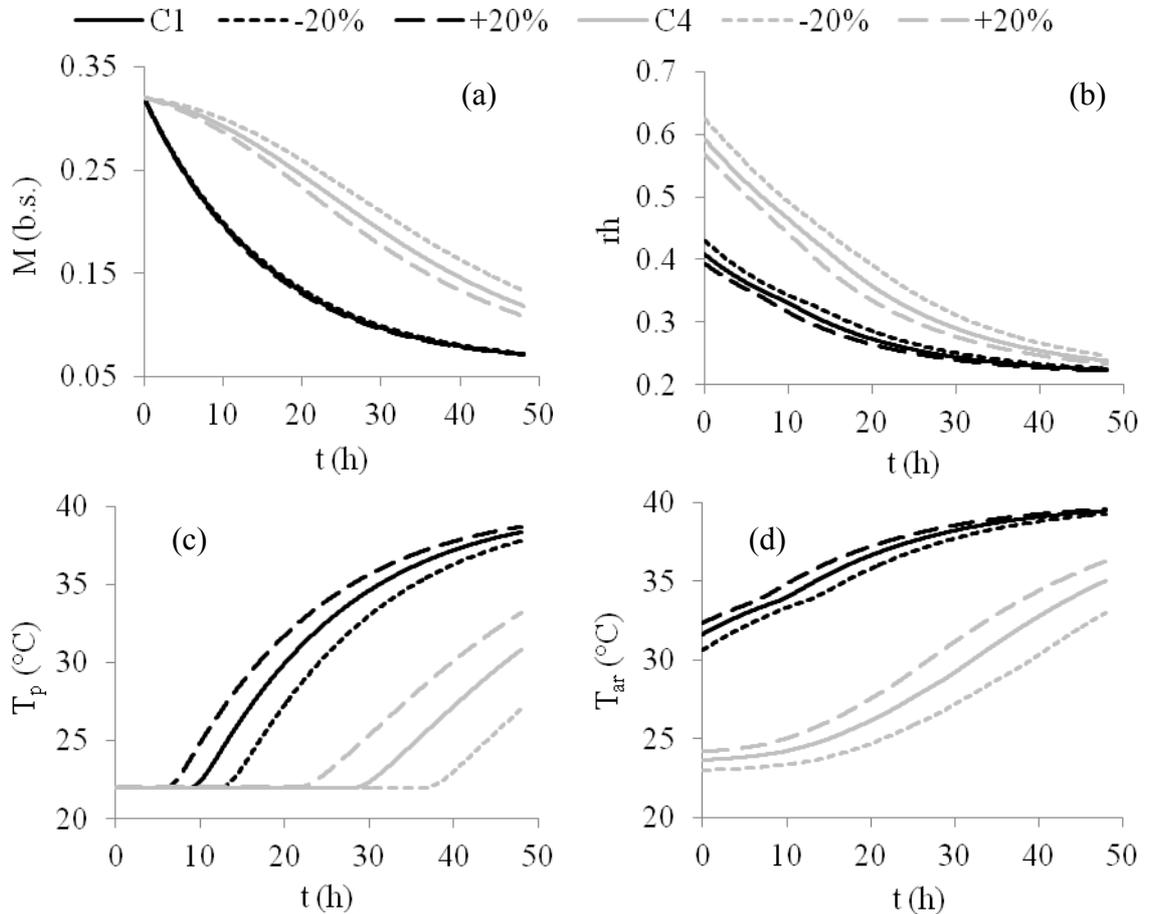


Figura 39. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor específico do ar (c_{ar}).

O calor latente de vaporização da água livre (h_{lw}) apresentou um valor de S_M igual a 12,73 %, representando que o teor de água do produto é consideravelmente sensível a variação deste parâmetro.

Na figura 40 estão apresentados os valores das variáveis respostas correspondentes ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor latente de vaporização da água livre (h_{lw}). Assim como o calor específico do ar, o calor latente de vaporização da água possui uma relação direta com a entalpia do ar (Eq. 5). Porém o inverso ocorre com o aumento do h_{lw} , pois o ar aumenta muito mais sua entalpia ao receber mais massa de vapor. Conseqüentemente, para transferir a mesma quantidade de calor, o ar precisa

variar mais sua temperatura (Fig. 40d), e com uma temperatura menor sua umidade relativa será maior (Fig. 40b).

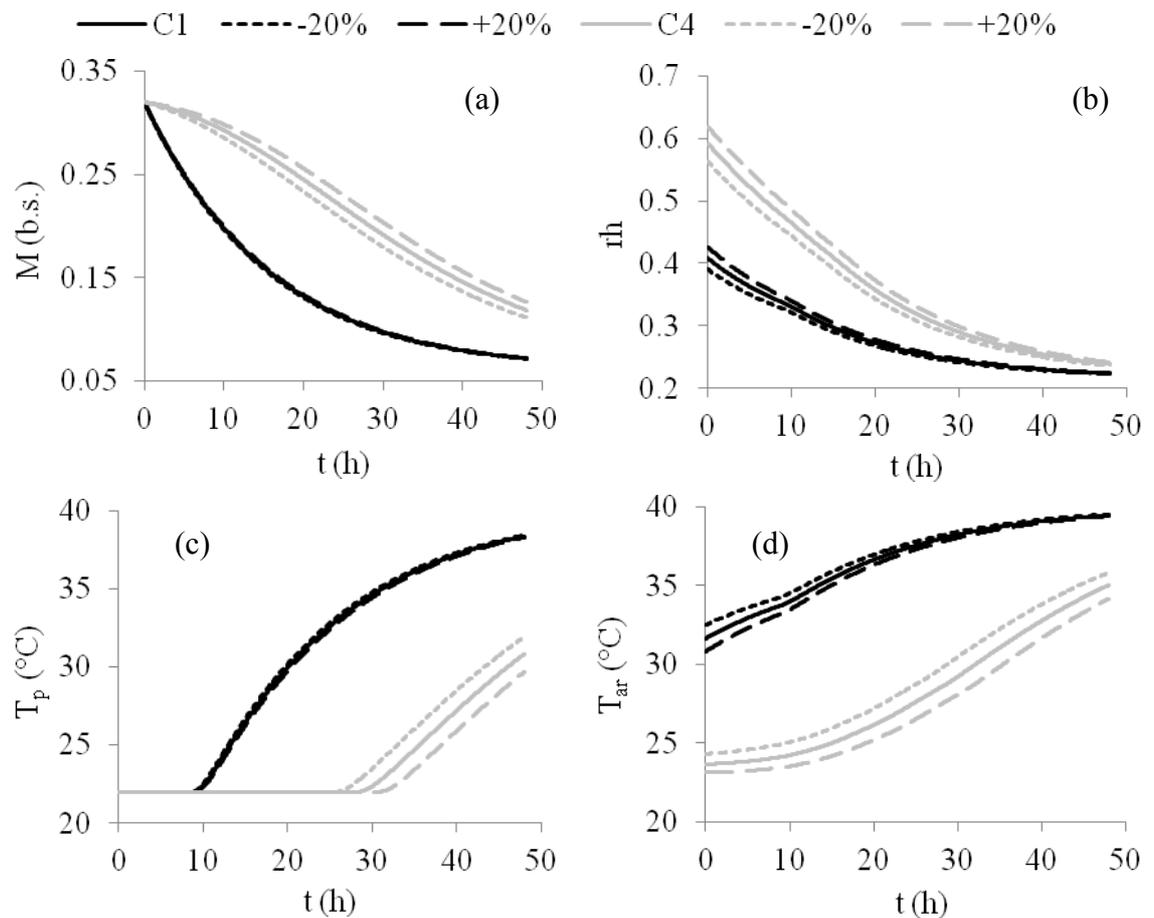


Figura 40. Valores do teor de água do produto (a), umidade relativa do ar na saída da camada (b), temperatura do produto (c) e temperatura do ar na saída da camada (d), correspondente ao caso base e a variação $\pm 20\%$ no calor latente de vaporização da água (h_{lv}).

3.3.3. Análise comparativa entre os modelos

Inicialmente podemos concluir, baseando-se na análise de sensibilidade diferencial, que a melhor performance do modelo proposto não está relacionada a consideração da perda de carga devido a fricção, e nem da consideração da variação das propriedades físicas, com excessão do calor latente de vaporização do produto, já que tais parâmetros apresentaram valores não significativos do coeficiente de sensibilidade do teor de água.

As demais considerações do modelo proposto que apresentaram coeficiente de sensibilidade significativo foram: a) variação interativa das propriedades do ar devido a

variação da massa de vapor, pressão e temperatura do ar, avaliada pela análise de sensibilidade do parâmetro rh_{am} ; b) calor latente de vaporização, avaliada pela análise de sensibilidade da variável h_{lp} ; c) consideração do período de temperatura constante do produto, avaliada pela análise de sensibilidade do parâmetro T_{pi} ; d) variação do fluxo de massa do ar, avaliada pela análise de sensibilidade do parâmetro V_{am} ; e) variação da pressão do sistema devido à variação da pressão de vapor, avaliada pela análise de sensibilidade do parâmetro p_{am} ; f) contração volumétrica da camada de produto, avaliada pela análise de sensibilidade do parâmetro L_i .

Com o objetivo de melhor avaliar o modelo proposto em relação ao modelo MSU, foi elaborado a tabela 7, baseado na análise de sensibilidade diferencial e subjetiva do modelo proposto. Na tabela 7 estão apresentados a tendência dos valores dos parâmetros/variáveis rh , T_p , h_{lp} , V , L e p do modelo proposto em relação aos valores do modelo MSU, a resposta da variação destes parâmetros na taxa de secagem e no teor de água, bem como o coeficiente de sensibilidade do teor de água obtidos.

Tabela 7. Tendência de variação dos parâmetros/variáveis, resposta na taxa de secagem e teor de água, e coeficiente de sensibilidade do teor de água em resposta a variação parâmetros/variáveis analisados.

β	Tendência de β	Tendência de dM/dt	Tendência de M	S_M (%)
rh	superior	inferior	superior	+ 31,04
T_p	inferior	inferior	superior	+ 15,64
h_{lp}	superior	inferior	superior	+ 5,29
V	superior	superior	inferior	- 38,37
L	inferior	superior	inferior	- 27,58
p	superior	superior	inferior	- 23,34

Observa-se na tabela 7 que os parâmetros rh , T_p e h_{lp} , tendem a superestimar os valores do teor de água e os parâmetros L , p e V tendem a subestimar os valores do teor de água. Se somarmos os valores de S_M obtemos o valor de $- 37,32$ %, o que indica uma conclusão de que o modelo proposto tende a subestimar o teor de água. Tal fato não foi verificado na análise de viés do modelo, que indicou o contrario, o modelo proposto em media tende a superestimar os valores do teor de água.

Algumas considerações devem ser observadas sobre a análise da soma de S_M : segundo Hamby (1994) os valores do coeficiente de sensibilidade são função das condições consideradas no *caso base* e da amplitude de variação analisada; a diferença entre os valores dos modelos não corresponde exatamente a amplitude de variação analisada ($\pm 20\%$); a análise de sensibilidade diferencial é realizada para um único caso, não abrangendo toda amplitude de variação os parâmetros e variáveis; e a variação interativa entre os parâmetros não foi analisada.

Para se corrigir a falta de abrangência de toda a amplitude de variação dos parâmetros/variáveis, o coeficiente de sensibilidade foi corrigido multiplicando-se a amplitude máxima relativa de cada parâmetro, com o objetivo de ser ter um valor aproximado do coeficiente de sensibilidade para a variação máxima do parâmetro/variável. Na tabela 8 estão apresentados o valor mínimo considerado do parâmetro (X_{min}), o valor máximo considerado do parâmetro (X_{max}), a amplitude relativa do parâmetro (AR) e o coeficiente de sensibilidade corrigido (\hat{S}_M).

Tabela 8. Valores mínimos, valores máximos, amplitude relativa e coeficiente de sensibilidade corrigido dos parâmetros rh , T_p , h_{lp} , V , L e p .

β	X_{min}	X_{max}	AR (%)	\hat{S}_M (%)
rh	0 %	100 %	200	+ 62,08
T_p	20 °C	40 °C	66,67	+ 10,43
h_{lp}	2534,61 kJ kg ⁻¹	3300,58 kJ kg ⁻¹	30,20	+ 1,60
V	7 m ³ min ⁻¹ t ⁻¹	20 m ³ min ⁻¹ t ⁻¹	96,30	- 36,95
L	10,08	20 cm	65,98	- 18,20
p	80 kPa	100 kPa	22,22	- 5,19

No modelo MSU o balanço de massa água do ar é realizada pelo balanço da razão de mistura. Já no modelo proposto o balanço de massa de água do ar é realizado pelo fluxo de massa de vapor, o qual está relacionado com a razão de mistura e densidade do ar, ambas propriedades função da pressão do ar, pressão de vapor, e temperatura, tornando o processo interativo e provavelmente gerando um valor superior de rh . A amplitude relativa foi calculada considerando a umidade relativa máxima que o ar possui no ambiente. Com base na análise de sensibilidade do parâmetro rh_{am} , o

modelo proposto tende a apresentar valores superiores de teor de água do produto de no máximo 62,08 % devido à esta consideração.

No modelo proposto o balanço de calor é restrita a quantidade de calor que o ar pode fornecer, o calor latente total do produto nunca é superior ao calor fornecido pelo ar, podendo no máximo ser igual ao calor fornecido, neste caso o calor sensível é igual a zero, criando um período de temperatura constante do produto. Logo, devido à esta restrição, o valor da T_p simulado usando o modelo proposto tende a ser inferior aos valores de simulados usando o modelo MSU. A amplitude relativa foi calculada considerando que no caso simulado a temperatura do produto pode variar de sua temperatura inicial até entrar em equilíbrio com o ar de secagem. Com base na análise de sensibilidade do parâmetro T_{pi} , o modelo proposto tende a apresentar valores superiores de teor de água do produto de no máximo 10,43 % devido à esta consideração.

No modelo MSU o calor latente de vaporização da água é considerada como sendo igual ao valor da água livre. Segundo Carvalho (1994) o calor necessario para a mudança de fase líquido-vapor da água no interior do produto é maior que a energia requerida para volatizar a mesma quantidade de água livre nas mesmas condições, devido à energia requerida para romper as ligações físico-químicas. No modelo proposto o calor latente de vaporização da água no interior do produto é representada pela equação 15, a qual gera valores superiores de h_{lp} se comparado ao modelo MSU. A amplitude relativa do h_{lp} foi calculada considerando a variação de teor de água de 1.85 (b.s.) a aproximadamente zero. Com base na análise de sensibilidade da variável h_{lp} , o modelo proposto tende a apresentar valores superiores de teor de água do produto de no máximo 1,60 % devido à esta consideração.

No modelo MSU a variação no fluxo de ar durante o processo é negligenciado, considerando um valor constante. No modelo proposto o fluxo de massa de ar aumenta a cada camada, devido ao aumento da massa de vapor, já que a área é considerada constante, e devido à variação na massa específica do ar. A amplitude relativa do fluxo de massa de ar foi calculado considerando os valores máximos e mínimos recomendados para a secagem em camada fixa de produtos agrícolas. Com base na análise de sensibilidade do parâmetro V_{am} , o modelo proposto tende a apresentar valores inferiores de teor de água do produto de no máximo 38,37 % devido à esta consideração.

No modelo proposto é considerada a contração da camada de produto, representada pela equação 26. Como no modelo MSU a espessura da camada é

considerada como valor constante, o valor da L do modelo proposto sempre será inferior. A amplitude relativa da espessura da camada foi calculada com base no teor de água máximo dos frutos de café (1.85 b.s.) a aproximadamente zero. Com base na análise de sensibilidade do parâmetro L_i , o modelo proposto tende a apresentar valores inferiores de teor de água do produto de no máximo 18,20 % devido à esta consideração.

No modelo MSU a pressão do ar ambiente é utilizada para o cálculo da razão de mistura e massa específica do ar de secagem, como uma condição de contorno. No modelo proposto é considerado a variação de pressão do sistema, devido à fricção, que foi avaliada como não significativa pela análise de sensibilidade, e devido à variação da pressão de vapor. Assim a pressão do sistema tende a aumentar devido ao aumento na pressão de vapor camada a camada. A amplitude relativa foi calculada considerando a variação de pressão correspondente ao acréscimo de pressão de vapor de 20 kPa. Com base na análise de sensibilidade do parâmetro p_{am} , o modelo proposto tende a apresentar valores inferiores de teor de água do produto de no máximo 5,19 % devido à esta consideração.

Se somarmos os valores do coeficiente de sensibilidade corrigido (\hat{S}_M) obtemos o valor de + 13,77 %, o que indica que o modelo proposto tende a superestimar o teor de água devido à variação máxima dos parâmetros. Deve-se resaltar que esta análise é apenas um indicativo. Recomenda-se uma análise estatística mais detalhada para um conclusão mais confiável.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

1. O modelo proposto de secagem de frutos de café em camada fixa representa satisfatoriamente o processo para as condições experimentais simuladas, já que o modelo apresentou um erro médio relativo menor que 10 % e um índice de desempenho maior que 85 % para todos os testes simulados.
2. O modelo MSU não representa satisfatoriamente o processo de secagem de frutos de café em camada fixa para as condições experimentais simuladas, já que o modelo apresentou um erro médio relativo maior que 10 % e um índice de desempenho menor que 85 % para todos os testes simulados.
3. Com a análise de viés dos modelos foi verificado o modelo proposto superestima ligeiramente os valores de teor de água, ao contrario do modelo MSU que subestima expressivamente os valores simulados.
4. O modelo proposto não é sensível a variação das propriedades físicas do produto (c_p , d_p , ε_p , ρ_p), com exceção do calor latente de vaporização da água do produto (h_{lp}). A variação destes parâmetros podem ser negligenciados no modelo com o objetivo de simplificar o modelo, sugerindo-se utilizar valores iniciais como constantes no modelo.
5. Provavelmente o modelo proposto tende a superestimar os valores do teor de água devido à variação das propriedades do ar e do calor latente de vaporização da água no interior do produto, além da consideração do período de temperatura constante do produto no início do processo.
6. Provavelmente o modelo tende a subestimar os valores do teor de água devido à consideração da contração da camada de produto e variação da pressão e fluxo de massa do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso Júnior, P. C. Aspectos físicos, fisiológicos e de qualidade do café em função da secagem e do armazenamento. Ph.D. Thesis, Viçosa Federal University, 2001.
- American Society of Agricultural Engineerings – ASAE. 2001. D245.5 Moisture relationship of plant-based agricultural products, in *ASAE Standards 2001: Standards Engineering Practices Data*. St. Joseph: ASAE Press. 1:522-538.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company. 450p.
- Camargo, A. P., Sentelhas, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5(1):89-97.
- Carvalho, N. M. 1994. *A secagem de sementes*. Jaboticabal:FUNEP/UNESP, 165p.
- Chen, C.; Morey, R. V. 1989. Comparison of four ERH/EMC equations. *Transactions of ASAE* 32:983-990.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. 2010. Acompanhamento da safra brasileira café safra 2010. [10/20/2011]. Available from <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/ab115d6fec883315856bfb3f57bc7a0a.pdf>.
- Corrêa, P. C. Simulação de secagem de café em camada espessa. M.Sc. Dissertation, Viçosa Federal University, 1982.
- Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Afonso Júnior, P. C., Oliveira, G. H. H., Valente, D. S. M. 2010. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *International Journal of Food Science & Technology* 45:2016-2022.
- Dalpasquale, V. A., Sperandio, D. 2010. Modelo de Simulação de Secagem De Produtos Agrícolas Usando Entalpia do Ar Constante. *Engenharia Agrícola* 30(4):726-731.
- Dalpasquale, V. A., Sperandio, D., Kolling, E. M. 2009. Performance of the Michigan drying simulation model with a new drying rate concept. *Acta Scientiarum. Agronomy* 31(4):553-557.
- Dincer, I. 1998. Moisture loss from wood products during drying - Part I: moisture diffusivities and moisture transfer coefficients. *Energy Sources* 20:531–539.
- Fritzson, P. 2003. *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. New York: Wiley-IEEE Press. 1033p.

- Guiné, R. P. F., Rodrigues, A. E., Figueiredo, M. M. 2007. Modelling and simulation of pear drying. *Applied Mathematics and Computation* 192:69–77.
- Hamby, D. M. 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment* 32: 135-154.
- Henderson, S. M., Perry, R. L., Young, J. H. 1997. *Principles of Process Engineering*. Fourth edition. St. Joseph: ASAE Press. 353p.
- Izadifar, M., Mowla, D., 2003. Simulation of a cross-flow continuous fluidized bed dryer for paddy rice. *Journal of Food Engineering* 58:325–329.
- Lecorvaisier, E., Darche, S., Silva, Z. E., Silva, C. K. F. 2010. Theoretical model of a drying system including turbulence aspects. *Journal of Food Engineering* 96:365–373.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., Buckle, K. A. 1996. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* 29:75-97.
- Mattsson, S. E., Elmqvist, H, Otter, M. 1998. Physical system modeling with Modelica. *Control Engineering Practice* 6:501-510.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. 2003. Instrução Normativa nº 8, de 11 de julho de 2003. 12p.
- Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. 2010. Balança Comercial Brasileira Janeiro/Dezembro 2010. [10/20/2011]. Available from http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1298052907.pdf
- Mohapatra, D., Rao, P. S. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering* 66:513-518.
- Pujana-Arrese, A., Mendizabal, A., Arenas, J., Prestamero, R., Landaluze, J. 2010. Modelling in Modelica and position control of a 1-DoF set-up powered by pneumatic muscles. *Mechatronics* 20:535–552.
- Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE. 2011. Informe Estatístico do Café. [20/10/2011]. Available from <http://www.sebrae.com.br/setor/cafe/o-setor/mercado/Exportacoes%20cafe%20maio.pdf>
- Sfredo, M. A., Finzer, J. R. D., Limaverde, J. R. 2005. Heat and mass transfer in coffee fruits drying. *Journal of Food Engineering* 70:15-25.
- Slätteke, O. 2006. *Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section*. Lund: Lund University Press.
- Sodja, A., Zupančič, B. 2009. Modelling thermal processes in buildings using an object-oriented approach and Modelica. *Simulation Modelling Practice and Theory* 17:1143–1159.

- Toğrul, H. 2005. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering* 71:311-323.
- Vossen, H. A. M. van der. 1979. Methods of preserving the viability of coffee seed in storage. *Seed Science and Technology* 7(1):65-74.
- Willmott, C. J., Ackleson, S. G., Davis, R. E., Feddema, J. J., Klink, K. M., Legates, D. R., O'Donnell, J., Rowe, C. M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90(5):8995-9005.
- Zare, D., Minaei, S., Mohamad Zadeh, M., Khoshtaghaza, M. H. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management* 47:3241–3254

APÊNDICE A

Modelo Proposto em linguagem Modelica

```
package DryLAB "Drying Library"
  package Interfaces
    connector AirPort
      import SI = Modelica.SIunits;
      SI.Temperature T(displayUnit = "degC", start = 293.15)
        "Temperatura do ar K";
      SI.Pressure p(displayUnit = "kPa", start = 92000) "pressão do ar umido";
      SI.MassFraction rh( min = 0, start = 0.6) "umidade relativa ad";
      flow SI.Velocity V(displayUnit = "m/min", start = 0)
        "Velocidade do ar m/s";
    end AirPort;
  partial model AirPort_a
    extends DryLAB.Media.MoistAir;
    import SI = Modelica.SIunits;
    import Modelica.Constants.R;
    SI.Pressure pva( displayUnit = "kPa") "pressão de vapor do ar Pa";
    SI.Pressure pvsata( displayUnit = "kPa", start = 5000)
      "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
    SI.MassFraction Ha( min = 0, start = 0.5) "razão de mistura ad";
    SI.Density roa "massa específica do ar kg/m3";
    SI.SpecificEnergy ha( displayUnit = "kJ/kg")
      "entalpia específica do ar úmido J/kg";
    Real ma_flow( final unit = "kg/(s.m2)") "fluxo de massa de ar kg/(m2.s)";
    Real mva_flow( final unit = "kg/(s.m2)") "fluxo de massa de vapor kg/(m2.s)";
  public
    AirPort port_a;
  equation
    //psicometria
    pva = port_a.rh * pvsata;
    Ha = pva / (1.605 * (port_a.p - pva));
    roa = (1 + Ha) * (port_a.p - pva) * MMA / (R * port_a.T); // kg m-3
    ha = cp * (port_a.T - T0) + Ha * (lv + cpv * (port_a.T - T0));
    (pvsata/AA) = exp((A + B*port_a.T + C*port_a.T^2 + D*port_a.T^3 + E*port_a.T^4) / (F*port_a.T - G*port_a.T^2)); //Pa
    //fluxo
    ma_flow = roa * port_a.V;
    mva_flow = (Ha / (Ha + 1)) * roa * port_a.V;
  end AirPort_a;
  partial model AirPort_b
    extends DryLAB.Media.MoistAir;
    import SI = Modelica.SIunits;
    import Modelica.Constants.R;
    SI.Pressure pvb( displayUnit = "kPa") "pressão de vapor do ar Pa";
    SI.Pressure pvsatb( displayUnit = "kPa", start = 5000)
      "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
    SI.MassFraction Hb( min = 0, start = 0.5) "razão de mistura ad";
    SI.Density rob "massa específica do ar kg/m3";
    SI.SpecificEnergy hb( displayUnit = "kJ/kg")
      "entalpia específica do ar úmido J/kg";
    Real mb_flow( final unit = "kg/(s.m2)") "fluxo de massa de ar kg/(m2.s)";
    Real mvb_flow( final unit = "kg/(s.m2)")
      "fluxo de massa de vapor kg/(m2.s)";
  public
    AirPort port_b;
  equation
    //psicometria
    pvb = port_b.rh * pvsatb;
    Hb = pvb / (1.605 * (port_b.p - pvb));
    rob = (1 + Hb) * (port_b.p - pvb) * MMA / (R * port_b.T); // kg m-3
```

```

        hb = cp * (port_b.T - T0) + Hb * (lv + cpv * (port_b.T - T0));
        (pvsatb/AA) = exp((A + B*port_b.T + C*port_b.T^2 + D*port_b.T^3 + E*por
t_b.T^4)/(F*port_b.T-G*port_b.T^2)); //Pa
        //fluxo
        mb_flow = rob * port_b.V;
        mvb_flow = (Hb / (Hb + 1)) * rob * port_b.V;
    end AirPort_b;
    partial model PartialTwoPort
    extends AirPort_a;
    extends AirPort_b;
    end PartialTwoPort;
end Interfaces;
package Components
    model Input
        extends DryLAB.Interfaces.AirPort_b;
        import SI = Modelica.SIunits;
        import Modelica.SIunits.Conversions.from_degC;
        parameter SI.Conversions.NonSIunits.Temperature_degC T;
        parameter SI.Pressure p;
        parameter Real rh;
        parameter Real V;
    equation
        port_b.T = from_degC(T);
        port_b.p = p;
        port_b.rh = rh/100;
        port_b.V = - V/60;
    end Input;
    model Output
        extends DryLAB.Interfaces.AirPort_a;
    end Output;
    model Heater
        extends DryLAB.Interfaces.PartialTwoPort;
        parameter Modelica.SIunits.Conversions.NonSIunits.Temperature_degC Ts;
        import Modelica.SIunits.Conversions.from_degC;
    equation
        ma_flow + mb_flow = 0;
        port_a.p = port_b.p;
        pva = pvb;
        port_b.T = from_degC(Ts);
    end Heater;
    model Dryer
        extends DryLAB.Products.CoffeeFruit;
        import SI = Modelica.SIunits;
        parameter SI.Length Li "espessura inicial da camada";
        SI.Length L(start = Li) "espessura da camada";
        SI.Pressure deltap(displayUnit = "kPa", start = 0);
        Real kh( final unit = "W/(m2.K)", start = 0);
        SI.HeatFlux dQ_flow;
        SI.HeatFlux dQl_flow;
        SI.HeatFlux dQh_flow;
    equation
        //Balanço de massa e energia
        ma_flow + mb_flow = mva_flow + mvb_flow;
        der(M) = - k*(M-Me);
        -(mva_flow + mvb_flow) = - der(M) * rop * L / (1 + M);
        (mb_flow*hb + ma_flow*ha) = kh * (Tm - Tp);
        kh = 0.9918 * cp * mm_flow * (3600*dp*mm_flow/(0.06175+16.5e-5*(Tm-
273.15)))^(-0.34);
        //Energia
        dQ_flow = dQl_flow + dQh_flow;
        dQ_flow = (mb_flow*hb + ma_flow*ha);
        dQl_flow = if dQ_flow>-(mvb_flow + mva_flow)*lvp then -
(mvb_flow + mva_flow)*lvp else kh * (Tm - Tp);
        dQh_flow = rop*L*cpp*der(Tp);
        //Fricção
        rop*L/(1+M) = ropi*Li/(1+Mi); //contração de camada
        port_b.p - port_a.p = pvb - pva - deltap;
        deltap = L * roa * Vm ^ 2/ (2 * dp) * ((1 -
por)/por^3) * (3.5 + 300 * (1 -
por) / (3600 * roa * Vm * dp / (0.06175+16.5e-5*(Tm-
273.15))))); //Ergun com vis em função de T

```

```

end Dryer;
end Components;
package Media
  record MoistAir
    import SI = Modelica.SIunits;
    import Modelica.Constants.R;
    parameter SI.Temperature T0 = 273.15 "Temperatura de referência K";
    parameter SI.MolarMass MMA = 0.02897 "Massa Molar do ar kg/mol";
    parameter SI.SpecificHeatCapacity cp = 1006.9254
      "calor específico do ar seco J/(kg.K)";
    parameter SI.SpecificHeatCapacity cpv = 1875.6864
      "calor específico do ar seco J/(kg.K)";
    parameter SI.SpecificEnergy lv = 2502535.259
      "calor latente de vaporização J/kg";
    parameter SI.DynamicViscosity vis = 1.79E-
5 "viscosidade do ar kg/(m.s)";//mudar vis para uma equação (Brooker)
      //equação de pvsat
    constant Real AA = 22105649.25;
    constant Real A = - 27405.526;
    constant Real B = 97.5413;
    constant Real C = - 0.146244;
    constant Real D = 0.12558E-3;
    constant Real E = - 0.48502E-7;
    constant Real F = 4.34903;
    constant Real G = 0.39381E-2;
  end MoistAir;
end Media;
package Products
  partial model CoffeeFruit "Physical Properties of Coffee Fruit"
    import SI = Modelica.SIunits;
    import Modelica.Constants.pi;
    extends DryLAB.Interfaces.PartialTwoPort;
    //Parâmetros do produto
    SI.MassFraction M(start = Mi, min = 0) "teor de água do produto ad";
    SI.Temperature Tp(start = Tpi, displayUnit = "degC")
      "temperatura do produto";
    SI.Density rop "massa especifica kg/m3";
    SI.VolumeFraction por "porosidade";
    SI.Length dp( displayUnit = "mm") "diâmetro médio do fruto";
    SI.SpecificHeatCapacity cpp "calor específico";
    // Parâmetros Iniciais
    parameter SI.MassFraction Mi "teor de água inicial ad";
    parameter SI.Temperature Tpi "Temperatura inicial do produto";
    parameter SI.Density ropi = 420.8490 + 198.8201 * Mi -53.8475 * Mi^2;
    // Equilibrium Moisture
    SI.MassFraction Me( start = Mi/8, min = 0) "Teor de água de equilíbrio";
  // ad
    constant Real ae = -0.0001;//correa 2010
    constant Real be = 46.8549;
    constant Real ce = 1.8299;
    // Latent heat of vaporization
    SI.SpecificEnergy lvp "Calor latente de vaporização do produto";
    constant Real al = 7.7866E6; //Afonso Jr;
    constant Real bl = -19.6621;
    constant Real cl = 0.0499;
    // Drying kinetics
    Real k( final unit = "1/s");
    //Parâmetros Médios
    SI.Temperature Tm "Temperatura média";
    SI.MassFraction rhm "Umidade Relativa média";
    SI.Velocity Vm "Velocidade média";
    Real mm_flow( final unit = "kg/(s.m2)", min= 0);
    constant SI.Velocity Vr = 0.21667;
  equation
    //Média
    Tm = (port_a.T+port_b.T)/2;
    rhm = (port_a.rh+port_b.rh)/2;
    Vm = (port_a.V-port_b.V)/2;
    mm_flow = (ma_flow - mb_flow)/2;
    //Product Properties
    pi * dp ^ 3 / 6 = (621.46 + 152.78 * M + 12.417 * M^2)*1e-9;
  end CoffeeFruit;
end Products;

```

```

rop = 420.8490 + 198.8201 * M - 53.8475 * M^2;
por = 0.001 * (432.324 + 114.307 * M - 32.317 * M^2);
cpp = 944.7 + 3619.7 * M - 1992.0 * M^2; //J/(kg.K)
//Drying Properties
k = (1 / 3600) * (Vm/Vr)^0.7 * (- 0.1196 + 1.4180e-3 * (Tm -
273.15) + 6.9938e-5 * (Tm - 273.15)^2 + 0.6545 * rhm - 0.5369 * rhm^2 -
7.5170e-3 * rhm * (Tm - 273.15));
lvp = 1000*(2502.49 - 2.43 * (Tm-273.15))*(1+a1*exp(bl*M^cl));
1 - rhm = exp(ae*(be+Tm-273.15)*(Me*100)^ce); //Henderson Modificado
end CoffeeFruit;
end Products;
package Tests
model T40_1
  DryLAB.Components.Input i( V=8.6, p=93843, T=23.5, rh=55.9);
  DryLAB.Components.Output o;
  DryLAB.Components.Heater h( Ts=40);
  DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1643, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.1822, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
  DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.1844, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.1765, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
  connect(i.port_b, h.port_a);
  connect(h.port_b, d1.port_a);
  connect(d1.port_b, d2.port_a);
  connect(d2.port_b, d3.port_a);
  connect(d3.port_b, d4.port_a);
  connect(d4.port_b, o.port_a);
end T40_1;
model T40_2
  DryLAB.Components.Input i( V=8.81, p=93683, T=25.4, rh=52.7);
  DryLAB.Components.Output o;
  DryLAB.Components.Heater h( Ts=40);
  DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1866, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.2076, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
  DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.2113, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.2112, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
  connect(i.port_b, h.port_a);
  connect(h.port_b, d1.port_a);
  connect(d1.port_b, d2.port_a);
  connect(d2.port_b, d3.port_a);
  connect(d3.port_b, d4.port_a);
  connect(d4.port_b, o.port_a);
end T40_2;
model T40_3
  DryLAB.Components.Input i( V=8.27, p=94216, T=20.2, rh=67.7);
  DryLAB.Components.Output o;
  DryLAB.Components.Heater h( Ts=40);
  DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.2053, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.2273, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
  DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.2319, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.2210, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
  connect(i.port_b, h.port_a);
  connect(h.port_b, d1.port_a);
  connect(d1.port_b, d2.port_a);
  connect(d2.port_b, d3.port_a);
  connect(d3.port_b, d4.port_a);
  connect(d4.port_b, o.port_a);
end T40_3;
model T50_1
  DryLAB.Components.Input i( V=9.2, p=94376, T=22.9, rh=48);
  DryLAB.Components.Output o;
  DryLAB.Components.Heater h( Ts=50);
  DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.3436, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.4214, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
  DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.3973, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
  DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.3615, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
  connect(i.port_b, h.port_a);
  connect(h.port_b, d1.port_a);

```

```

    connect(d1.port_b, d2.port_a);
    connect(d2.port_b, d3.port_a);
    connect(d3.port_b, d4.port_a);
    connect(d4.port_b, o.port_a);
end T50_1;
model T50_2
    DryLAB.Components.Input i( V=8.82, p=93750, T=23.2, rh=62.2);
    DryLAB.Components.Output o;
    DryLAB.Components.Heater h( Ts=50);
    DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1779, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.1779, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
    DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.1877, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.1860, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
    connect(i.port_b, h.port_a);
    connect(h.port_b, d1.port_a);
    connect(d1.port_b, d2.port_a);
    connect(d2.port_b, d3.port_a);
    connect(d3.port_b, d4.port_a);
    connect(d4.port_b, o.port_a);
end T50_2;
model T50_3
    DryLAB.Components.Input i( V=8.72, p=94136, T=19.8, rh=69.6);
    DryLAB.Components.Output o;
    DryLAB.Components.Heater h( Ts=50);
    DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1537, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.1565, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
    DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.1666, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.1874, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
    connect(i.port_b, h.port_a);
    connect(h.port_b, d1.port_a);
    connect(d1.port_b, d2.port_a);
    connect(d2.port_b, d3.port_a);
    connect(d3.port_b, d4.port_a);
    connect(d4.port_b, o.port_a);
end T50_3;
model T60_1
    DryLAB.Components.Input i( V=8.81, p=93817, T=24.3, rh=43.9);
    DryLAB.Components.Output o;
    DryLAB.Components.Heater h( Ts=60);
    DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1799, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.2021, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
    DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.1983, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.1925, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
    connect(i.port_b, h.port_a);
    connect(h.port_b, d1.port_a);
    connect(d1.port_b, d2.port_a);
    connect(d2.port_b, d3.port_a);
    connect(d3.port_b, d4.port_a);
    connect(d4.port_b, o.port_a);
end T60_1;
model T60_2
    DryLAB.Components.Input i( V=7.10, p=93790, T=22.9, rh=57.7);
    DryLAB.Components.Output o;
    DryLAB.Components.Heater h( Ts=60);
    DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.1562, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.1570, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
    DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.1656, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
    DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.1733, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
    connect(i.port_b, h.port_a);
    connect(h.port_b, d1.port_a);
    connect(d1.port_b, d2.port_a);
    connect(d2.port_b, d3.port_a);
    connect(d3.port_b, d4.port_a);
    connect(d4.port_b, o.port_a);
end T60_2;
model T60_3
    DryLAB.Components.Input i( V=8.27, p=94083, T=16.7, rh=45.7);

```

```

DryLAB.Components.Output o;
DryLAB.Components.Heater h( Ts=60);
DryLAB.Components.Dryer d1( Mi = 0.3227, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
DryLAB.Components.Dryer d2( Mi = 0.3272, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
DryLAB.Components.Dryer d3( Mi = 0.3341, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.2);
DryLAB.Components.Dryer d4( Mi = 0.3223, Tpi = i.T + 273.15, Li = 0.1);
equation
connect(i.port_b, h.port_a);
connect(h.port_b, d1.port_a);
connect(d1.port_b, d2.port_a);
connect(d2.port_b, d3.port_a);
connect(d3.port_b, d4.port_a);
connect(d4.port_b, o.port_a);
end T60_3;
end Tests;
annotation (uses(Modelica(version="3.1")));
end DryLAB;

```

APÊNDICE B

Modelo MSU em linguagem Modelica

```
package MSU
connector Port
import SI = Modelica.SIunits;
  SI.Temperature T(displayUnit = "degC", start = 293.15)
    "Temperatura do ar K";
  SI.MassFraction H( min = 0, start = 0.001) "razão de mistura ad";
end Port;
partial model Air
import SI = Modelica.SIunits;
constant SI.Velocity V "Velocidade do ar";
constant SI.Density roa = (1009.26 - 0.0040403 * 293 + 6.1759E-4 * 293^2 -
4.097E-7 * 293^3)/1000 "massa específica do ar kg/m3";
constant SI.SpecificHeatCapacity ca = 1006.9254
  "calor específico do ar seco J/(kg.K)";
constant SI.SpecificHeatCapacity cv = 1875.6864
  "calor específico do vapor J/(kg.K)";
constant SI.SpecificHeatCapacity cw = 4182
  "calor específico da água J/(kg.K)";
constant SI.SpecificEnergy lv = 2502535.259
  "calor latente de vaporização J/kg";
constant SI.Pressure p "pressão do ar";
  //equação de pvsat
constant Real AA = 22105649.25;
constant Real A = - 27405.526;
constant Real B = 97.5413;
constant Real C = - 0.146244;
constant Real D = 0.12558E-3;
constant Real E = - 0.48502E-7;
constant Real F = 4.34903;
constant Real G = 0.39381E-2;
end Air;
partial model Product
  //Variáveis
import SI = Modelica.SIunits;
SI.MassFraction M(start = Mi, min = 0) "teor de água do produto ad";
SI.Temperature Tp(start = Tpi, displayUnit = "degC")
  "temperatura do produto";
  //Parâmetros iniciais
parameter SI.MassFraction Mi "teor de água inicial ad";
parameter SI.Temperature Tpi "Temperatura inicial do produto";
  // Equilibrium Moisture
SI.MassFraction Me( start = Mi/8, min = 0) "Teor de água de equilíbrio"; /
/ ad
constant Real ae = -0.0001;//correa 2010
constant Real be = 46.8549;
constant Real ce = 1.8299;
  //Constantes
SI.SpecificHeatCapacity cp;
parameter SI.Density rop = (420.8490 + 198.8201 * Mi/2 -
53.8475 * (Mi/2)^2)/(1+Mi/2);
  constant SI.Length L = 0.2 "espessura inicial da camada";
equation
  cp = 944.7 + 3619.7 * Mi - 1992.0 * Mi^2;
end Product;
model Dryer
import SI = Modelica.SIunits;
extends MSU.Air;
extends MSU.Product;
Port port_a;
Port port_b;
Real k( final unit = "1/s");
```

```

Real kh( final unit = "W/(m2.K)", start = 0);
Real mar;
Real mv;
SI.Pressure pvsata( displayUnit = "kPa", start = 5000)
    "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
SI.Pressure pvsatb( displayUnit = "kPa", start = 5000)
    "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
SI.Pressure pva( displayUnit = "kPa")
    "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
SI.Pressure pvb( displayUnit = "kPa")
    "pressão de vapor de saturação do ar Pa";
SI.MassFraction rha( min = 0, start = 0.6) "umidade relativa ad";
SI.MassFraction rhb( min = 0, start = 0.6) "umidade relativa ad";
SI.MassFraction rhm( min = 0, start = 0.6) "umidade relativa ad";
SI.Temperature Tm;
equation
//Balanço Ar
port_b.H - port_a.H = - rop * L * der(M) / (roa * V);
port_b.T - port_a.T = - kh * (Tm -
Tp)/(roa * V * ca + roa * V * cv * port_a.H);
//Balanço Produto
der(M) = - k * (M - Me);
kh * (Tm - Tp) = if roa * V * (port_b.H - port_a.H) * (lv + cv * (Tm -
Tp)) < kh * (Tm -
Tp) then der(Tp) * L * (rop * cp + rop * cw * M) + roa * V * (port_b.H -
port_a.H) * (lv + cv * (Tm -
Tp)) else der(Tp) * L * (rop * cp + rop * cw * M);
//der(Tp) * L * (rop * cp + rop * cw * M) = kh * (Tm -
Tp) + roa * V * (port_b.H - port_a.H) * (lv + cv*(Tm - Tp));
1 - rhm = exp(ae*(be + Tm - 273.15)*(Me * 100)^ce); //Henderson Modificado
kh = 0.9918 * cp * roa * V * (3600 * 0.01 * roa * V / (0.06175 + 16.5e-
5 * (Tm - 273.15)))^(-0.34);
k = (1 / 3600) * (- 0.1196 + 1.4180e-3 * (Tm - 273.15) + 6.9938e-
5 * (Tm - 273.15)^2 + 0.6545 * rhm - 0.5369 * rhm^2 - 7.5170e-3 * rhm * (Tm -
273.15));
//Psicometria
port_a.H = rha * pvsata / (1.605 * (p - rha * pvsata));
(pvsata/AA) = exp((A + B*port_a.T + C*port_a.T^2 + D*port_a.T^3 + E*port_a
.T^4)/(F*port_a.T-G*port_a.T^2));//Pa
port_b.H = rhb * pvsatb / (1.605 * (p - rhb * pvsatb));
(pvsatb/AA) = exp((A + B*port_b.T + C*port_b.T^2 + D*port_b.T^3 + E*port_b
.T^4)/(F*port_b.T-G*port_b.T^2));//Pa
pva = rha*pvsata;
pvb = rhb*pvsatb;
mar = V*roa;
mv = V*roa*(port_b.H/(1+port_b.H));
//Media
Tm = (port_a.T + port_b.T) / 2;
rhm = (rha + rhb) / 2;
end Dryer;
model Input
import SI = Modelica.SIunits;
import Modelica.SIunits.Conversions.from_degC;
extends MSU.Air;
Port port_a;
Port port_b;
constant Real Ta;
constant Real Ts;
SI.Pressure pvsat( displayUnit = "kPa", start = 5000;
parameter SI.MassFraction rhm( min = 0, start = 0.6);
equation
port_a.T = from_degC(Ta);
port_b.T = from_degC(Ts);
port_a.H = port_b.H;
port_a.H = rhm/100 * pvsat / (1.605 * (p - rhm/100 * pvsat));
(pvsat/AA) = exp((A + B*port_a.T + C*port_a.T^2 + D*port_a.T^3 + E*port_a.
T^4)/(F*port_a.T-G*port_a.T^2));//Pa
end Input;
model Output
Port port_a;
end Output;

```