



21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM CFD DA SECAGEM DE SERRAGEM DE MADEIRA COMPARADA A DADOS EXPERIMENTAIS EM UM SECADOR DE LEITO FLUIDIZADO

Medeiros, M. R. Q., marcelorqm@petrobras.com.br^{1,2}

Leite, M. A. H., mahaikal@petrobras.com.br²

Cruz, M. E. C., manuel@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Leiroz, A. J. K., leiroz@mecanica.ufrj.br¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Bloco G – Sala 204, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ – Brasil, CEP: 21941-914

²Petróleo Brasileiro S. A., Centro de Pesquisa & Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – PETROBRAS – CENPES, Avenida Horácio Macedo 950, PDAB/CB Sala 9109A, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ – Brasil, CEP: 21941-915

Resumo: Este artigo apresenta a comparação de resultados obtidos através de Dinâmica dos Fluidos Computacional com resultados experimentais disponíveis na literatura para a secagem de serragem de madeira. Nas simulações numéricas são utilizados parâmetros de cinética química também disponíveis na literatura. Os materiais considerados são: serragem de madeira com a umidade inicial de 60% como biomassa e como agente fluidizante o ar quente seco a 105 °C com uma corrente de 0,32 m/s. O modelo de equipamento utilizado é um secador de leito fluidizado borbulhante para a secagem em batelada. A metodologia engloba um breve estudo de malha, a realização da simulação numérica do processo de secagem do material adotando a abordagem Euler-Euler, com o modelo viscoso laminar e com transferência de calor e massa. São traçadas as curvas numéricas de umidade, pressão e temperatura. Os resultados numéricos de umidade e umidade calculada em função dos valores de temperatura e de pressão numéricos são comparados aos resultados experimentais. Os resultados obtidos na simulação utilizando parâmetros disponíveis na literatura acompanham o experimento até 250 s, quando a taxa de secagem experimental se torna mais rápida que a simulada. A simulação numérica realizada por outro conjunto de dados disponíveis na literatura indica um processo de secagem mais rápido que o experimento. O balanço de massa instantâneo realizado durante a simulação apresenta erros percentuais entre -2% e 7%.

Palavras-chave: CFD, Secagem, Serragem de Madeira, Cinética, Leito Fluidizado

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta a comparação da simulação numérica por dinâmica dos fluidos computacional com os resultados experimentais realizados por Liu et al. (2014), utilizando os parâmetros de cinética da secagem apresentados em Liu et al. (2013) e Gebgeziabeher et al. (2013).

A finalidade deste trabalho consiste na validação da simulação em CFD através de dados experimentais da secagem da serragem obtidos de Liu et al. (2014).

2. PROBLEMA ABORDADO

O problema abordado é a secagem da serragem através de um secador de leito fluidizado borbulhante. Uma amostra de serragem é aquecida através de aquecedores elétricos instalados nas paredes do reator de secagem de leito fluidizado, enquanto a umidade que evapora é carregada através de uma corrente de ar também aquecida direcionada sobre o leito de serragem a ser secado.

2.1. Características da Simulação em CFD

As características da simulação apresentadas na lista a seguir são especificadas por Liu et al. (2014).

- A geometria do reator de secagem de leito fluidizado tem 1,5 m de altura e 50 mm de diâmetro, com um leito de serragem com 51 mm de altura.
- O aquecimento nas paredes é realizado a uma temperatura de 105 °C.
- A injeção de ar aquecido a 105 °C é realizada com velocidade de 0,32 m/s e inclinação de 30°.
- O leito de serragem é caracterizado por umidade inicial de 60%, densidade seca de 1.388 kg/m³, densidade úmida de 288 kg/m³ e tamanho médio de partículas de 302,5 µm.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Liu et al. (2014) realizaram experimentos em um secador de biomassa de leito fluidizado. Utilizaram amostras de serragem com 60% de umidade e um aparato experimental que consistia de um reator de leito fluidizado borbulhante, onde a biomassa era secada através de uma corrente de ar pré-aquecida injetada pela base do reator, retirando-se assim a umidade da biomassa. Observou-se que quanto menor fosse a relação entre a altura e o diâmetro do leito a ser secado, mais rápida era a taxa de secagem e esta decaía com a redução da umidade da amostra. Comparando-se os resultados dos experimentos feitos com o leito de serragem somente com os resultados dos experimentos feitos com leito de serragem misturado com areia, as taxas de secagem foram equivalentes.

Para a determinação da umidade da biomassa foi utilizado o seguinte conjunto de equações. A Eq. (1) mostra a perda de massa,

$$m_{\text{perda}} = m_d - m_a = m_g \cdot \sum_{i=a}^d Y_i \quad (1)$$

onde m_{perda} é a massa de umidade perdida [g], m_d é a massa de umidade remanescente [g], m_a é a massa de umidade antes da secagem [g], m_g é a massa de ar seco [kg] e Y_i é a razão de massa de vapor por unidade de massa de ar seco [g de água/kg de ar seco]. A Equação (2) mostra o cálculo de Y_i ,

$$Y_i = 0,622 \cdot \left(\frac{P_s}{P - P_s} \right) \quad (2)$$

onde P é a pressão de operação [Pa] e P_s é a pressão de saturação de vapor no gás [Pa]. A pressão de saturação do vapor é calculada através da expressão de Wagner Pruss, mostrada na Eq. (3),

$$\ln \left(\frac{P_s}{22,064 \cdot 10^6} \right) = \frac{647,096}{T_k} \cdot (-7,85951783 \cdot v + 1,84408259 \cdot v^{1,5} - 11,7866497 \cdot v^3 + 22,6807411 \cdot v^{3,5} - 15,9618719 \cdot v^4 + 1,80122502 \cdot v^{7,5}) \quad (3)$$

onde T_k é a temperatura de operação [K]. A constante auxiliar v é calculada através da Eq. (4),

$$v = 1 - \frac{T_k}{647,096} \quad (4)$$

O percentual de umidade é calculado pela Eq. (5),

$$\%m = \frac{m_a - m_d}{m_a} \cdot 100\% \quad (5)$$

em que $\%m$ é o percentual de umidade da serragem.

A Figura 1 apresenta a curva de secagem de Liu et al. (2014). A Figura 2 apresenta a curva dos experimentos de Liu et al. (2014) com aquecimento de 105 °C, cujos dados foram trabalhados utilizando um *software* de análise visual para transformar a curva para dados do programa MS-Excel.

Liu et al. (2013) aplicaram a técnica de análise termogravimétrica para determinar a cinética da secagem de biomassa. Foram utilizadas amostras de *bermuda grass*, pinho vermelho e lignina nos experimentos. Foi utilizado o equipamento TGA/SDTA851 Mettler-Toledo. Usaram-se amostras de 10 mg de biomassa com umidade de até 80%, aquecendo-se da temperatura ambiente até 170 °C em atmosfera de nitrogênio com vazão de 40 ml/min. O método aplicado foi o logaritmo de Arrhenius. Os valores encontrados para a energia de ativação ficaram entre 13,87 e 18,53 kJ/mol e os valores para os fatores pré-exponenciais ficaram entre 101,3 e 101,82 1/min. Foi observado que a taxa de secagem era proporcional ao teor de lignina da amostra de biomassa. Quanto maior o teor de lignina maior a taxa de secagem.

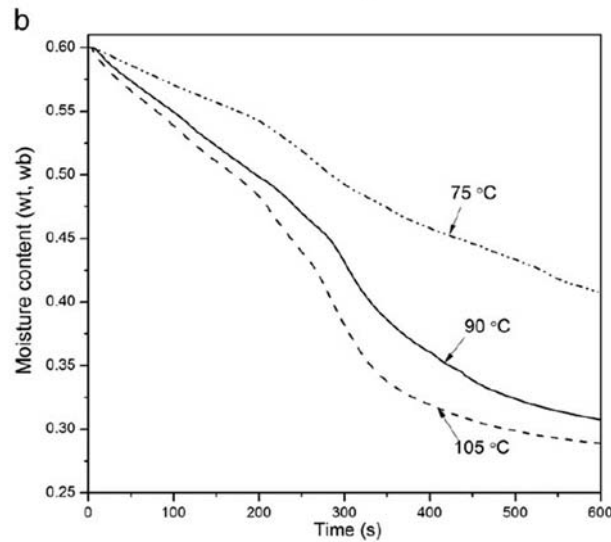


Figura 1. Experimento de secagem de serragem (Liu et al., 2014).

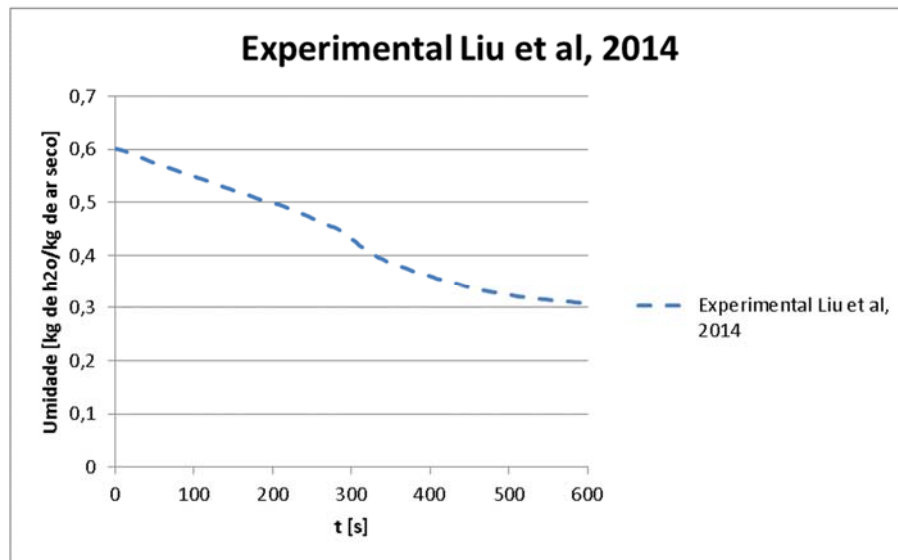


Figura 2. Experimento de secagem de serragem de Liu et al. (2014) com aquecimento de 105 °C, trabalhado com o software gráfico visual MarkGraf.

Gebgeegziabher et al. (2013) realizaram estudo para otimizar efetivamente o modelo do processo de secagem de biomassa. Utilizaram um modelo de aquecedor cilíndrico horizontal com alimentação de ar e pré-aquecimento indireto do mesmo através de vapor. A madeira foi utilizada como material a ser secado. Calculou-se a cinética da secagem através da lei de difusão de Fick, apresentada na Eq. (6),

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}} \cdot (\nabla MR)) \quad (6)$$

onde MR é a umidade, t é o tempo e D_{eff} é a difusividade efetiva. Fazendo com que a umidade dependa da temperatura, obtém-se a difusividade através da equação de Arrhenius, Eq. (7),

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

onde D_0 é a difusividade inicial (fator pré-exponencial), E_a é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura. Aplicando este método aos dados obtidos através dos testes de análise termogravimétrica, onde amostras de serragem foram aquecidas da temperatura ambiente até 90 °C, observou-se que o fator D_0 tinha valores em torno de $2,31 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ e a energia de ativação em torno de 17 kJ/mol. Logo observou-se que a cinética da secagem da madeira poderia ser determinada pela solução da 2ª lei de Fick.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho utiliza os passos a listados seguir.

- Preparação da geometria do reator de secagem de leito fluidizado para utilização no software FLUENT da ANSYS.
- Utilização do modelo Euleriano-Euleriano, que trata as fases sólida e gasosa como meios contínuos e inter-penetrantes. O modelo viscoso utilizado foi o para escoamento laminar com transferência de calor.
- Realização de simulações numéricas utilizando os dados de cinética apresentados por Liu et al. (2013) e Gebgeegziabher et al. (2013).
- As condições de contorno utilizadas nas simulações foram as mesmas apresentadas em Liu et al. (2014).

4.1. Geometria

As geometrias utilizadas para as simulações apresentaram uma qualidade ortogonal mínima de 0,82 com razão de aspecto de 7,79 e aproximadamente 25.000 células com tamanho de aresta de 5 mm. Também foram testadas geometrias com tamanho de aresta de 2 mm com aproximadamente 300.000 células e qualidade ortogonal mínima de 0,74 e razão de aspecto de 11,16, assim como geometrias com tamanho de aresta de 10 mm com 6.600 células, qualidade ortogonal mínima de 0,778 e razão de aspecto de 11,16. A Tabela 1 mostra as discretizações espaço-temporais trabalhadas para a simulação utilizando a cinética de Liu et al. (2013).

Tabela 1. Características das discretizações espaço-temporais.

Descrição							
Discretização espaço-temporal	1	2	3	4	5	6	7
Tamanho da malha, mm	2		5			10	
Qualidade ortogonal	0,74		0,82			0,778	
Razão de aspecto	11,16		7,79			11,16	
Número de células	296786		24786			6630	
Passo de tempo (s)	0,005	0,001	0,002	0,001	0,0005	0,001	0,0005

4.2. Condições de Contorno e Iniciais

A seguir são apresentados os dados utilizados na simulação da secagem. A Tabela 2 apresenta as condições de contorno e as condições iniciais utilizadas.

Tabela 2. Parâmetros de entrada.

Descrição	Unidade	Valor
Serragem		
Densidade seca	[kg/m ³]	1388
Densidade úmida	[kg/m ³]	288
Diâmetro médio de partículas	[μm]	302,5
Umidade inicial	[%]	60
Temperatura inicial	[°C]	30
Altura do leito	[mm]	51
Ar		
Velocidade	[m/s]	0,32
Temperatura	[°C]	105
Reator		
Temperatura das paredes	[°C]	105
Altura	[m]	1,5
Diâmetro	[mm]	50
Biomassa - madeira de pinho (Modelo de Liu et al., 2014)		
Energia de ativação	[kJ/mol]	16,2
Coefficiente pré-exponencial de Arrhenius	[1/s]	0,79
Biomassa - madeira de cavaco (Modelo de Gebreegziabher et al., 2014)		
Energia de ativação	[kJ/mol]	17
Coefficiente pré-exponencial de Arrhenius	[m ² /s]	2,31
Coefficiente pré-exponencial de Arrhenius	[1/s]	1130,79

5. VERIFICAÇÃO DA MALHA

Foram realizados testes de curta duração, de até 50 s de tempo real, para se verificar a variação dos resultados em função do tamanho de aresta de malha e do passo de tempo utilizado nas simulações. A Figura 3 apresenta a comparação entre essas simulações preliminares e o resultado experimental no período de 0 a 50 s de secagem.

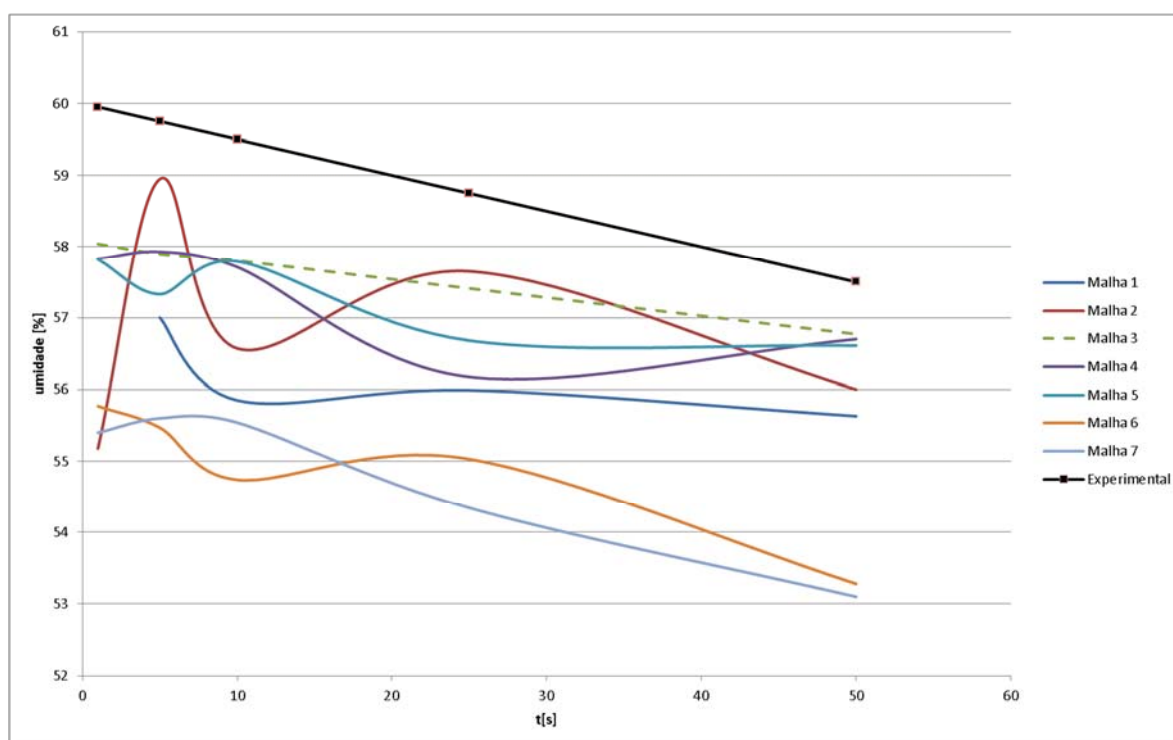


Figura 3. Comparação das simulações preliminares com o experimento.

A Tabela 3 apresenta os resultados numéricos da umidade da serragem ao longo do tempo nas simulações preliminares.

Tabela 3. Resultados preliminares das simulações em CFD.

Descrição	1	2	3	4	5	6	7
Discretização espaço-temporal - DET							
Fração mássica de umidade no instante							
1s		7,96	3,19	3,54	3,55	6,97	7,59
5s	4,60	1,34	3,10	3,05	4,05	7,16	6,95
10s	6,13	4,92	2,86	3,01	2,87	8,00	6,66
25s	4,70	1,87	2,28	4,39	3,52	6,33	7,51
50s	3,25	2,61	1,27	1,39	1,55	7,34	7,65
Erro médio	4,67	3,74	2,54	3,07	3,11	7,16	7,27

6. RESULTADOS

Analisando os resultados das simulações preliminares verificou-se que a discretização espaço tempo DET-3 apresentou inicialmente o menor erro em relação aos dados experimentais.

A Figura 4 mostra as curvas de secagem utilizando a discretização espaço tempo DET-3, utilizando os dados de pressão e temperatura do ar retirados da simulação numérica e as Eqs. (1)-(5), utilizando o valor médio de Y aplicado nas equações anteriores e os resultados da umidade através da simulação com a discretização espaço tempo DET 3 e os valores da cinética de Gebreegziabher et al. (2014), comparadas aos dados experimentais.

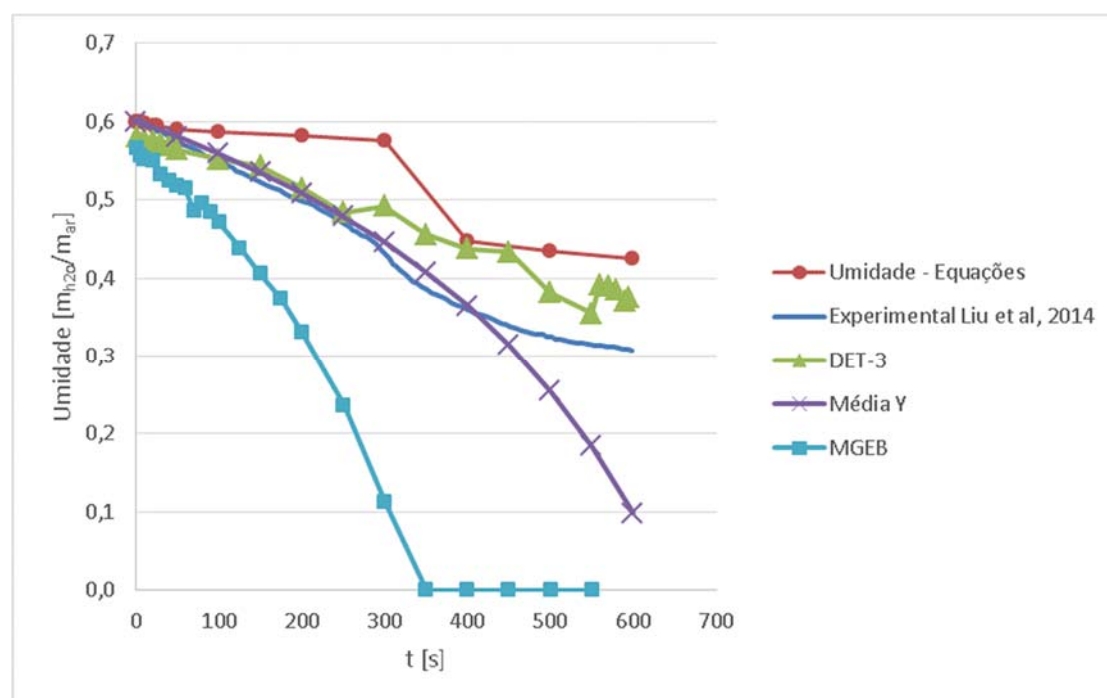


Figura 4. Comparação dos dados de umidade numéricos e experimentais.

A Figura 5 apresenta as curvas de pressão e temperatura obtidas na simulação com a discretização espaço tempo DET-3 em CFD.

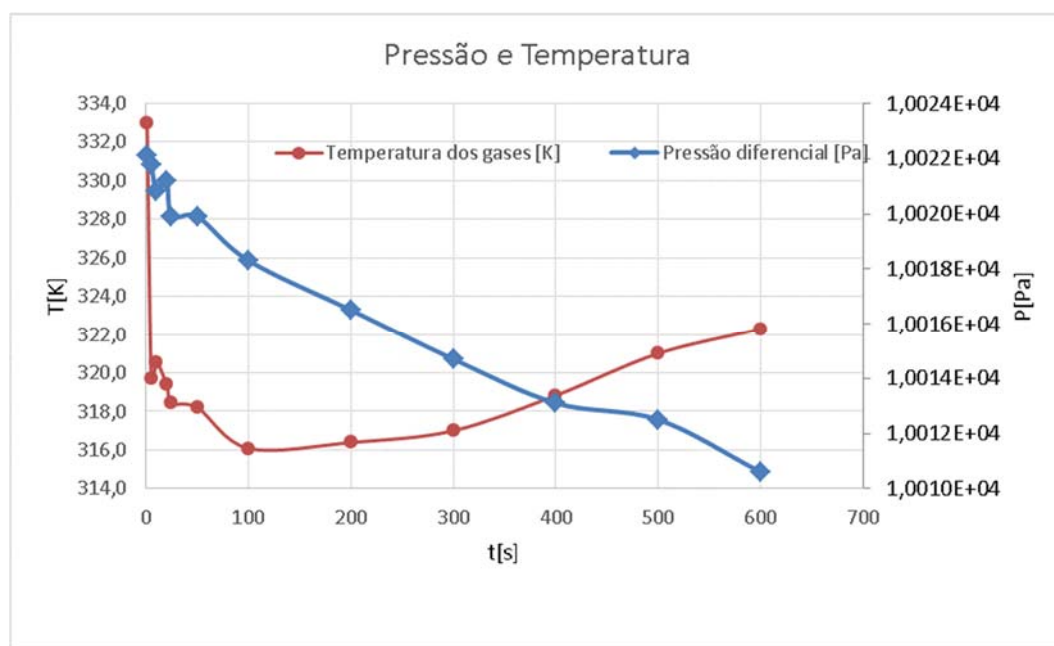


Figura 5. Pressão e temperatura na simulação da secagem.

No instante 300 s, a pressão e a temperatura correspondem ao ponto de vapor saturado, o que pode explicar a deformação da curva experimental.

Utilizando os dados da simulação da discretização espaço temporal DET-3, realizou-se o balanço de massa instantâneo a instante no volume de controle do secador de leito fluidizado borbulhante. O balanço é apresentado na Tab. 4.

Tabela 4. Resultados do balanço de massa.

Tempo [s]	Massa Inicial de gás [g]	Saída dos gases [g/s]	Entrada dos gases [g/s]	Balanço [g]	Erro percentual [%]
1,0	1,073	2,551E-03	3,081E-03	1,0735	-2,24
2,0	1,050	3,443E-03	3,081E-03	1,0496	0,13
3,0	1,051	3,698E-03	3,081E-03	1,0504	0,06
4,0	1,051	3,519E-03	3,081E-03	1,0506	-0,05
5,0	1,050	3,766E-03	3,081E-03	1,0493	0,07
6,0	1,050	3,692E-03	3,081E-03	1,0494	0,15
7,0	1,051	3,737E-03	3,081E-03	1,0503	0,35
8,0	1,054	3,636E-03	3,081E-03	1,0534	0,05
9,0	1,054	3,745E-03	3,081E-03	1,0533	-0,13
10,0	1,052	3,760E-03	3,081E-03	1,0486	0,42
15,0	1,053	3,649E-03	3,081E-03	1,0502	0,55
20,0	1,056	3,760E-03	3,081E-03	1,0492	0,64
30,0	1,056	3,659E-03	3,081E-03	1,0502	1,02
40,0	1,061	3,763E-03	3,081E-03	1,0542	0,74
50,0	1,062	3,591E-03	3,081E-03	1,0365	3,40
100,0	1,073	3,687E-03	3,081E-03	1,0427	3,18
150,0	1,077	3,549E-03	3,081E-03	1,0536	2,44
200,0	1,080	3,760E-03	3,081E-03	1,0121	6,89
300,0	1,087	3,688E-03	3,081E-03	1,0263	6,02
400,0	1,092	3,709E-03	3,081E-03	1,0292	6,01
500,0	1,095	3,560E-03	3,081E-03		

Analisando a Tab. 4, o erro percentual entre o balanço entre a massa inicial e as correntes de entrada e saída e a massa final (massa inicial do instante seguinte considerado) de cada um dos instantes de tempo estudados variou entre - 2 e 7 %.

7. DISCUSSÕES

Analisando as três curvas de secagem da serragem na Fig. 1, era esperado que as curvas tivessem um comportamento linear, porém a mudança de direção da inclinação das curvas indicaria uma possível mudança de mecanismo do processo de secagem em temperaturas mais altas, já que as curvas de 90 e 105 °C apresentam mudança mais acentuada do que a curva de aquecimento com 75 °C.

Analisando a Fig. 4, a tendência apresentada pela curva traçada utilizando os dados de pressão e temperatura através das Eqs. (1)-(7) são semelhantes à curva traçada com os dados de umidade obtidos através da simulação. A tendência apresentada pela curva utilizando o valor médio de Y é a curva que se aproxima mais dos dados experimentais até o instante aproximado de 400 s, porém a partir deste ponto a curva calculada apresenta uma secagem mais acentuada que a curva experimental. Nos resultados utilizando a cinética de Gebreegziabher et al. (2014), a tendência de secagem em relação à simulação utilizando a cinética apresentada por Liu et al. (2014) é mais veloz, no instante em torno de 350 s a biomassa está praticamente seca, apesar dos dados experimentais indicarem uma fração de umidade em torno de 40%.

Analisando a Fig. 5, as variações de temperatura e pressão indicam uma possível mudança de mecanismo da secagem devido à mudança do estado da saturação para vapor superaquecido no ponto de 50 °C (323 K) e 10 kPa.

8. AGRADECIMENTOS

Este trabalho conta com o apoio da PETROBRAS e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. M. E. Cruz agradece ao CNPq pelo apoio continuado (proc. 303208/2014-7).

9. REFERÊNCIAS

- Liu, Y., Peng, J., Kansha, Y., Ishizuka, M., Tsutsumi A., Jia, D., Bi, X. T., Lim, C. J., Sokhansanj, S., “Novel fluidized bed dryer for biomass drying”, Elsevier, Fuel Processing Technology, Vol. 122, pps. 170-175, 2014.
- Liu, H. M., Chen, M. Q., Han, Z. L., Fu, B. A., “Isothermal kinetics based on two periods scheme for co-drying of biomass and lignite”, Thermochemica Acta, vol. 573, pp. 25 – 31, 2013.
- Gebreegziabher, T., Oyedun, A. O., Zhang, Y., Hui, C. W., “Effective Optimization Model for Biomass Drying”, Proceedings of the 23rd European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 23, pp. 97-102, 2013.
- Ansys, “Ansys Fluent Theory Guide”, Ansys, Release 14.0, 2011.
- Junior, J. A. C. B., “MarkGraf for Windows 95”, LTTC, COPPE.

10. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

NUMERICAL SIMULATION USING CFD OF SAWDUST DRYING COMPARED TO EXPERIMENTAL DATA OBTAINED IN A FLUIDIZED BED DRYER

Medeiros, M. R. Q., marcelorqm@petrobras.com.br^{1,2}

Leite, M. A. H., mahaikal@petrobras.com.br²

Cruz, M. E. C., manuel@mecanica.coppe.ufrj.br¹

Leiroz, A. J. K., leiroz@mecanica.ufrj.br¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Bloco G – Sala 204, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ – Brasil, CEP: 21941-914

²Petróleo Brasileiro S. A., Centro de Pesquisa & Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – PETROBRAS – CENPES, Avenida Horácio Macedo 950, PDAB/CB Sala 9109A, Cidade Universitária – Rio de Janeiro, RJ – Brasil, CEP: 21941-915

Abstract.: *This article presents the comparison of CFD results with experimental results available in the literature for sawdust drying. In the numerical simulations, chemical kinetic parameters also available in the literature are used. The materials considered are: sawdust with 60% initial humidity as biomass, and 105 °C hot air as fluidization agent, with a 0,32 m/s stream. The equipment model used is a bubbling fluidized bed drier, operating in batch mode. The methodology consists of a brief mesh study, and CFD simulations of the material drying process using an Euler-Euler approach, with a viscous laminar model and heat and mass transfer. The numerical results for humidity, as well as values for humidity calculated as a function of numerical temperature and pressure, are compared to experimental results. The CFD simulation results obtained with parameters available in the literature follow the experiment up to 250 s, when the experimental drying rate exceeds the simulated drying rate. The CFD simulation results obtained with a different set of parameters also available in the literature indicate a faster drying process than the experimental one. The instantaneous mass balance calculated during the simulation presents percentage errors between -2% and 7%.*

Keywords: *CFD, Drying, Sawdust, Kinetics, Fluidized Bed.*