

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DA BIOMASSA DE MICROALGAS

Bruna Pirão Ling, brunaling@gmail.com¹
Milena Sanches, milenasanches19@gmail.com¹
Thiago Leite dos Santos, thiago.leite@ufpr.br¹
Wellington Balmant, wbalmant@gmail.com¹
Dhyogo Miléo Taher, dhyogomt@gmail.com¹
André Bellin Mariano, andrebmariano@gmail.com¹
José Viriato Coelho Vargas, vargasjvcv@gmail.com¹

¹ Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, Curitiba, PR, Brasil, CEP:81531-980

Resumo: O cultivo de microalgas ganhou mais espaço na indústria e na pesquisa acadêmica por causa de suas aplicações comerciais. A biomassa resultante deste processo é a matéria-prima para a produção de biocombustíveis, alimentos para animais e pode também ser utilizado para a extração de moléculas de valor econômico elevado, tais como pigmentos e antioxidantes. No entanto, para obter esses produtos é necessário um processo de secagem que tem um elevado gasto de energia. Assim, é necessário otimizar o consumo de energia do presente processo, para que os produtos obtidos a partir de microalgas tornar-se economicamente viável. Uma ferramenta que permite essa otimização é a modelagem matemática do processo. Consequentemente, o objetivo deste estudo é propor um modelo matemático que descreve o processo de secagem da biomassa de microalgas. O modelo proposto descreve o sistema em duas fases: fase gasosa e de fase sólida. A fase gasosa consiste de ar quente ventilado através da biomassa úmida, a fim de remover a humidade a partir do sólido. A fase sólida é constituída de biomassa úmida que tem de ter sua umidade removida. Para cada fase do sistema foi realizado o balanço de energia térmica e massa. Simulações foram realizados com o modelo para prever o tempo de secagem de acordo com a temperatura de secagem. No final, obteve-se que melhor temperatura de secagem da biomassa foi de 60 °C.

Palavras-chave: secagem, transferência de massa, transferência de calor, modelagem matemática

1. INTRODUÇÃO

O mundo passa por um processo de transição no uso de combustíveis e, com a crise do petróleo, que vem afetando o mercado, e as influências negativas relacionadas ao meio ambiente, torna-se cada vez mais comum o surgimento de novas pesquisas focadas no desenvolvimento de biocombustíveis e demais alternativas energéticas sustentáveis. Biocombustível é definido comumente como um combustível derivado de materiais biológicos, incluindo matéria orgânica morta que não esteja fossilizada, e também proveniente de produtos metabólicos de organismo vivos, como, por exemplo, óleo vegetal para a produção de biodiesel (Azeredo, 2012).

Entre os biocombustíveis mais conhecidos estão o biodiesel e o bioetanol. Com o aumento do uso dos mesmos, novas matérias primas estão sendo utilizadas. As microalgas vêm sendo usadas para a produção de biocombustível e começou a ganhar forma na produção industrial – elas são capazes de produzir biomassa a partir de dióxido de carbono e certa exposição luz solar. As microalgas são organismos unicelulares e habitam quase todos os ambientes existentes. Entretanto, em sua maioria, as microalgas são de ambiente marinho. O grande destaque destes organismos microscópicos é a sua enorme capacidade de produzir biomassa por unidade de área e tempo. Além disso, algumas espécies armazenam grandes quantidades de óleo (Azeredo, 2012).

A extração do biocombustível a partir das microalgas apresenta diversas vantagens, no entanto existem variáveis a serem otimizadas dentro do processo produtivo. Fatores como a secagem da matéria orgânica no processo relacionado ao uso da microalga são de extrema importância, tendo em vista que a umidade da mesma é essencial para que se dê continuidade às próximas etapas. A secagem é um processo complexo que envolve transferência simultânea de massa e calor. Alimentos e materiais biológicos, como a microalga, apresentam estrutura complexa além de certa heterogeneidade que dificultam a secagem. Modelos de secagem são importantes para aperfeiçoar projetos de

secadores, além de avaliarem o seu desempenho. Um modelo de secagem de confiança é extremamente útil para explorar sistemas de secagem ajustando o uso de energia de baixa e alta qualidade. Através do uso do modelo certo, é possível obter dados para avaliar um modo de secagem já existente, melhorar um processo já em andamento, ou projetar um novo tipo de secagem que atenda melhor às especificações pretendidas (Putranto & Chen, 2013).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo matemático que descreva a curva de secagem da microalga utilizada para a produção de biocombustível. O modelo proposto descreve o sistema em duas fases: gasosa e sólida. A fase gasosa consiste de ar quente ventilado através da biomassa úmida, a fim de remover a umidade presente na fase sólida. A fase sólida é constituída de biomassa úmida que terá sua umidade removida. Para cada fase do sistema foi realizado o balanço de energia térmica e massa.

2. MODELO MATEMÁTICO

O diagrama simplificado do sistema de secagem de microalgas pode ser observado na Fig. 1. Conforme a Fig. 1 o sistema é dividido em duas fases: gasosa e sólida. Na fase gasosa há uma entrada de ar quente com temperatura e vazão constantes. Esse ar quente entra em contato com a fase sólida fornecendo calor por convecção para o sólido. A fase gasosa também recebe água que evapora do sólido aumentando a umidade do ar contido na fase gasosa. Após trocar calor e massa com o sólido o ar quente sai do sistema como mostra a Fig. 1. Na fase sólida ocorrem dois fenômenos: evaporação da água e transferência de calor do ar quente para o sólido. Não foi considerado no modelo fase líquido, assumiu-se que toda água está adsorvida na fase sólida.

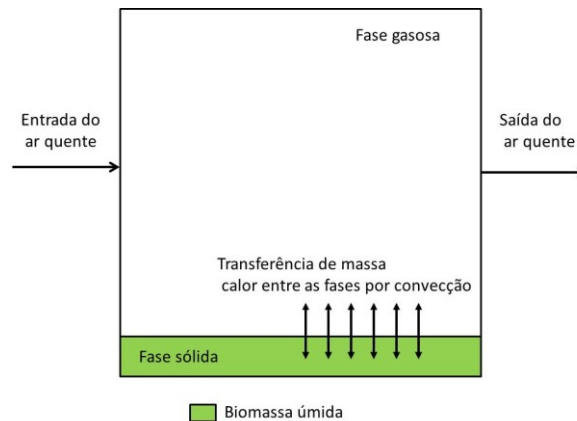


Figura 1. Diagrama esquemático do modelo.

Tendo em vista esse processo, duas variáveis são de extrema importância: a temperatura da secagem e a umidade do sólido. Dessa forma, é necessário um balanço de energia térmica (desprezando as outras formas de energia) para o sistema gasoso e para o sólido, bem como o balanço de massa por componente relativo à umidade da fase gasosa e sólida. Não há necessidade de um balanço de massa para o ar seco, pois este não interage com o sólido. Desta forma, ele fornece apenas calor ao sistema, inclusive a vazão de ar seco no sistema é considerada constante.

O balanço de energia para a fase gasosa pode ser definido na Eq. (1) como:

$$\frac{dT_{ar}}{dt} = \frac{\left[\begin{aligned} &\dot{m}_{ar,parseco} T_{entar} + \dot{m}_{ar,cpvapor} U_{aramb} T_{entar} \\ &- \dot{m}_{ar,parseco} T_{ar} - \dot{m}_{ar,cpvapor} U_{ar} T_{ar} \\ &- h_{Aelem} (T_{ar} - T_{sol}) + H_{vap} k_{mass} A_{elem} (U_{sol} - U_{eq}) \end{aligned} \right]}{(r_{oar seco} V_{elem} (c_{parseco} + U_{ar} c_{pvapor}))} \quad (1)$$

Onde os dois primeiros termos do numerador do lado direito representam a entrada de entalpia no sistema através do ar seco quente e água, os quais apresentam como umidade a do ar ambiente. O terceiro e quarto termo do numerador representam a saída de entalpia no sistema através do ar seco e da fase gasosa úmida. O quinto termo do numerador representa a transferência de calor por convecção da fase gasosa para a fase sólida. O sexto termo no numerador representa o calor transferido da fase sólida para a fase gasosa através da evaporação da água no sólido. O denominador representa as formas de energia acumuladas na fase gasosa que estão em duas componentes: o ar seco e no vapor de água presente na umidade do ar. Para simplificar a modelagem matemática assumiu-se que o gás é ideal e que a pressão no sistema é mantida constante. Sendo uma simplificação bastante precisa para dada faixa de trabalho de um processo de secagem.

O balanço de água na fase gasosa descrita na equação 2:

$$\frac{dU_{ar}}{dt} = \frac{\dot{m}_{ar}.U_{ar,amb} - \dot{m}_{ar}.U_{ar} + k_{mass}.A_{elem}.(U_{sol} - U_{eq})}{roar.seco.Velem} \quad (2)$$

Onde o primeiro termo do numerador a direita representa a entrada de umidade na fase gasosa através do ar que está entrando na fase gasosa. O segundo termo do numerador representa a saída de umidade do sistema no ar proveniente da fase gasosa. O terceiro termo do numerador representa a transferência de umidade entre a fase gasosa e sólida.

O balanço de energia na fase sólida descrita na equação 3 como:

$$\frac{dT_{sol}}{dt} = \frac{-k_{mass}.H_{vap}.A_{elem}.(U_{sol} - U_{eq}) + h.A_{elem}.(T_{ar} - T_{sol})}{(roalga.Velem.s.cpalga + roalga.U_{sol}.Velem.s.cpagua)} \quad (3)$$

Onde o primeiro termo do numerador a direita representa a transferência de calor entre o sólido e a fase gasosa através da energia contida no vapor de água. O segundo termo do numerador representa a transferência de energia por convecção entre a fase gasosa e a fase líquida. O denominador representa as forma de energia acumuladas no sólido: microalga e água líquida.

O balanço de água na fase sólida descrita na equação 4 como:

$$\frac{dU_{sol}}{dt} = \frac{-k_{mass}.A_{elem}.(U_{sol} - U_{eq})}{roalga.Velem} \quad (4)$$

O único fenômeno que afeta o balanço de água no sólido é a transferência de massa por convecção que causa a evaporação de água na fase sólida.

Além do balanço de massa e energia do sistema, se faz necessário determinar tal como definir a umidade de equilíbrio do sistema. A umidade de equilíbrio é uma função da temperatura e umidade do ar sendo uma característica do material a ser secado. Primeiramente deve se determinar a pressão de saturação da fase gasosa que é uma função da temperatura como mostra a Eq. (5):

$$p_{satw} = 133,322 \cdot \exp \left(18,3036 - \frac{3816,44}{(T_{ar} + 273,15) - 46,13} \right) \quad (5)$$

A partir da pressão de saturação se calcula a atividade de água da fase gasosa como mostra a Eq. (6):

$$a_{wg} = U_{ar} \cdot \frac{P_{atm}}{p_{satw} \cdot (U_{ar} + 0.62413)} \quad (6)$$

Com a atividade de água da fase gasosa calculada é possível calcular a umidade através da equação empírica proposta por Desmorieux et al. (2005) que correlaciona a atividade de água com a umidade de equilíbrio da fase gasosa como mostra a Eq (7):

$$U_{eq} = \frac{\left(\left(-\frac{\log(1 - a_{wg})}{2.33E - 4 \cdot (1.8 \cdot T_{ar} + 492)} \right)^{\left(\frac{1}{0.7} \right)} \right)}{100} \quad (7)$$

O coeficiente de transferência de massa entre a fase líquida e gasosa foi determinado segundo a seguinte correlação determinada pelos autores:

$$k_{mass} = 0.0001 \cdot \exp(0.2302585093 \cdot T_{sol}) \quad (8)$$

Os demais parâmetros utilizados no modelo foram mantidos constantes e estão mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no modelo de secagem

Parâmetros	Descrição	Valor	Referências
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica de ar	100.0 [kg/s]	
Patm	Pressão atmosférica	101325 [Pa]	Himmelblau (1982)
roarseco	Densidade do ar seco	1225 [kg/s]	Himmelblau (1982)
roalga	Densidade da alga	1100 [kg/m ³]	Zeng <i>et al.</i> (2013)
cparseco	Cp do ar seco	1005 [J/kg.K]	Himmelblau (1982)
cpvapor	Cp do vapor	1791 [J/kg.K]	Himmelblau (1982)
cpagua	Cp da água	4186 [J/kg.K]	Himmelblau (1982)
cpalga	Cp da alga	1595 [J/kg.K]	Zeng <i>et al.</i> (2013)
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	500.5 [J/m ² .K]	Autores
Uamb	Umidade do ar ambiente	0,0065 [kg de água/kg de ar seco]	Condição inicial da Eq. (2)
Aplaca	Área total de secagem	0,12 [m ²]	
Hvap	Entalpia de vaporização da água	2414300 [J/kg]	Himmelblau (1982)
Tamb	Temperatura ambiente	20°C	Condição inicial da Eqs. (1) e (3)
Usini	Umidade inicial do sólido	2.0 [kg água/kg sólido seco]	Condição inicial da Eq. (4)
Tentar	Temperatura de entrada do ar	30°C, 45°C, 60°C e 75°C	

O modelo foi implementado em Fortran e o método de solução das equações diferenciais foi feito através do Runge-Kutta de 4º ordem com o passo de integração de 10^{-3} horas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DA SIMULAÇÃO

Foram realizadas ao todo quatro simulações variando-se a temperatura do ar de entrada em 30°C, 45°C, 60°C e 75°C. Nas figuras 2, 3, 4 e 5 são mostrados os gráficos com a temperatura do sólido e a umidade do sólido em função do tempo.

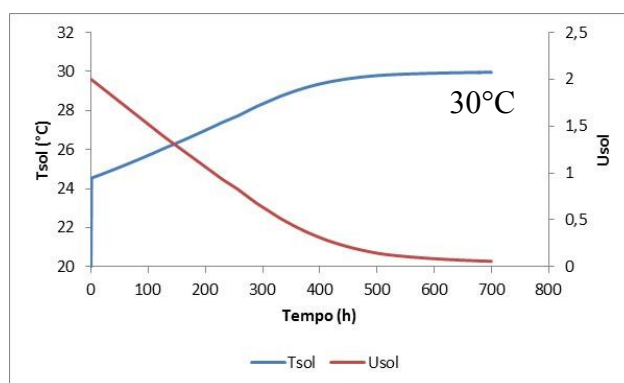


Figura 2. Curva de secagem e temperatura do sólido com ar de entrada a 30°C.

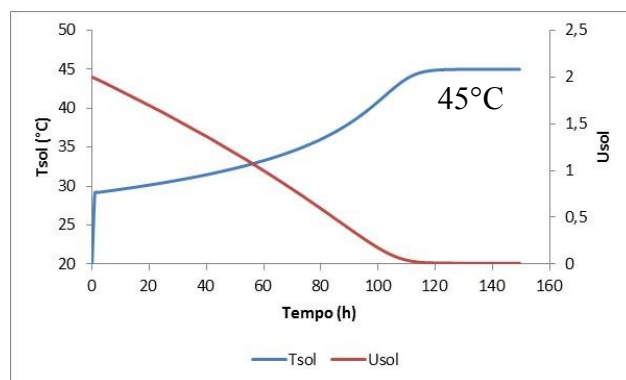


Figura 3. Curva de secagem e temperatura do sólido com ar de entrada a 45°C.

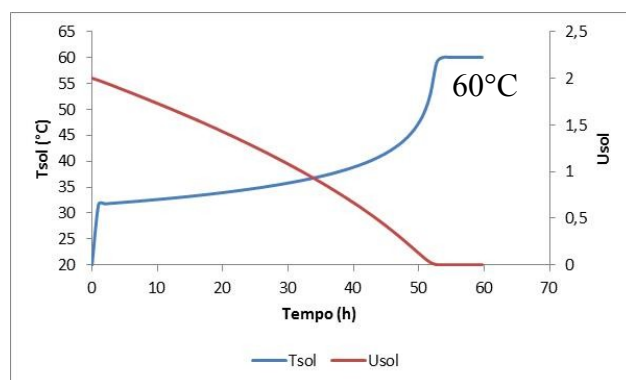


Figura 4. Curva de secagem e temperatura do sólido com ar de entrada a 60°C.

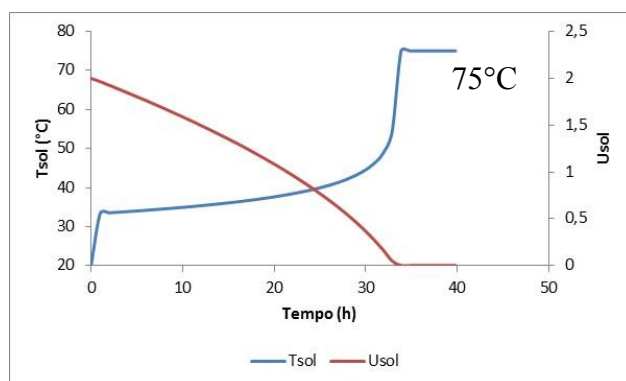


Figura 5. Curva de secagem e temperatura do sólido com ar de entrada a 75°C.

Como pode ser observado nas Figs. (2, 3, 4 e 5) a temperatura do ar de entrada afeta imensamente o tempo de secagem da biomassa presente em microalgas. Com 30°C o tempo de secagem é de 600 horas, em 45°C o tempo se reduz para 120 horas, em 60°C é de 55 horas e em 75°C é de 35 horas. Na figura 6 é mostrado com mais detalhe esses dados de tempo de secagem. É possível notar que apesar da temperatura de 75°C ter um tempo menor de secagem, no entanto esse tempo não apresenta uma diferença significativa em relação ao de secagem a 60°C. Sendo assim a melhor temperatura de secagem das microalgas é a de 60°C porque o gasto energético para aquecer o ar até 60°C é menor do que com 75°C.

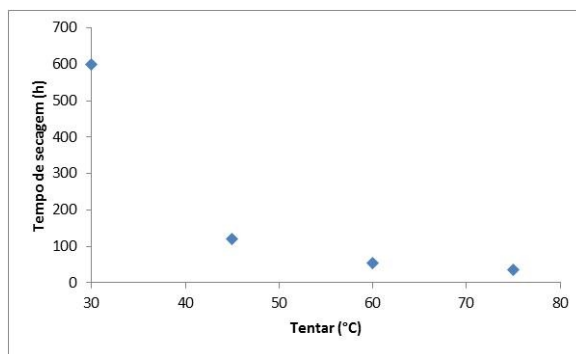


Figura 6. Efeito da temperatura de entrada do ar sobre o tempo de secagem.

O modelo proposto precisa ser validado experimentalmente para que possa ser utilizado como uma ferramenta efetiva para otimização de sistemas reais. Porém o modelo apresentou uma rápida resolução das equações (menos de 30 segundos para finalização de cada simulação) e estabilidade numérica frente à modificação de parâmetros do modelo tornando o modelo bastante robusto numa futura otimização do sistema.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um modelo matemático para secagem de microalgas. O modelo proposto é robusto e descreve bem o comportamento do sistema. A próxima etapa do trabalho é a validação experimental do modelo.

5. REFERÊNCIAS

- Azeredo, V.B.S., 2012, “Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil”. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Desmorieux, H., Decaen, N., 2005, “Convective drying of spirulina in thin layer”, *Journal of Food Engineering*, vol. 66, pp. 497-503.
- Himmelblau D.M., 1982, “Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering”. 5th edition. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Putranto, A., Chen, X.D., 2012, “Spatial Reaction Engineering Approach as an Alternative for Nonequilibrium Multiphase Mass-Transfer Model for Drying of Food and Biological Materials”, *AIChE Journal*, vol. 59, No 1., pp. 55-67.
- Rosa, J.M.C., 2011 “Modelação e Optimização de uma Unidade de Produção de Microalgas”, Tese, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Zeng, X.; Quek C.X., Danquah M. K., Woo M.W., Chen X.D., Lu Y., 2013, “Pool boiling characteristics of microalgae suspension for biofuels production”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, pp. 1369-1375.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

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

MATHEMATICAL MODEL OF DRYING MICROALGAE BIOMASSA

Bruna Pirão Ling, brunaling@gmail.com¹
 Milena Sanches, milenasanches19@gmail.com¹
 Thiago Leite dos Santos, thiago.leite@ufpr.br¹
 Wellington Balmant, wbalmant@gmail.com¹
 Dhyogo Miléo Taher, dhyogomt@gmail.com¹
 André Bellin Mariano, andrebmario@gmail.com¹
 José Viriato Coelho Vargas, vargasjvcv@gmail.com¹

¹University Federal of Paraná, postal code 19011, Curitiba, PR, Brasil, CEP:81531-980

Abstract. *The microalgae cultivation has more space in the industry and in academic research because of their commercial applications. The resulting biomass of this process is the feedstock for biofuel production, feed and can also be used for the extraction of high economic value molecules, such as pigments and antioxidants. However, for such products a drying process having a high energy expenditure is required. Thus, it is necessary to optimize this process energy consumption, so that the products obtained from microalgae become economically viable. A tool that allows this optimization is the mathematical modeling of the process. Consequently, the aim of this study is to propose a mathematical model describing the process of drying the biomass of microalgae. The proposed model describes the system in two phases: solid phase and gas phase. The gas phase consists of hot air blown through the moist biomass in order to remove moisture from the solid. The solid phase consists of wet biomass that must have its moisture removed. For each phase of the system was carried out the energy balance and mass. The method used to discretize the system is the volume element. Simulations were performed with the model to predict the drying time according to the drying temperature. In the end, it was found that the best biomass drying temperature was 60 °C.*

Keywords: *mathematical model, heat transfer, mass transfer, drying*