

EXPERIMENTO DIDÁTICO EM ESCOAMENTOS DE FLUIDOS EM MEIOS POROSOS: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO PRÁTICO DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

DIDACTIC EXPERIMENT IN FLUID FLOW IN POROUS MEDIA: A PROPOSAL FOR THE PRACTICAL EDUCATION OF TRANSPORT PHENOMENA

Larissa de Souza Noel Simas Barbosa¹, Patrícia Aparecida Santiago², Paulo Seleglim Junior³

RESUMO

No ensino de engenharia, uma grande maioria das disciplinas oferecidas é baseada em métodos dedutivos de ensino. Alguns estudos, porém, demonstraram que a indução desenvolve a intuição, promove uma aprendizagem mais profunda e resulta em uma retenção prolongada das informações pelos alunos. Além disso, devido à incompatibilização muitas vezes existente entre o estilo de ensino dos professores e o estilo de aprendizado dos alunos, constatou-se que a utilização de uma gama mais ampla de técnicas de ensino pode levar ao desenvolvimento de um estilo de ensino que seja mais eficiente para o aluno e confortável para o professor. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar um experimento didático capaz de introduzir alguns conceitos básicos fundamentais e necessários para o entendimento de escoamentos de fluidos em meios porosos pelos alunos de cursos de engenharia. Espera-se que, após a introdução do experimento na metodologia de ensino da disciplina de fenômenos de transporte, o aluno tenha uma maior compreensão a respeito dos conceitos de perda de carga, velocidade de percolação, extração sólido-líquido, efeito da porosidade e da vazão de embebição na velocidade de percolação e existência de um perfil de permeabilidade em leitos porosos.

Palavras-chave: experimento didático; fenômenos de transporte; escoamento em meio poroso; ensino de engenharia.

ABSTRACT

Most of the courses offered in engineering education are based on deductive teaching methods. Some studies, however, have shown that induction develops intuition, promotes deeper learning, and results in a prolonged retention of information by students. In addition, due to the incompatibility between professors 'teaching style and students' learning style, it has been found that the use of a wider range of teaching techniques can lead to the development of a teaching style that is more efficient for the student and comfortable for the professor. In this context, this work aims to present a didactic experiment capable of introducing some fundamental concepts for the understanding of fluid flow in porous media by students of engineering courses. It is expected that, after the introduction of the experiment in the teaching methodology of transport phenomena course, the student will have a better understanding of concepts such as load loss, percolation velocity, solid-liquid extraction, the influence of porosity and percolation flowrate at percolation velocity and the existence of a permeability profile in porous beds.

¹ Larissa de Souza Noel Simas Barbosa, doutoranda, Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz (ESALQ/USP); larissa.snsb@gmail.com

² Patrícia Aparecida Santiago, doutora, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP); pamarasantiago@gmail.com

³ Professor Doutor Paulo Seleglim Junior, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP); seleglim@sc.usp.br

Keywords: didactic experiment; transport phenomena; flow in porous media; engineering education.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do conhecimento, adquirido ao longo dos anos através da observação e da experimentação, deu origem a um modo sistemático de explicar e formular teorias a respeito de um grande número de ocorrências semelhantes (SOUZA et al., 2002). A este modo denominou-se método científico. O método científico é o alicerce do modelo de ensino e aprendizagem adotados no desenvolvimento de um indivíduo, sendo utilizado, até mesmo inconscientemente, em situações cotidianas. Como ramificação do método científico existem os métodos indutivos e dedutivos. No método indutivo, o antecedente corresponde a dados e fenômenos particulares enquanto o consequente é uma verdade geral ou universal (HESKETH et al., 2003). Já no método dedutivo, o antecedente é constituído de princípios universais e genéricos a partir dos quais se chega a um consequente específico (HESKETH et al., 2003).

Apesar do ensino fundamental ser caracterizado por métodos indutivos de ensino (HESKETH et al., 2003), no ensino superior, principalmente no que se refere ao ensino de engenharia, uma grande maioria das disciplinas oferecidas é baseada em métodos dedutivos de ensino (Felder, 1988). Alguns estudos, porém, demonstraram que a indução desenvolve a intuição, promove uma aprendizagem mais profunda e resulta em uma retenção prolongada das informações pelos alunos (HESKETH et al., 2003). Além disso, devido à incompatibilização muitas vezes existente entre o estilo de ensino dos professores e o estilo de aprendizado dos alunos, constatou-se que a utilização de uma gama mais ampla de técnicas de ensino pode levar ao desenvolvimento de um estilo de ensino que seja mais eficiente para o aluno e confortável para o professor (HESKETH et al., 2002; FELDER, 1988).

Tendo isso em vista e considerando que um simples experimento laboratorial é capaz de prover a fundamentação necessária para o início do processo indutivo pelo aluno e para a conexão da teoria com a prática, o uso de experimentos didáticos mostra-se como uma excelente ferramenta para consolidar conceitos e aprofundar o entendimento dos fenômenos e processos presentes nas disciplinas de engenharia. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo apresentar um módulo experimental capaz de introduzir alguns conceitos básicos fundamentais e necessários para o entendimento de escoamentos de fluidos em meios porosos pelos alunos. Esses conceitos são relativos à área de Fenômenos de Transporte.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: ESCOAMENTOS EM MEIOS POROSOS

Um meio poroso é todo material que contém poros, ou seja, espaços vazios em sua estrutura. Muitas substâncias naturais (tais como rochas, madeiras, solos e ossos) e muitos materiais produzidos pelo homem (tais como cimentos, concretos e cerâmicas) podem ser classificados como materiais porosos. Consequentemente, o estudo de escoamentos de fluidos através de meios porosos é de extrema importância para muitas áreas da ciência aplicada e da engenharia tais como para o design, construção e operação de colunas empacotadas (reatores de leito fixo, leitos de filtração e permeação de água/óleo em uma matriz porosa).

A força motriz para que ocorra um escoamento é a queda de pressão existente no tubo onde se dá o escoamento e a resistência oferecida ao escoamento se dá devido à viscosidade do fluido que esco. O escoamento de um fluido em um leito poroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do

fluido em questão, sendo a proporcionalidade chamada de permeabilidade do meio (k). A permeabilidade é uma propriedade do meio que corresponde à resistência oferecida pelo meio à passagem do fluido.

A lei mais importante que governa o escoamento de um fluido em um meio poroso é a lei de Darcy. A lei de Darcy (equação 1) é uma simplificação das equações de Navier-Stokes sob as hipóteses de escoamento laminar e incompressível e permite determinar os campos de velocidade e pressão que descrevem o fluxo de um fluido em um meio poroso (WILKES, 2006).

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} + \rho_{sol}g \right) \quad (1)$$

Onde:

v = velocidade de escoamento do fluido no leito poroso (velocidade de Darcy)

k = permeabilidade do meio poroso

μ = viscosidade do fluido

dP/dz = gradiente de pressão absoluta observado no interior do meio poroso

ρ_{sol} = densidade da solução

g = aceleração da gravidade

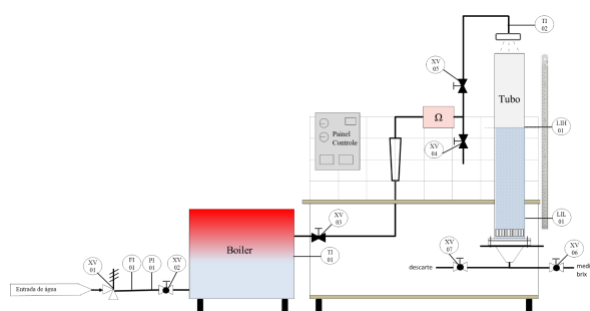
A determinação da velocidade de Darcy, no entanto, não pode ser realizada de forma direta e trivial. Os métodos mais comumente adotados para medir a velocidade de escoamento consistem de medições do tempo que o fluido leva para percorrer uma distância determinada ou de medições da pressão total e estática em uma pequena área (SOUSA JUNIOR, 2011). No entanto, devido ao fato do meio se tratar de um meio poroso, essas medições são ainda mais complexas e difíceis de serem realizadas, sendo limitado o número de instrumentos existentes no mercado para esse fim.

MATERIAIS E MÉTODOS

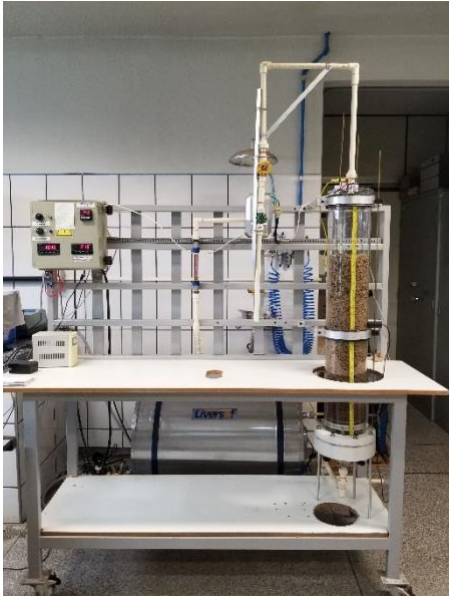
Experimento didático proposto

O aparato experimental construído consiste de um sistema de extração sólido-líquido em meio poroso muito similar ao desenvolvido por Rein e Woodburn (1974) e encontra-se exemplificado no esquema da Figura 1. O sistema é composto basicamente por um boiler, um controlador PID, uma resistência elétrica, um chuveiro para aspersão de líquido e um tubo de borosilicato. Esses equipamentos são interligados por tubos e conexões em CPVC e as variáveis (vazão, pressão, temperatura e nível) são monitoradas por instrumentos de medição. Os valores medidos são enviados ao controlador PID e indicados tanto no controlador como em uma interface de usuário desenvolvida em *LabVIEW*. Uma válvula redutora de pressão é utilizada para diminuir o valor da pressão de entrada no boiler (limitada a 10 m de coluna d'água), válvulas globo são utilizadas para o controle manual da vazão e válvulas gaveta para isolar trechos da linha quando necessário. Uma foto do experimento montado encontra-se na Figura 2.

Figura 1 – Esquema do experimento didático.



Fonte: acervo dos autores.

Figura 2 – Foto do experimento didático proposto

Fonte: acervo dos autores.

O objetivo principal do experimento proposto é fornecer aos alunos um sistema no qual seja possível: (1) determinar a velocidade de percolação de um fluido (água) em um meio poroso (bagaço de cana) em cinco temperaturas diferentes; (2) fazer uma análise qualitativa das variáveis e propriedades envolvidas no processo de escoamento em meio poroso e na transferência de massa de sacarose existente entre o bagaço de cana e a água. Além disso, devido à instrumentação e ao sistema de controle de processos construídos, o módulo experimental também possibilita que o aluno aprenda conceitos de instrumentação industrial e controle de processos.

Os materiais utilizados para a construção da bancada experimental foram:

- Hidrômetro que suporta até 1,5 m³/h de vazão;
- Três sensores-receptores de radiação infravermelha;
- Arduino;
- Boiler de aquecimento de 200 L com resistência elétrica de 3000 W e termostato;
- Tubo de borosilicato cujas medidas são: comprimento 1500 mm, diâmetro 180 mm e espessura de parede de 9 mm;
- Válvula redutora de pressão;

- Três válvulas tipo gaveta;
- Três válvulas tipo esfera;
- Manômetro;
- Rele de nível com medição de nível mínimo e máximo;
- Tubos e conexões de CPVC;
- Chuveiro elétrico do tipo KDL, com 8800 W de potência elétrica e 220V de tensão (resistência elétrica, Ω);
- Dois termopares tipo K para medição da temperatura (no boiler e no chuveiro);
- Controlador PID;
- Dois tarugos de poliacetal preto de diâmetro de 25 mm e comprimento de 200 mm;
- Grade circular;
- Trena;
- Suporte da estrutura.

A velocidade de percolação (velocidade de Darcy) pode ser determinada de forma indireta, medindo-se o tempo que o líquido leva para percolar uma altura determinada do material poroso. Logo, a velocidade de percolação é calculada a partir da medida de nível de líquido no leito de fibras. As principais variáveis e propriedades do fenômeno de transferência de massa que podem ser observadas qualitativamente através do aparato experimental construído são a diminuição da permeabilidade do material fibroso ao longo da coluna (realizada a partir de uma análise de variância dos sinais dos indicadores de nível de líquido) e a extração de componentes do bagaço solúveis em água (inferência qualitativa visual).

A instrumentação da bancada para a medição de vazão e nível foi realizada com instrumentos desenvolvidos pelos técnicos do laboratório de energias térmicas e fluidos do departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). A medição de vazão foi realizada com o acoplamento de um emissor/receptor de sinal infravermelho a um hidrômetro (Figura 3) enquanto a indicação de nível foi realizada por dois emissores/receptores de sinal infravermelho envolvidos por dois tarugos de poliacetal ligados a um rele de nível (Figura 4). Os indicadores de nível desenvolvidos foram instalados externamente ao tubo de

borosilicato que contém o meio poroso (Figura 5).

Figura 3 – Medidor de vazão construído.



Fonte: acervo dos autores.

Figura 4 – Indicador de nível construído.



Fonte: acervo dos autores.

Figura 5 – Instalação dos indicadores de nível construídos na parte externa da coluna.



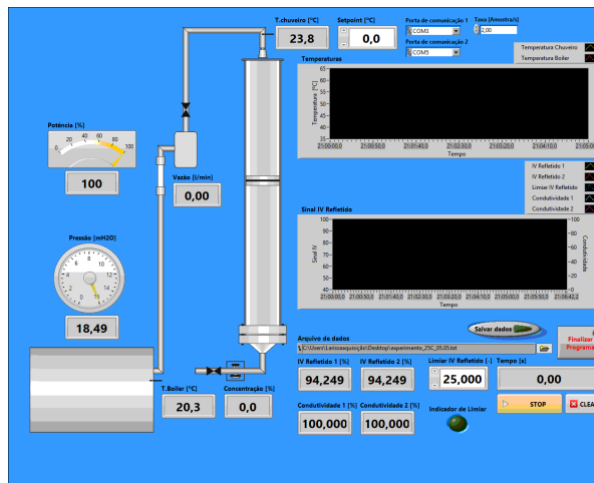
Fonte: acervo dos autores.

O princípio de funcionamento do medidor de vazão desenvolvido é baseado no fato de que o sinal de infravermelho emitido pelo sensor é absorvido pela hélice que mede o volume no hidrômetro (uma vez que a hélice é preta) e ao, mesmo tempo, refletido pelo painel que suporta essa hélice (que é branco). Sendo assim, o receptor de sinal infravermelho consegue detectar o número de ciclos por segundo da hélice. O sinal de infravermelho é então interpretado pelo arduino e convertido em vazão na interface de usuário desenvolvida em *LabVIEW*.

Já para a medição de nível, devido ao fato do líquido ficar retido no material poroso, uma altura de líquido dinâmico é formada na coluna que contém o material. Os indicadores de nível são posicionados em alturas pré-determinadas do leito de fibras na parte externa da coluna. Como o sinal de infravermelho absorvido/refletido pela cana e pelo líquido são distintos, quando o líquido atinge a altura dos indicadores de nível desenvolvidos, uma variação de sinal infravermelho pode ser observada. O sinal de infravermelho é interpretado por um arduino e transmitido via USB para um computador.

Uma interface do experimento, na qual as principais variáveis podem ser monitoradas, foi elaborada em *LabVIEW* (Figura 6).

Figura 6 – Interface do experimento em *LabVIEW*. As variáveis monitoradas são a pressão do fluido que entra no boiler, a potência do chuveiro, a vazão de entrada de fluido e a temperatura do fluido (no boiler e no chuveiro).



Fonte: acervo dos autores.

Operação do módulo experimental

O procedimento adotado para a operação do módulo experimental é descrito a seguir. Primeiramente, a grade de metal localizada na parte inferior do tubo de borosilicato é preenchida com um material poroso (no caso do caso estudado, bagaço de cana). Em seguida, água, cuja vazão é regulada pelo medidor de vazão desenvolvido, entra no boiler e é aquecida até uma temperatura desejada setada no controlador. Devido ao processo de estratificação térmica, a água quente (que é menos densa e fica na camada superior do boiler) segue em direção à coluna a partir da abertura da válvula gaveta na saída do boiler. A resistência do chuveiro, que é controlada pelo PID, será ligada se a temperatura da água for inferior ao valor setado de forma a garantir que a água esteja em uma determinada temperatura antes de aspergir pela coluna. Ao chegar na extremidade da tubulação de CPVC anterior à coluna, a água passa por um chuveiro e é distribuída uniformemente, percolando a biomassa até atingir sua extremidade inferior, por onde será descartada ou coletada. As variáveis referentes ao sistema são medidas e monitoradas na interface de usuário em *LabVIEW*.

RESULTADOS

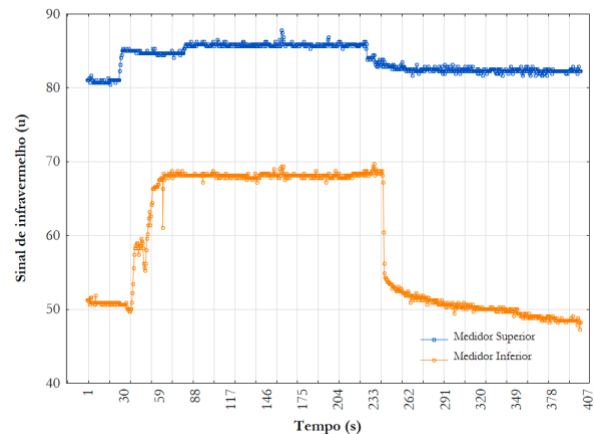
Cálculo da velocidade de percolação

A velocidade de percolação é calculada indiretamente dividindo-se a diferença de altura entre o medidor superior e inferior pela diferença de tempo de percolação do líquido entre os dois medidores. A altura dos indicadores de nível é fixa enquanto o tempo de percolação é calculado subtraindo-se o instante de tempo no qual o sinal de infravermelho do medidor superior sofre uma variação após a abertura da válvula do instante de tempo no qual o sinal de infravermelho do medidor inferior varia devido à presença de líquido. A partir do sinal de infravermelho obtido dos indicadores de nível desenvolvidos (Figura 7), é possível observar a variação de

sinal necessária para o cálculo da velocidade de percolação.

Os valores calculados para a velocidade de percolação nas cinco temperaturas distintas estão expressos na Tabela 1.

Figura 7 – Sinais de infravermelho dos medidores de nível desenvolvidos (T = 25°C e número do experimento = 2).



Fonte: acervo dos autores.

Tabela 1 – Valores de velocidade de percolação para os experimentos realizados em triplicata (experimento 1, 2 e 3) em cada uma das 5 temperaturas. As temperaturas estão em °C e as velocidades em cm/s.

T	v _{p1}	v _{p2}	v _{p3}	$\overline{v_p}$	$\overline{\overline{v_p}}$
25	3,0	3,1	3,4	3,2	
35	2,8	2,1	3,1	2,6	
45	2,6	3,3	2,5	2,9	2,7
55	2,5	3,1	2,4	2,7	
65	2,5	2,1	2,5	2,4	

Fonte: elaborada pelos autores.

A partir dos sinais de infravermelho dos medidores da Figura 6 (que equivalem a T = 25°C e número do experimento = 2), percebe-se que há um aumento de sinal infravermelho quando a água atinge os medidores de nível superior (quando t = 25,6s) e inferior (quando t = 35,6s). Considerando-se que a distância entre os medidores é de 31 cm, a velocidade de percolação calculada para o líquido nesse experimento é de 3,1 cm/s. Utilizando-se desse

mesmo procedimento, o restante das velocidades apresentadas na Tabela 1 pode ser calculado.

A partir de uma análise da Tabela 1, é possível observar que a temperatura não é um fator que altera a velocidade de percolação no sistema estudado uma vez que para todas as temperaturas os valores da velocidade de percolação calculados são muito próximos. Dessa forma, para esse sistema em específico, podemos concluir que a temperatura tem pouca influência sob o escoamento e que a velocidade de percolação depende exclusivamente da porosidade do material e da vazão de embebição do líquido. Diferentes índices de preparos do bagaço de cana e diferentes vazões de percolação podem ser utilizados pelos alunos a fim de corroborar essa conclusão.

Inferências qualitativas a respeito dos fenômenos de transporte observados

A observação dos fenômenos que ocorrem no experimento realizado pode levar os alunos a chegarem a algumas inferências qualitativas a respeito dos processos de escoamento de fluidos e transferência de massa:

- 1) Uma menor abertura da válvula redutora de pressão, que antecede o boiler, é capaz de gerar quedas de pressão diferentes na linha de CPVC que conecta a entrada de água no sistema ao boiler. Tal mudança pode ser analisada variando-se a abertura da válvula redutora e observando-se a queda de pressão no manômetro instalado logo em seguida da válvula.
- 2) Uma mudança na vazão de embebição acarreta em uma alteração de mesma proporção na velocidade de percolação. Esse comportamento pode ser analisado utilizando-se diferentes vazões de embebição e medindo-se as velocidades de percolação.
- 3) Uma mudança na porosidade do material também gera uma mudança

substancial na velocidade de percolação. Tal fato pode ser evidenciado repetindo-se o experimento utilizando-se diferentes níveis de preparo da biomassa.

- 4) A partir da observação visual do líquido que deixa a coluna de extração é possível observar que um fenômeno de transferência de massa também ocorre no processo devido à cor do líquido, que fica mais escura após a extração. A mudança de cor evidencia uma mudança na concentração de sacarose no líquido.
- 5) Qualitativamente, também é possível observar que quanto maior é a vazão de embebição (e consequentemente a velocidade de percolação), maior é a quantidade de soluto transferida da fibra para o líquido (pois mais escura fica a cor do líquido). Tal fato pode ser comprovado repetindo-se o experimento para diferentes vazões de embebição.
- 6) Percebe-se a existência de um perfil de permeabilidade ao longo da coluna uma vez que há um acúmulo maior de líquido na parte inferior da mesma. A diminuição de permeabilidade se dá devido à movimentação do soluto (sacarose) das camadas superiores do leito de fibra para as camadas inferiores.

Apesar do módulo experimental construído ter sido operado utilizando-se bagaço de cana como material poroso e água como fluido de embebição, outras biomassas porosas facilmente acessíveis poderiam ter sido utilizadas como exemplo grãos de café.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um experimento didático no qual um processo de extração sólido-líquido em um meio poroso pode ser operado por alunos para compreender

os processos de fenômenos de transporte envolvidos de forma prática.

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que o módulo experimental apresentado permite aos alunos observar e verificar conceitos de perda de carga, velocidade de percolação, extração sólido-líquido, efeito da porosidade e da vazão de embebição na velocidade de percolação e existência de um perfil de permeabilidade em leitos porosos. Dada a importância de conectar a teoria com a prática para melhor aprendizagem, o experimento proposto permite ao aluno aprender de forma prática e indutiva conceitos importantes para a sua formação em engenharia.

REFERÊNCIAS

- Felder R. M. **Learning and teaching styles in Engineering education**. Engr. Education, 78 (7), 674-681, 1988.
- Hesketh, R. P., Farrell S., Slater C. S. **An inductive approach to teaching courses in engineering**. Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2003.
- Hesketh, R. P., Farrell S., Slater C. S. **The role of experiments in inductive learning**. Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2002.
- Rein, P.W., Woodburn, E.T. **Extraction of Sugar from Cane in the Diffusion Process**. The Chemical Engineering Journal, 7, p. 41-51, 1974
- Sousa Junior, R. **Experimentos Didáticos em Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias para a Engenharia Ambiental**. EdUFSCar, 2011.
- Souza, A. M. *et al.* **Introdução a projetos de experimentos: caderno didático**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, 2002.
- Wilkes, J. O. **Fluid mechanics for chemical engineers, with microfluidics and CFD**. 2nd edition. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Series, 2006.

DADOS DOS AUTORES



Larissa de Souza Noel Simas Barbosa é Engenheira Química (UFRJ, 2011); possui pós-graduação em Automação Industrial dos Sistemas de Produção, Refino e Transporte de Petróleo (SENAI, 2014); doutoranda em bioenergia pelo Programa Integrado de Pós-graduação em Bioenergia USP, Unicamp, UNESP. Atua na área de energias renováveis com foco na produção de biocombustíveis, mitigação de mudanças climáticas e otimização multi-objetivo.



Patrícia Aparecida Santiago é Engenheira Química (UFU, 1999); possui mestrado em Engenharia Química (UFU, 2002) e doutorado em Engenharia Química (UFSCar, 2007). Atua na área de Engenharia Bioquímica no projeto e desenvolvimento de biorreatores convencionais e não-convencionais para a indústria sucroalcooleira.



Paulo Seleghim Junior é Engenheiro Mecânico (USP, 1987); possui mestrado em Engenharia Mecânica (USP, 1990); mestrado em Mecânica dos Fluidos (Comissariat à L'energie Atomique, 1994); doutorado em Mecânica dos Fluidos (Comissariat à L'energie Atomique, 1996); é professor titular no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP. Atua na área de sistemas industriais para geração, otimização e racionalização energética, economia de baixo carbono e escoamentos multifásicos.