



TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO RECHEADO COM RESÍDUOS AGRÍCOLAS PARA CULTIVO EM ESTADO SÓLIDO: ANÁLISE EM SISTEMA COM E SEM REAÇÃO

ÉVERTON H. SALES^{1*}, FERNANDA P. CASCIATORI¹

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
*e-mail: evertonholanda@estudante.ufscar.br

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento térmico de leitos fixos recheados com resíduos agroindustriais, sem e com a ocorrência de cultivo em estado sólido. Nos dois casos, a matriz porosa foi composta por bagaço de cana (BC) e farelo de trigo (FT) na proporção BC:FT 3:7 (m/m), com teor de umidade inicial 65 % (base úmida). Como estudo de caso com reação (cultivo), foi escolhida a produção de celulases por *Myceliophthora thermophila* I-1D3b. A distribuição de temperatura no topo do leito foi obtida por um conjunto de termopares inseridos radialmente em cinco posições radiais. Os ensaios em leito sem cultivo foram realizados em duplicata, com vazões de percolação de ar saturado de 175 e 350 L/h, sob diferentes configurações de escoamento de água pela camisa, sendo os testes conduzidos até alcance do regime permanente de transferência de calor, admitido quando de leituras constantes dos termopares após 1 h. Foi avaliado tempo para alcance de regime permanente, temperatura média e gradiente radial. Nos testes com cultivo, as temperaturas foram registradas por 96 h. Nestes ensaios, foi avaliado o instante e a magnitude da máxima temperatura atingida devido à geração de calor metabólico.

INTRODUÇÃO

A valorização de resíduos agroindustriais a partir de reciclagem, reutilização e conversão em biocompostos de alto valor agregado vem sendo amplamente difundida a partir de novas alternativas de tratamento e metodologias de aproveitamento. No âmbito das agroindústrias, tem-se buscado instrumentos estratégicos para a fabricação de variados bioprodutos a partir da otimização e melhoria da eficiência das etapas produtivas, assim como a redução e emprego do resíduo em cadeias inovadoras ambientalmente apropriadas (Nayak; Bhushan, 2019).

Em especial, a quantidade de trabalhos voltados para a produção de enzimas requeridas no processo de obtenção de biocombustíveis, como o etanol de segunda geração (E2G), tem aumentado nos últimos 20 anos (Vandenberghe et al., 2020). Isso justifica-se pelo fato de que estas podem ser produzidas *in loco*, nas próprias biorrefinarias, utilizando como substratos seus sub ou coprodutos, como bagaço de cana (BC),

tornando possível o compartilhamento de instalações, utilidades e colaboradores (Behera; Ray, 2016).

Neste contexto, tem ganhado destaque a fermentação em estado sólido (FES), que pode ser definida como bioprocesso no qual ocorre o crescimento de microrganismos sobre matrizes sólidas porosas e úmidas, sendo o espaço entre as partículas preenchido por uma fase gasosa contínua (Mitchell et al., 2006).

Para ampliação de escala do processo, são utilizados fermentadores ou biorreatores, que se tratam de vasos nos quais se busca reproduzir as condições do habitat natural de determinados microrganismos para que ocorra a produção dos bioprodutos desejados. Os biorreatores de FES podem ser de leito empacotado, tipo bandeja, tambores rotativos, e outros (Zanelato, 2011).

Dentre estes modelos disponíveis, se destacam os biorreatores de leito empacotado (BLEs), que já vem sendo estudados para produção, por FES, de enzimas úteis à cadeia de processamento de biocombustíveis, tendo como

vantagens a simplicidade do seu projeto, custo reduzido e fácil manutenção (Casciotori, 2015). Este tipo de reator favorece o desenvolvimento de microrganismos sensíveis ao cisalhamento, por conta inexistência de movimento de suas partículas (Calixto, 2019).

O biorreator de leito empacotado (BLE), que tradicionalmente consiste em uma coluna de seção transversal cilíndrica encamisada de fundo perfurado para permitir a percolação de ar forçado, é o tipo mais comumente empregado em FES. Além de geralmente ter menor custo, a chance de contaminação nesse biorreator é menor em relação ao de bandeja, dado que sua estrutura é fechada (Soccol et al., 2017).

Embora o potencial de aplicação de BLEs para produção de enzimas lignocelulolíticas já tenha sido demonstrado em vários estudos, tais equipamentos são raramente operados em larga escala, sobretudo devido à remoção deficiente do calor metabólico gerado durante o cultivo. Dessa forma, pesquisadores vêm buscando alternativas que minimizem esses problemas e viabilizem a operação destes equipamentos em âmbito industrial (Rodrigues, 2021).

Mediante a necessidade de dissipar o calor gerado durante a fermentação para evitar danos e prejuízos à produtividade do processo, o conhecimento dos mecanismos, modelos e propriedades de transferência de calor nestes biorreatores mostra-se fundamental, sendo o suporte para projetos de equipamentos e para o controle dos bioprocessos de FES (Casciotori, 2011).

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento térmico de leitos fixos recheados com resíduos sólidos agroindustriais, sem e com a ocorrência de cultivo em estado sólido. Perfis de temperatura foram avaliados, e servirão como base para a continuidade do trabalho, que prevê o cálculo de parâmetros de transferência por diferentes modelos da literatura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Microrganismo e matriz sólida porosa

Como agente biológico para os ensaios com cultivo, foi empregado o fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b (termofílico), isolado pela Prof^a. Dr^a. Daniela Alonso Bocchini a partir de pilhas de bagaço de cana-de-açúcar da Usina

Guarani, de Olímpia-SP. Este fungo é reportado como bom produtor de celulasas em escalas de frascos e de biorreatores de bancada (Zanelato et al. 2012; Casciotori et al., 2016; Perez et al., 2019).

Para utilização, a cultura foi repicada em frascos de Erlenmeyer contendo 60 mL de meio Agar Sabouraud Dextrose e 1% de carboximetil celulose (CMC), deixados para solidificar inclinados. Esses frascos foram mantidos em câmara BOD por pelo menos 3 dias a 45°C para crescimento das colônias. Após isso, foram adicionados em cada frasco 100 mL de solução com pH = 5,0 e a seguinte composição (m/v): 0,35 % de (NH₄)₂SO₄, 0,3 % de KH₂PO₄, 0,05 % de MgSO₄.7H₂O, 0,05 % de CaCl₂ e 0,1 % de Tween 20 (Zanelato et al., 2012).

Em seguida, foi realizada a raspagem superficial do ágar para remoção dos esporos crescidos na superfície. As suspensões obtidas em cada frasco foram misturadas. Uma alíquota de 1 mL foi retirada para contagem de esporos em câmara de Neubauer em triplicata.

Como material particulado, foi utilizada uma mistura de bagaço de cana e farelo de trigo. O bagaço de cana foi fornecido pela Usina São Manoel (São Manoel – SP) e o farelo de trigo foi adquirido no comércio local.

A matriz porosa para ensaios sem e com reação (cultivo) foi composta por uma mistura de bagaço de cana (BC) e farelo de trigo (FT) na proporção BC:FT 3:7 (m/m), com teor de umidade inicial 65% (em base úmida). Para os ensaios com reação, o substrato foi autoclavado a 121°C por 20 minutos, assim como a solução nutriente.

Para início dos cultivos, dentro de câmara de fluxo laminar esterilizada, o substrato foi inoculado com a suspensão fúngica (número de esporos fixo por grama de sólidos secos) e umidificado com a mesma solução nutriente empregada na raspagem de esporos, após o que foi homogeneizado.

Ensaio em leito empacotado

Sem reação

O sistema de suporte ao leito empacotado foi o mesmo empregado por Oliveira et al. (2020) e Rodrigues (2021), mostrado na Figura 1. Ar foi fornecido por compressor e filtrado para retirada de impurezas grosseiras, passou

por um medidor de vazão e na sequência por um filtro biológico, após o que foi umidificado em coluna encamisada e recheada com esferas de vidro cheia de água destilada. Por fim, o ar seguiu para o leito, percolou a matriz porosa e saiu pelo topo, sendo finalmente liberado para a atmosfera.

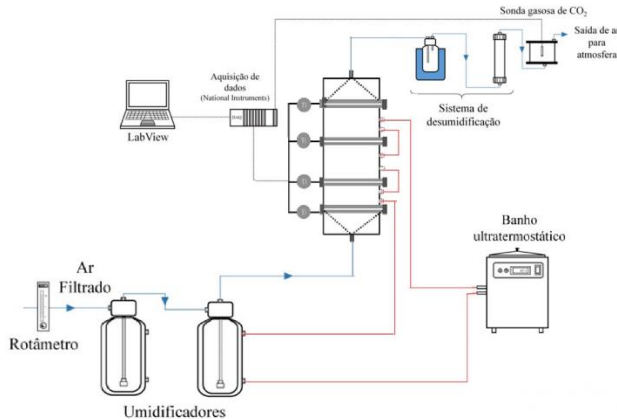


Figura 1: Sistema de suporte ao leito fixo.

A coluna foi orientada verticalmente e operada com um módulo empacotado com a matriz sólida, além dos módulos de entrada e saída, com interior cônico. O empacotamento de todos os módulos foi realizado segundo a técnica loose packing (LP) de Casciari et al. (2014), o que significa que os substratos foram acomodados sem provocar compressão do leito.

O equipamento utilizado constituiu-se de módulos construídos em aço inoxidável, com dimensões 12,5 cm de diâmetro interno e 11 cm de comprimento, totalizando cerca de 1,35 L de volume. Os módulos têm parede dupla, sendo o espaço anular feito de camisa para circulação de água. O módulo de entrada foi preenchido com esferas de vidro para estabelecimento do perfil de escoamento do ar, que percolou o leito no sentido ascendente (end-to-end). O módulo de saída permaneceu vazio.

Foram realizados ensaios em duplicata, empregando-se vazões de ar saturado de 175 e 350 L/h, com escoamentos de água pela camisa em contracorrente (CT) e co-corrente (CC) com o ar. Nos ensaios com configuração CT, ar saturado a 25°C percolou o leito no sentido ascendente e a água a 45°C circulou pela camisa no sentido descendente, enquanto em CC os dois fluidos escoaram no sentido ascendente, sendo os testes conduzidos até a obtenção do regime permanente de transferência de calor,

admitido quando observadas leituras constantes dos termopares com intervalo de 1 h.

Com reação

O aparato experimental empregado nos ensaios com cultivo foi o mesmo já apresentado na Figura 1. Segundo a literatura, a temperatura ideal para a produção de enzimas celulases por *Myceliophthora thermophila* I-1D3b é 45°C, com tempo de cultivo de 96 h. Em cada módulo fermentativo, foram colocados 195 g de BC:FT 3:7 (m/m), após inoculação com a suspensão de esporos e umidificação com solução nutriente. A temperatura da água da camisa foi de 45°C, assim como a de saturação do ar, e a vazão do ar percolante foi de 350 L/h.

Ao sair do leito, o ar passou por sistema de desumidificação no qual a água condensada era coletada e, em seguida, passava por coluna de sílica, baixando a umidade relativa do ar para no máximo 15%, possibilitando assim a leitura da concentração de CO₂ por sonda (Carbocap Vaisala). Nesses ensaios, os escoamentos do ar percolante e da água pela camisa também foram avaliados em CC e CT.

O material fermentado foi extraído com água destilada, conforme Rodrigues (2021), e analisado quanto à atividade CMC_{ase}, segundo método de Ghose (1987).

Técnica de medição de temperatura

As medições de temperaturas foram feitas seguindo a técnica amplamente utilizada de termopares acima do leito de partículas. Um conjunto de termopares foi colocado acima da camada superior de partículas, com os sensores localizados em diferentes posições radiais. O conjunto de medição de temperatura continha 5 termopares tipo T com revestimento de 1,5 mm de diâmetro externo e 45 mm de comprimento (Figura 2). Esses termopares, localizados em 5 posições radiais adimensionais ($r/R = 0; 0,27; 0,56; 0,79$ e $0,92$), foram fixados por uma placa circular de poliamida 6.

Os sinais de todos os sensores térmicos foram coletados por um sistema de aquisição de dados (Compaq DAQ, National Instruments, Austin, EUA) e enviados para um computador para serem processados pelo software LabView 8.5 (National Instruments, Austin).

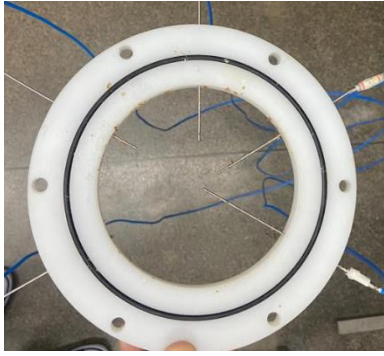


Figura 2: Suporte para os termopares.

Imagens de infravermelho

Utilizando termovisor de 4800 pixels infravermelho pontual (FLIR TG165 Imaging IR Thermometer, Flir Systems Inc), também se buscou visualizar frentes de transporte de calor na seção transversal do leito, para ar e água escoando em CT e CC, com e sem cultivo. As imagens foram registradas e analisadas com base na escala de cores *hot iron*, associada à radiação emitida do leito de partículas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1, são apresentados os dados acerca dos perfis de temperatura nos ensaios sem reação, onde é possível observar tanto o efeito do sentido das correntes de ar e de água quanto da vazão de percolação. Os valores entre parênteses referem-se à duplicata de um mesmo ensaio.

Nota-se que a temperatura média radial ($T_{\text{avg radial}}$) é maior para os ensaios com vazão 175 L/h, em comparação a 350 L/h, para as duas configurações de escoamento, CT e CC. Entre CC e CT, não se observa diferença significativa dessa variável. Já o gradiente térmico radial ($\Delta T_{r/R=0 \text{ a } 0,92}$) aumenta para a maior vazão de ar, em CT e CC. O tempo para alcance do regime permanente (RP), por sua vez, foi menor para maior vazão, também tanto em CT quanto em CC. No entanto, como as temperaturas do ar e da camisa foram próximas, a análise do perfil obtido em RP pode ter sido prejudicada.

Tabela 1. Análise dos perfis térmicos dos ensaios sem reação.

Sentido das correntes de ar e água	Vazão de ar (L/h)	T_{camisa} (°C)	$T_{\text{ar entrada}}$ (°C)	t até RP (h)	$T_{\text{avg radial}}$ (°C)	$\Delta T_{r/R=0 \text{ a } 0,92}$ (°C)
CT	175	45,0	39,4 (39,8)	4 (4)	42,0 (40,9)	2,4 (3,7)
CT	350	45,0	40,2 (38,8)	3 (3)	37,2 (38,1)	10,3 (7,1)
CC	175	45,0	39,5 (39,6)	4 (4)	41,6 (41,5)	2,9 (2,8)
CC	350	45,0	38,8 (37,5)	3 (3)	38,1 (38,0)	7,1 (2,7)

Na Tabela 2, são apresentados os dados acerca dos perfis de temperatura nos ensaios com reação. Valores entre parênteses referem-se à duplicata do cultivo. Mais uma vez, nota-se que o sentido das correntes de ar e de água não exerce influência expressiva sobre os perfis térmicos, já que o tempo de cultivo até atingir a

máxima temperatura ($T_{\text{máx}}$), o valor de $T_{\text{máx}}$, a posição em que ocorreu o pico de temperatura e o tempo de cultivo a $T > 50^\circ\text{C}$ foram próximos para CC e CT. Da mesma forma, a atividade enzimática obtida foi praticamente a mesma nas duas configurações de escoamento dos fluidos percolante e da camisa.

Tabela 2. Análise dos perfis térmicos dos ensaios com reação.

Sentido das correntes de ar e água	Vazão de ar (L/h)	T_{camisa} (°C)	$T_{\text{ar entrada}}$ (°C)	$t_{T_{\text{máx}}}$ (h)	$T_{\text{máx}}$ (°C)	$t_{T > 50^\circ\text{C}}$ (h)	r/R de $T_{\text{máx}}$	$\Delta T_{r/R=0 \text{ a } 0,92}$ (°C)	CMCase (U/g)
CT	350	45,0	42,7 (42,6)	28,0 (27,5)	51,2 (50,6)	18 (17)	0 (0)	0,1 (0,4)	121,63 (125,78)
CC	350	45,0	42,5 (42,7)	28,5 (28,0)	51,3 (50,9)	19 (18)	0,27 (0)	0,5 (0,6)	123,94 (123,02)

O teor de CO₂ na corrente gasosa de saída do BLE, medida indireta do metabolismo do fungo durante o cultivo, demonstrou aumento expressivo entre 20 e 30 h de cultivo, tendo sido coincidente com o período em que se registrou a máxima temperatura. Tal fato reitera que calor metabólico acumulado é, de fato, o que provoca o sobreaquecimento do leito.

A Figura 3 ilustra a imagem térmica de infravermelho do teste sem reação, em CC com vazão de 350 L/h. Como a camisa é mantida em temperatura maior que o ar, observa-se que a temperatura aumenta em direção às posições radiais mais próximas da parede. O contrário é observado na Figura 4, que mostra a imagem térmica ao final de um teste com cultivo. No caso com reação, o calor metabólico gerado, ao se acumular no meio, sobreaquece de forma mais expressiva o centro do leito, posição mais afastada do contorno resfriado, que é a parede.

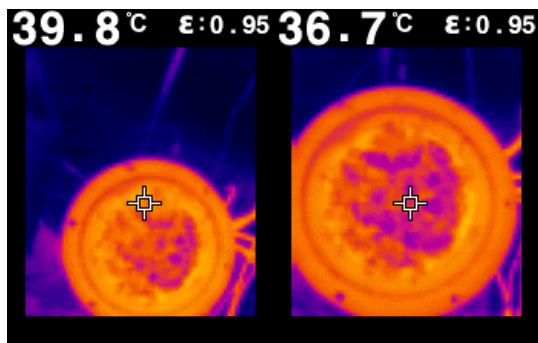


Figura 6 – Imagens de infravermelho captadas do sistema sem reação, em RP, CC, 350 L/h.

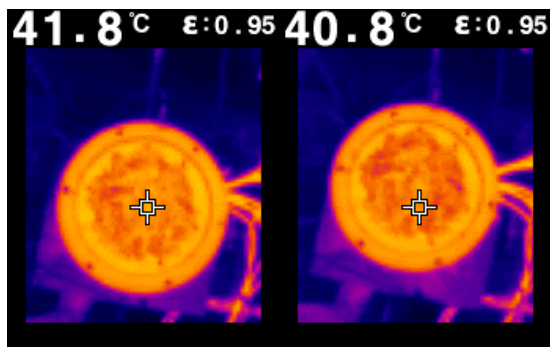


Figura 7 – Imagens de infravermelho captadas do sistema com reação, CC, 96 h de cultivo.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma análise preliminar da transferência de calor em leito empacotado com rejeitos agroindustriais para cultivo em estado sólido, em sistema com e sem

reação. As observações sobre o efeito da vazão de ar percolante e do sentido de escoamento do ar e da água através da camisa servirão como base para a continuidade do trabalho, que prevê o cálculo de parâmetros de transferência por diferentes modelos da literatura, em sistema com e sem cultivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001).

NOMENCLATURA

BC – Bagaço de cana
 BLE – Biorreator de leito empacotado
 CC – Co-corrente
 CMC – carboximetilcelulose
 CMC_{ase} – atividade enzimática sobre a CMC
 CT – Contracorrente
 FES – Fermentação em estado sólido
 FT – Farelo de trigo
 LP – *Loose packing*
 Q – Vazão de ar (L/h)
 r – Posição radial
 R – Raio do leito
 r/R – Posição radial adimensional
 RP – Regime permanente
 t – tempo (h)
 TC – Transferência de calor
 z – Posição axial

REFERÊNCIAS

- CALIXTO, L. O. (2019), Simulação da transferência de calor em um biorreator de leito empacotado operado em modo pseudo-contínuo (BLEPC) para fermentação em estado sólido (FES). UFSCar – São Carlos – SP, 40 p. (Trabalho de Graduação).
- CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; TABOGA, S. R.; CASCIATORI, P. A.; THOMÉO, J. C. (2014), Structural properties of beds packed with agro-industrial solid by-products applicable for solid-state fermentation: Experimental

data and effects on process performance, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 255, p. 214–224.

GHOSE, T. K. (1987), Measurement of cellulase activities, *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 59, p. 257-268.

MITCHELL, D. A.; KRIEGER, N.; BEROVIC, M. (2006), *Solid-state fermentation bioreactors: fundamentals, design and operation*, Springer-Verlag, Berlin.

NAYAK, A.; BHUSHAN, B. (2019), An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes, *Journal of Environmental Management*, Vol. 233, p. 352-370.

OLIVEIRA, S. P.; RODRIGUES, N. A.; CASCIATORI-FRASSATTO, P. A.; CASCIATORI, F. P. (2020), Solid-liquid extraction of cellulases from fungal solid-state cultivation in a packed bed bioreactor, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 37, p. 1530-1540.

RODRIGUES, N. A. (2021), Avaliação experimental de diferentes modos de operação de um biorreator de leito empacotado multicamadas para produção de celulases por cultivo em estado sólido. PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP, 103p. (Dissertação de Mestrado).

SOCOL, C. R.; da COSTA, E. S. F.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; WOICIECHOWSKI, A. L.; de SOUZA VANDENBERGHE, L. P. (2017), Recent developments and innovations in solid state fermentation, *Biotechnology Research and Innovation*, Vol. 1, p. 52-71.

ZANELATO, A. I. Produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido em bioreator de leito fixo. 2011. PPGECA/UNESP – São José do Rio Preto – SP, 118 p. (Dissertação de Mestrado).