



USO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO ESTUDO DE BIORREATORES APLICADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Daniela Maria Koerich – danielakoerich@gmail.com
Universidade Federal de São Carlos, Faculdade de Engenharia Química
Rodovia Washington Luís, km 235 – SP-310
CEP 13565-905 – São Carlos – São Paulo

Leonardo Machado da Rosa – leorosa@gmail.com
Universidade de Blumenau, Faculdade de Engenharia Química
Rua São Paulo, 3250, Itoupava Seca
CEP 89030-080 – Blumenau – Santa Catarina

Resumo: Diversas atividades vêm contribuindo para a emissão de poluentes no ambiente, incluindo tanto o uso de combustíveis fósseis quanto a produção de combustíveis limpos. A fim de minimizar o impacto causado, faz-se necessário o tratamento destes efluentes, antes da sua disposição no ambiente. Para isto, biorreatores são comumente usados, devido ao seu baixo requerimento energético. Tradicionalmente, estes equipamentos são projetados utilizando-se apenas correlações empíricas, que são úteis para a maior parte das situações encontradas. No entanto, para garantir uma operação eficiente, mesmo em diferentes escalas, é necessário o uso de técnicas mais precisas, como a fluidodinâmica computacional (CFD). O objetivo deste trabalho é avaliar o uso da fluidodinâmica computacional como alternativa para o estudo do comportamento de biorreatores, em especial os biorreatores anaeróbios sequenciais em batelada (ASBR), sob as condições de operação encontradas no tratamento da vinhaça. Diferentes aspectos na fluidodinâmica dessa configuração de biorreator foram estudados: a influência da turbulência para operações com baixo número de Reynolds, o efeito de diferentes vazões de recirculação sobre a fluidodinâmica e sobre a biomassa, e efeitos de escala. Nota-se que CFD é imprescindível para a obtenção de um melhor entendimento nestes equipamentos, tanto para o seu dimensionamento adequado, quanto para a sua otimização e garantia de que o processo de tratamento ocorra com eficiência.

Palavras-chave: biorreatores, tratamento de efluentes, fluidodinâmica computacional, cisalhamento, turbulência.



THE USE OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN THE STUDY OF BIOREACTORS APPLIED TO WASTEWATER TREATMENT

Abstract: *Several activities have contributed to the emission of pollutants in the environment, including both the use of fossil fuels and the production of clean fuels. In order to minimize their impact, it is necessary to treat these effluents, before their disposal in the environment. Therefore, bioreactors are commonly used due to their low energy requirement. Traditionally, these devices are designed using only empirical correlations, which are useful for most situations encountered. However, to ensure an efficient operation even at different scales, the use of more accurate techniques is required, such as computational fluid dynamics (CFD). The objective of this study is to evaluate the use of computational fluid dynamics as an alternative for the study of bioreactors behavior, especially the anaerobic sequential batch reactors (ASBR), under the operating conditions found in the treatment of vinasse. Different aspects in the fluid dynamics of this bioreactor configuration were studied: the influence of turbulence for operations with low Reynolds number, the effect of different recirculation flow of the fluid and the biomass, and scale effects. It was noticed that CFD is essential to obtaining a better understanding of these devices, both for design, its optimization, and to ensure that the treatment process to occur efficiently.*

Keywords: *bioreactors, wastewater treatment, computational fluid dynamics, shear stress, turbulence.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis fósseis tem causado mudanças climáticas globais, devido, em grande parte, à emissão de substâncias químicas poluentes como CO_x, NO_x, SO_x, C_xH_x, cinzas e outros compostos orgânicos que são liberados para a atmosfera, como resultado da sua combustão (DAS e VEZIROGLU, 2001).

Mesmo a utilização de combustíveis “limpos” pode acarretar na emissão de poluentes. Como exemplo, a crescente produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, desde a implementação do Programa Nacional do Alcool (ProAlcool), tem levado ao aumento da geração da vinhaça, agravando o problema da sua destinação (CORAZZA, 2006). A vinhaça é um efluente industrial gerado a partir do processo de destilação, durante a produção do álcool. Cerca de 10 a 15 litros de vinhaça são gerados na produção de 1 litro de álcool (VAN HAANDEL, 2005).

É necessário o uso de tecnologias para a redução do impacto ambiental associado à geração de efluentes. Para isto, muitas vezes processos biológicos são empregados. Estes são realizados, em grande parte, à temperatura e pressão ambiente e, portanto, consomem menos energia do que processos químicos ou eletroquímicos (SHOW et al., 2012). Diferentes configurações de biorreatores vêm sendo propostas, com o intuito de dissociar o tempo de retenção hidráulica do tempo de retenção celular (TAUSEEF et al., 2013).

Processos anaeróbios têm sido amplamente estudados e aplicados nos últimos anos, devido ao baixo custo operacional, se comparado aos processos aeróbios, além de apresentar maior conversão do substrato e menor geração de lodo. Estes processos têm sido empregados no tratamento de efluentes e resíduos, tendo como vantagem a possibilidade de aproveitamento de biogás (CAMPOS, 1999) e, mais recentemente, de biohidrogênio. O tratamento anaeróbio (digestão anaeróbia) de substâncias biodegradáveis é realizado através da fermentação bacteriana que ocorre em ambientes isentos de oxigênio livre (molecular). Como consequência, a matéria orgânica complexa é convertida em metano e gás carbônico, que compõe o biogás (REGULY, 1996).

Dentre as configurações de biorreatores utilizados no tratamento de efluentes tem-se o reator anaeróbio sequencial em batelada (ASBR). A operação de um ASBR ocorre num único tanque, o qual é preenchido com efluente e esvaziado ao final do tratamento, repetindo-se esta operação para



cada nova batelada (CAMPOS, 1999). A maior parte do tempo de funcionamento de uma batelada ocorre na atividade microbiana, quando o líquido é continuamente recirculado para melhorar a transferência de massa. Assim, a mistura é um parâmetro chave, pois uma boa mistura entre as fases promove o contato entre microrganismos e substrato, e aumenta a produção de biogás, sob a forma de bolhas dispersas através de reações de fermentação.

Observa-se na literatura que muitos estudos têm sido desenvolvidos avaliando apenas a cinética dos processos microbiológicos e desenvolvidos com base na análise experimental, em escala de bancada. As características físicas que afetam a eficiência do processo vêm sendo relegadas a segundo plano, e muitos reatores em escala real e de laboratório ainda são dimensionados por correlações empíricas. O efeito dos campos de velocidade, da tensão de cisalhamento, turbulência e volume das frações multifásicas, que afetam significativamente a composição da comunidade microbiana, da atividade de biomassa e da sedimentabilidade do lodo são desta forma menosprezados (WANG et al., 2010).

Devido ao aumento do poder computacional nas últimas décadas, é possível prever o comportamento do fluido no interior de reatores. A fluidodinâmica computacional (CFD) permite avaliar características do escoamento em determinadas regiões do domínio de cálculo, com maior detalhamento e precisão. Com isto, processos podem ser visualizados e otimizados através de resultados de simulações, antes de realizar experiências em escala real, poupando tempo e reduzindo custos (WANG et al., 2010).

Com o intuito de otimizar a operação em biorreatores, é imprescindível conhecer a dinâmica das fases no seu interior. A mistura entre biomassa e substrato é um fator importante para o tratamento de efluentes, e a turbulência contribui neste aspecto. No entanto, muitas vezes biorreatores são operados com vazões reduzidas, a fim de manter um tempo de retenção elevado, bem como reduzir a tensão de cisalhamento sobre os flocos. Estas vazões reduzidas podem resultar em diferentes regimes de operação no biorreator, o qual pode apresentar regiões não completamente turbulentas (COUGHTRIE et al., 2013). A importância da turbulência, do ponto de vista prático da engenharia, está em seu efeito de dissipação e difusão aumentadas nos escoamentos (SCHLICHTING e GERSTEN, 2000). Na tentativa de se quantificar e explicar a turbulência, muitos modelos foram desenvolvidos, como modelos algébricos, modelos com uma, duas ou mais equações para o transporte de quantidades turbulentas (CASTRO, 2011). Para a modelagem da turbulência em biorreatores, é então importante a aplicação de modelos suficientemente complexos, para prever com precisão o regime de operação.

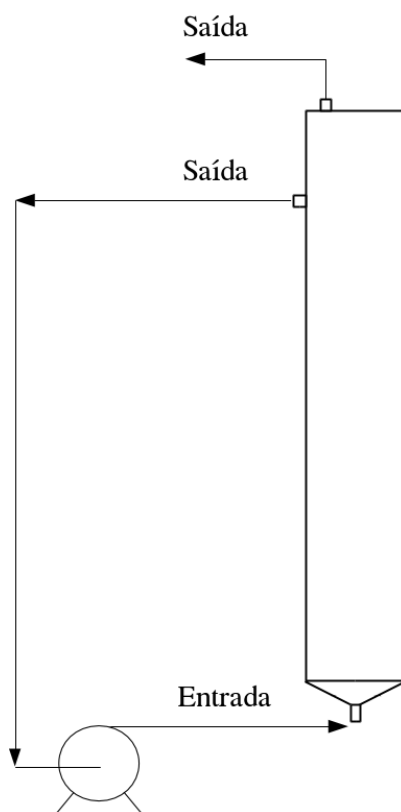
Simulações tridimensionais do escoamento gás-líquido em um reator com agitação contínua (CSTR), possibilitam a predição da produção de biohidrogênio nestes equipamentos (DING et al., 2010). Esta abordagem, aplicada para investigar a ampliação de escala em CSTRs, indica que parâmetros como o campo de velocidade e zonas de estagnação devem ser melhoradas para a aplicação em escala industrial (WANG et al., 2010). Com o acoplamento do modelo ADM1 de digestão anaeróbia à fluidodinâmica das fases, bem como a inclusão da teoria cinética do escoamento granular (KTGF), é possível estudar melhorias para aumentar o rendimento de biodigestores (YU et al., 2013). Nestes equipamentos, é importante determinar corretamente a sedimentação do lodo, garantindo a retenção da biomassa.

Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar a aplicação de métodos de CFD para a obtenção de um melhor entendimento do comportamento de biorreatores aplicados ao tratamento de efluentes. Primeiramente, avaliou-se a turbulência em um biorreator em escala piloto, e a modelagem necessária para prever corretamente este fenômeno. Em seguida, foram avaliadas diferentes vazões de recirculação, para então determinar qual o efeito destas vazões sobre a biomassa presente. Por fim, considerando-se resultados para biorreatores com duas capacidades (125 L e 1000 L), fez-se uma comparação do comportamento do processo nestas duas escalas. Resultados discutidos nesse estudo indicam a adequação do uso da fluidodinâmica computacional para a predição com maior exatidão do funcionamento de unidades para tratamento de efluentes.

2. MÉTODOS

Para os resultados apresentados a seguir, foram considerados biorreatores do tipo ASBR, com capacidades de 125 L e 1000 L (Figura 1). Nesta configuração, a mistura entre as fases dá-se pela recirculação do substrato, alimentado na base do reator.

Figura 1 – Diagrama esquemático do biorreator considerado neste estudo.



Diferentes condições operacionais foram aplicadas para o escoamento, sendo estas indicadas junto aos casos apresentados. As propriedades das fases presentes são listadas na Tabela 1. Considerou-se em todas as simulações que o biorreator é utilizado para o tratamento de vinhaça. Desta forma, as propriedades utilizadas para o substrato foram ajustadas de acordo com esse material.

Tabela 1 – Propriedades das fases usadas nas simulações.

Fase	Massa específica [kg/m ³]	Viscosidade [kg/(m.s)]	Diâmetro [m]
Substrato	1044,7	$1,00 \times 10^{-3}$	–
Biogás	0,089	$0,74 \times 10^{-6}$	0,0010
Biomassa	1178,1	$1,00 \times 10^{-8}$	0,0009

Para a simulação dos diferentes casos propostos, foi adotada uma abordagem Euleriana, considerando 1 ou 2 fases, dependendo do estudo. Desta forma, foram resolvidas as Equações da continuidade (1) e de transporte de quantidade de movimento (2), expressas a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{U}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \mathbf{U}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i) \\ &= \nabla \cdot (\alpha_i \mu_i (\nabla \mathbf{U}_i + \nabla \mathbf{U}_i^T)) + \nabla \cdot \alpha_i \boldsymbol{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} - \alpha_i \nabla p + \beta (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \end{aligned} \quad (2)$$

onde α é a fração volumétrica de cada fase, indicada pelo índice i , ρ é a massa específica da fase [kg/m³], t representa o tempo [s], \mathbf{U} é a velocidade média [m/s], μ é a viscosidade dinâmica [kg/(m.s)], g é a aceleração da gravidade [m/s²], p é a pressão [Pa], β é a força de arraste, e $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor turbulento [kg/(m².s²)]. A turbulência foi modelada adotando a abordagem RANS.

Em todos os casos avaliados, um estudo de malha foi realizado a fim de determinar o refinamento necessário para a obtenção de resultados válidos. Para tanto, utilizou-se o método GCI (ROACHE, 1997), considerando-se aceitáveis valores abaixo de 5%. Simulações foram calculadas ao longo de um tempo suficientemente grande, de tal forma que a média temporal dos campos preditos não apresentasse variação significativa (menores que 10%). Estes valores médios são os resultados apresentados a seguir.

Para a condução das simulações, foram usados os códigos Fluent (versão 15) e OpenFOAM (versão 2.2.1). Considerou-se como critério de convergência a obtenção de resíduos abaixo de 10⁻⁴. Passos de tempo foram ajustados ao longo da simulação, a fim de garantir que o critério CFL ficasse abaixo de 1. Os cálculos foram feitos em paralelo, utilizando estações de trabalho HP Z600.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

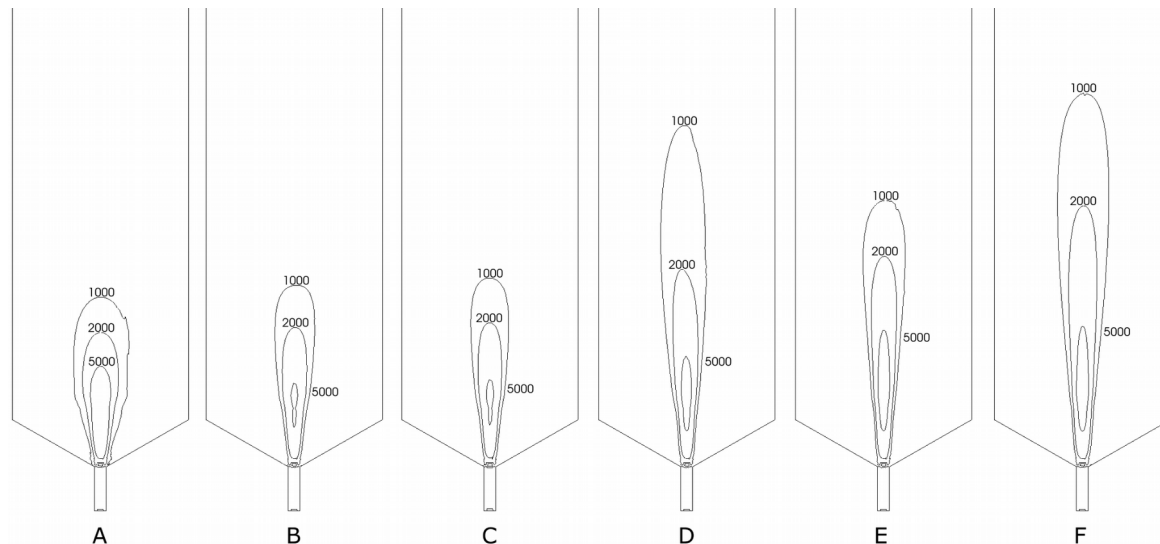
Neste estudo, foram avaliados aspectos fluidodinâmicos referentes à operação de biorreatores aplicados ao tratamento de efluentes.

3.1 Regimes de operação

A fim de se obter um melhor entendimento do comportamento turbulento de um biorreator, diferentes modelos de turbulência foram aplicados para a predição de um reator anaeróbio sequencial em batelada, com um número de Reynolds nominal de 1689. Neste estudo, adotou-se uma abordagem monofásica, considerando apenas o movimento da fase contínua (substrato), calculado utilizando-se o código Fluent. A modelagem utilizada foi validada utilizando dados experimentais para condições similares, encontrados na literatura (SPICKA et al., 2001). A malha determinada para este estudo contém 421 mil volumes de controle, para um reator de 125 L, com cerca de 2 metros de altura e 0,3 metros de diâmetro. Foram considerados os modelos Spalart-Allmaras, Transition SST k-omega, SST k-omega, k-epsilon, Realizable k-epsilon, e Reynolds Stress Model (RSM).

Notam-se diferenças significativas na predição do número de Reynolds local, para a unidade operando sob as mesmas condições (Figura 2). Em contraste, regiões em regime de transição possuem pouca influência na dinâmica do equipamento – cerca de 3% quando comparando a energia cinética média (KOERICH e ROSA, 2016a).

Figura 2 – Contornos para o número de Reynolds local, obtido usando os modelos (A) Spalart-Allmaras, (B) Transition SST k-omega, (C) SST k-omega, (D) k-epsilon padrão, (E) Realizable k-epsilon, e (F) Reynolds Stress Model.



Cada modelo foi avaliado comparando seus resultados com aqueles preditos utilizando o modelo RSM, que é um modelo mais completo dentre os considerados. Qualitativamente, observa-se que resultados preditos utilizando-se os modelos k-epsilon padrão e RSM mostraram-se próximos. Quantitativamente, essa concordância não é mais válida: o modelo que apresentou resultados mais próximos aos obtidos com o modelo RSM foi o SST k-omega. Isto enfatiza a necessidade de se considerar modelos mais complexos, para capturar com precisão os efeitos da turbulência em escoamentos com baixos números de Reynolds, e assim prever com maior precisão a mistura entre as fases durante o tratamento.

3.2 Vazão de Recirculação

Para a simulação de um biorreator com maior capacidade (1000 L, com 4 metros de altura e 0,6 metros de diâmetro), adotou-se o código OpenFOAM. Testes de malha indicaram a necessidade de uma malha contendo pelo menos 130 mil volumes de controle. Simulações consideraram uma fase dispersa (biogás) e outra contínua (substrato), esta última operando sob diferentes vazões de recirculação, a fim de avaliar a influência desta sobre o comportamento do biorreator. Para tal, foram adotadas vazões de 1,50 kg/s, 2,25 kg/s e 3,00 kg/s.

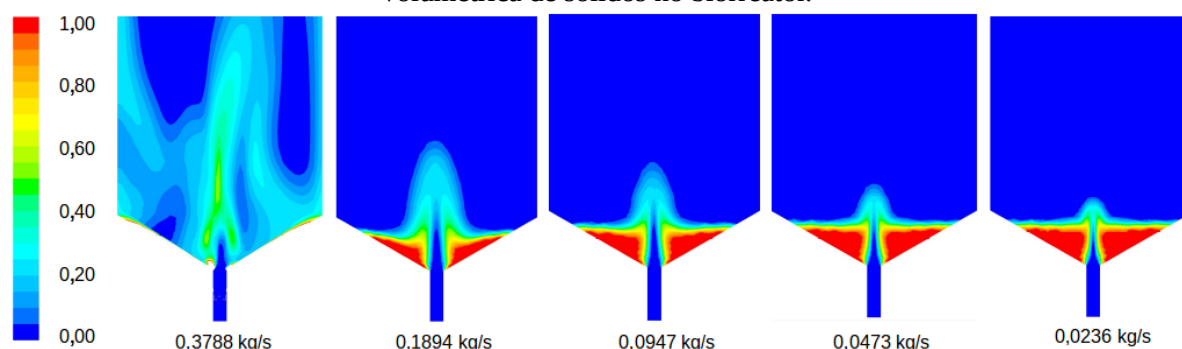
Resultados indicaram que, quanto maior a vazão adotada, maior a turbulência presente no escoamento. Na maior parte do reator, a tensão de cisalhamento manteve-se em valores baixos. Porém, próximo à entrada e saída do reator (junto aos dutos de reciclo), a tensão de cisalhamento manteve-se acima do limite encontrado em literatura (NURTONO et al., 2012), sendo recomendado o uso de dutos com maior diâmetro, a fim de reduzir a velocidade, mantendo a vazão mais elevada (MAURINA et al., 2014). Resultados numéricos indicaram que a tensão de cisalhamento mantém-se abaixo do limite tolerável, mantendo valores elevados para a energia cinética turbulenta no interior do biorreator. Isto enfatiza algumas vantagens do uso de CFD sobre outros métodos: dispõe-se de uma maior riqueza de detalhes para a análise de biorreatores.

3.3 Comportamento da biomassa

Para avaliar o impacto de diferentes vazões sobre a biomassa, simulações foram conduzidas considerando-se as fases contínua (substrato) e dispersa (biomassa). Neste estudo, utilizou-se o código Fluent para a condução das simulações bifásicas, adotando uma malha contendo 421 mil volumes de controle.

A análise numérica por meio de CFD foi realizada de forma a otimizar o processo de tratamento de efluentes, pela determinação de uma vazão ótima de recirculação, que acarretasse em menores danos à biomassa presente no biorreator. Resultados preditos mostram o impacto da vazão de recirculação sobre a distribuição da biomassa (Figura 3).

Figura 3 – Efeito da aplicação de diferentes vazões de recirculação sobre os campos de fração volumétrica de sólidos no biorreator.



Nota-se que a maior vazão considerada arrasta maior parte de biomassa, proporcionando um contato mais intenso entre as fases, mas também causando maior tensão de cisalhamento na biomassa, bem como carregando-a a alturas mais elevadas. Este resultado também afeta a distribuição de tempos na batelada, uma vez que deve-se esperar que os sólidos sedimentem antes de realizar a descarga ao final do tratamento.

Valores preditos para a tensão de cisalhamento foram utilizados para estimar a quantidade de sólidos sujeito a tensões elevadas. A este valor, foi adicionada a quantidade de sólidos arrastados através do duto de recirculação, que são danificados ao passarem pela bomba. De posse dos resultados preditos, foi possível determinar a quantidade total de sólidos danificados em cada condição, bem como a altura máxima que estes atingem (Tabela 2). Considerando-se estes valores, bem como a turbulência no interior do biorreator, definiu-se que a condição ótima de operação ocorre para a vazão de recirculação de 0,1894 kg/s, pois dentre as condições avaliadas, esta é a que proporciona maior mistura entre as fases, e uma quantidade aceitável de sólidos danificados (KOERICH e ROSA, 2016b).

Tabela 2 – Comportamento do biorreator sob diferentes vazões.

Vazão [kg/s]	Quantidade de sólidos danificados [%]	Altura máxima [m]
0,3788	89,61	–
0,1894	24,46	0,15
0,0947	15,42	0,10
0,0473	1,10	0,05
0,0236	0,73	0,02

Cabe ressaltar que, com a adoção de uma vazão de recirculação reduzida na unidade, deve-se reduzir a vazão na bomba de recirculação. Inversores de frequência são comumente associados para este fim. Com isto, o consumo de energia – que é um dos principais custos neste tipo

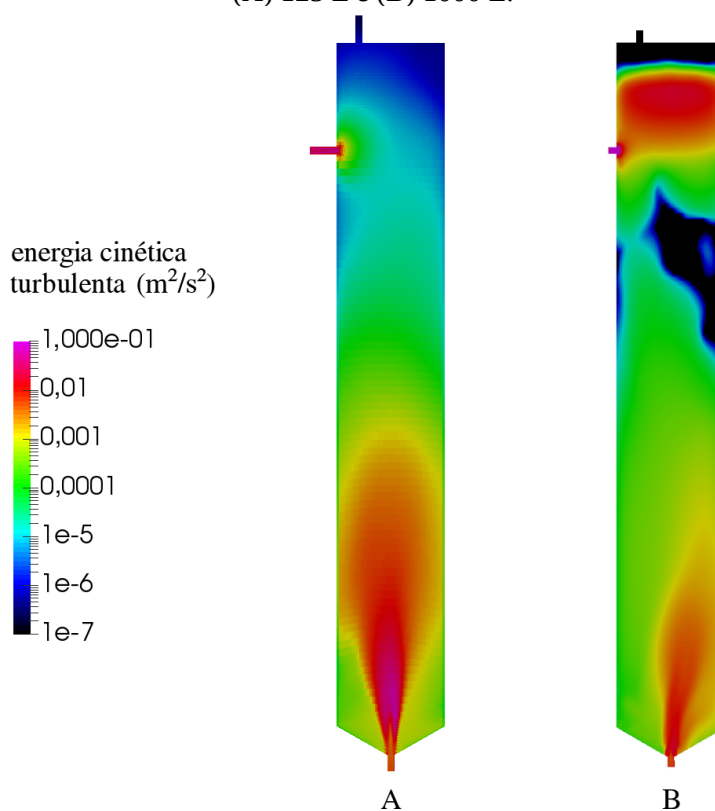
de processo – pode ser reduzido drasticamente. Na situação avaliada neste estudo, a redução do consumo de energia para o tratamento utilizando a vazão ótima chega a 87,5%.

3.4 Scale-up

Por praticidade, muitas das pesquisas com biorreatores são realizadas em escala de laboratório. Resultados ótimos podem ser obtidos nestas condições, mas estes não necessariamente serão mantidos em escala industrial, uma vez que diferentes condições se apresentam durante o *scale-up* de biorreatores. Técnicas numéricas, como a Fluidodinâmica Computacional, podem ser utilizadas para reproduzir o comportamento de equipamentos em diferentes escalas.

Neste estudo, considerou-se um reator com capacidade de 125 L, e outro com 1000 L, ambos apresentando similaridade geométrica, e sob condições operacionais que resultam num mesmo número de Reynolds. Apesar dessas similaridades, observou-se que é mais difícil manter valores elevados para a turbulência em reatores de maior porte: no reator de 1000 L, resultados indicaram a presença de regiões com movimento e turbulência desprezíveis (Figura 4B). No reator menor, a energia cinética turbulenta encontra-se melhor distribuída (Figura 4A). Cabe ressaltar que, apesar do reator maior apresentar uma maior turbulência – 48% maior do que a simulada para o reator menor – a presença de regiões com mistura pobre entre as fases pode comprometer a sua operação. Através de simulações, pôde-se reduzir a presença de tais “zonas mortas” (MAURINA et al., 2014), de forma a garantir que o processo ocorra em condições adequadas, evitando que o tratamento de efluentes seja ineficiente.

Figura 4 – Campos de energia cinética turbulenta média previstas para biorreatores em duas escalas: (A) 125 L e (B) 1000 L.





4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, técnicas de fluidodinâmica computacional foram usadas para avaliar diversos aspectos da operação de biorreatores, usados para o tratamento de efluentes. Tradicionalmente, estas unidades são projetadas utilizando-se apenas correlações empíricas, o que é adequado na maior parte dos casos, mas pode resultar em uma operação ineficiente em casos específicos. Isto é evidenciado avaliando-se a presença de zonas mortas, e/ou valores altos para a tensão de cisalhamento em sistemas de tratamento. Nestas situações, uma abordagem fenomenológica se faz necessária.

Numa primeira análise, foi verificado que, mesmo operando sob números de Reynolds reduzidos, os efeitos de regiões em regime de transição podem ser desprezados em biorreatores. Devido às baixas velocidades, a turbulência pode afetar significativamente a fluidodinâmica no seu interior. O cálculo das propriedades turbulentas do fluido deve ser feito com maior acurácia, visto que diferentes modelos de turbulência podem resultar em comportamentos distintos. Nestas situações, modelos populares como o k-epsilon não são necessariamente tão bons quanto modelos mais completos, como o RSM. Visto que este último não requer tempo de cálculo demasiadamente maior do que os demais, determinou-se que o RSM é um dos modelos mais adequados para prever o comportamento em biorreatores.

A avaliação de reator de maior porte indicou a presença de zonas estagnadas, as quais são indesejáveis na operação industrial. A proposta de avaliar vazões de recirculação superiores indicou que a turbulência é incrementada com o aumento da vazão, bem como a tensão de cisalhamento. Uma vez que os maiores valores para a tensão de cisalhamento foram observados junto aos dutos de recirculação, foi proposta a adoção de dutos com diâmetros maiores, a fim de reduzir parcialmente a velocidade, sem afetar a turbulência no biorreator.

Avaliando-se o efeito de diferentes vazões especificamente sobre a biomassa, verificou-se que esta pode ser danificada não apenas devido à presença de valores elevados de tensão de cisalhamento, mas também devido ao arraste para fora do reator. Este efeito foi mais significativo para a maior vazão de recirculação avaliada. Com a aplicação de simulações numéricas, foi possível quantificar a quantidade de sólidos danificada em cada caso, bem como determinar a distribuição destes no biorreator. Estimando-se a altura máxima atingida pelos sólidos com maior precisão, define-se o tempo necessário para a etapa de sedimentação, podendo-se avaliar a condição na qual o efluente é tratado com maior eficiência.

Por fim, a análise da energia cinética turbulenta média em biorreatores com diferentes escalas (125 L e 1000 L) mostrou que, por mais que o número de Reynolds nominal seja mantido para diferentes tamanhos de equipamentos, ainda assim é possível o aparecimento de regiões com pouca agitação em escalas maiores. Isto evidencia a necessidade de métodos precisos para a predição do comportamento de biorreatores, quando for necessário conhecer o comportamento em escala real de processos avaliados em escala reduzida.

Com esse estudo, pode-se concluir que técnicas numéricas como a fluidodinâmica computacional (CFD) são úteis para o estudo do comportamento de biorreatores, precursor indispensável para a otimização de processos para tratamento de efluentes. Neste estudo, foram abordados aspectos fluidodinâmicos, que podem ser preditos com maior precisão utilizando-se técnicas CFD. Passos seguintes incluem a modelagem das reações presentes no processo, de tal forma que a eficiência do processo seja predita com maior fidelidade. Isto requer maior tempo e maior investimento para a obtenção de resultados, que de outra forma podem ser obtidos com o uso de correlações empíricas. No entanto, pode-se justificar o uso de técnicas numéricas com a maior precisão dos resultados obtidos, permitindo-se o projeto de sistemas de tratamento de efluentes cada vez mais eficientes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERGS e a Petrobras pelo suporte financeiro.



REFERÊNCIAS

BANNARI, R.; BANNARI, A.; SELMA, B.; PROULX, P. Mass transfer and shear in an airlift bioreactor: Using a mathematical model to improve reactor design and performance. **Chemical Engineering Science**, v. 66, p. 2057-2067, 2011.

CASTRO, H. C. A. **Estudo do tempo de mistura em tanques de diesel com o uso da Fluidodinâmica Computacional**. Campinas, 102 p., 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.

COUGHTRIE, A. R.; BORMAN, D. J.; SLEIGH, P. A. Effects of turbulence modelling on prediction of flow characteristics on a bench-scale anaerobic gas-lift digester. **Bioresource Technology**, v. 138, p. 297-306, 2013.

CORAZZA, R. I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação. In: XLIV Congresso da SOBER – Questões Agrárias, Educação no Campo e Desenvolvimento, 2006.

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological process: a survey of literature. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 26, p. 13-28, 2001.

DING, J.; WANG, X.; ZHOU, X. F.; REN, N. Q.; GUO, W. Q. CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 7005-7013, 2010.

KOERICH, D. M.; ROSA, L. M. Numerical evaluation of the low Reynolds turbulent flow behaviour in a bioreactor. **International Journal of Simulation and Process Modelling**, v. 11, n. 1, p. 66-75, 2016.

KOERICH, D. M.; ROSA, L. M. Optimization of bioreactor operating conditions using computational fluid dynamics techniques. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, *in press*, 2016.

MAURINA, G. Z.; ROSA, L. M.; BEAL, L. L.; BALDASSO, C.; GIMENEZ, J. R.; TORRES, A. P.; SOUSA, M. P. Effect of Internal Recirculation Velocity in an Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 4, p. 895-903, 2014.

NURTONO, T.; NIRWANA, W. O. C.; ANWAR, N.; KUSDIANTO; NIA, S. M.; WIDJAJA, A.; WINARDI, S. A computational fluid dynamics (CFD) study into a hydrodynamic factor that affects a bio-hydrogen production process in a stirred tank reactor. **Procedia Engineering**, v. 50, p. 232-245, 2012.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Reviews in Fluid Mechanics**, v. 29, p. 123-160, 1997.

SCHLICHTING, Hermann., GERSTEN, Klaus. **Boundary-Layer Theory**. 8th edition. Berlin, Germany: Springer, 2000.

SHOW, K. Y.; LEE, D. J.; TAY, J. H.; LIN, C. Y.; CHANG J. S. Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward. **International journal of hydrogen energy**, v. 3, n. 7, p. 15616-15631, 2012.

SPICKA, P.; DIAS, M. M.; LOPES, J. C. B. Gas-liquid flow in a 2D column: comparison between experimental data and CFD modelling. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 6367-6383, 2001.

REALIZAÇÃO

CORREALIZAÇÃO

INFORMAÇÕES



TAUSEEF, S. M.; ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 704-741, 2013.

VAN HAANDEL, A. C. Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants. **Water Science and Technology**, v. 52, n. 1-2, p. 49-57, 2005.

VON SPERLING, M. Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 6 n. 3-4, p. 147-156, 2001.

WANG, X.; DING, J.; GUO, W. Q.; REN, N. Q. Scale-up and optimization of biohydrogen production reactor from laboratory-scale to industrial-scale on the basis of computational fluid dynamics simulation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 10960-10966, 2010.

YU, L.; MA, J.; FREAR, C.; ZHAO, Q.; DILLON, R.; LI, X.; CHEN, S. Multiphase modeling of settling and suspension in anaerobic digester. **Applied Energy**, v. 111, p. 28-39, 2013.

REALIZAÇÃO



CORREALIZAÇÃO



INFORMAÇÕES

abes-rs@abes-rs.org.br
51 3212.1375