

ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATOR UASB DE PEQUENA ESCALA POR DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL (CFD): SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO

V.C. ROCHA¹, A.N. SIMÕES², C.E.D. SANTOS³, E.C. PIRES⁴

Universidade Federal do Triângulo Mineiro^{1,2,3}, Universidade de São Paulo⁴

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0930-4567>¹

vinicius.rocha@uftm.edu.br¹

Submetido 09/11/2023 - Aceito 07/12/2023

DOI: 10.15628/holos.2023.16400

RESUMO

Um reator UASB de pequena escala foi modelado para avaliar seu comportamento hidrodinâmico e comparar simulações de CFD com resultados experimentais obtidos em escala de laboratório. As simulações foram realizadas por meio do pacote Ansys® CFX™, e variou-se duas vazões: A) 26,68 e B) 4,0 l.d⁻¹. O volume do reator foi de 1,5 litros, com volume útil de 1,38 litros. Além das simulações em CFD, foram realizados testes hidrodinâmicos com injeção de traçador, tanto experimental quanto virtualmente. Curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) foram obtidas e o modelo de número de tanques em série (NTIS) foi utilizado para determinação do comportamento

hidrodinâmico. Os valores NTIS calculados através de simulações CFD foram 5,55 e 4,76, para vazões A e B, respectivamente. Para a análise experimental, os valores de NTIS foram 6,67 e 5,54, para vazões A e B, respectivamente. O teste U de Mann-Whitney foi realizado para confirmar a similaridade entre simulações de CFD e testes experimentais. Os resultados do teste U de Mann-Whitney não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as simulações de CFD e os dados experimentais. Pode-se concluir que as simulações CFD são válidas e podem ser utilizadas para analisar o comportamento hidrodinâmico de reatores UASB.

PALAVRAS-CHAVE: CFD, experimental, simulação, testes de injeção de traçador

HYDRODYNAMIC STUDY OF SMALL-SCALE UASB REACTOR BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD): SIMULATION AND VALIDATION

ABSTRACT

A small-scale UASB reactor was modeled in order to evaluate its hydrodynamic behavior and compare CFD simulations with experimental results obtained on a laboratory scale. Simulations using Ansys® CFX™ were carried out with two different flow rates: A) 26.68 and B) 4.0 l.d⁻¹. The reactor volume was 1.5 liters, with a useful volume of 1.38 liters. In addition to the CFD simulations, hydrodynamic tests with tracer injection were performed, both experimentally and in simulations. Residence time distribution (DTR) curves were obtained and the number of tanks-in-series (NTIS) model was used for determination of hydrodynamic behavior. The NTIS

values calculated using CFD simulations were 5.55 and 4.76, for flow rates A and B, respectively. For the experimental analysis, the NTIS values were 6.67 and 5.54, for A and B flow rates, respectively. The Mann-Whitney U test was performed to confirm the similarity between CFD simulations and experimental tests. The results of the Mann-Whitney U test showed no statistically significant differences between the CFD simulations and experimental data. It can be concluded that CFD simulations are valid and can be used to analyze the hydrodynamic behavior of UASB reactors.

Keywords: CFD, experimental, simulação, testes de injeção de traçador.

1 INTRODUÇÃO

Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (UASB) são reatores biológicos amplamente utilizados no tratamento de águas residuais, especialmente em climas quentes (Chernicharo et al., 2015). Esta tecnologia pode ser utilizada para tratar águas residuais industriais e domésticas e proporciona: (i) menores custos de manutenção e operação quando comparado aos sistemas aeróbios; (ii) pronta formação de grânulos densos e sua manutenção na parte inferior devido à hidrodinâmica do reator (Bhatti et al., 2014; Rodríguez-Gómez et al., 2014; Chernicharo et al., 2015); (iii) remoção efetiva de matéria orgânica aliada à produção de biogás (Hinken et al., 2014; Lu et al., 2015); e (iv) baixa taxa de crescimento da biomassa, diminuindo a frequência das descargas de biomassa (Daud et al., 2018).

O desempenho do UASB, em termos de remoção de matéria orgânica e produção de energia, geralmente é determinado por dois fatores principais inter-relacionados: microbiológicos e hidrodinâmicos (Ren et al., 2009). Em relação à hidrodinâmica do reator, sabe-se que esta pode ser influenciada pelas características de mistura, presença de zonas mortas, curtos-circuitos e caminhos preferenciais, que normalmente não são consideradas na maioria dos modelos aplicados para digestão anaeróbia. Simulação em dinâmica de fluidos computacional (CFD) (Passos et al., 2014; Cruz et al., 2016) e testes experimentais de laboratório (técnicas de estímulo-resposta com traçadores e modelos relacionados) (Fia et al., 2016) são métodos adequados para avaliar a hidrodinâmica do reator. Além disso, a CFD tem uma vantagem adicional, pois pode ser usada em grande medida para substituir experimentos demorados e caros (Pourtousi et al., 2015).

Neste contexto, ainda falta uma compreensão sistemática do comportamento hidrodinâmico de um UASB, baseada no entendimento completo dos padrões de fluxo e sua relação com o desempenho do reator. A distribuição do tempo de residência (DTR) pode ser uma ferramenta útil para atingir este objetivo. A DTR pode descrever com eficácia o comportamento hidráulico real e detectar anomalias em reatores biológicos. A determinação da DTR é relativamente simples e Levenspiel (1999) apresenta uma das referências teóricas mais conhecidas sobre este assunto. Estudos anteriores sobre a hidrodinâmica UASB mostraram que eles poderiam ser bem descritos pelo modelo do número de tanques em série (NTIS) (Fia et al., 2016).

O presente estudo teve como objetivo compreender completamente o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB de pequena escala através de simulação em CFD e ensaios experimentais reais. As simulações e os experimentos foram realizadas considerando duas vazões diferentes e o método final foi validado por análise estatística.

2 METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

O reator UASB de pequena escala era feito de acrílico e continha alguns plásticos MBBR (reator de biofilme de leito móvel) para simular a manta de lodo (Figura 1). A água da torneira foi aplicada como afluente por uma bomba doseadora (Grundfos, DDA). O reator possuía uma zona

de deflexão de 2,0 cm localizada imediatamente acima da entrada. A Tabela 1 contém informações sobre a estrutura do reator.

Tabela 1: Características do UASB.

Parâmetro/Unidade	Valor
Altura (cm)	66
Diâmetro maior (cm)	10
Diâmetro menor (cm)	5
Volume (L)	1,50
Volume efetivo (L)	1,38
Porosidade (-)	0,88
Rugosidade da parede (mm)	0,005

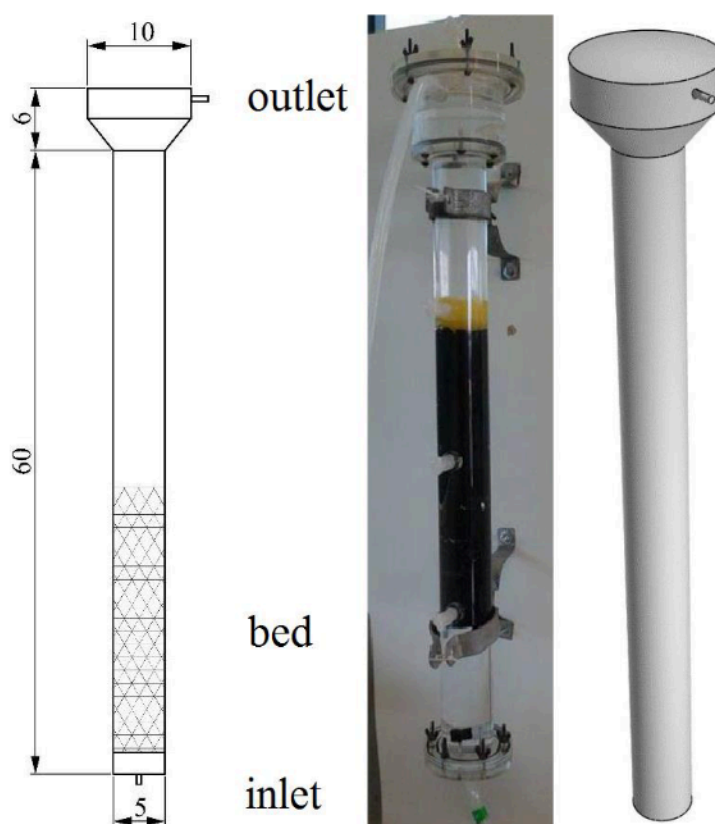


Figura 1: Vista em perspectiva esquemática, real e virtual do reator UASB de pequena escala.

2.2 Procedimento experimental

O trabalho experimental foi realizado considerando duas vazões diferentes: 26,68 (C1) e 4,0 l d⁻¹ (C2). O tempo que um elemento fluido leva para passar através de um reator, desde sua entrada até sua saída, é denominado tempo de detenção hidráulica (TDH). O movimento do fluido pode percorrer diversas rotas, permanecendo por diferentes momentos dentro do reator. Neste estudo, os TDH teóricos para cada condição testada foram de 1h21min e 9h00min, respectivamente. Esses TDHs foram calculados considerando o volume total do reator.

Com base na detecção do tempo que cada elemento de fluido passa pelo reator, a curva de distribuição do tempo de residência (DTR) foi alcançada injetando-se na corrente de entrada 5,0 mL de cloreto de sódio (NaCl) na concentração de 3,0 g l⁻¹ (traçador).

Este tipo de injeção é chamado de “injeção de pulso” e sua característica principal é a necessidade de um pequeno volume de traçador para realizar o experimento, comparado ao volume total do reator. A concentração do traçador (C) foi medida continuamente na saída do reator, juntamente com o tempo, e resultou em uma curva C, conforme expresso pela Equação 1. A concentração do traçador foi avaliada indiretamente pelo monitoramento de condutividade elétrica (Vernier) e depois convertida para mg l⁻¹ de traçador.

$$C_{pulse} = \int_0^{\infty} C \cdot dt \quad (1)$$

onde C é a concentração do traçador (mg l⁻¹) e t é o tempo do experimento (min).

O TDH (HTR) médio foi estimado pelos dados adquiridos durante os testes experimentais (Equação 2):

$$\overline{HRT} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C \cdot dt}{\int_0^{\infty} C \cdot dt} \quad (2)$$

Para a injeção de pulso, a função DTR, denominada curva E, é definida pela Equação 3:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) \cdot dt} \quad (3)$$

onde:

$$\int_0^{\infty} E(t) \cdot dt = 1 \quad (4)$$

Antes da aplicação do modelo NTIS e sua análise integrada com os modelos Kinect, a função E_θ (concentração adimensional) foi calculada (Equações 5 e 6), onde θ é definido como o tempo adimensional:

$$E_{\theta} = \overline{HRT} \cdot E \quad (5)$$

$$\theta = \frac{t}{\overline{HRT}} \quad (6)$$

O número de tanques em série foi calculado utilizando a Equação 7:

$$NTIS = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} \quad (7)$$

onde é a variância da distribuição adimensional do tempo de residência, dada na Equação (8):

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\overline{HRT}^2} \quad (8)$$

O valor NTIS é um critério importante para julgar os padrões de fluxo em um reator. Normalmente, NTIS = 1 representa um sistema de fluxo completamente misto, porém NTIS = ∞ indica uma unidade de fluxo tampão. A integração de um balanço de massa dinâmico em torno da

cadeia de reatores gera o DTR do sistema. A concentração adimensional de um traçador no NTIS é dada pela Equação (9) (Levenspiel, 1999):

$$E_{\theta} = NTIS \cdot \frac{(NTIS \cdot \theta)^{NTIS-1}}{(NTIS - 1)!} \cdot e^{-NTIS \cdot \theta} \quad (9)$$

2.3 Abordagem da Modelagem em CFD

O processo de modelagem CFD envolve diversas etapas essenciais: (i) construir uma geometria tridimensional do reator (Figura 1); (ii) desenvolver uma malha utilizando elementos finitos ou volumes finitos; (iii) realizar um teste de independência da rede para escolha da malha ideal; (iv) definir condições de contorno, métodos de cálculo e equações adicionais e, por fim, (v) processar os resultados. Neste estudo o sistema utilizado foi o Ansys 14.0®. O pacote de softwares inclui um criador de geometria (DesingModeler™), um *mesher* (Meshing™) e módulos de pré-processamento, processamento e pós-processamento (CFX™).

O domínio de simulação foi representado por uma representação geométrica, portanto foi considerado apenas o volume ocupado pelo fluido no reator. Nas simulações em CFD, o volume de fluido no reator é dividido em uma malha, que é composta por uma porção de volumes “menores”, para os quais são realizados os cálculos de conservação de massa e momento. Em geral, quanto mais refinada a resolução da malha, mais precisos serão os resultados (Li, Yang e Dai, 2009).

Portanto, foram construídas duas malhas a fim de determinar a melhor (M1 e M2), em termos de qualidade dos resultados e tempo de processamento da simulação. A diferença entre as duas malhas está no refinamento da região da manta. A primeira malha (M1) foi construída utilizando uma configuração padrão do software Meshing™ e a segunda (M2) refere-se ao refinamento realizado apenas na manta. A simulação em CFD deve buscar independência dos resultados em relação à densidade da malha adotada (Curi et al., 2017).

Uma série de testes é necessária para garantir o refinamento da malha e também para comparar os resultados caso o refinamento não altere os resultados. Todos os testes foram realizados com as mesmas condições físicas e de contorno. O ponto final principal do nível de refinamento da malha é a convergência da simulação.

Os softwares de CFD geralmente contêm ferramentas que permitem o monitoramento dos parâmetros de convergência. Por exemplo, o CFX-Solver™ permite ao usuário visualizar o grau de convergência de vários parâmetros, como a conservação de massa e momento através dos critérios RMS P-Mass, RMS U-Mom, RMS V-Mom e RMS W-Mom.

Outros parâmetros importantes são RMS e RMS, TurbKE e KO-TurbFreq, relacionados ao modelo de turbulência *k- ω shear stress transport* (SST), e o parâmetro *Imbalance*. Porém, parâmetros adicionais podem ser utilizados no teste de independência de malha, como comparar os resultados da simulação. Por exemplo, nesta investigação, a curva DTR do reator para cada nível de refinamento da malha poderia ser utilizada como parâmetro no teste de independência de malha.

As equações fundamentais utilizadas em simulações de CFD, como conservação de massa, momento e energia, que são a base do modelo de CFD, estão disponíveis em vários livros didáticos



(por exemplo, Fortuna, 2000). Além dessas equações fundamentais, outra foi adicionada ao modelo para simular o teste do traçador (Equação 10) como resultado de uma injeção de pulso do traçador virtual no passo de tempo (1s).

$$Tracer = \text{step}((t - 1[s])/1[s]) * \text{step}((\gamma[s] - t)/1[s]) * \beta \text{ [kg s}^{-1}\text{]} \quad (10)$$

onde γ é a duração da injeção (s) e β é a carga de traçador injetado (kg s^{-1}) no reator.

As malhas analisadas neste estudo eram compostas exclusivamente por tetraedros e volumes não estruturados. A independência da malha foi avaliada de duas maneiras:

- observação do parâmetro *Imbalance* (%) para as variáveis P-mass, U-Mom, V-Mom, W-Mom e *tracer*, esta última variável foi introduzida pelos autores. Nota: a simulação foi considerada aceitável quando o *Imbalance*, para todas as variáveis monitoradas, ficou abaixo de 1%;
- análise estatística da simulação da curva DTR em cada nível de refinamento da malha.

Para todo o domínio computacional, as propriedades da água foram definidas a 30°C (massa específica = 995,6 kg m^{-3} ; massa molar = 18,02 g mol^{-1} ; viscosidade dinâmica = 0,798 $\times 10^{-3}$ N s m^{-2} ; condutividade térmica = 0,6069 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$; capacidade calorífica específica = 4172,7 $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$). A manta de lodo do reator UASB, conforme mencionado anteriormente, foi replicada com plástico MBBR, resultando em porosidade de 0,88. Para simular este meio poroso foi configurado no CFX-Pre um escoamento bifásico na região da manta com mesmo valor de porosidade.

As condições de contorno para as simulações de CFD foram semelhantes às dos testes experimentais, devido à necessidade de simular as condições reais. Todas as simulações foram executadas sob condições transitórias. Um *Root Mean Square Error* (RMS) de 10^{-5} foi definido como critério de convergência para todas as variáveis. Além disso, a simulação em tempo total foi escolhida como critério de conclusão para duas condições testadas.

Os dados relativos às condições de contorno e simulações transitórias são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Condições de contorno e análise transitória para as simulações de CFD (C1 e C2)

Parâmetro	C1	C2
	Valor	
Taxa de fluxo (l d^{-1})	26,68	4,0
Velocidade de entrada (m s^{-1})	$1,38 \times 10^{-2}$	$2,37 \times 10^{-3}$
Pressão relativa de saída (Pa)	0	0
Rugosidade da parede (mm)	0,005	0,005
Porosidade (-)	0,88	0,88
Simulação de tempo total (min)	501	1995
Passo de tempo (min)	3	15

O modelo de turbulência foi o SST (modelo híbrido de $k-\epsilon$ e $k-\omega$) a 1%.

2.4 Método de validação

Para analisar a similaridade dos dados experimentais e das simulações de CFD e validar ainda mais o modelo, comparado:

- o número de NTIS;
- análise estatística de curvas DTR aplicando (i) teste t de Student para amostras que seguem distribuição padrão; (ii) teste U de Mann-Whitney para amostras que não seguem distribuição normal (teste não paramétrico para duas amostras independentes); ambos os testes considerando nível de significância de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teste de independência de rede

A Figura 2a representa as duas malhas (M1 e M2) desenvolvidas neste estudo (a seta indica a área de refinamento).

As malhas 1 e 2 foram compostas por nós (junções entre elementos tetraédricos) e elementos (volumes de controle tetraédricos). A malha M1 possui 9.307 nós e 44.505 elementos, enquanto a M2 possui 17.100 nós e 84.023 elementos. O parâmetro *Imbalance* atingiu valores abaixo de 1% para todas as variáveis, indicando estabilidade nas simulações.

Para completar o teste de independência de malhas, o teste U de Mann-Whitney foi aplicado às curvas DTR geradas a partir das simulações M1 e M2. O teste U revelou que a diferença nos valores medianos entre as duas curvas não foi grande o suficiente para descartar a possibilidade de variabilidade amostral aleatória. Portanto, não há diferença estatisticamente significativa (nível de significância de 5%, valor p de 0,804). A Figura 2b apresenta as duas curvas interpostas e a regressão linear entre as curvas DTR M1 e M2 ($R^2 = 0,9965$).

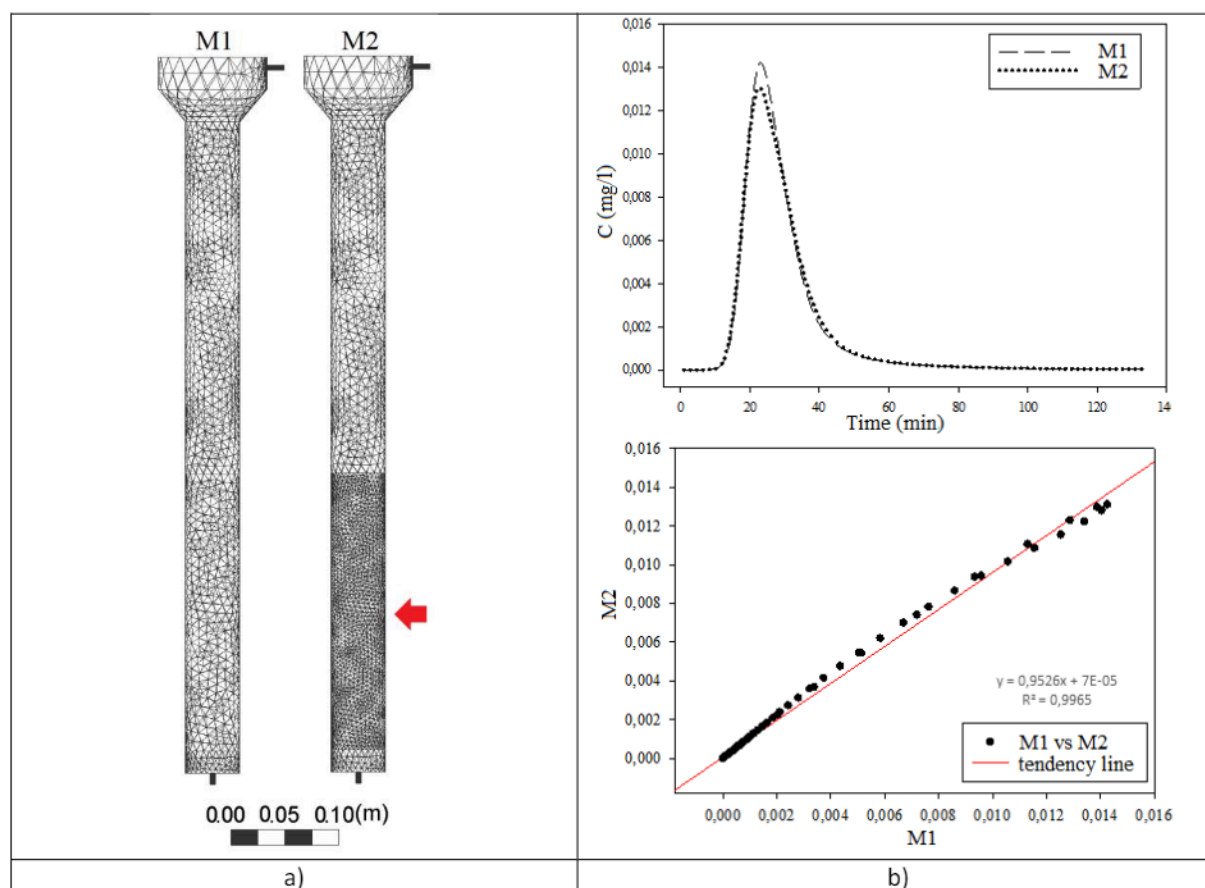


Figura 2: a) Malhas 1 (padrão) e 2 (refinada). b) Curvas DTR de M1 e M2 e regressão linear entre M1 e M2.

A partir destes resultados pode-se concluir que ambas as curvas foram estatisticamente iguais. Consequentemente, a malha utilizada na validação do CFD foi M1, devido à sua menor exigência computacional.

O teste foi realizado com os dados de entrada relativos à condição C1. Uma vez realizado um teste para uma condição, sua saída pode ser aproveitada para outras condições, ou seja, o teste foi válido para as condições C1 e C2.

3.2 Análise Hidrodinâmica – Simulação e Experimentação

As simulações em CFD para as condições C1 e C2 foram realizadas conforme Tabela 2. Os vetores de velocidade e curvas DTR (relativas aos dados experimentais, simulados e do modelo NTIS) estão ilustrados nas Figuras 3 (C1) e 4 (C2).

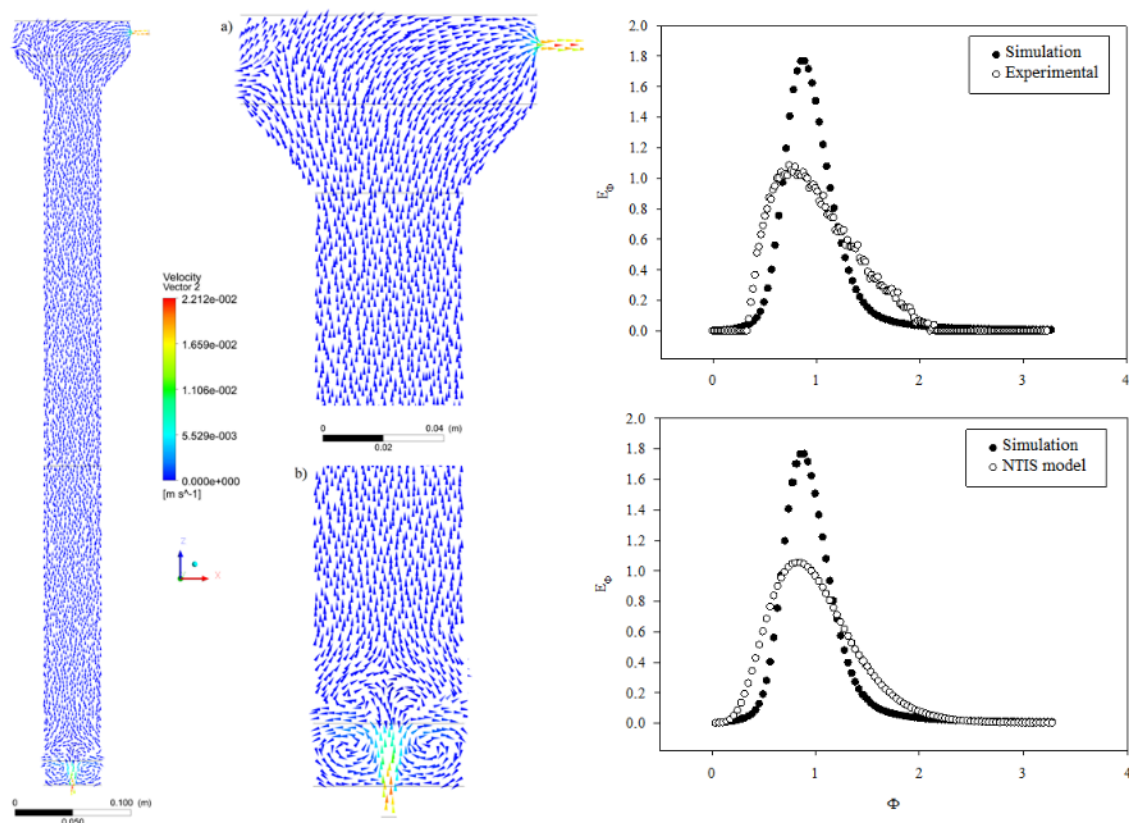


Figura 3 - Vetores de velocidade e curvas DTR (modelo simulado, experimental e NITS) para condição C1.

Uma distribuição uniforme dos vetores de velocidade na direção vertical e algumas zonas de recirculação podem ser observadas nas Figuras 4 e 5. O *buffer* (anteparo) teve grande influência na distribuição uniforme do fluxo (Figura 1), e o comportamento de *plug-flow* é observado para a saída do reator.

Os mesmos comentários podem ser feitos para a condição C2, mas é importante mencionar que devido ao baixo fluxo de entrada, o fluxo C2 também é menos turbulento que C1.

Os resultados do comportamento hidrodinâmico e do modelo NTIS para as condições C1 e C2 são mostrados na Tabela 3.'

Inicialmente observou-se que os valores de NTIS (experimental e simulado) foram muito próximos para ambas as condições (Tabela 3). Isto é confirmado devido às condições de contorno e ao desenvolvimento da abordagem do modelo tridimensional que é o mais próximo possível da realidade.

Tabela 3 – Análise hidrodinâmica para condições C1 e C2.

Parâmetro	C1		C2	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
TDH Teórico (h)	1,52	1,52	9,0	9,0
TDH médio (h)	1,40	2,57	9,8	9,4
σ_{θ}^2 (-)	0,18	0,15	0,21	0,22
NTIS (-)	5,55	6,67	4,76	5,54

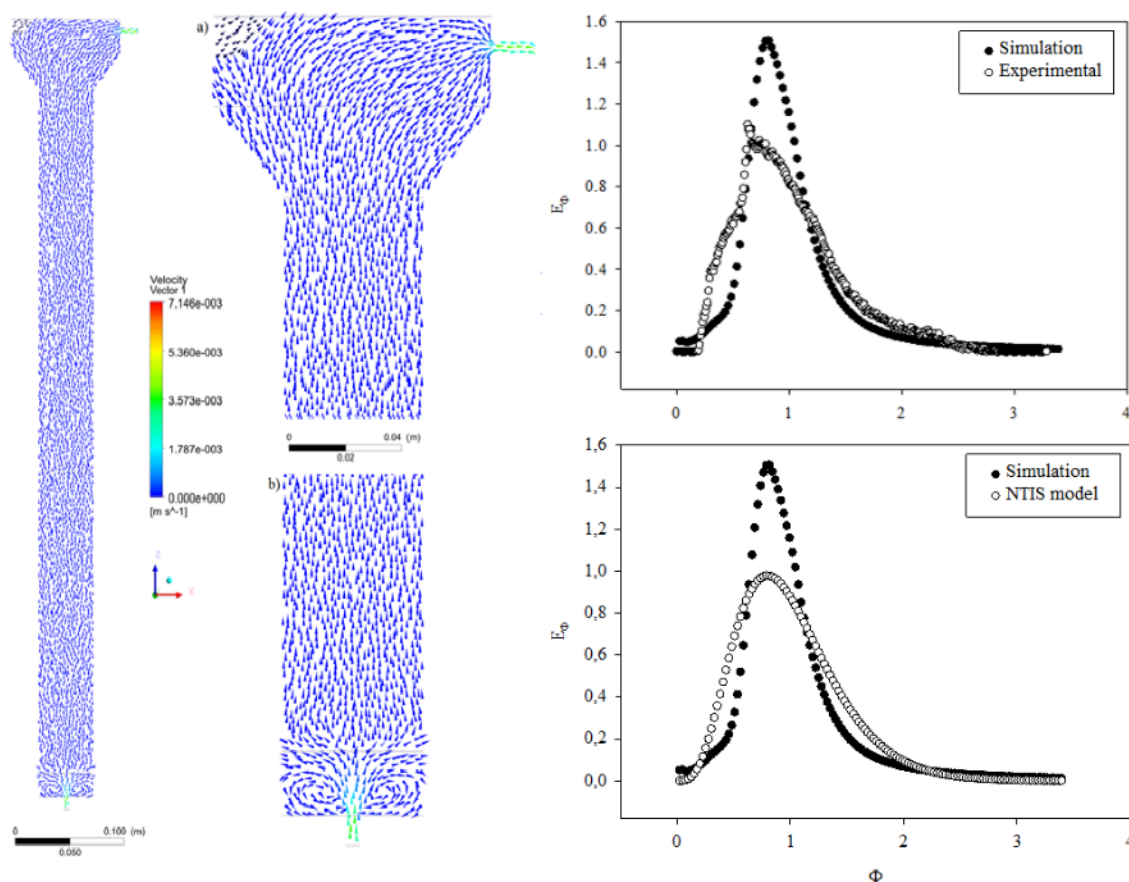


Figura 4 - Vetores de velocidade e curvas DTR (modelo simulado, experimental e NITS) para condição C2.

3.3 Validação do modelo

A validação foi realizada por meio de análise estatística. O teste U de Mann-Whitney foi utilizado porque os dados experimentais e simulados não seguem distribuição normal. Os valores de p para as condições C1 e C2 foram 0,561 e 0,940, respectivamente, onde ($\alpha = 0,05$). Não foram identificadas diferenças estatísticas significativas para as condições, pois os valores de p foram menores que o alfa. Assim, simulações em CFD podem ser utilizadas para analisar o comportamento hidrodinâmico e o teste do traçador proposto por Levenspiel (1999).

Este fato pode contribuir para novos *insights* para aplicações de biorreatores em processos de engenharia, uma vez que diversas configurações podem ser testadas antes da construção de um modelo real, seja em pequena escala ou em escala real.

4 CONCLUSÃO

A ferramenta CFD provou ser uma ferramenta poderosa e inovadora na análise do comportamento hidrodinâmico de um reator UASB. Foi possível estabelecer um maior nível de confiança desta ferramenta através da validação experimental dos dados obtidos computacionalmente.

Como resultado, pode-se afirmar que a utilização de *software* de CFD, como o CFXTM, é essencial no desenvolvimento de reatores (de qualquer tipo) e na compreensão do seu

comportamento hidrodinâmico. Através de simulações computacionais, resultados que exigem longos prazos e grandes recursos financeiros podem ser reduzidos à necessidade de um computador, uma licença de *software* e um pequeno período de tempo.

5 REFERÊNCIAS

Bhatti, Z.A., Maqboo, F., Malik, A.H., Mehmood., Q. (2014). UASB reactor startup for the treatment of municipal wastewater followed by advanced oxidation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31 (03), 715-726.

Chernicharo, C.A.L., van Lier, J.B., Noyola, A., Bressani Ribeiro, T. (2015). Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 14, 649-679.

Cruz, D.B., Arantes, E.J., Carvalho, K.Q., Passing, F.H., Kreutz, C., Gonçalves, M.S. (2016). Avaliação do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente com diferentes configurações do sistema de distribuição do afluente utilizando fluidodinâmica computacional. *Eng. Sanit. Ambient.* 21 (4), 721-730.

Curi, T.M.R.C., Moura, D.J., Massari, J.M., Mesquita, M., Pereira., D.F. (2017). Computational Fluid Dynamics (CFD) application for ventilation studies in broiler houses. *Engenharia Agrícola*, 37 (1), 1-12.

Daud, M.K., Rizvi, H., Akram, M.F., Ali, S., Rizwan, M., Nafees, M., Jin, Z.S. (2018). Review of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Technology: Effect of Different Parameters and Developments for Domestic Wastewater Treatment. *Journal of Chemistry*.
<https://doi.org/10.1155/2018/1596319>

Fia, F.R.L., Fia, R., Campos, C.M.M., Oliveira, L.F.C. (2016). Hydrodynamic behavior of a combined anaerobic-aerobic system employed in the treatment of vinasse. *Ciênc. Agrotec.*, 40 (6), 718-729.
<https://doi.org/10.1590/1413-70542016406010416>

Fortuna, A.O. (2000). Técnicas computacionais para dinâmica de fluidos. (2ª ed.). Edusp.

Hinken, L., Huber, M., Weichgrebe, D., Rosenwinkel, K.-H. (2014). Modified ADM1 for modelling an UASB reactor laboratory plant treating starch wastewater and synthetic substrate load tests. *Water Research*, 64, 82-93.

Levenspiel O. (1999). Chemical Reaction Engineering. (3ª ed.). John Wiley & Sons.

Li, G., Yang, X., Dai, G. (2009). CFD simulation of effects of the configuration of gas distributors on gas-liquid flow and mixing in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, 64, 5104-5116.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.08.016>.

Lu, X., Zhen, G., Estrada, A.L., Chen, M., Ni, J., Hojo, T., Kubota, K., Li, Y-Y. (2015). Operation performance and granule characterization of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating wastewater with starch as the sole carbon source. *Bioresource Technology*, 180, 264-273.



Passos, R.G., Von Sperling, M., Ribeiro, T.B. (2014). Hydrodynamic evaluation of full-scale facultative pond by CFD (computational fluid dynamics) and field measurements. *Water Sci. Technol.*, 70(3), 569-575.

Pourtousi, M., Sahu, J.N., Ganesan, P., Shamshirband, S., Redzwan, R. (2015). A combination of computational fluid dynamics (CFD) and adaptive neuro-fuzzy system (ANFIS) for prediction of the bubble column hydrodynamics. *Powder Technology.*, 274, 466-481.

Rodríguez-Gómez, R., Renman, G., Moreno, L., Liu, L. (2014). A model to describe the performance of the UASB reactor. *Biodegradation*, 25, 239-251.

Ren T-T, Mu Y, Ni B-J, Yu, H-Q. (2009). Hydrodynamics of upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Aiche Journal*. 55(2), 516-528.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Carvalho Rocha, V., Nataline Simões, A., Eloísa Diniz dos Santos, C., & Cleto Pires, E. (2023). ESTUDO HIDRODINÂMICO DE REATOR UASB DE PEQUENA ESCALA POR DINÂMICA DE FLUIDO COMPUTACIONAL (CFD): SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO. HOLOS. Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/16400>

SOBRE OS AUTORES:

V. C. ROCHA

Doutor em Ciências (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP); Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM); Diretor da Divisão de Sustentabilidade (UFTM).

E-mail: vinicius.rocha@uftm.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0930-4567>

A. N. SIMÕES

Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM); Mestre em Ciências (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). E-mail: andrezasimoes.uftm@gmail.com.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3983-5921>

C. E. D. SANTOS

Doutor em Ciências (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). Entre 2014 e 2015, completou um doutorado sanduíche de 12 meses na Universidade Politécnica de Gdansk (Polônia) no âmbito do Projeto CARBALA (CARbon BALancing for nutrient control in wastewater treatment), financiado pelo projeto da Comunidade Europeia People Maria Curie Actions (FP7-PESSOAS-2011-IRSES). Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). É orientadora do Programa de Pós-Graduação em



Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA/UFTM).

E-mail: carla.santos@uftm.edu.br.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5954-1026>

E. C. PIRES

Doutor em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Universidade de São Paulo (USP); Professor Sênior da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

E-mail: ecpires@sc.usp.br.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6943-3988>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas *Ad Hoc*: Marco Antonio Jacomazzi e Hemerson Pinheiro



Recebido: 09 de novembro de 2023

Aceito: 07 de dezembro de 2023

