

# Estudo hidrodinâmico computacional de reator UASB em escala de laboratório

## Hydrodynamic computational study of the laboratory scale UASB reactor

• **Data de entrada:**  
07/09/2019

• **Data de aprovação:**  
04/10/2019


Diego Bongiorno Cruz<sup>1</sup> | Eudes José Arantes<sup>1\*</sup> | Karina Querne de Carvalho<sup>2</sup> | Fernando Hermes Passig<sup>2</sup> | Cristiane Kreutz<sup>1</sup> | Morgana Suszek Gonçalves<sup>1</sup> | Jayson Pereira Godinho<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.088>

### ORCID ID


Cruz DB  <https://orcid.org/0000-0002-2723-0725>


Arantes EJ  <https://orcid.org/0000-0002-7684-3069>

Carvalho KQ  <https://orcid.org/0000-0003-4577-7537>

Passig FH  <https://orcid.org/0000-0002-7461-0616>

Kreutz C  <https://orcid.org/0000-0003-3152-6489>

Gonçalves MS  <https://orcid.org/0000-0002-7576-2937>

Godinho JP  <https://orcid.org/0000-0003-2948-8639>

### Resumo

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator UASB de 18 L por meio da fluidodinâmica computacional (CFD) e de ensaios do tipo estímulo-resposta experimentais. Foram realizadas simulações computacionais do comportamento hidrodinâmico do reator operando com a injeção de ar na região da manta de lodo (1<sup>o</sup> etapa). Foi realizada também a simulação de operação do reator com o preenchimento de 35% do seu volume útil com um polímero absorvente de água abiótico (2<sup>a</sup> etapa). O modelo computacional utilizado para a simulação do reator em escala de bancada foi validado por meio da comparação do volume de zonas mortas obtido por meio das simulações com os valores calculados nos ensaios de estímulo-resposta com o traçador Eosina Y. O volume de zonas mortas calculadas por meio dos ensaios apresentou um erro de aproximadamente 43% em relação ao valor obtido com o modelo computacional do reator para a 1<sup>a</sup> etapa, validando os resultados da simulação.

**Palavras-chave:** Fluidodinâmica computacional. Ansys CFX. Traçador. Difusão. Anomalias.

### Abstract

*The objective of the present work was to evaluate the hydrodynamic behavior of an 18 L UASB reactor through computational fluid dynamics (CFD) and experimental stimulus-response type tests. Computational simulations of the hydrodynamic behavior of the reactor were carried out with the injection of air in the region of the sludge blanket (1<sup>st</sup> stage). Simulation of reactor operation was carried out by filling 35% of its useful volume with an abiotic water absorbing polymer (2<sup>nd</sup> stage). The computational model used for the simulation of the bench scale reactor was validated by comparing the volume of dead zones obtained through the simulations with the values calculated in the stimulus-response tests with the Eosin Y tracer. The volume of dead zones calculated through of the tests presented an error of approximately 43% in relation to the value obtained with the computational model of the reactor for the 1st stage, validating the results of the simulation.*

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics. Ansys CFX. Tracer. Diffusion. Anomalies.

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Campo Mourão - Paraná - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Curitiba - Paraná - Brasil.

\* **Autor correspondente:** eudesarantes@utfpr.edu.br.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, para o tratamento do esgoto gerado, são utilizados tratamentos prévios e preliminares, primários, secundários e terciários, sendo empregados processos biológicos, aeróbios e anaeróbios. O objetivo do tratamento de efluentes consiste na remoção da poluição presente na forma inorgânica ou orgânica, por meio de processos químicos, físicos e biológicos (CHERNICHARO, 2007).

Segundo o IBGE (2000), entre os diversos processos, os reatores anaeróbios representam 15% do tipo de tratamento utilizado no Brasil. De acordo com Além Sobrinho e Kato (1999), o desenvolvimento dos reatores UASB no Brasil foi impulsionado inicialmente por pesquisadores da Cetesb, da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas e da Sanepar.

O processo anaeróbio é aplicado principalmente por meio dos reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). De uma forma simplificada, esse processo ocorre em quatro etapas. Na primeira etapa, a matéria orgânica complexa é transformada em compostos mais simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares, pela ação dos microrganismos hidrolíticos (LETTINGA et al., 1999; CHERNICHARO, 2007).

O reator UASB em sua coluna ascendente é composto de um leito de lodo, uma zona de sedimentação e um separador de fases. A princípio, os reatores UASB foram concebidos para o tratamento de efluentes industriais, tendo sua configuração bem simplificada. Com o avanço de pesquisas e o uso no tratamento de efluentes menos concentrados como esgoto sanitário, esse sistema tem sido utilizado com diferentes configurações (NARNOLI e MEHROTRA, 1997).

Segundo Lettinga et al. (1999), algumas das principais condições que devem ser encontradas nos reatores UASB são: uma efetiva separação do biogás, do efluente e do lodo; o lodo anaeróbio

deve apresentar uma boa capacidade de sedimentação e deve desenvolver um lodo (biomassa) de elevada atividade, na forma de flocos ou de grânulos (1 a 5 mm de diâmetro); o esgoto deve ser introduzido na parte inferior do reator.

Apesar do conhecimento já acumulado, ainda não existe um consenso sobre a forma e a configuração interna mais eficiente de reatores UASB, mas a importância dos diversos critérios e parâmetros é amplamente estudada e compreendida, permitindo o dimensionamento das câmaras de digestão, decantação e captura de gás (CASTRO, 2010).

De acordo com mesmo autor, nos atuais projetos de reatores UASB circulares, é comum o uso da configuração clássica com câmara de gás no centro do reator e o uso de separadores trifásicos, para delimitar a câmara de decantação. Essa configuração pode apresentar algumas limitações de projeto, para reatores de maiores diâmetros, em relação a: inclinação do separador trifásico superior, que interfere no volume útil da câmara de decantação; perda de volume útil da câmara digestora, devido ao defletor de biogás; apresenta pequena abertura de passagem para o decantador e excessiva área de contato na câmara de gás, aumentando assim o risco de corrosão (PASSIG, 2005).

A avaliação da hidrodinâmica de reatores UASB pode ser de grande importância, visto que diferentes velocidades internas nas câmaras de digestão e decantação podem influenciar a eficiência das reações biológicas e a qualidade do efluente final. A velocidade de entrada na câmara de decantação influencia diretamente o processo de retorno de sólidos suspensos, sendo assim seu estudo permite o desenvolvimento de geometrias alternativas para o aumento da eficiência da decantação (PASSIG, 2005; CARVALHO et al., 2008).

Nesse contexto, a fluidodinâmica computacional, do inglês CFD (*Computational Fluid Dynamics*),

pode ser utilizada para modelar reatores UASB, tornando-se uma ferramenta no estudo de vários aspectos de hidrodinâmicos e de projeto relacionados à eficiência dos reatores.

De acordo com Islabão et al. (2010), o CFD é uma ferramenta utilizada para simular numericamente o comportamento do escoamento de gases e líquidos, transferência de massa e energia, corpos em movimento, sistema multifásicos, reações químicas, acústica, dentre outras aplicações. Essa ferramenta soluciona equações matemáticas do problema de maneira específica sobre uma região de interesse, com condições de contorno pré-determinadas sobre essa região.

Para a confirmação dos resultados obtidos por meio dos estudos em CFD torna-se necessária a realização de estudos experimentais. Segundo Fontes (2005), o modelo computacional deve ser capaz de descrever o comportamento físico, imitando o comportamento do sistema experimental; deve ser avaliado e comparado ao experimental, quanto ao resultado numérico final do sistema; deve ser capaz de apoiar teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; deve ser capaz de prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças nas variáveis do sistema ou em seu modo de operação.

Dentre os estudos em destaque a respeito de simulações utilizando a ferramenta CFD em reatores e sistemas de tratamento de águas residuárias de forma geral, podemos citar os trabalhos de Ren et al. (2009), Wang et al. (2009), Wang et al. (2010), Laurent et al. (2014), López-Jiménez et al. (2015) e Cruz et al. (2016) que simularam reatores em diferentes escalas.

REN et al. (2009) avaliaram as características da hidrodinâmica dos reatores UASB em 3D no modelo trifásico, composto por partículas sólidas, fase líquida e fase gasosa, comparando com o modelo experimental de laboratório. Para o es-

tudo foram utilizados três modelos diferentes para tentar reproduzir a hidrodinâmica dos reatores: ESC model (*ExtendedEqual-SizedCSTRs*); EESC model (*Equal-SizedCSTRs*); e ISC model (*Increasing-SizedCSTRs*). Os modelos de descrição multi-CSTRs de simulação hidrodinâmica são um modelo consagrado. Os autores citaram ainda que as modelagens em três fases em um reator UASB são muito limitadas, e que grande parte dos estudos se baseiam em uma ou duas fases. Os autores esclarecem que, devido à natureza complexa, a hidrodinâmica local e o comportamento de reatores UASB não são bem documentados ainda.

O método de CFD tem demonstrado ser um instrumento útil para a compreensão de comportamentos de fluxo e pode ser usado para substituir os experimentos demorados e caros. Existem duas abordagens principais, ou seja, a abordagem Euleriana, que considera as fases dispersas com as fases interpenetrantes contínuas, e a abordagem Lagrangiana, que trata as fases dispersas como entidades discretas (REN et al., 2009; WANG et al., 2009; WANG et al., 2010).

O comportamento hidrodinâmico do reator pode ser analisado experimentalmente a partir de um estudo com traçadores, o qual consiste em obter informações sobre a distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido que está escoando. Essa informação pode ser determinada facilmente por um método de investigação amplamente usado: o teste de estímulo-resposta (PIRES et al., 2000).

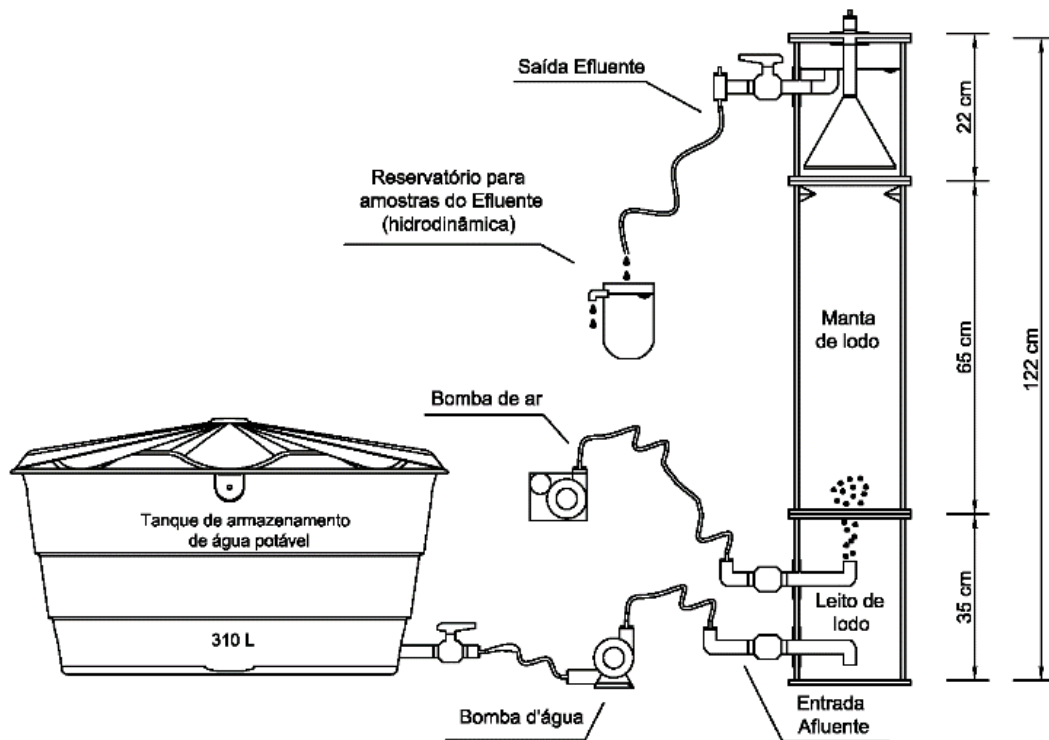
Desse modo, o objetivo do presente trabalho é realizar uma comparação dos resultados obtidos nos testes computacionais em CFD, com resultados dos estudos hidrodinâmicos experimentais de um reator abiótico, a fim de otimizar esse tipo de sistema de tratamento.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Aparato experimental

O reator UASB em escala de bancada utilizado no presente trabalho (Fig. 1) foi construído em

plexiglas®, possui diâmetro interno de 0,15 m e altura de 1,22 m. O volume útil do reator é de aproximadamente 18 L e o volume total de 20 L.



**Figura 1** – Desenho esquemático do aparato experimental utilizado neste trabalho.

O reator apresenta as configurações típicas de um reator UASB, com fluxo ascendente e um separador de trifásico em seu topo. A alimentação do mesmo foi realizada com água potável por meio de uma bomba dosadora, marca Provitec® modelo AWG 5000 ABS.

O sistema foi operado em duas condições distintas, ambas com alimentação de água potável a uma vazão aproximada de  $4,4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de aproximadamente 4,5 horas. A 1ª etapa consistiu em injetar ar na base do reator, com um compressor de ar da

marca Master® modelo Junior, a fim de representar a geração de gás de um reator UASB tratando esgoto sanitário e sua influência no escoamento do mesmo.

A 2ª etapa consistiu no preenchimento de aproximadamente 35% do volume total do reator com um polímero absorvente de água na forma de esferas. Os ensaios realizados nessa condição buscaram representar a influência do leito de lodo no escoamento do reator, assemelhando essa condição de operação à inoculação do reator com lodo anaeróbio granular.

## 2.2 Ensaios hidrodinâmicos experimentais

A fim de avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator, foram realizados três ensaios de estímulo-resposta tipo pulso utilizando-se o traçador eosina Y.

O preparo do traçador eosina Y foi realizado por meio da mistura de 0,200 g do traçador em 10 mL de água destilada. Injetaram-se 10 mL do traçador na entrada do reator, com o auxílio de uma seringa, em um período de aproximadamente 60 segundos.

O tempo total de duração dos ensaios foi de três vezes o TDH teórico ao qual o reator foi submetido, com coletas de amostras do efluente em intervalos de 30 minutos.

Para a determinação da concentração do traçador nas amostras do efluente, foi utilizado o método colorimétrico de leitura de absorbância, realizado em espectrofotômetro HACH UV-VIS, modelo DR/5000, com comprimento de onda de 516 nm.

As curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo ( $C(t)$ ) foram normalizadas de acordo com Levenspiel (2000) por meio de planilhas eletrônicas, resultando em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ( $E_{\theta}$ ) em função do tempo adimensional ( $\theta$ ). A variância ( $\sigma_{2_{\theta}}$ ) de cada ensaio foi calculada após a normalização. O ajuste das curvas experimentais foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR), de acordo com Levenspiel (2000).

Para o cálculo do volume de zonas mortas foram utilizadas as metodologias descritas por Persson et al. (1999), Peña et al. (2006), Singh et al. (2006) e Sarathai et al. (2010), com base nos valores de TDH teórico e real ( $h$ ), e do volume ativo e total do reator ( $m^3$ ). Para verificar a presença de curtos-circuitos foi utilizada a relação entre o

tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente do reator ( $h$ ) e o TDH teórico ( $h$ ) de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al. (2010) e Thackston et al. (1987).

## 2.3 Modelo computacional

Para o estudo computacional foram realizadas simulações bidimensionais e tridimensionais das condições de entrada de um reator UASB em escala de bancada de 18L, para comparação com os ensaios hidrodinâmicos experimentais.

Em todas as etapas do estudo computacional utilizaram-se modelos multifásicos. Estes consideram cada fase como sendo um meio contínuo ocupando todo o domínio de cálculo, onde a quantidade presente de cada fase em cada ponto do domínio é dada por sua correspondente fração volumétrica. Os modelos consideram um sistema de equações de conservação para ambas as fases, podendo, dessa maneira, calcular diferentes campos de velocidades para as diferentes fases.

Para as todas as condições das simulações, os softwares resolveram as equações da continuidade, da conservação da quantidade de movimento e o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  para os fluidos simulados.

A equação de conservação da massa para o sistema multifásico fica sob a forma representada na Eq. 1:

$$\partial/\partial t (\alpha_k \rho_k) + \nabla (\alpha_k \rho_k V_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

Onde  $\alpha_k$  é a fração do volume da fase  $k$ ,  $\rho_k$  é a massa específica da fase  $k$  e  $V_k$  é o vetor velocidade da fase  $k$ .

Supondo que as fases estão escoando em conjunto e adotando a hipótese de escoamento unidimensional, com área variável obtém-se a Eq. 2.

$$\partial/\partial t [\alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_f] + 1/A\partial/\partial z \{\alpha\rho_g u_g + (1 - \alpha)\rho_f u_f\}A(z) = 0 \quad (2)$$

A equação da quantidade de movimento é representada pela Eq. 3.

$$\partial/\partial t (\alpha_k \rho_k V_k) + \nabla [\alpha_k (V_k V_k - T_k + T_k^{turb})] = \Gamma_k V_{ki} + \alpha_k \rho_k G_k + M_k \quad (3)$$

Onde  $G_k$  representa as forças de origem gravitacional atuantes de maneira simétrica sobre o escoamento.

O primeiro termo do lado direito da equação ( $\Gamma_k \Gamma_k$ ) considera a acumulação de massa ou transferência de massa entre as interfaces, porém nesse caso é desconsiderada, assumindo a hipótese de que não há transferência de massa entre as mesmas.

O termo  $M_k$  é representado pela Eq. 4 e indica a força normal à interface dada pela diferença entre a pressão de fase e a de interface. No caso deste estudo este termo é desprezado pelo *software*, pois os esforços normais representam uma parcela pequena quando comparados aos de cisalhamento.

$$M_k = \langle (p - p_{ki}) \nabla X_i - T_{ki} \nabla X_i \quad (4)$$

O modelo de turbulência escolhido para as simulações foi o *k-epsilon* padrão, que segundo Launder e Spalding (1972) é um modelo semi-empírico baseado nas equações do modelo de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ). A equação do modelo de transporte para  $k$  é derivada da equação exata de Navier-Stokes, enquanto a equação de modelo de transporte para  $\epsilon$  foi obtida usando raciocínio físico e sustenta pouca semelhança com a outra matematicamente exata.

A energia cinética turbulenta,  $k$ , e sua taxa de dissipação,  $\epsilon$ , são obtidas das Eq. de transporte 5 e 6.

$$\partial(\rho_k)/\partial t + \partial(\rho k u_i)/\partial x_i = \partial/\partial x_j [(\mu + \mu_t/\sigma_k) \partial k/\partial x_j] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \partial(\rho_\epsilon)/\partial t + \partial(\rho \epsilon u_i)/\partial x_i = \partial/\partial x_j [(\mu + \mu_t/\sigma_\epsilon) \partial \epsilon/\partial x_j] + \\ + C_{1\epsilon} \epsilon/k (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2/k \end{aligned} \quad (6)$$

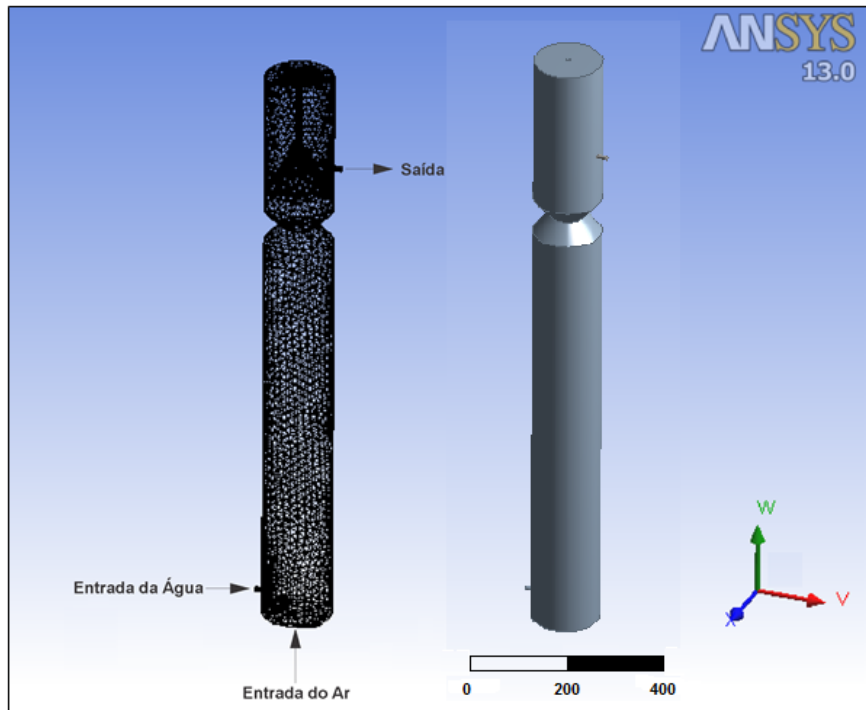
Em que  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta em decorrência dos gradientes de velocidade média;  $G_b$  é a geração de energia cinética turbulenta em consequência das flutuações das velocidades;  $Y_M$  representa a

contribuição na taxa de dissipação total devido à variação volumétrica para o caso compressível;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  e  $C_{3\epsilon}$  são constantes; e  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\epsilon$ , respectivamente.

## 2.4 Geometrias propostas à simulação

A geometria utilizada para o estudo computacional desta etapa representa apenas o perfil interno do reator UASB escala da bancada de

18 L na forma tridimensional (Fig. 2). Uma geometria simplificada permite a redução no tempo de simulação e a obtenção de resultados melhores, pois evita problemas relacionados com a geração de malhas em geometrias complexas.



**Figura 2** – Desenho do modelo computacional simplificado para o reator UASB.

As simulações foram realizadas em duas condições diferentes, de acordo com os ensaios hidrodinâmicos. Para a simulação do reator operando com água potável e com a injeção de ar foi utilizado um modelo multifásico com uma fase líquida e uma fase gasosa dispersa sendo injetada no interior do reator pela sua base. Para a simulação do reator operado com água potável e o polímero

absorvente representando o leito de lodo, utilizou-se um modelo multifásico com uma fase líquida e outra fase sólida dispersa.

As propriedades dos fluidos e os parâmetros das simulações para o problema, em ambas as condições de operação, são apresentadas na Tabela 1 e foram realizadas de acordo com Cruz et al. (2016).

**Tabela 1** – Parâmetros utilizados no ANSYS-CFX para as simulações dos modelos bifásicos distintos.

Parâmetros	Valores	
	Modelo Bifásico Água-Ar	Modelo Bifásico Água-Sólidos
Velocidade de entrada da água	0,015 (m.s <sup>-1</sup> )	0,93 (m.s <sup>-1</sup> )
Densidade da fase contínua (Água)	1000 (Kg.m <sup>-3</sup> )	1000 (Kg.m <sup>-3</sup> )
Densidade da fase dispersa (Ar)	1225 (Kg.m <sup>-3</sup> )	NA
Densidade da fase dispersa (Polímero)	NA	1460 (Kg.m <sup>-3</sup> )
Viscosidade dinâmica da água	0,001 (Pa.s)	0,001 (Pa.s)
Viscosidade dinâmica do ar	17,4x10 <sup>-6</sup> (Pa.s)	NA
Viscosidade dinâmica do polímero	NA	0,001 (Pa.s)
Quantidade inicial de polímero	0%	35%
Diâmetro das esferas de polímero absorvente de água	NA	0,014 (m)

Legenda: NA = Não aplicável.

Todas as simulações foram realizadas em um computador com um processador Intel i7, com 12 GB de memória RAM, e velocidade de 2,80 GHz.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

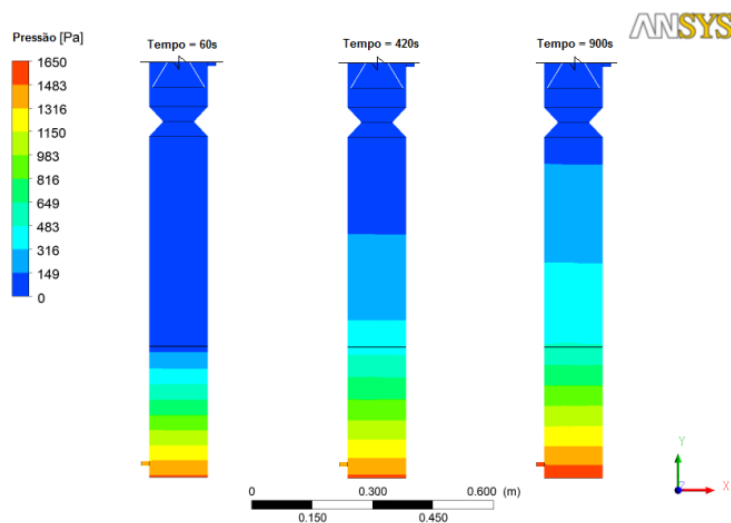
#### 3.1 Modelo computacional - Água e sólidos

Os resultados das simulações do reator UASB operando com 35% do seu volume útil preenchido com o polímero absorvente de água são apresentados na forma de figuras. Na Fig. 3a observa-se a pressão no interior do reator em diferentes tempos de simulação. O comportamento da pressão durante a simulação ocorreu conforme o esperado, alterando seu valor ao longo da altura do reator devido à mistura da fase sólida

com a fase líquida, mas sempre mantendo os valores maiores na base do reator.

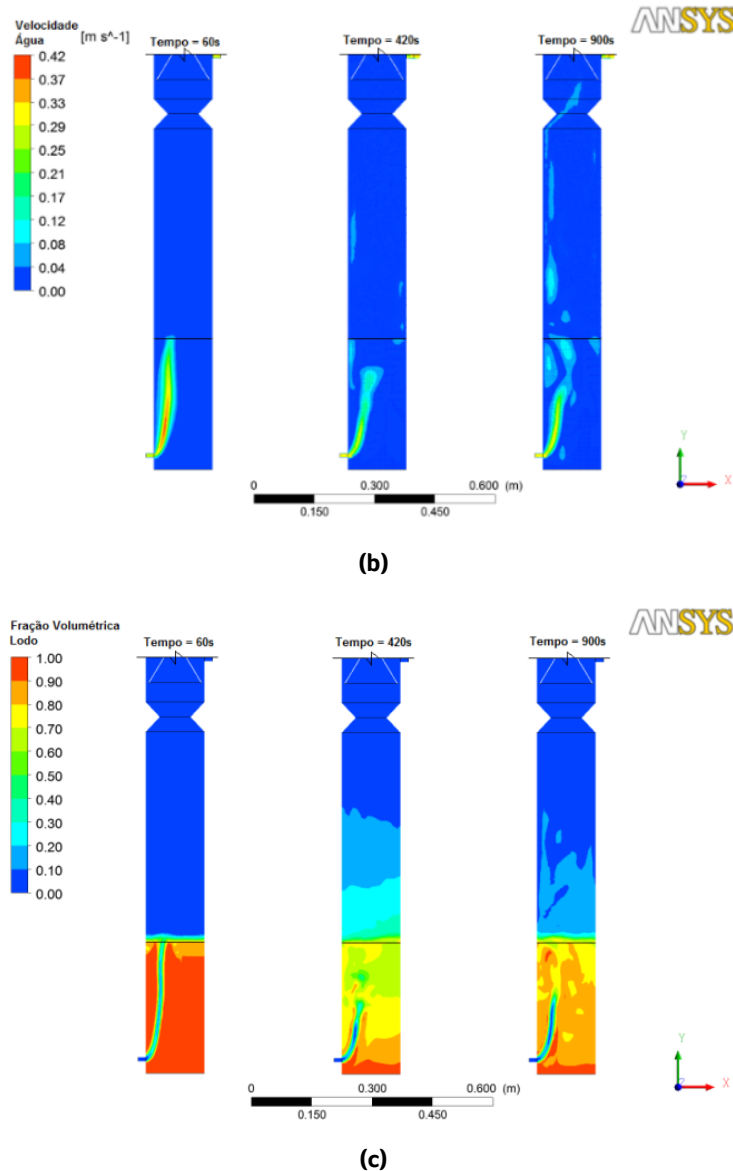
Na Fig. 3b é apresentado o campo de velocidade da fase líquida (água) no interior do reator durante a simulação. Por meio da figura é possível observar que as maiores velocidades da água ocorrem junto à lateral esquerda do reator, sem a formação de vórtices ao longo do reator.

Na Fig. 3c é possível observar a fração do polímero absorvente de água, representado o lodo anaeróbico, e seu comportamento durante a simulação. Observa-se que a água passa pelo leito por um caminho próximo à entrada do reator e após algum tempo de simulação ocorre uma maior mistura da água com o polímero, demonstrando uma boa mistura das duas fases.



(a)





**Figura 3** – Modelos computacionais do reator UASB operando com 35% do seu volume útil preenchido com o polímero absorvente de água em diferentes tempos de simulação para o modelo bifásico com água e sólidos. (a) Gradiente de pressão ao longo do reator; (b) Gradiente de velocidade da água no interior do reator; (c) Fração volumétrica do leito de lodo e seu comportamento.

Ren et al. (2009) consideraram em seu estudo as zonas mortas como regiões onde a fase líquida apresenta velocidades inferiores a 5% da velocidade ascensional média. Com base nesse pressuposto encontrou-se o valor de 0,0135 m.s<sup>-1</sup> como 5% da velocidade ascensional do reator simulado. Desta maneira, por meio do software ANSYS-CFX elaborou-se um histograma acu-

mulativo da porcentagem de água no interior do reator com velocidades inferiores a 0,0135 m.s<sup>-1</sup>, obtendo-se assim o valor de 18% de zonas mortas no interior do reator.

Cruz et al. (2016) simulando um reator em escala piloto, com 1,70 m de altura, 0,28 m de diâmetro, volume total de 160 L, tempo de detenção hidráulica (TDH) de 10 h e vazão afluente de

16 L.h<sup>-1</sup>, observaram porcentagens máximas dos volumes de zonas mortas, em relação ao volume total do reator, de aproximadamente 4%.

### 3.2 Modelo computacional - Água e ar

Os resultados do modelo computacional bifásico com água e a injeção de ar simulado no ANSYS-CFX são apresentados na forma de figuras do campo de pressão, velocidade da água e fração de volume do ar. Observa-se na Fig. 4a o comportamento da pressão no interior do reator durante o tempo de simulação, apresentando valores coerentes com a distribuição esperada, sendo os maiores valores na parte inferior do reator e menores valores em seu topo.

Na Fig. 4b são apresentados os campos de velocidade da água durante a simulação. Podemos observar que a variação da velocidade é influenciada pelo comportamento de ascensão do ar injetado no fundo do reator. Devido a esse movimento nessas simulações, a distribuição da velocidade da água ocorre de maneira mais uniforme.

Na Fig. 4c observa-se a maior concentração de ar no centro do reator, onde se encontra o separador trifásico, demonstrando a simulação adequada do comportamento do separador em relação aos fluidos simulados. Além disso, é possível verificar que uma parcela de gás é desprendida junto com o efluente.

Van Haandel e Lettinga (1994) e Noyola et. al. (2006) comentam que uma parcela significativa dos gases gerados nos reatores UASB tende

a permanecer dissolvida no líquido e, assim, sair com o efluente tratado ou encontrar outra rota de desprendimento.

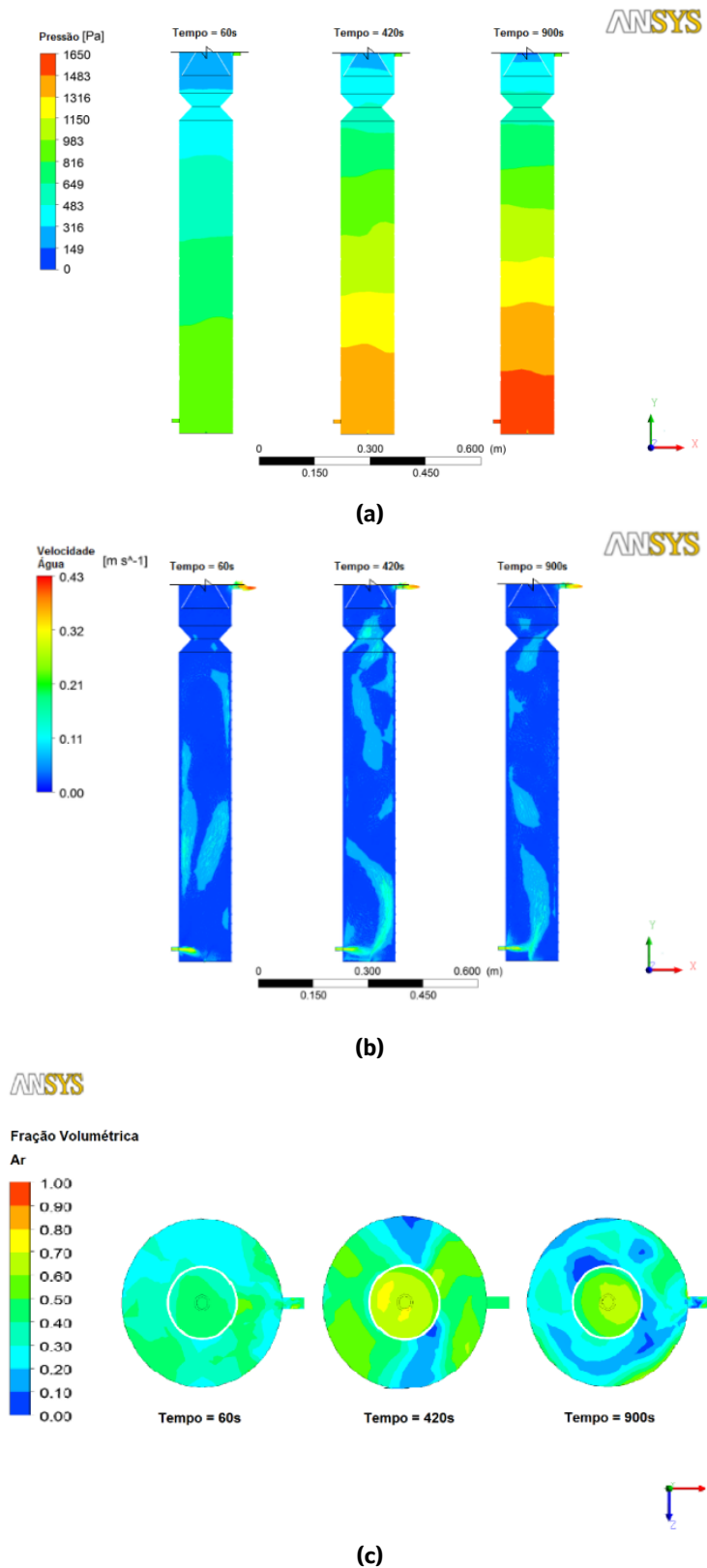
Segundo Castro (2010), os separados trifásicos (gases, sólidos e líquidos) representam dispositivos internos de fundamental importância para o funcionamento do UASB, pois são responsáveis pela manutenção do lodo anaeróbico no interior da câmara de digestão, fornecendo um maior tempo de retenção de sólidos, clarificação do efluente e separação dos gases gerados.

O volume de zonas mortas para esse modelo de simulação foi calculado da mesma forma que o do modelo anterior, obtendo-se uma porcentagem de aproximadamente 22% do volume útil do reator sendo zonas mortas.

Wu et al. (1992) apresentam em seu trabalho os valores de 25% e 35% de zonas mortas calculados nos estudos teóricos e experimentais em um reator UASB de 3.1 litros.

Singh et al. (2006), em seu estudo computacional, encontraram o valor de 10% de zonas mortas em um reator UASB em escala laboratorial de 8 litros operando a 32 °C e 11% em um reator UASB com mesma configuração operando a 20 °C.

Bitog et al. (2014) utilizaram a técnica de CFD para realizar simulações numéricas de fotobiorreatores do tipo coluna de bolhas cilíndricas (PBRS), com entrada única. Os autores observaram que a taxa de fluxo de ar, o diâmetro e a geometria dos defletores interferem significativamente no volume de zonas mortas.



**Figura 4** – Modelos computacionais do reator UASB com fluido bifásico composto por água e a injeção de ar nos diferentes tempos de simulação. (a) Gradiente de pressão ao longo do reator; (b) Gradiente de velocidade da água no interior do reator; (c) Fração volumétrica de ar e seu comportamento na saída do reator.

### 3.3 Ensaios Hidrodinâmicos experimentais

A partir dos resultados experimentais dos ensaios de estímulo-resposta, foi possível traçar as curvas de variação da concentração de eosina Y nas amostras coletadas na saída do reator UASB, operando com polímero adsorvente de água representando o lodo anaeróbio (meio abiótico).

Realizaram-se o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000), para ambas as condições de operação do reator UASB com TDH Teórico de 4,5 h (Tabela 2).

**Tabela 2** – Resultados obtidos com os ajustes dos dados experimentais utilizando Eosina Y como traçador inerte, para o reator UASB operado com TDH Teórico de 4,5 h, com a representação do lodo (1ª etapa) e a com injeção de ar (2ª etapa).

Modo de operação	Ensaio	TDH Real (h)	N-CSTR	N-CSTR (%)	PD ( $D\mu.L^{-1}$ )	PD (%)	GD ( $D\mu.L^{-1}$ )	PD (%)
Com lodo	1	8,0	8	92,1	0,072	94,2	0,185	94,2
	2	7,2	5	95,1	0,102	95,2	0,288	85,2
	3	8,1	7	91,2	0,070	96,6	0,179	95,8
Com injeção de ar	1	6,8	5	92,5	0,127	88,6	0,382	72,0
	2	6,9	5	96,4	0,110	91,0	0,316	78,1
	3	7,0	5	94,3	0,110	91,3	0,316	81,1

**Legenda:** Tempo de detenção hidráulica (TDH); Número de reatores de mistura completa em série (N-CSTR); Número de dispersão ( $D\mu.L^{-1}$ ); Pequena dispersão (PD); Grande dispersão (GD).

Na Tabela 2 pode-se observar que o modelo teórico de N-CSTR em série apresentou uma variação significativa no número de tanques de mistura perfeita em série encontrados nos três ensaios. Esse fato pode ter ocorrido devido à troca do polímero adsorvente de água para a realização de cada ensaio modificando a característica do meio; já os resultados do número de tanques para os ensaios com a injeção de ar não apresentaram variação. Além disso, os valores encontrados para o número de tanques em série em ambas as condições de operação do reator ficaram entre 5 e 50, indicando a tendência de um fluxo pistonado no interior do reator. Apenas em um dos ensaios, com o reator operado com a injeção de ar, foi possível observar um fluxo mais disperso, pois encontrou-se o valor de 5 tanques em séries em todos os ensaios.

Godinho et al. (2018), operando o mesmo reator com esgoto sanitário universitário e com inoculação de 35% de lodo anaeróbio floculento proveniente de um reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) e um TDH de 4 h, também observaram que o modelo teórico N-CSTR melhor

se ajustou aos dados experimentais, indicando 3 reatores de mistura perfeita em série.

Em seu estudo, Passig (2005) observou que o reator UASB equivale a 5 reatores de mistura perfeita em série e obteve valor de 0,11 para o modelo de pequena dispersão. Ren et. al. (2008) encontrou um valor máximo de 4 tanques em séries aplicando o modelo N-CSTR em um reator UASB com volume útil de 4 L. Ambos os autores encontraram valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

Todos os ensaios realizados apresentaram o TDH real superior ao TDH teórico de 4,5 h; isso caracteriza um atraso devido provavelmente à presença de zonas mortas. Acredita-se que a adsorção do traçador no polímero adsorvente de água não influenciou o atraso do TDH e sim apenas a diminuição da concentração do traçador ao final do estudo.

Para os ensaios realizados no reator operando com o polímero, o valor de  $D\mu.L^{-1}$  encontrado para o modelo de pequena dispersão foi uma média de 0,08 e 0,22 por meio do modelo de grande dispersão. Esses baixos valores demonstram a tendência do reator ao fluxo pistonado. Os valores médios de

$D\mu.L^{-1}$  para o reator operando com a injeção de ar foram mais elevados: em média 0,12 para o modelo de pequena dispersão e 0,34 para o modelo de grande dispersão, demonstrando um fluxo mais disperso, mais próximo da mistura completa.

Segundo Oliveira Netto (2011), a mistura promovida pela aeração ou recirculação leva ao comportamento mais próximo do de mistura completa, fenômeno observado no reator com a injeção de ar.

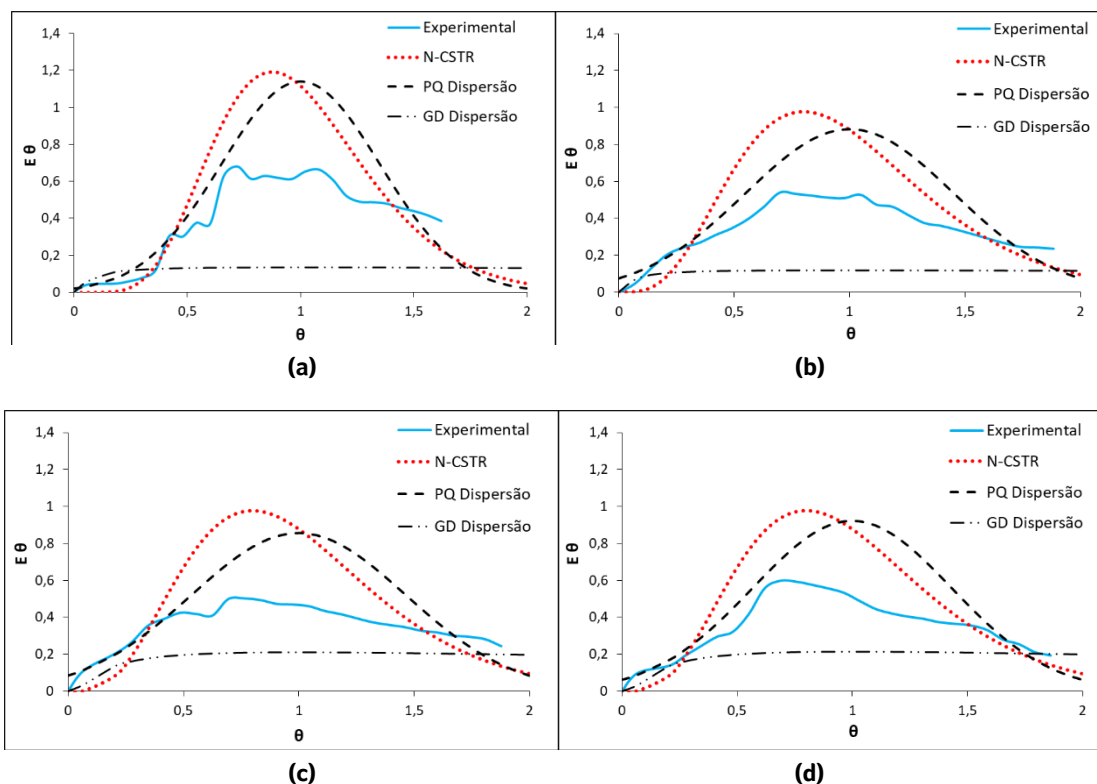
Kreutz (2012) observou em seu estudo que, com o aumento do grau de dispersão do modelo de grande intensidade, ocorre uma redução do número de reatores em série, comportamento também observado pelos resultados dos ensaios, os quais no reator com injeção de ar apresentou valores mais elevados e uma menor quantidade de tanques de mistura completa em série, ao contrário do reator com o polímero absorvente de água.

Em relação à correção dos modelos teóricos com os dados experimentais, é possível observar na

Tabela 2 que todos os ensaios apresentaram uma boa correlação.

Por meio do ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados foram obtidas curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) em função do tempo adimensional para as diferentes condições de operação do reator (Fig. 5).

Como pode ser observado na Fig. 5, em todos os ensaios realizados, as curvas de concentração do traçador ao longo do tempo apresentaram o efeito de cauda longa, o que reflete o lento decaimento das concentrações da eosina Y no efluente do reator. Outros autores, como Kreutz (2012), Bernardez et al. (2008), Capela et al. (2009), Lourenço e Campos (2009), Sarathai et al. (2010), Méndez-Romero et al. (2011), Freitas et al. (2017) e Godinho et al. (2018) também observaram o efeito cauda longa nas curvas de resposta dos seus experimentos, utilizando corantes como traçadores.



**Figura 5** – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com o traçador para o reator UASB - operando com a representação de lodo: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; - operando com injeção de ar: (c) Ensaio 1; (d) Ensaio 2.

Méndez-Romero et al. (2011) observaram que, nas curvas experimentais, as zonas mortas aparecem como uma longa cauda, correlacionando assim a área da cauda com a quantidade de zonas mortas.

Sartori et al. (2015) ressalta que as zonas mortas são regiões do reator em que os tempos de detenção das partículas do fluido são relativamente altos quando comparados ao TDH teórico de projeto do reator.

Os resultados referentes aos cálculos de zonas mortas e a presença de curtos-circuitos hidráulicos

são apresentados na Tabela 3.

O valor médio encontrado para o volume de zonas mortas no reator UASB operando com a representação de lodo foi de aproximadamente 41%, e para o reator operando com a injeção de ar foi de aproximadamente 35%.

Godinho et al. (2018), na operação do mesmo reator UASB do presente trabalho, com TDH de 4 h, observaram volume de zonas mortas negativo de -25% e atribuíram esses valores à presença de caminhos preferenciais no interior de um reator.

**Tabela 3** – Resultados obtidos no cálculo de anomalias para o reator UASB operando com a representação do lodo anaeróbio (1º etapa) e com a injeção de ar (2º etapa).

Modo de operação	Ensaio	TDH Real (h)	Pico (h)	Volume de Zonas mortas (L)	Curtos-circuitos hidráulicos ( $\Psi$ )
Com lodo	1	8,0	6,0	7,9	0,8
	2	7,2	5,0	6,8	0,7
	3	8,1	8,5	8,0	1,0
Com injeção de ar	1	6,8	5,5	6,1	0,8
	2	6,9	5,0	6,3	0,7
	3	7,0	6,0	6,4	0,9

A presença de caminhos preferenciais no interior de reatores UASB acarreta na diminuição do TDH e no tempo de contato entre a biomassa e o substrato, prejudicando sua eficiência (TEIXEIRA et al., 2009).

Peña et al. (2006) também observaram valores negativos de -9,9% de volumes de zonas mortas no interior de um reator tipo UASB com volume de 296 m<sup>3</sup>, operado com TDH de 5 h no tratamento de esgotos sanitários.

Méndez-Romero et al. (2011) observaram em seu estudo que a biomassa pode ocupar um volume considerável do reator e poderia ser considerada um volume de zona morta; possivelmente esse fato influenciou os altos volumes de zonas mortas calculados por meio dos ensaios hidrodinâmicos

realizados com o reator operando com água e o polímero absorvente de água, representando a biomassa do reator.

Singh e Viraraghavan (2003) avaliaram o efeito da temperatura no comportamento hidrodinâmico de reatores UASB tratando esgotos domésticos e obtiveram para um reator operando com TDH de 10h, em temperatura de 11°C, o valor de 13% de zonas mortas.

A presença de curtos-circuitos hidráulicos ocorre quando o valor de  $\Psi$  é menor que 0,3. Assim verificou-se que essa anomalia não ocorreu em nenhum dos ensaios realizados, visto também que o TDH real para todos os ensaios foi maior do que o TDH teórico, não ocorrendo adiantamento, e sim atraso.

## 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

i) Os resultados das simulações do reator UASB em escala de bancada construído em plexiglas® representaram o comportamento dos fluidos por meio dos campos de velocidade das fases, do gradiente de pressão e da fração volumétrica dos fluidos. Estes demonstraram uma distribuição mais uniforme da água no interior do reator, operando com a injeção de ar devido ao efeito do gás no escoamento da água. Já no reator preenchido em 35% do seu volume com o polímero absorvente, a velocidade da água foi reduzida pelo contato com o polímero.

ii) Por meio dos ensaios hidrodinâmicos de estímulo-resposta, observou-se que o reator operando com a representação do lodo anaeróbico apresentou um comportamento hidrodinâmico próximo ao do fluxo pistonado; já o reator operando com a injeção de ar apresentou um fluxo mais disperso com uma tendência menor ao fluxo pistonado.

iii) Analisando os ensaios hidrodinâmicos, encontrou-se um TDH real maior do que o teórico, demonstrando a presença de zonas mortas no interior do reator e a inexistência de caminhos preferenciais.

iv) A porcentagem de zonas mortas obtidas, por meio das simulações, para o reator UASB em escala de bancada operando com o polímero absorvente de água foi de aproximadamente 15%, e o valor obtido por meio dos ensaios hidrodinâmicos foi de 41%, apresentando um erro relativo de 63% entre o valor simulado e o valor experimental. O valor encontrado para o erro relativo é muito alto e demonstra uma má representação do experimento pela simulação.

v) O volume de zonas mortas calculado por meio do CFD para o reator operando com a injeção de ar foi de aproximadamente 21%, e o valor calculado por meio dos ensaios hidrodinâmicos foi de 35%, sendo o erro relativo de 40% entre os valores. Esse

valor demonstra uma correlação satisfatória entre os resultados da simulação e os ensaios experimentais, validando a simulação em CFD.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALÉM SOBRINHO, P.; KATO, M. T. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. 1. ed., Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- BITOG, J. P. P.; LEE, I. B.; OH, H. M.; HONG, S. W.; SEO, I. H.; KWON, K. S. Optimised hydrodynamic parameters for the design of photobioreactors using computational fluid dynamics and experimental validation. **Biosystems engineering**, v. 122, p. 42-61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.006>
- CARVALHO, K. Q. D.; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H.; PIRES, E. C. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 226-235, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000200013>
- CASTRO, F. M. S. **Estudo do Comportamento Hidrodinâmico de Uma Nova Proposta de Configuração Interna para Reator UASB**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 102 p., 2010.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors: Biological wastewater treatment Series (volume 4)**. 1. ed. London: IWA Publishing, v. 1, 184p., 2007.
- CRUZ, D. B.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; GONCALVES, M. S. Avaliação do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbico de manta de lodo e fluxo ascendente com diferentes configurações do sistema de distribuição do afluente utilizando fluidodinâmica computacional. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n.4, p. 721-730, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016127299>
- FONTES, C. E.; SILVA, L. F. L. R.; LAGE, P. L. C.; RODRIGUES, R. C. **Introdução à Fluidodinâmica Computacional**. Rio de Janeiro: Escola Piloto Virtual-UFRJ, 1. ed., 2005.
- FREITAS, D. C.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; CARVALHO, K. Q.; ARANTES, E. J.; GOMES, S. D. Effect of hydraulic retention time on hydrodynamic behavior of anaerobic-aerobic fixed bed reactor treating slaughterhouse effluent. **Acta Scientiarum**. Technology, Maringá, v. 39, n.4, p. 469-476, Oct.-Dec., 2017. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30995>
- GODINHO, J. P.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; NAGALLI, A.; SILVA, M. S. A. Comportamento dinâmico

- e hidrodinâmico de reator tipo UASB submetido à variação de carga hidráulica. **Revista DAE**, v. 66, n. 209, p. 77-86, Jan.-Abr., 2018. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.017>
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento. **BIO - Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente**, Rio de Janeiro: ABES, v. 6, n. 22, p. 28-3, 2000.
- ISLABÃO, G. I.; PINTO, J. C. C. S.; VIANNA JÚNIOR, A. S. Technological Trends in CFD Applications. **Journal of Technology Management & Innovation**, v. 5, n.2, p. 76-83, 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242010000200007>
- KREUTZ, C. **Comportamento de Reator Anaeróbio-aeróbio no Tratamento de Efluente Bovino**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Unioeste, Cascavel, 114 p., 2012.
- LAURENT, J.; SAMSTAG, R. W.; DUCOSTE, J. M.; GRIBORIO, A.; NOPENS, I.; BATSTONE, D. J.; WICKS, J. D.; SAUNDERS, S.; POTIER, O. A protocol for the use of computational fluid dynamics as a supportive tool for wastewater treatment plant modelling. **Water Science & Technology**, v. 70, n. 10, p. 1575-1584, 2014. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.425>
- LETTINGA, G.; REBAC, S.; PARSHINA, S.; NOZHEVNIKOVA, A.; VAN LIER, J. B.; STAMS, A. J. M. High rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. **Applied and Environmental Microbiology Journal**, Wageningen, v. 65, n. 4, p. 1696-1702, 1999.
- LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; ESCUDERO-GONZÁLEZ, J.; MARTÍNEZ, T. M.; MONTAÑANA, V. F.; GUALTIERI, C. Application of CFD methods to an anaerobic digester: The case of Ontinyent WWTP, Valencia, Spain. **Journal of Water Process Engineering**, v. 7, p. 131-140, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.05.006>
- NARNOLI, S. K.; MEHROTRA, I. Sludge blanket of UASB reactor: Mathematical simulation. **Water Research**, Roorkee, v. 31, n.4, p. 715-726, Abr., 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)80987-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)80987-6)
- NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, v. 5, p. 93-114, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2754-6>
- PASSIG, F. H. **Reator anaeróbio híbrido para tratamento de esgoto sanitário**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 171 p., 2005.
- PEÑA, M. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v. 50, n. 3, p. 445-452, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.021>
- PERSSON J.; SOMES N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 291 - 300, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00448-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00448-5)
- PIRES, E. C.; HANISCH, W. S.; ANDRADE, M. A. N. An original procedure for physical simulation of upflow anaerobic sludge reactors. **Bioprocess Engineering**, Berlim, v. 23, p. 389-395, 2000. <https://doi.org/10.1007/s004499900180>
- REN, T.; MU, Y.; NI, B.; YU, H. Hydrodynamics of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. **Environmental and Energy Engineering**, v. 55, n. 2, p.516-528, 2009. <https://doi.org/10.1002/aic.11667>
- SARATHAI, T.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal of Environmental Science**, v. 22, n. 9, p. 1319-1326, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60257-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60257-6)
- SARTORI, M.; OLIVEIRA, D. S.; TEIXEIRA, E. C.; RAUEN, W. B.; REIS, N. C. CFD modelling of helically coiled tube flocculators for velocity gradient assessment. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, p. 187-198, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0141-3>
- SINGH, K. S.; T. VIRARAGHAVAN T.; BHATTACHARYYA D. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactors: Temperature Effects. **Journal of Environmental Engineering**, v. 132, n. 8, p. 895-900, Ago., 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:8\(895\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:8(895))
- TEIXEIRA, A. R.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUTO, T. F. S.; PAULA, F. S. Influência da alteração da distribuição do tamanho de partículas no desempenho de reatores UASB tratando esgotos domésticos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 159-166, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000200003>
- THACKSTON, E. L.; SHIELDS Jr. F. D.; 89 SCHROEDER P. R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 6, p. 1319-1332, 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1987\)113:6\(1319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1987)113:6(1319))
- VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande, Brasil, EPGRAF, p. 240, 1994.
- WANG, X.; DING, J.; GUO, W. Q.; REN, N. Q. A hydrodynamics- reaction kinetics coupled model for evaluating bioreactors derived from CFD simulation. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 9749-9757, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.115>
- WANG, X.; DING, J.; REN, N. Q.; LIU, B. F.; GUO, W. Q. CFD simulation of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor for biohydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, China, p. 9686-9695, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.027>
- WU, M. M.; VOICE, T. C.; HICKEY, R. F. Hydraulic characteristics of an upflow anaerobic sludge blanket UASB reactor with granular sludge. In: XLVII Industrial Waste Conference, Proceedings. West Lafayette: Lewis, Boca Raton, 1992. **Anais...**