

II-114 – USO DA FERRAMENTA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO ESTUDO HIDRODINÂMICO DE DIFERENTES GEOMETRIAS NA ENTRADA DE REATORES

Diego Bongiorno Cruz⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Campo Mourão.

Kelly Leiko Umeki

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Campo Mourão.

Eudes José Arantes

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Campo Mourão.

Fernando Hermes Passig

Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Campo Mourão.

Cristiane Kreutz

Tecnóloga Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutoranda em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) *Campus* Campo Mourão.

Endereço⁽¹⁾: Av. José Custódio de Oliveira, 1206 - Centro – Campo Mourão - PR - CEP: 87300-020 - Brasil - Tel: (44) 9997-1772 - e-mail: diego.bongiorno@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a simulação de um reator UASB com diferentes modelos de entrada para a água residuária, de forma a caracterizar os escoamentos internos do reator considerando que o seu desempenho é diretamente influenciado pelos processos microbiológicos e pela hidrodinâmica. O estudo em questão foi realizado fazendo-se uso do COMSOL *Multiphysics* 3.5a, *software* comercial de fluidodinâmica computacional (CFD), utilizado para modelagem e resolução de problemas científicos e de engenharia baseados em equações diferenciais parciais (PDEs). Como resultados são apresentados às análises dos campos de velocidade de mistura e densidade de mistura, a fim de verificar a formação de zonas mortas, caminhos preferenciais e a eficiência de mistura das duas fases. Através desses resultados confirmou-se a descontinuidade no comportamento da mistura em um reator UASB e verificou-se que um modelo de entrada, em particular, possibilitou ao reator uma melhor mistura do lodo e melhores características hidrodinâmica. A variação temporal dos vórtices demonstrou que o reator não apresentou um padrão bem definido de escoamento dificultando o processo de criação do modelo simplificado.

PALAVRAS-CHAVE: Reator UASB, Hidrodinâmica, CFD, COMSOL *Multiphysics*.

INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia é uma das melhores alternativas para o tratamento de subprodutos altamente poluidores, como resíduos sólidos, efluentes da agroindústria, esgoto sanitário doméstico e dejetos de animais (BRUNO e OLIVEIRA, 2008). Segundo Ren *et al.* (2009) o reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tem sido o reator anaeróbico de alta taxa mais utilizado para tratamento de águas residuárias em todo mundo desde 1980.

No reator UASB, a água residuária entra pelo fundo e prossegue em fluxo ascendente, até o topo do reator, atravessando três etapas: o leito de lodo, onde há grande concentração de biomassa ativa, logo após uma biomassa menos densa, denominada manta de lodo e finalmente passa por um separador de três fases, onde ocorre a separação dos sólidos em suspensão (lodo), do líquido e do biogás formado no tratamento (CHERNICHARO e CAMPOS, 1992). O seu desempenho geralmente é determinado pelos processos microbiológicos e sua hidrodinâmica que possui grande importância, pois pode influenciar a velocidade das

reações biológicas, por meio de alterações na taxa de transferência de massa e a distribuição das reações ao longo do reator.

Segundo Salgado (2008) o estudo do comportamento hidrodinâmico de reatores contribui para o aumento da eficiência desses sistemas e permite obter equações de desempenho e modelos mais satisfatórios. Uma forma de estudar o comportamento hidrodinâmico de reatores é a utilização da dinâmica dos fluidos computacional, uma ferramenta utilizada na análise de escoamentos, que não substitui completamente os métodos analíticos, mas pode aperfeiçoá-los. Com o avanço dos computadores, a capacidade de processamento cresceu exponencialmente otimizando este tipo de estudo e propiciando o desenvolvimento de *softwares* nesta área.

O presente trabalho tem como objetivo a utilização de ferramenta de fluidodinâmica computacional para modelagem de reatores com diferentes geometrias de entrada para água residuária, considerando um escoamento bifásico, sendo uma fase líquida e outra sólida. A fim de caracterizar o escoamento em reatores visando à análise de sua hidrodinâmica e a eficiência de mistura das duas fases foram determinados os campos de velocidade de mistura e densidade de mistura.

METODOLOGIA

FERRAMENTA CFD – COMSOL MULTIPHYSICS

O *software* utilizado no presente estudo é o COMSOL *Multiphysics* 3.5a. Através dele é possível construir modelos definindo as quantidades físicas relevantes, como as propriedades dos materiais, cargas, restrições, fontes e fluxos, em vez de utilizar a definição das equações subjacentes. Para representar estes modelos o *software* compila internamente um conjunto de *PDEs*.

Para resolver as *PDEs*, o *software* utiliza o método dos elementos finitos (*FEM*). Executando a análise de elementos finitos, juntamente com a malha adaptativa e o controle de erros, utilizando diversos métodos para resolução de problemas estacionários, autovalores e dependentes do tempo e para resolver sistemas lineares possui recursos diretos e interativos. O processo de utilização do software se inicia pela escolha do modelo a ser resolvido e a criação da geometria. A interface de usuário COMSOL *Multiphysics* contém um conjunto de ferramentas CAD para a modelagem de geometrias em 1D, 2D e 3D. Após a modelagem e a definição dos vários parâmetros, é possível a geração automática da malha desta geometria ou a geração da mesma manualmente através de um conjunto de parâmetros de controle. Em seguida, vem à fase de solução através dos seguintes métodos de solução numérica disponibilizados pelo *software*: PARDISO, UMFPACK, SPOOLES e TAUCS.

Este *software* fornece ferramentas para plotagem e para o pós-processamento em vários parâmetros, como: Campo de superfícies e de seções, isosuperfícies, contornos, formas deformadas, linhas de correntes, trajetórias das partículas, seções transversais e interpolação numérica, animações, exportação de dados de soluções para arquivo de texto e plataforma MATLAB e integrações no contorno e nos subdomínios.

MODELOS MATEMÁTICOS

O modelo utilizado para realizar as simulações foi um modelo de mistura macroscópica de fluxo de duas fases. Este controla a concentração média de cada fase, ou fração de volume, e resolve por um campo de velocidade para cada fase.

O modelo é baseado no modelo Euler-Euler, sendo constituído de uma fase dispersa e uma fase contínua. O modelo de mistura é válido se a fase contínua é um líquido e a fase dispersa consiste em partículas sólidas, gotas de líquido ou bolhas de gás. Este modelo baseia-se nos seguintes pressupostos: A densidade de cada fase é aproximadamente constante; Ambas as fases possuem o mesmo campo de pressão; A velocidade relativa entre as duas fases é determinada essencialmente assumindo um equilíbrio entre a pressão, gravidade e arrasto viscoso.

O *software* utiliza uma versão generalizada das equações de Navier-Stokes para permitir a variação da viscosidade. Começando com o balanço do momento em termos de tensões, realizado através das equações 1 e 2 generalizadas em termos de propriedades de transporte e gradientes de velocidade.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^t)] + F \quad \text{equação (1)}$$

$$u \cdot \nabla = 0 \quad \text{equação (2)}$$

A primeira equação é a equação de transporte de momento, e a segunda é a equação da continuidade para fluidos incompressíveis. As seguintes variáveis e parâmetros aparecem nas equações: η é a viscosidade dinâmica, ρ é a densidade, u é o campo de velocidade, p é a pressão e F é um campo de força como a gravidade. Estes modos de aplicação geralmente são suficientes para explicar todos os tipos de escoamentos incompressíveis.

No modelo de mistura utilizado o comportamento da viscosidade da mistura foi determinada pelo modelo de Krieger demonstrado pela equação 3 onde: η representa a viscosidade máxima, η_c a viscosidade da fase contínua, ϕ_d a fração de volume da fase dispersa e ϕ_{max} é a concentração máxima, que para partículas sólidas é de aproximadamente 0,62. A velocidade de deslizamento foi considerada nula caracterizando um escoamento homogêneo.

$$\eta = \eta_c (1 - \phi_d / \phi_{max})^A (-2,5 \phi_{max}) \quad \text{equação (3)}$$

GEOMETRIAS PROPOSTAS

O reator UASB em sua coluna ascendente consiste de um leito de lodo, *sludge bed*, uma zona de sedimentação, *sludge blanket*, e o separador de fase, *gas-solid separator* - GSS (NARNOLI e MEHROTRA, 1997). No presente trabalho utilizou-se como modelo para o desenho da geometria a ser simulada, um reator UASB em escala piloto confeccionado em PVC com 1,70 m de altura, 0,28m de diâmetro estudado por Carvalho *et al.* (2008). O desenho da geometria simulada foi simplificado (Figura 1), demonstrando apenas o LODO ANAERÓBIO e as entradas para a água residuária a ser tratada. Após o desenho da geometria gerou-se automaticamente através do *software* uma malha triangular (Figura 1). O modelo de entrada original e o modelo de reator com a adição de uma nova entrada pode ser observado na Figura 2. A Figura 3 apresenta a mudança de posição das entradas do reator para as laterais em um modelo e o acréscimo de três entradas com fluxo descendente em outro. O fluxo de entrada para água residuária é demonstrado nas figuras através de setas.

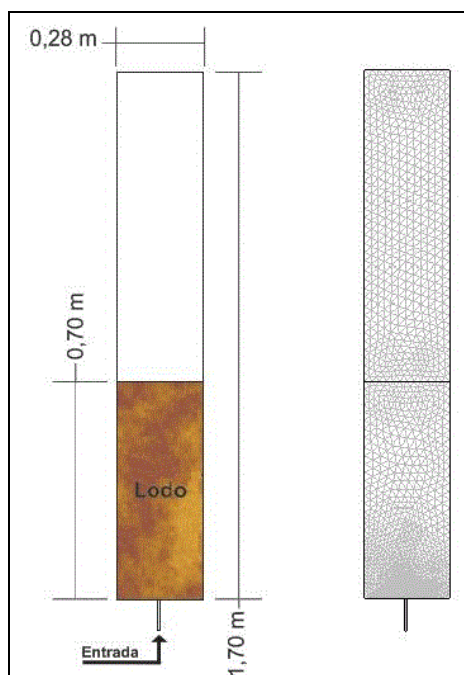


Figura 1 – Modelo simplificado do reator UASB em 2D e a malha triangular gerada pelo *software*.

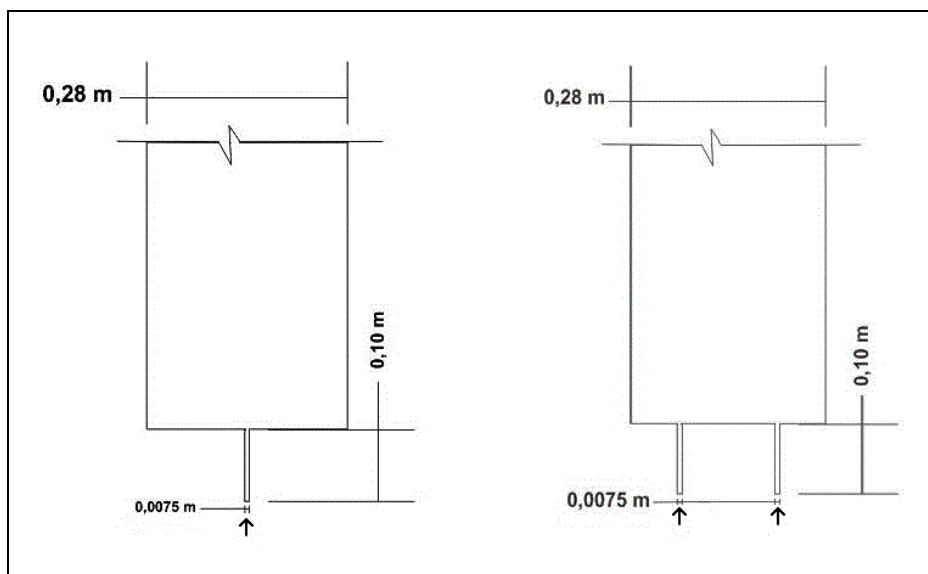


Figura 2 – Desenho do local de entrada do primeiro modelo de reator UASB, à esquerda, e à direita a modificação de entrada do segundo modelo de reator.

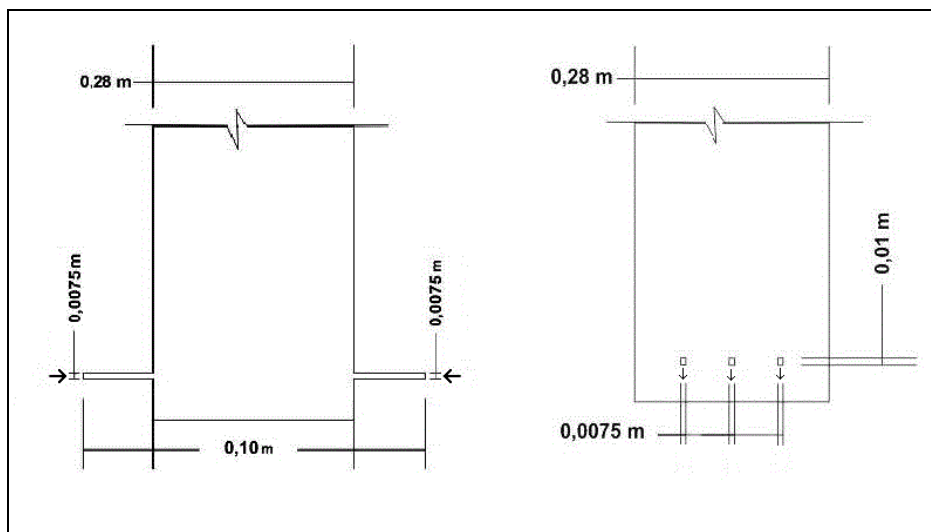


Figura 3 - Desenho do terceiro modelo de reator UASB e as alterações de sua entrada, à esquerda, e à direita o quarto modelo de reator com três entradas.

As simulações numéricas foram realizadas através do método de solução SPOOLES por apresentar maior rapidez no processamento das simulações e em condições transientes com duração total de 600 segundos. Na Tabela 1 são apresentadas as características do sistema simulado, valores baseados nos estudos de Carvalho *et al.* (2008) e Ren *et al.* (2009).

Tabela 1: Parâmetros da simulação.

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Velocidade de entrada da Fase Continua	0,00552	m/s
Densidade da Fase Dispersa (Lodo)	1460	kg/m ³
Diâmetro das Partículas	0,01	m
Quantidade inicial de lodo	0,035	%
Pressão	0,038	Pa
Densidade da Fase Continua	1000	Kg/m ³
Viscosidade Dinâmica da Fase Continua	0,001	Pa.s

RESULTADOS PRIMEIRA GEOMETRIA

A Figura 4 demonstra a formação de um vórtice, mais evidente, no tempo de 450 segundos e uma estabilização do comportamento da velocidade de mistura no tempo de 600 segundos formando um possível padrão a partir deste tempo. O modelo apresentou uma velocidade de mistura maior na lateral esquerda da parte inferior do reator. A Figura 5 mostra a densidade da mistura que durante a simulação apresentou uma leve queda no seu valor na parte inferior do reator, comportamento resultante da alta velocidade no local ao final da simulação.

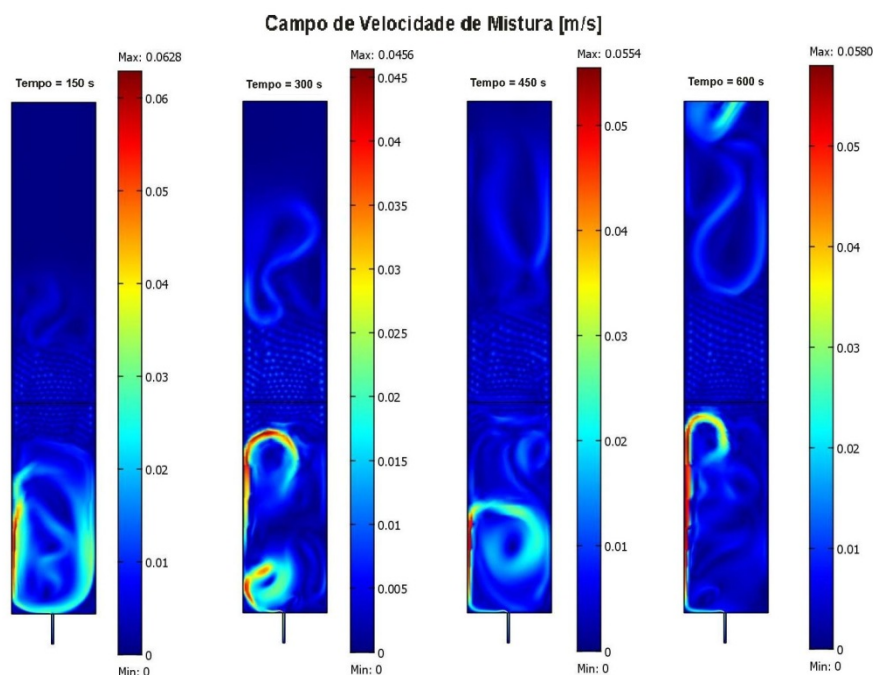


Figura 4 – Campo de velocidade de mistura do primeiro modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

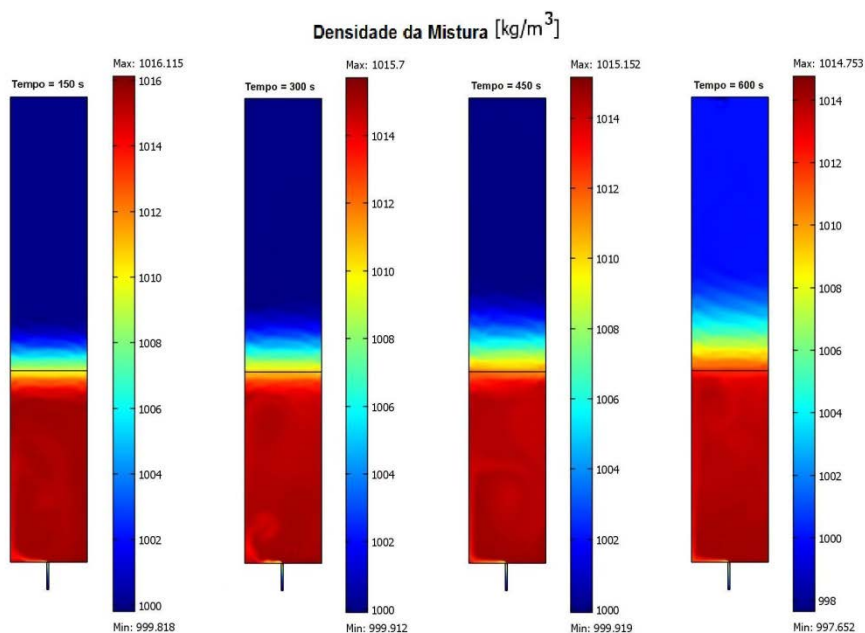


Figura 5 – Densidade da mistura do primeiro modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

RESULTADOS SEGUNDA GEOMETRIA

Observa-se através da Figura 6 uma grande formação de vórtices e a concentração destes na parte inferior do reator, em todos os tempos demonstrados, evidenciando a má distribuição e concentração do campo de velocidade de mistura. A densidade da mistura para este modelo é apresentada na Figura 7, mostrando como essa densidade praticamente não variou na região do lodo do reator.

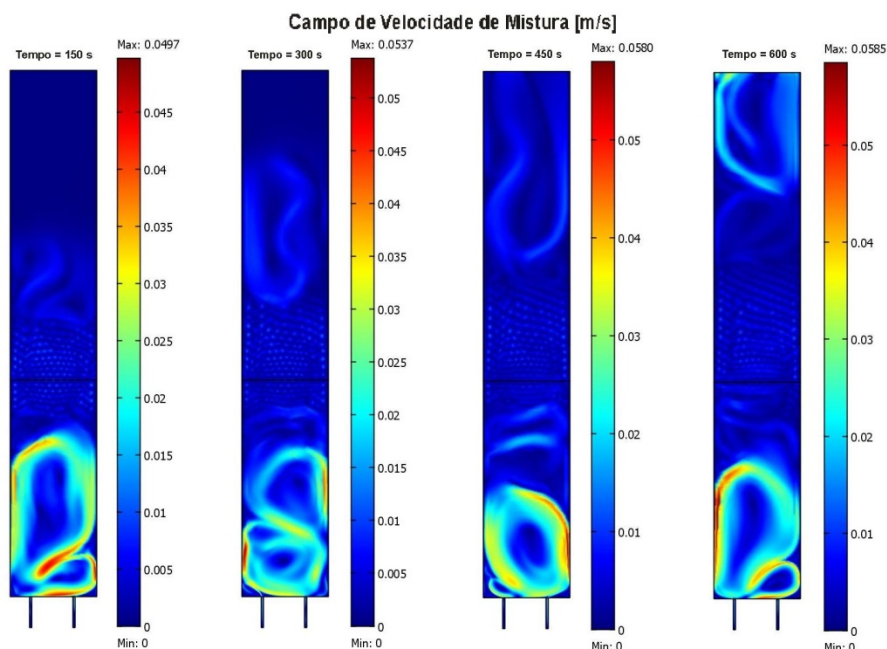


Figura 6 – Campo de velocidade de mistura do segundo modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

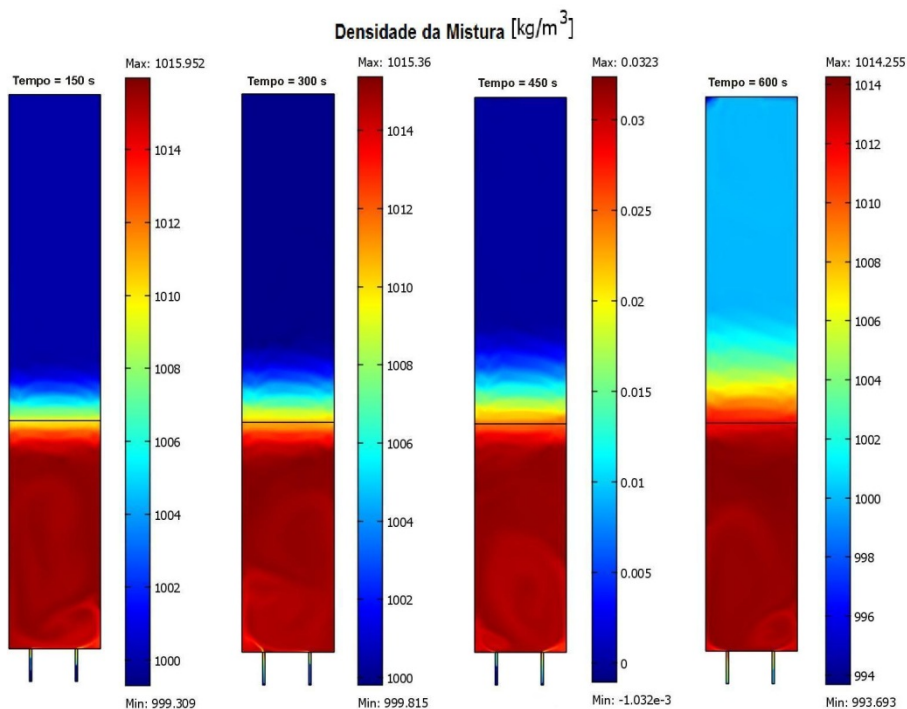


Figura 7 – Densidade da mistura do segundo modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

RESULTADOS TERCEIRA GEOMETRIA

Analisando a Figura 8 observa-se a baixa mistura do lodo para este modelo de reator, devido à formação de zonas com maior velocidade de mistura nas laterais do reator com a aparente formação de um padrão a partir do tempo de 300 segundos. A Figura 9 mostra a densidade da mistura na parte inferior do reator diminuindo durante a simulação, apresentando menores valores no tempo de 600 segundos devido ao aumento da velocidade neste local, aumentando a mistura do lodo.

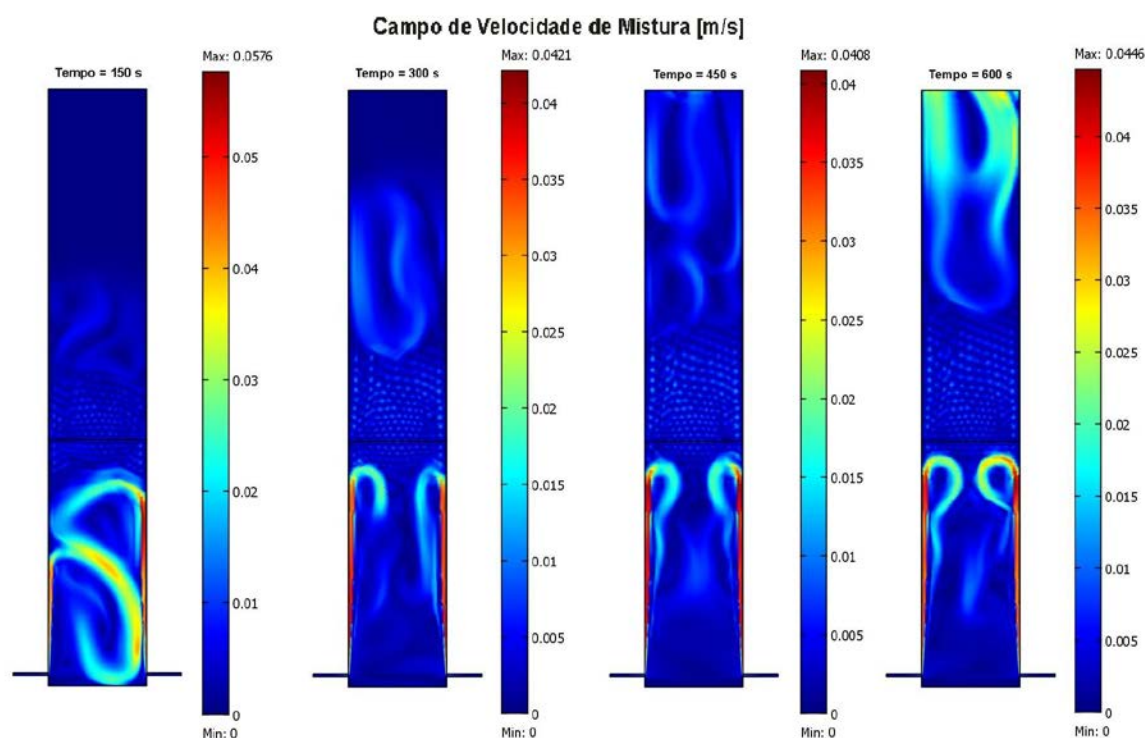


Figura 8 – Campo de velocidade de mistura do terceiro modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

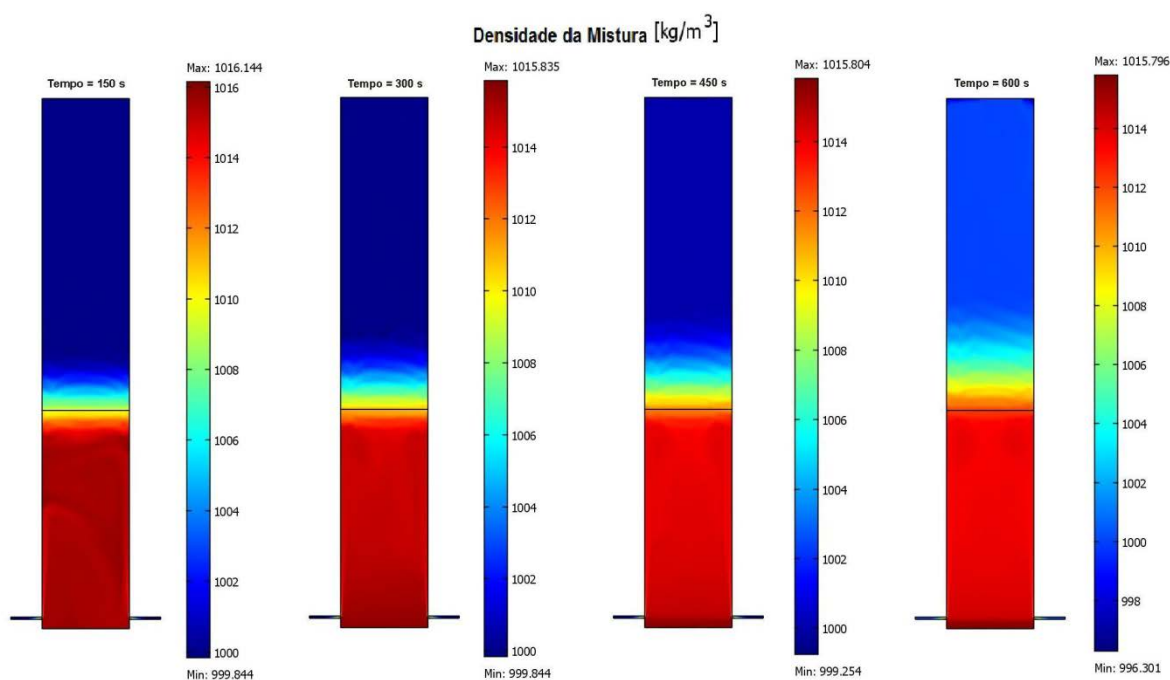


Figura 9 – Densidade da mistura do terceiro modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

RESULTADOS QUARTA GEOMETRIA

Na Figura 10 observa-se a formação de vórtices, na parte inferior deste modelo de reator, até o tempo de 450 segundos e logo após uma queda na velocidade da mistura na parte inferior e aumento do campo de velocidade na parte superior devido ao fluxo normal do reator. Este modelo não apresenta o mesmo padrão, em relação ao campo de velocidade e a densidade de mistura, comparado com os outros reatores, este apresenta uma baixa densidade de mistura no tempo de 150 segundos que aumenta no decorrer da simulação, demonstrando o efeito de sedimentação das partículas após a sua mistura, como pode ser observado na Figura 11.

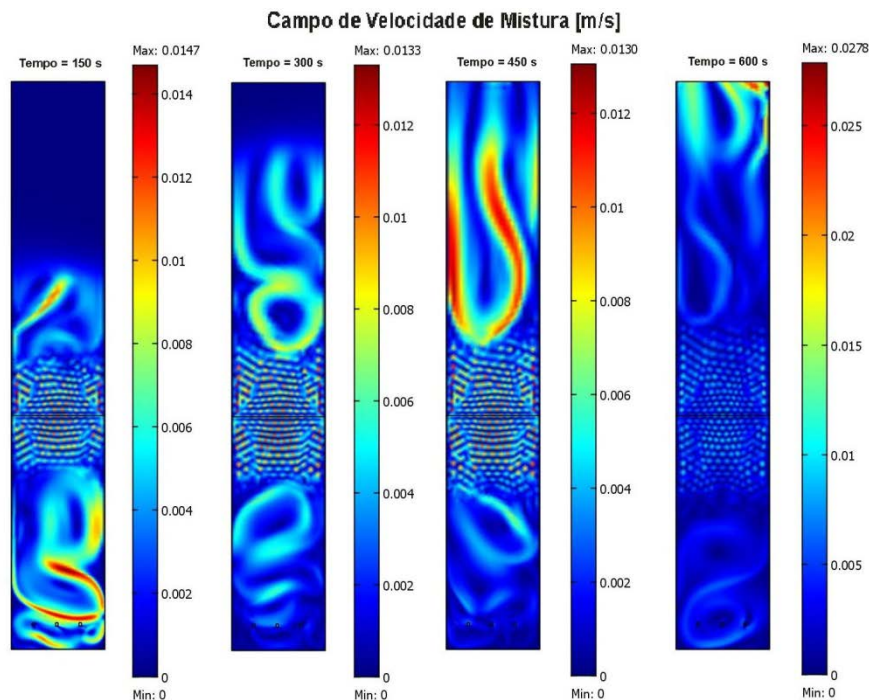


Figura 10 – Campo de velocidade de mistura do quarto modelo em diferentes tempos de simulação.

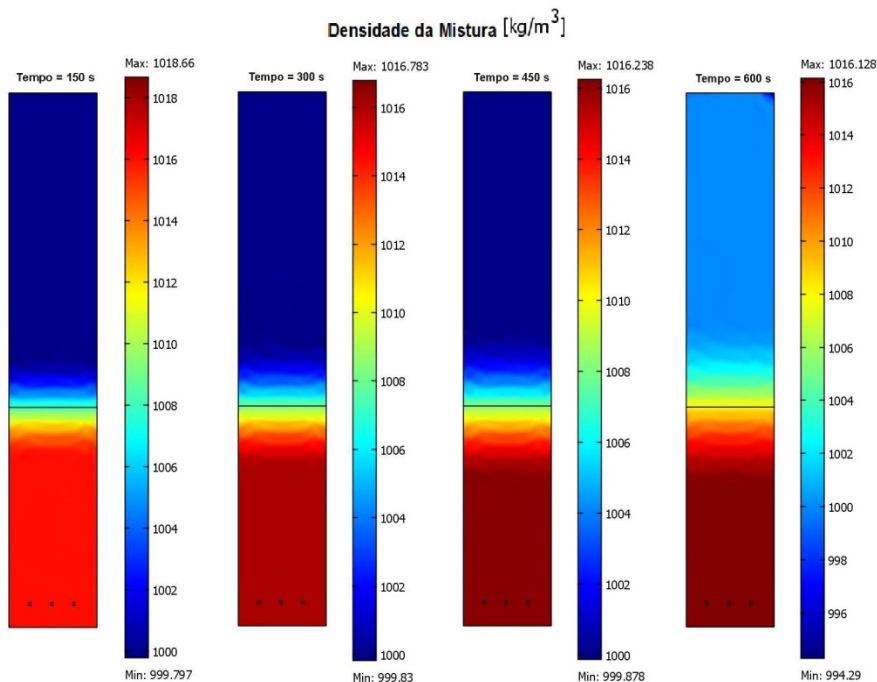


Figura 11 – Densidade de mistura do quarto modelo de reator em diferentes tempos de simulação.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Segundo Sant'Ana *et al.* (2002) basicamente é a velocidade de escoamento e a distribuição da mesma que determinam as propriedades hidráulicas do reator. Visto que de acordo com Carvalho *et al.* (2008) estas propriedades hidráulicas podem influenciar na velocidade das reações biológicas e na formação de curtos-circuitos hidráulicos, caminhos preferenciais e zonas mortas. Observa-se através dos resultados obtidos que a velocidade de mistura é maior na parte inferior de todos os modelos de reatores estudados e menor na parte superior, confirmando a descontinuidade no comportamento da mistura em um reator UASB, a dispersão do lodo também se comporta desta maneira sendo mais intensa na parte inferior. O reator estudado não apresentou um padrão bem definido, demonstrado pela variação temporal dos vórtices dificultando processo de criação do modelo simplificado.

Tendo em vista os resultados obtidos, concluiu-se que:

O modelo de reator com três entradas de fluxo descendente para água residuária apresentou melhores características hidrodinâmicas. Apresentando um bom perfil de mistura do lodo e uma boa sedimentação após essa mistura. Sedimentação demonstrada pelo comportamento da densidade de mistura, que a partir de um determinado tempo passou a concentrar valores maiores na parte inferior do reator, pelo campo de velocidade de mistura que se comportou da forma esperada, ao longo da simulação, com a queda do seu valor na parte onde se encontra o lodo e aumento na parte superior demonstrando o fluxo natural de um reator.

Os modelos simulados apresentaram zonas falhas na região entre as fases sólida e líquida, isto ocorreu, possivelmente devido à utilização de uma malha não ortogonal para simulação.

A simulação deste reator em três dimensões e com uma porcentagem de lodo mais próxima de valores reais de funcionamento é uma proposta para futuros estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRUNO, M.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento Anaeróbio de Águas Residuárias do Beneficiamento de Café por Via Úmida em Reatores UASB em Dois Estágios. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p.364-377, abril/jun. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n2/a17v28n2.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2011.
2. CARVALHO, K. Q. et al. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, São Carlos, v. 13, n. 2, p.226-235, abr./jun. 2008. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/esa/v13n2/a13v13n2.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2010.
3. CHERNICHARO, C. A. L.; CAMPOS, C. M. M. Curso de tratamento anaeróbio de efluentes líquidos. Belo Horizonte: ABES, 1992. 101 p.
4. NARNOLI, S. K.; MEHROTRA, I. Sludge blanket of UASB reactor: Mathematical simulation. Water Research, Roorkee, p. 715-726. abr. 1997.
5. *Quick Start and Quick Reference – COMSOL Multiphysics®* - Manual, 2006.
6. REN, T. et al. Hydrodynamics of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors. Alche Journal: Environment and Energy Engineering, Newark, p. 516-528. fev. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/aic.11667>>. Acesso em: 16 nov. 2009.
7. SALGADO, M. T. Modelo Matemático para Avaliação Hidrodinâmica em Reatores Tubulares Operando em Regime Não-Permanente. 2008. 167 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos, 2008.
8. SANT'ANA, T. et al. Influência do comportamento hidrodinâmico de um reator UV com lâmpadas emersas na desinfecção de esgotos sanitário tratados a nível secundário. In: Simpósio Ítalo-Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, 6., 2002, Vitória. Anais...Vitória, 2002.