

## II-272 – MODELAGEM COMPUTACIONAL HIDRODINÂMICA E DA FASE GASOSA DE REATOR UASB

### **Carlos Adller Saraiva Paiva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestrando em Engenharia Química pela UFC. Coordenador de Projetos de Inovação da Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (GEPED) da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece).

### **Leon Torres de Oliveira<sup>(2)</sup>**

Graduando em Engenharia Química pela UFC. Estagiário de nível superior da GEPED/Cagece.

### **Silvano Porto Pereira<sup>(3)</sup>**

Biólogo pela UFC. Mestre em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da UFC. Doutor em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pelo DEHA/UFC. Gerente da GEPED/Cagece.

### **Renato Carrhá Leitão<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Civil pela UFC. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Ciências Ambientais pela *Wageningen University and Research Center*, Holanda. Pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical.

### **Iran Eduardo Lima Neto<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Civil pela UFC. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos pela Universidade de Alberta, Canadá. Pós-doutorado pela Universidade de Cambridge, Inglaterra.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Dr. Lauro Vieira Chaves, 1030 – Vila União – Fortaleza - CE - CEP: 60.1420-280 - Brasil - Tel: (85) 3101-1949- e-mail: [carlos.saraiva@cagece.com.br](mailto:carlos.saraiva@cagece.com.br)

## RESUMO

Os reatores do tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) tem se destacado no tratamento de esgoto doméstico em países tropicais devido às suas propriedades, as quais permitem operação ótima nas condições providas naturalmente pelo clima de tais locais. Além do tratamento da carga de afluente, este equipamento ainda pode ser incorporado a uma planta de maneira que o subproduto gasoso de suas reações, o biogás, possa ser aproveitado para geração de energia, em vez de liberá-lo à atmosfera. A existência de produto gasoso no meio reacional influencia fortemente a fluidodinâmica do reator, sendo um fator de acréscimo de turbulência ao fluxo. O estudo por *Computational Fluid Dynamics* (CFD) possibilita a estimativa do efeito na física interna e na produção de biogás no reator por meio de modelos de turbulência voltados para o fluxo bifásico.

**PALAVRAS-CHAVE:** UASB, CFD, Multifásico, Biogás, Modelos de Mistura.

## INTRODUÇÃO

Reatores do tipo UASB tem sido o foco de diversos estudos devido tanto as suas qualidades, como alta eficiência e baixo custo de operação em climas tropicais, como seus obstáculos, a instabilidade com relação a variações expressivas na Demanda Química de Oxigênio (DQO) e na vazão de esgoto, devido à alta sensibilidade dos micro-organismos produtores de metano presentes no lodo ativado, podem alterar consideravelmente a produção de biogás. O design do reator é feito de forma que as três fases presentes, esgoto, lodo e biogás, possam ser separadas, de forma que há alta eficiência tanto no âmbito da separação como na taxa de remoção de DQO. Estudos anteriores confirmaram a capacidade deste design de reator de suportar cargas orgânicas tão baixas quanto 92 mg/L, tornando-o opção conveniente para o tratamento de esgoto doméstico.

O uso de CFD para o estudo do comportamento hidrodinâmico de equipamentos é prática comum, possibilitando alterações no design visando sua otimização. Tal método pode ser aplicado para fluxos multifásicos, escolhidos os modelos de mistura e de arraste adequados, apresentando resultados como campos de velocidade, pressão e concentração, de forma que é possível analisar o comportamento de cada fase separadamente com relação ao fluxo, no caso de fases imiscíveis, e também a variação da fração mássica de cada fase, no caso de haver miscibilidade entre elas. Os resultados gerados por esse tipo de estudo se

mostraram em diversos casos representativos das físicas aplicáveis aos casos, tornando-se dados válidos para a análise de casos e de desenvolvimento de projetos. Com as técnicas corretas, o uso de simulação para a avaliação de estruturas e modelos mostrou-se um método de pré-análise válido, reduzindo custos e riscos de projetos.

O objetivo desse trabalho foi simular um modelo fluidodinâmico para um fluxo multifásico em um reator UASB contendo as fases líquida e gasosa fazendo uso de modelos matemáticos adequados.

## MÉTODOS E MODELOS

O trabalho foi realizado em duas etapas, uma computacional, na qual foi realizada a simulação da fluidodinâmica do reator sob as condições de entradas desejadas, primeiramente simulando somente uma fase, a líquida, composta de água a temperatura ambiente, e após simulando o mesmo sistema com a adição da fase gasosa a partir do fundo do reator, reproduzido experimentalmente por meio de um difusor. A segunda etapa, experimental, realizou testes hidrodinâmicos em um reator modelo UASB para obter dados de linha de fluxo para validar os resultados obtidos pelos modelos aplicados nas simulações.

O modelo hidrodinâmico utilizado para as simulações considerando somente a fase líquida foi o RANS  $\kappa$ - $\epsilon$  adaptado para fluxos de baixo número de Reynolds, como é no caso estudado. Abaixo seguem as equações descritas no modelo:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho k u_j - \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \partial k}{\partial x_j} \right] = P - \rho \epsilon - \rho D \quad \text{equação (1)}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \epsilon u_j - \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = \frac{(C_{\epsilon 1} f_1 P - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \epsilon)}{k} \epsilon + \rho E \quad \text{equação (2)}$$

$$\mu_t = C_{\mu} f_{\mu} \rho k^2 \quad \text{equação (3)}$$

$$P = \frac{\tau_{ij}^{turb} \partial u_i}{\partial x_j} \quad \text{equação (4)}$$

Nas quais os termos  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $C_{\mu}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são parâmetros constantes do modelo, e  $f_1$  e  $f_2$  são fatores de amortecimento. O termo de viscosidade difere do modelo  $k$ - $\epsilon$  pela inclusão do fator de amortecimento  $f_{\mu}$ . A energia cinética na parede é  $k_{wall} = 0$ . Os valores comuns estabelecidos para esses parâmetros seguem em tabela na seção seguinte.

Para a inclusão da fase gasosa no modelo, foi necessária a inclusão de termos de mistura para as bolhas, além de um modelo para o arraste proporcionado pelo fluxo de líquido. O modelo de arraste escolhido foi o balanço de Pressão-Arraste para o coeficiente de arraste para bolhas de Hadamard-Rybczynski. O cálculo do fluxo foi ajustado para o modelo laminar, devido à ausência de acoplamento do modelo usado anteriormente com o fluxo multifásico, assim a equação torna-se:

$$\phi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \phi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \nabla \cdot [-p_l + \phi_l \mu_l (\nabla \cdot u_l + (\nabla \cdot u_l)^T)] + \phi_l \rho_l g + F \quad \text{equação (5)}$$

Onde o coeficiente de arraste é definido como:

$$Cd = \frac{16}{Re_b} \quad \text{equação (6)}$$

$$Re_b = d_b \rho_l \frac{|u_{rel}|}{\mu_l} \quad \text{equação (7)}$$

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software de simulação computacional multifísica COMSOL *Multiphysics*® foi utilizado no estudo, tanto como ferramenta para modelar a geometria do reator, quanto para realizar as simulações e processar os

resultados. O reator modelado tem altura de 1,35 metro, com diâmetro da seção inferior de 0,1065 m, diâmetro da seção superior de 0,18 m, acomodando um cone separador trifásico de maior diâmetro 0,14 m.

O modelo proposto foi simulado aplicando um eixo de simetria no seu centro, de maneira a reduzir o tempo computacional necessário. Os parâmetros de entrada, velocidade de entrada da água e o fluxo de entrada do gás, foram suavizados nos tempos iniciais de simulação, por meio de multiplicação por uma função de rampa suavizada no início e no corte, de forma a melhorar a convergência do modelo, reduzindo assim os efeitos da sua não-linearidade. Foram especificados pontos de pressão atmosférica no topo do reator de forma a evitar a existência de múltiplas soluções para o modelo.

Os parâmetros das equações seguem o modelo proposto por Chien (1982), com os valores abaixo:

**Tabela 1: Parâmetros do modelo RANS k-ε para baixo Reynolds**

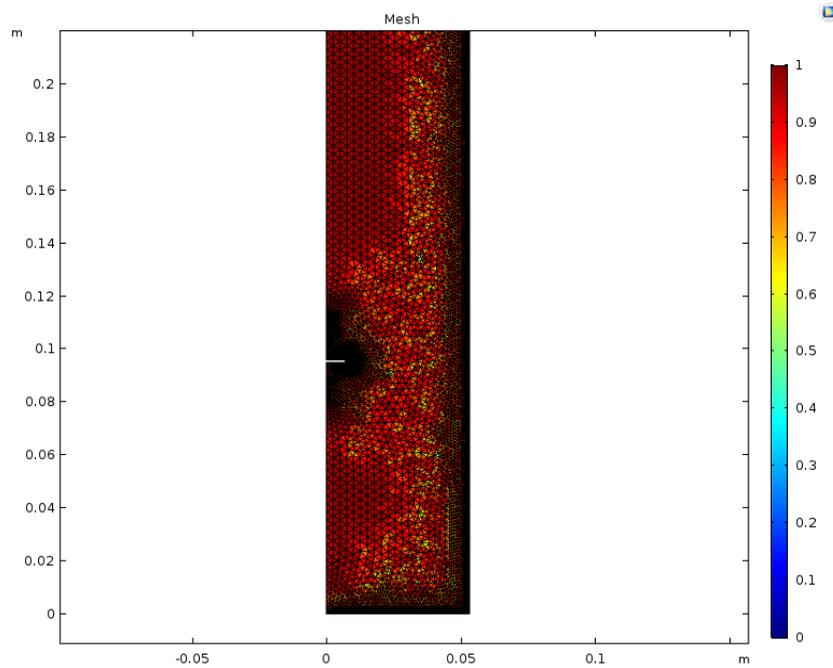
PARÂMETROS	VALOR/FÓRMULA
$C_\mu$	0,09
$\sigma_k$	1
$\sigma_\varepsilon$	1,3
D	$2\nu k/y^2$
E	$-2\nu\varepsilon/y^2 + \exp(-0,5y^+)$
$\varepsilon_{wall}$	0
$C_{\varepsilon 1}$	1,35
$C_{\varepsilon 2}$	1,8
$f_\mu$	$1 - \exp(-0,0115y^+)$
$f_1$	1
$f_2$	$1 - 0,22\exp(-(Re_t/6)^2)$

Onde:

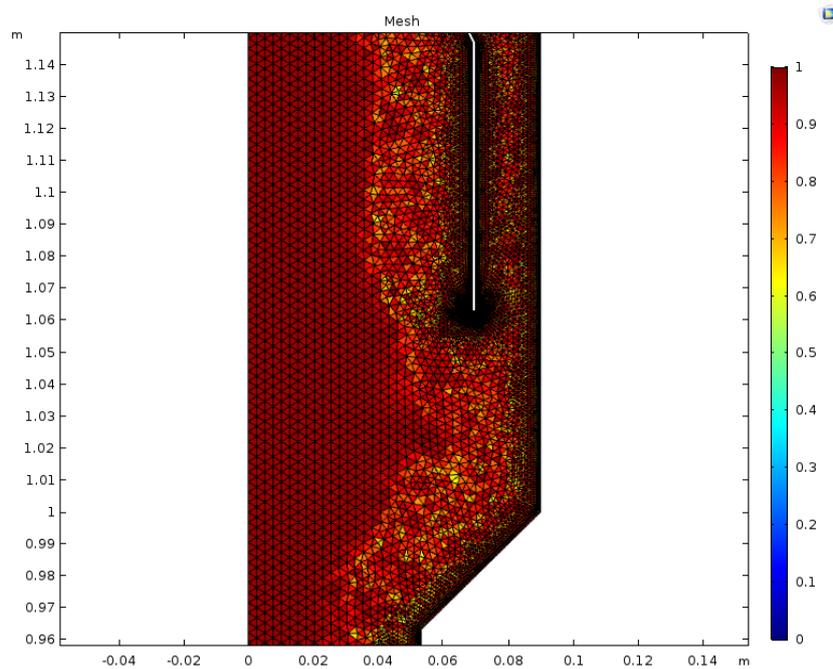
$$Re_t = \frac{k^2 y^+}{\nu \varepsilon}$$

equação (8)

Para discretizar o sistema, foi montada uma malha com 60272 elementos, composta de 9202 quadriláteros e 51070 elementos triangulares distribuídos conforme a resolução necessária à física apresentada:



**Figura 1 – Malha na seção inferior do reator**



**Figura 2 – Malha na região do cone separador**

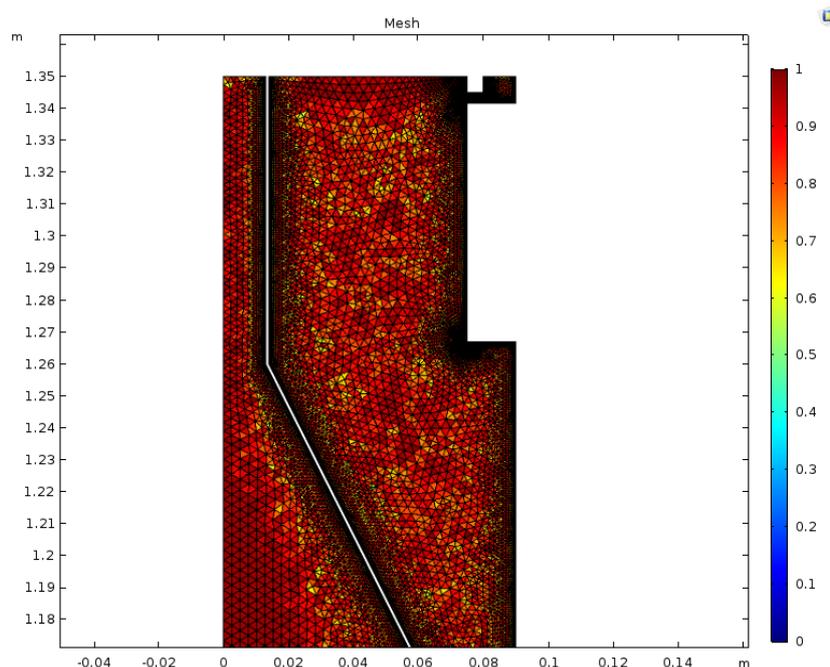


Figura 3 – Malha na região da saída do reator

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações foram processados de maneira a se obter imagens nas quais é possível observar claramente o deslocamento das linhas de fluxo durante o tempo definido. Estas foram comparadas com as imagens pós-tratadas obtidas nos testes hidrodinâmicos. Seguem abaixo os resultados obtidos pelo modelo monofásico:

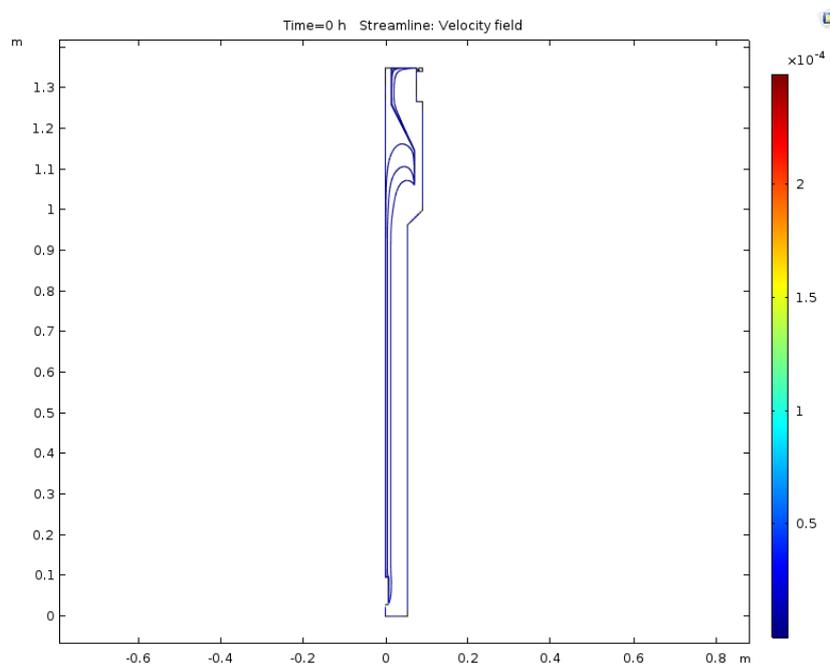
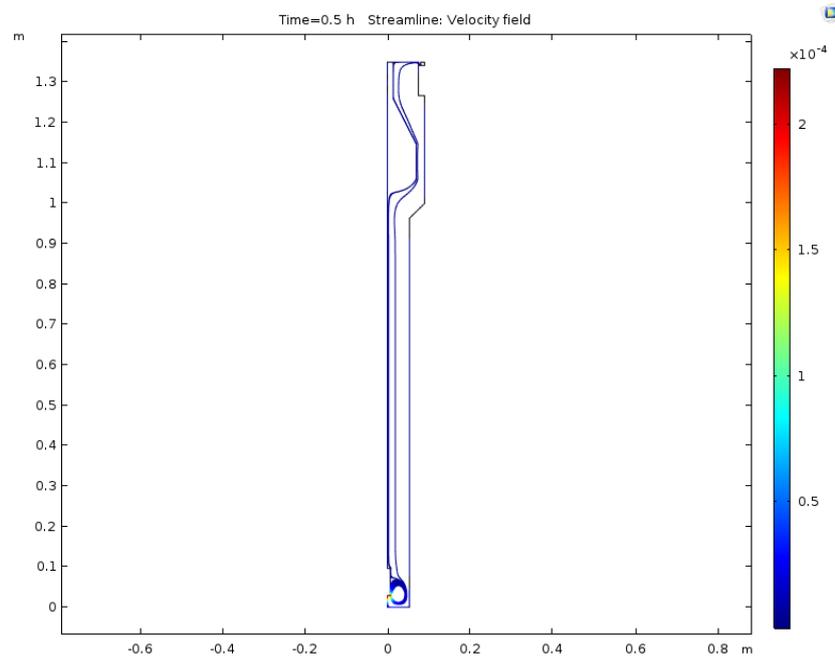
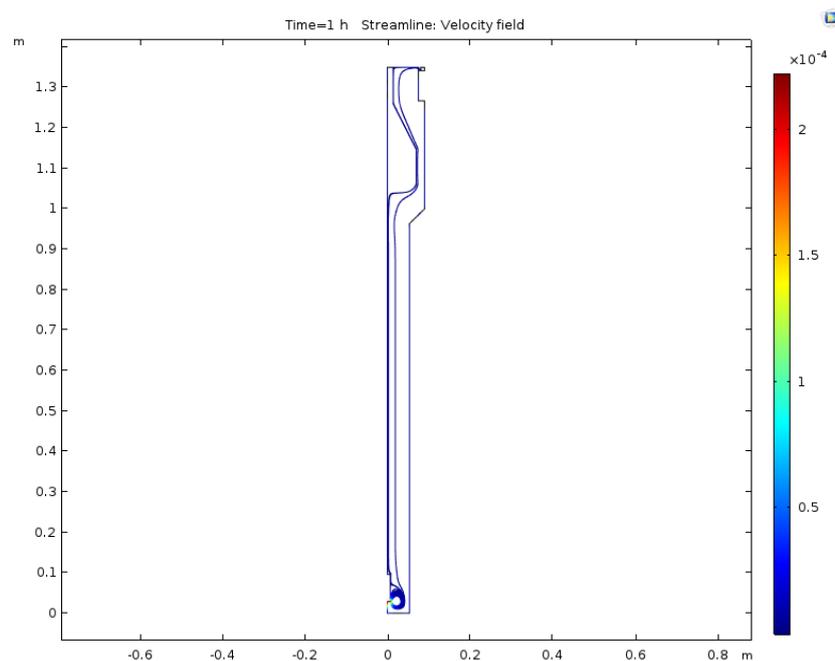


Figura 4 – Linhas de fluxo simuladas no modelo monofásico, tempo  $t = 0$  h



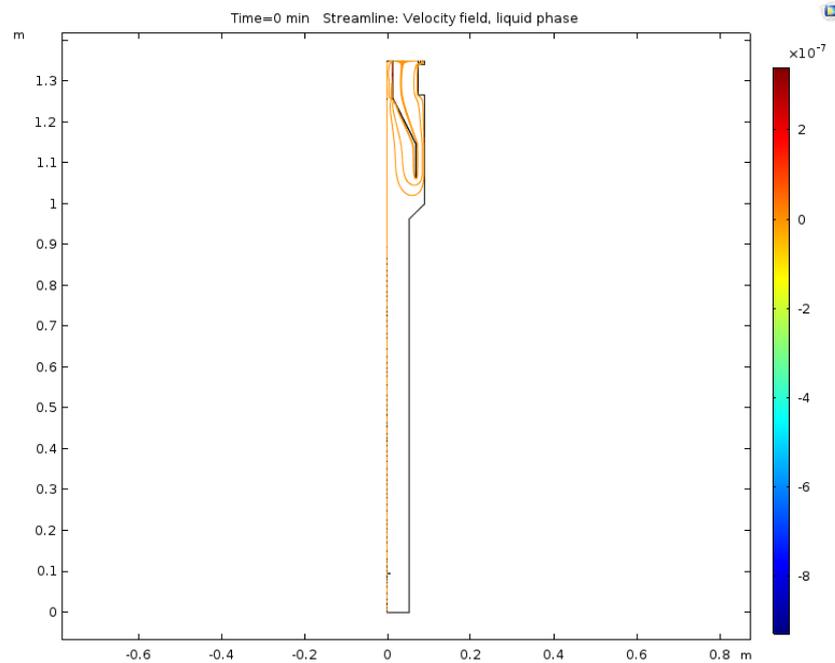
**Figura 5 – Linhas de fluxo simuladas no modelo monofásico, tempo = 0,5 h**



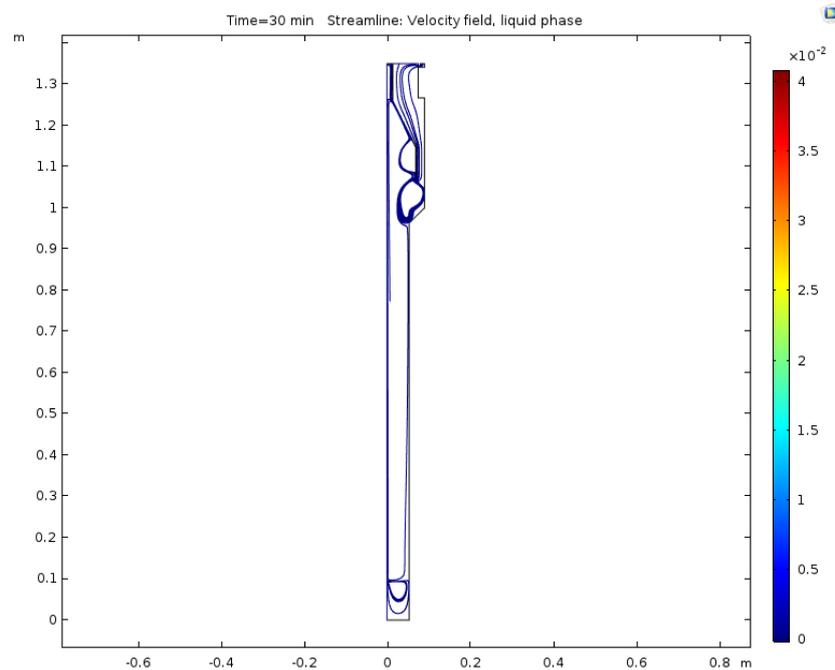
**Figura 6 – Linhas de fluxo simuladas no modelo monofásico, tempo = 1 h**

É visível a tendência laminar do fluxo na seção intermediária no reator, além do turbilhão formado na entrada, o qual auxilia na turbulência do fluxo, e a tendência do fluxo de percorrer a seção exterior do separador trifásico a medida que se desenvolve, o que suporta a alta eficiência esperada nas suas aplicações. A perda de velocidade maior é percebida próxima à entrada de fluido, sendo pouco perceptível nas outras seções do reator.

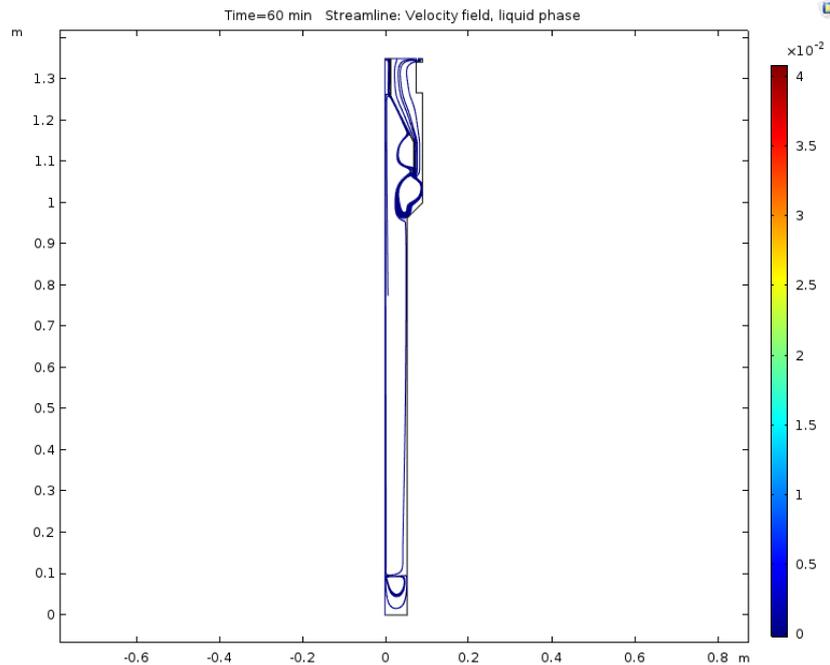
Seguem os resultados da simulação multifásica, a qual tem entrada de ar no reator:



**Figura 7 – Linhas de fluxo bifásico para tempo  $t = 0$  h**

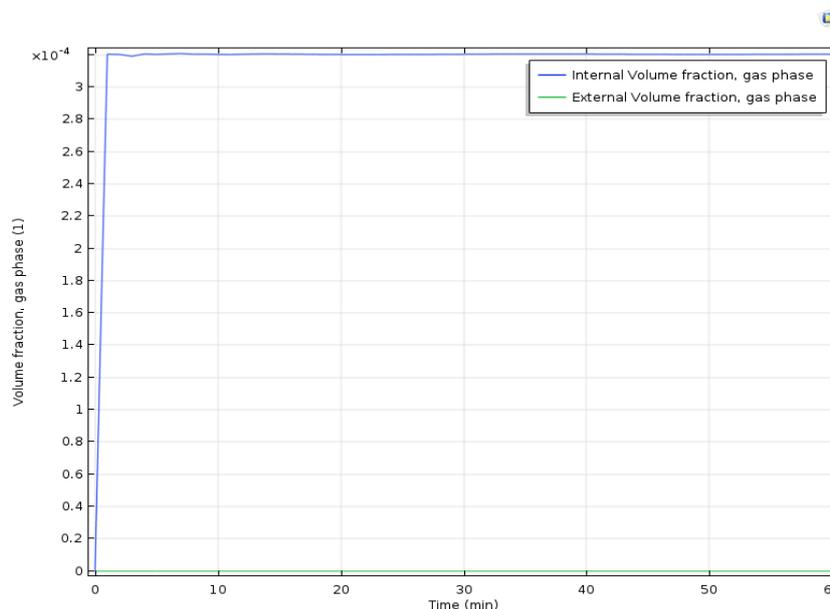


**Figura 8 – Linhas de fluxo bifásico para tempo  $t = 0,5$  h**



**Figura 9 – Linhas de fluxo bifásico para tempo  $t = 1h$**

Evidenciou-se o aumento da turbulência na região entre o costado do reator e a seção inferior do separador trifásico, mesmo tendo sido aplicado um modelo laminar para o transporte do fluido e da fase gasosa, além da diferença da formação do turbilhão na região próxima da entrada, tendo o efeito do arraste das bolhas alterando o comportamento do fluxo nas proximidades. Foi possível estimar a eficiência da separação das fases do reator por meio da análise das frações volumétricas de saída de gás nas seções interna e externa ao separador. Os valores obtidos seguem no gráfico abaixo:



**Figura 10 – Frações volumétricas do gás nas seções interna e externa do separador trifásico**

O gráfico nos permite observar a alta eficiência do equipamento na separação das fases, resultando em valores próximos do zero na seção exterior avaliada.

## CONCLUSÕES

A geometria proposta para o reator UASB se mostrou altamente eficiente na operação proposta, aproveitando-se do fluxo proporcionado para gerar elementos de turbulência nas regiões inferiores do reator e alta taxa de separação entre as fases líquida e gasosa. Tais efeitos são acentuados pela cinética reacional, a qual proporciona a entrada de gás no sistema de maneira dispersa e gradual, gerando a flutuação de particulados da fase sólida (não abordada nesse estudo), característica essencial para a atuação dos micro-organismos produtores de metano. A estimativa do fluxo pela técnica computacional demonstra-se essencial para a otimização geométrica do equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHIEN, Kuei-yuan. *Predictions of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model*. **Aiaa Journal**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.33-38, jan. 1982. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
2. COMSOL *Multiphysics*® v. 5.3. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
3. HADAMARD, J.S. *Slow permanent motion of a viscous liquid sphere in a viscous fluid*. **CR Acad. Sci.** 1911;152:1735-1738.
4. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. ed. New York: Mcgraw-hill Companies, Inc., 2003.
5. RYBCZYNSKI, W. *On the translatory motion of a fluid sphere in a viscous medium*. **Bull. Acad. Sci., Cracow, Series A**. 1911;40.