

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM LAGOAS FACULTATIVAS COM CHICANAS

*Computer simulation of hydrodynamic behavior in optional ponds with baffling*

Vinicius Alexandre Sikora Souza<sup>1</sup>, Alyne Foschiani Helbel<sup>2</sup>, Johannes Gerson Janzen<sup>3</sup>, Rafael Henrique Serafim Dias<sup>4</sup>, Harrison Cesar de Souza Coltre<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, E-mail: vass1000@hotmail.com

<sup>2</sup>Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Rondônia, E-mail: foschiani\_jp@hotmail.com

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo, professor da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, E-mail: johannesjanzen@gmail.com

<sup>4</sup>Engenheiro Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, E-mail: raffaeldias17@hotmail.com

<sup>5</sup>Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, E-mail: harrison\_sc@hotmail.com

### RESUMO

Lagoas facultativas são extensivamente utilizadas para o tratamento de esgoto no Brasil. Apesar da compreensão da hidráulica de lagoas de estabilização ser importante para sua otimização, não há uma claro entendimento do comportamento do escoamento em seu interior. O objetivo deste estudo é utilizar a ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para simular lagoas facultativas com diferentes configurações, incluindo chicanas. As seguintes conclusões podem ser extraídas depois da comparação dos resultados: (1) o escoamento para a configuração sem chicanas é caracterizado por altos níveis de curto-circuito e grandes regiões de recirculação; (2) o uso de chicanas cria escoamentos nas lagoas, que reduz os curtos-circuitos e as regiões de recirculação. Particularmente, os resultados mostram que lagoas com duas chicanas longitudinais são mais efetivas em termos de comportamento hidrodinâmico, pois o uso de chicanas cria campos de escoamento com volumes significativos de “fluxo de pistão” e as regiões com velocidades extremamente baixas são significativamente reduzidas.

**Palavras-chave:** lagoas facultativas; chicanas; comportamento hidrodinâmico; hidráulica.

### ABSTRACT

Wastewater facultative ponds are used extensively to provide wastewater treatment in Brazil. While understanding the hydraulics of facultative ponds is critical to their optimization, there is a poor understanding of the behavior of the flow that exists within them. The objective of this study is to apply Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling on waste stabilization ponds with many configurations including baffling. From the comparison of the results the following conclusions were drawn: (1) the flow for the geometry without baffles was characterized by high levels of short-circuiting and large re-circulation regions; (2) the use of baffles creates flow fields in the tanks which reduce short-circuiting and the re-circulating regions. Particularly, the results show that ponds with two longitudinal baffles are more effective in terms of hydrodynamic behavior because the use of baffles creates flow fields with significant volumes of “plug flow” and the regions with very low velocities are significantly diminished.

**Keywords:** facultative ponds; baffling; hydrodynamic behavior; hydraulics.

### 1 – INTRODUÇÃO

O tratamento de esgotos domésticos, segundo Matsumoto e Takeuti (2002) consiste basicamente na modificação de suas características físico-químicas e biológicas, de tal forma que possam ser lançados em corpos receptores dentro dos padrões exigidos pelos órgãos de controle de poluição ambiental ou ainda serem reutilizados. Dentre as várias tecnologias de tratamento de esgotos disponíveis, no Brasil tem-se usado amplamente as lagoas de estabilização tendo em vista sua simplicidade e eficiência e as condições climáticas favoráveis, além disso, autores como Wood *et al.* (1996) e Fonseca (2005), destacam que tal método de tratamento possui baixo custo de construção e operação. Segundo Olijnyk *et al.* (2007), a lagoa facultativa é a variante mais simples dos sistemas de lagoas de estabilização. Basicamente, o processo consiste na retenção dos esgotos por um período de tempo longo o

suficiente para que os processos naturais de estabilização da matéria orgânica se desenvolvam. As vantagens deste processo de tratamento relacionam-se à simplicidade e à confiabilidade de operação, pois não há necessidade de equipamentos ou aparatos especiais.

Embora os sistemas de tratamento por lagoas de estabilização facultativas sejam frequentemente denominados como sendo de baixa tecnologia (*low tech*), Shilton (2001) ressalta que os processos físicos, químicos e biológicos, envolvidos no tratamento e estabilização da matéria orgânica são tão complexos como nos demais sistemas de tratamento. Entre os processos físicos mais complexos e importantes encontra-se a hidráulica da lagoa (TORRES *et al.*, 1999; ABBAS, NASR e SEIF, 2006).

Com relação ao comportamento hidráulico podem ocorrer dois regimes ideais de escoamento na lagoa: mistura completa e fluxo em pistão. O escoamento de mistura completa ocorre quando as partículas introduzidas

na lagoa se misturam instantaneamente com as partículas já existentes na lagoa de tal forma a produzir uma mistura uniforme ao longo da lagoa. Quaisquer partículas que saem da lagoa possuem a mesma composição das partículas existentes no interior da lagoa. No escoamento de fluxo em pistão as partículas que entram na lagoa não se misturam com quaisquer outras partículas já existentes no interior da lagoa e as partículas que entraram primeiro são também as primeiras a saírem da lagoa.

Na maioria dos projetos de lagoas, assume-se que o padrão de escoamento é ideal, não sendo consideradas as reais características hidrodinâmicas da lagoa. Uma vez que a eficiência do tratamento depende do regime de escoamento real na lagoa (e não ideal), o projeto de lagoas não pode ser bem sucedido a não ser que informações realísticas da hidráulica da lagoa sejam fornecidas. Para lagoas já existentes a informação da hidráulica pode ser obtida via experimentos, uma tarefa difícil, cara e demorada, a qual na maioria das situações não é realizada.

As características do escoamento podem ser obtidas por meio do emprego da ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD é uma ferramenta computacional utilizada para resolver as equações de conservação de massa, calor e quantidade de movimento utilizando técnicas numéricas, permitindo o estudo combinado das diversas variáveis que influenciam o comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização. Vale a pena destacar que recentemente diversos estudiosos têm empregado a ferramenta CFD para o estudo do comportamento hidrodinâmico interno em lagoas de estabilização e a sua influência sobre outros processos, dentre os quais podem ser citados Wood *et al.*, (1996), Shilton (2001), Shilton e Mara (2005), Banda, Sleight e Mara (2006), Olukanni e Ducoste (2011), Alvarado *et al.* (2012) e Francener *et al.* (2012).

Neste estudo é empregada a ferramenta CFD para avaliar a influência de diferentes configurações de chicanas no comportamento hidrodinâmico de lagoas facultativas. Inicialmente, os cálculos são realizados para uma geometria simples, sem a presença de chicanas. Então, diversas modificações são realizadas por meio da inserção de chicanas, uma solução comum, simples e barata. Os resultados são comparados qualitativamente. Finalmente, a geometria modifica que apresentou a melhor eficiência hidráulica (regime de escoamento próximo do fluxo de pistão, com poucas zonas mortas e curtos-circuitos) é proposta para implementação em lagoas reais.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados e os procedimentos empregados na realização do trabalho estão descritos nas seções a seguir.

### 2.1 Geometrias das lagoas

A Figura 1 apresenta a geometria das lagoas estudadas no presente estudo. Foram elaborados seis modelos apresentando variações no número e disposição de chicanas e configuração de entrada e saída. A primeira lagoa (lagoa comum) possui dispositivo de entrada e saída

no centro da lagoa e não possui chicanas. As Lagoas A, B e C apresentam uma, duas e três chicanas transversais, respectivamente. As Lagoas D e E possuem chicanas longitudinais. A Lagoa D possui apenas uma chicana e entrada e saída no mesmo lado. A Lagoa E possui duas chicanas e entrada e saída em lados opostos.

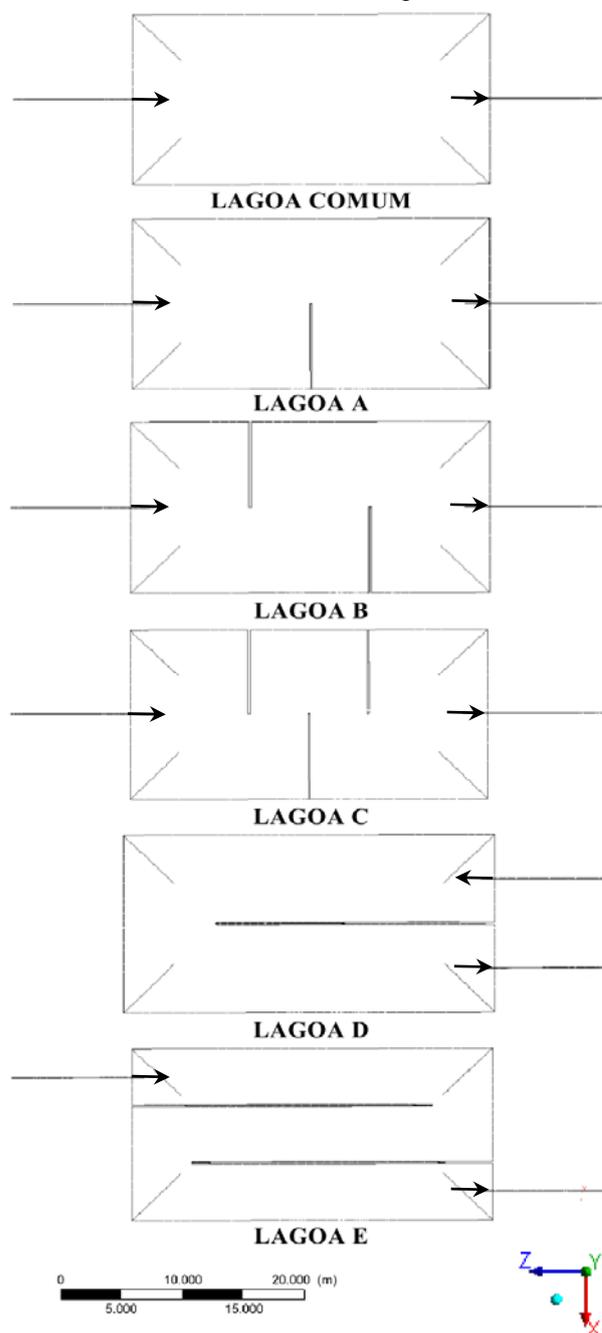


Figura 1 – Vista superior da geometria com variação de dispositivos

Para o dimensionamento das lagoas, foram atendidas as especificações de projeto sugeridas na literatura. Para o tempo de detenção hidráulica (TDH) teórico foi adotado o valor de 15 dias, pois segundo Von Sperling (2002) esse TDH é típico para lagoas facultativas, dado que segundo o autor encontra-se variando de 15 a 45 dias. A vazão foi considerada igual a  $0,372 \text{ L.s}^{-1}$ .

As lagoas possuem 30 m de comprimento (L) e 15 m de largura (B),  $L/B = 2$ , e profundidade de 2 m. Von Sperling (2002) ressalta que, para lagoas facultativas, a relação  $L/B$  varia entre 2 e 4 e a profundidade varia entre 1,5 a 3,0 m. Para o talude externo, foi adotada uma inclinação de  $26^\circ$ , de forma a atender a recomendação de Silva Filho (2007), que sugere uma inclinação entre  $18^\circ$  e  $26^\circ$ .

O formato retangular adotado para a área superficial da lagoa se deve ao fato de Silva Filho (2007) ressaltar que esta apresenta melhor eficiência em relação às suas características hidráulicas quando comparada a outras geometrias, no que diz respeito ao número de dispersão e existência de zonas mortas.

As lagoas possuem somente uma entrada afogada (para que não cause zonas mortas nas extremidades confluentes dos reatores), seguindo recomendações de Von Sperling (2002) e Silva Filho (2007).

## 2.2 Simulação computacional

As simulações computacionais foram realizadas utilizando a ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD é uma ferramenta que utiliza métodos numéricos e algoritmos para solucionar numericamente as equações discretizadas da conservação da quantidade de movimento, de massa e energia, nas três dimensões. Com a ferramenta CFD é possível obter resultados com detalhamento quase ilimitado, de forma não intrusiva, reduzindo substancialmente o tempo e os custos quando comparados com métodos convencionais. Segundo Nakamura *et al.* (2003), a simulação computacional de um sistema (neste caso, lagoas facultativas) permite a avaliação de um maior número de variações do projeto, com custos e tempo menores, reduzindo a necessidade de construção de protótipos. A simulação com CFD, portanto, auxiliam a compreender a natureza dos fenômenos que ocorrem em lagoas facultativas. No entanto, deve-se salientar que embora os experimentos usando CFD ofereçam diversas vantagens, o uso de técnicas experimentais é de extrema importância na análise de problemas. Isto porque, mesmo que um caso simulado resulte em dados coerentes do ponto de vista numérico, facilmente pode-se tratar de um resultado inconsistente com a realidade; ou então, mesmo que fisicamente correto, pode apresentar alguma divergência percebidas apenas quando comparando com dados reais.

Diversos pesquisadores têm empregado a simulação computacional para desenvolver soluções para problemas da temática de engenharia ambiental. Podem ser citados como exemplos: sedimentação em estruturas do sistema de esgoto (ADAMSSON, STOVIN e BERGDAHL, 2003), mistura em reservatórios de armazenamento de água (STAMOU, 2008), dispersão do óleo em rios (DOĞRUL, ARIKAN e ÇELIK, 2011), escoamento em colunas de borbulhamento (JOSHI, 2001).

Neste estudo foi utilizado o pacote comercial multipropósito ANSYS CFX desenvolvido pela ANSYS Inc. Atualmente, o ANSYS CFX é o principal programa computacional de CFD utilizado na América do Sul. O

pacote CFX é um conjunto de programas voltados para a área de CFD de uso geral, sendo utilizado com comprovada eficiência na solução de problemas de escoamentos na engenharia. O pacote combina um solver avançado com pré e pós-processadores.

A aplicação de CFD (e, conseqüentemente, do pacote CFX) segue os seguintes passos:

- Definição do domínio da lagoa. O domínio da lagoa é desenhado. Neste caso, o domínio foi confeccionado por meio do programa computacional AutoCAD.
- Discretização do domínio e geração da malha. O domínio é dividido em pontos de aplicação das equações para obtenção das soluções numéricas. O conjunto de pontos discretos é denominado de malha (PINHEIRO *et al.*, 2008). Na Tabela 1, estão especificados os dados das malhas que foram confeccionadas. Todas as malhas são constituídas por elementos tetraédricos e possuem número total de nós e de elementos da ordem de, respectivamente,  $10^4$  e  $10^5$ . O tipo de bloco (tetraedro) e o número de elementos foram escolhidos após a realização de testes para assegurar resultados representativos e independentes da malha. Para a geração da malha foi utilizado o programa computacional DesignModeler.

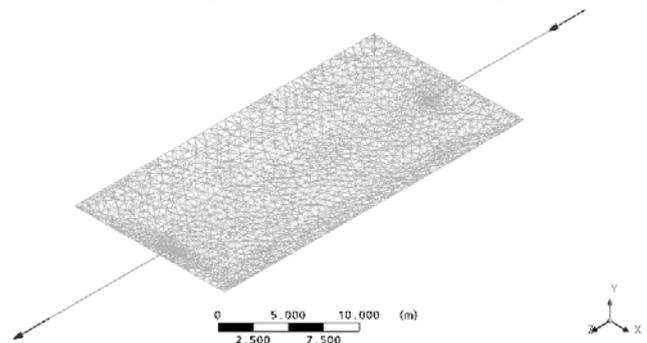


Figura 2 – Malha computacional 3D do reator

Tabela 1 – Elementos estruturais da lagoa

Lagoas	Dispositivos	Nós	Número de Tetraedros
Comum	Sem chicana	13180	37015
A	Com 1 chicana transversal	14445	41892
B	Com 2 chicanas transversais	14969	43801
C	Com 3 chicanas transversais	15251	44483
D	Com 1 chicana longitudinal	19064	59324
E	Com 2 chicanas longitudinais	15445	44051

- Introdução das condições para resolução das equações. Após a geração da malha, foram introduzidas as condições de contorno necessárias para resolução das equações (quinto passo). Essas condições de contorno, ao lado das propriedades físicas do fluido e dos parâmetros do escoamento

especificam o problema a ser tratado. Neste passo também foi definido que o regime de escoamento das lagoas é permanente. Ademais, as paredes da lagoa foram consideradas hidraulicamente lisas, isto é, a rugosidade das paredes encontra-se completamente coberta pela subcamada limite laminar não alcançando o núcleo turbulento. E, finalmente, o modelo de turbulência empregado nas simulações foi o *k-epsilon*, o qual resolve duas equações de transporte: energia cinética turbulenta, *k*, e taxa de dissipação de energia,  $\epsilon$ . O modelo *k-epsilon* tem apresentado bons resultados para diversas áreas de aplicação (SHILTON, 2001). Ressalta-se que as condições adotadas no presente estudo foram às mesmas adotadas por Shilton (2001), o qual validou os seus resultados CFD com resultados obtidos em laboratório. Para introduzir as condições necessárias para resolução das equações foi utilizado o programa computacional CFX-Pre.

– Resolução das equações. Para resolução das equações, utilizando as condições estabelecidas no passo anterior, foi utilizado o programa computacional CFX-Solver.

– Visualização dos resultados. Os resultados obtidos são visualizados por meio de gráficos no programa CFX-Post.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações computacionais.

#### 3.1 Análise qualitativa

As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, os mapas de contorno do módulo da velocidade e os campos de velocidade com suas direções de fluxo para as lagoas simuladas. Os planos apresentados nas Figuras 3 e 4 são para metade da profundidade da lagoa, isto é,  $y = 1$  m ( $y$  é a direção vertical, ao longo da profundidade). As coordenadas  $x$  e  $z$  estão, respectivamente, paralelamente a largura e do comprimento da lagoa. Nas figuras as regiões de coloração azulada são as que possuem as menores velocidades de escoamento e a coloração vermelho-alaranjado indica áreas de maior velocidade do fluxo. As regiões de baixa velocidade (usualmente com a coloração azul) são regiões em que há uma redução de velocidade do escoamento e, por conseguinte, favoráveis à sedimentação. Nota-se que usualmente na entrada das lagoas há a existência dessas regiões, o que, de fato, é usualmente encontrado em sistemas similares aos estudados no presente estudo (TEIXEIRA, 1995).

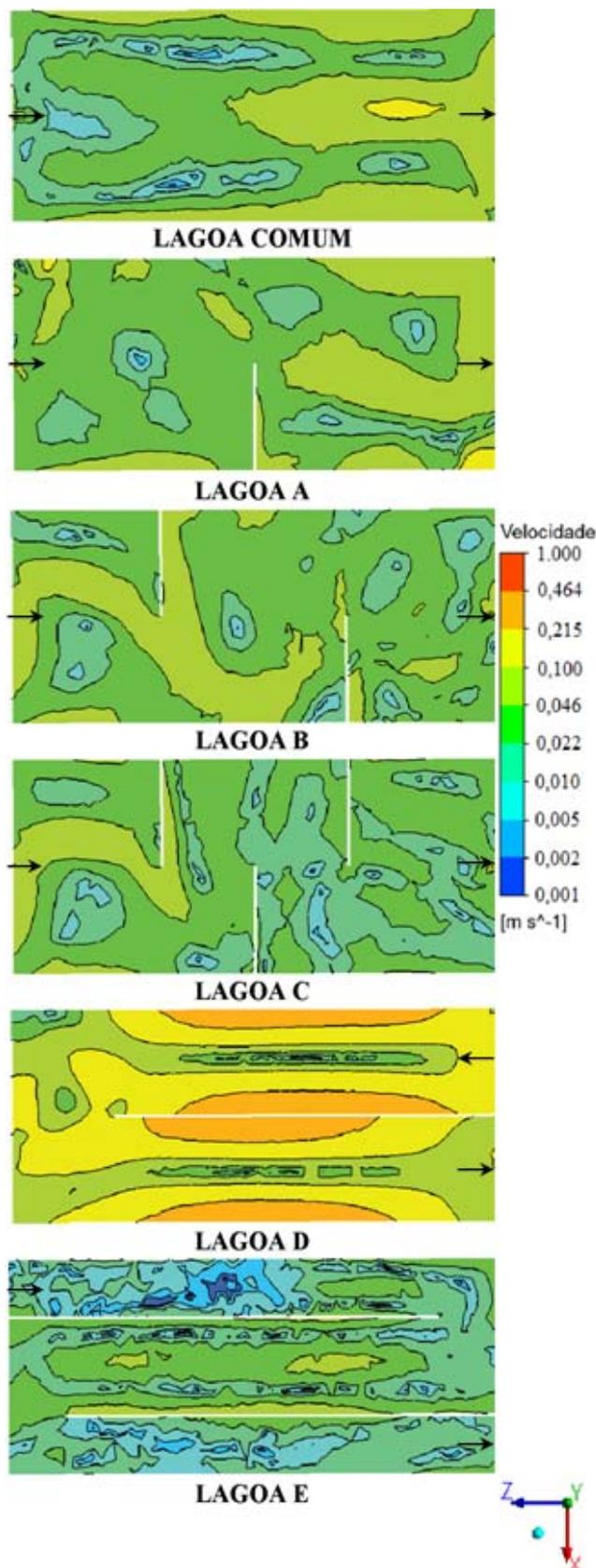


Figura 3 – Mapas de contorno do módulo da velocidade para o plano da metade da profundidade da lagoa

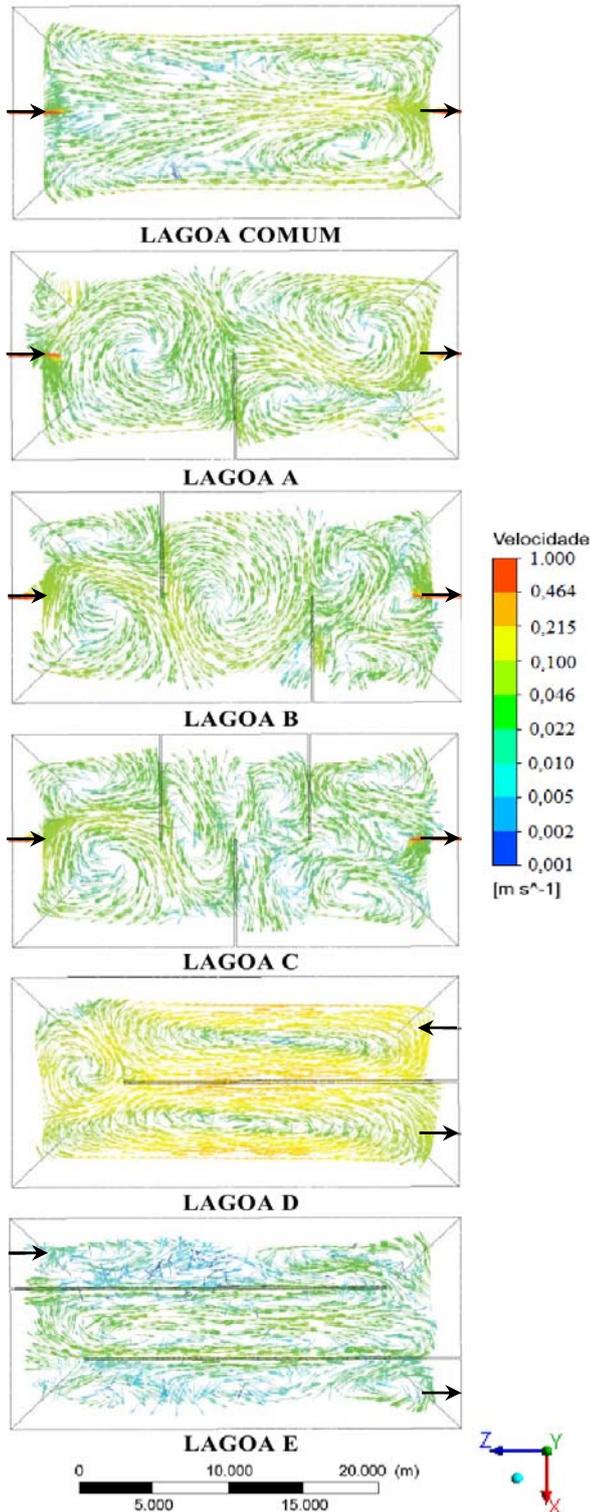


Figura 4 – Vetores da direção do fluxo

Os resultados para as seis lagoas estudadas são sumarizados a seguir.

### 3.1.1 Lagoa comum

A Figura 5 apresenta as linhas de corrente para Lagoa Comum. Nota-se nas Figuras 3 e 4, a existência de zonas mortas, regiões de circulação contracorrente, à esquerda e à direita da entrada da lagoa. As regiões de circulação são

também conhecidas como zonas mortas. Para Teixeira (1995), as zonas mortas são regiões em que os tempos de permanência de partículas do líquido no seu interior são, em média, relativamente altos, quando comparados ao valor do tempo teórico de detenção hidráulica. Nas regiões de circulação são encontradas velocidades extremamente baixas que favorecem a sedimentação. No centro da Lagoa Comum (coincidindo com a posição da entrada e da saída da lagoa), ocorre um curto-circuito (*bypassing*) da entrada para a saída. Isto é, o tempo de permanência das partículas que “caminham sob o curto-circuito” é, em média, relativamente baixo, quando comparado ao tempo de detenção hidráulica médio da Lagoa Comum. O padrão de escoamento encontrado é similar ao de Shilton (2001) e é o usualmente esperado quando a entrada e a saída estão posicionadas no meio da “largura” da lagoa.

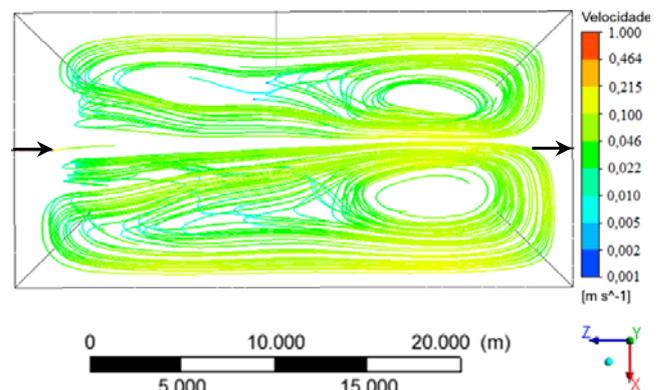


Figura 5 – Linhas de corrente na Lagoa Comum para metade da profundidade da lagoa

### 3.1.2 Lagoas A, B e C

Nas Lagoas A, B e C também é possível observar zonas mortas. As zonas mortas impedem o bom funcionamento da lagoa (vide Figuras 3 e 4). De forma geral, o aumento do número de chicanas gera o aumento de zonas de circulação, fazendo com que isto amplifique o número de vórtices. Os centros dos vórtices possuem velocidades baixas, sendo regiões propícias para ocorrer sedimentação. Apesar do aumento do número de zonas mortas, a magnitude espacial das zonas mortas é menor quando comparadas à Lagoa A. Ademais, o fluxo apresenta um comportamento com velocidades mais homogêneas.

### 3.1.3 Lagoa D

Na lagoa D, observam-se velocidades mais altas quando comparada com as outras lagoas (ver Figuras 3, 4 e 6). Dessa forma, a introdução da chicana longitudinal associado à mudança da configuração de entrada e saída, “acelerou” o escoamento. As zonas de recirculação, por exemplo, apresentaram o centro do vórtice com velocidades superiores aos outros modelos. Esta lagoa também mostrou velocidades bem próximas à sua velocidade média. Por conseguinte, destacam Matsumoto e Takeuti (2002) que o fluxo é mais “pistonado”, não havendo mistura completa. Levando-se em consideração apenas a variável velocidade, pode-se dizer que a lagoa

com apenas uma chicana longitudinal (Lagoa D) deve apresentar um desempenho superior em relação às demais configurações, pois a incidência de zonas mortas é menor, resultando em um TDH real mais próximo do teórico.

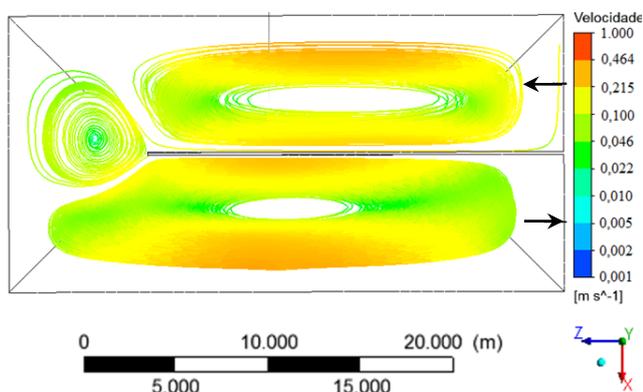


Figura 6 – Linhas de corrente na Lagoa D (com chicana longitudinal) para metade da profundidade da lagoa

### 3.1.4 Lagoa E

A Lagoa E apresenta o maior número de vórtices, cujos centros possuem velocidades próximas à zero (Figuras 3 e 4). A Lagoa E possui o maior número de zonas mortas, indicando dessa forma que o estreitamento gerado por esta configuração de chicanas provoca o choque entre os fluidos re-circulantes e os incidentes da entrada, ocasionando a desaceleração dos mesmos.

### 3.2 Percentuais de incidências de zonas com velocidade baixa

A Tabela 2 apresenta o percentual de áreas com velocidades extremamente baixas. Neste estudo, foi considerado que velocidade baixa é aquela inferior a  $1 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ . Este valor representa 1% da velocidade de entrada. Conforme já dito, as velocidades baixas são regiões propícias para sedimentação.

Nota-se que a presença de chicanas diminui a porcentagem de velocidade baixa para as Lagoas A, B, C e D quando comparada à Lagoa Comum, e aumenta para a Lagoa E. As lagoas A e D, que possuem uma chicana em sua configuração, apresentaram menor incidência de zonas com velocidades abaixo de  $1 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ . Interessantemente o aumento do número de chicanas, nas Lagoas B e C, provocou um aumento das zonas de baixa velocidade quando comparada com a Lagoa A. Entretanto, o espaço ocupado pelas baixas velocidades nas lagoas A a D possui aproximadamente a mesma ordem de grandeza.

Tabela 2 – Percentual de áreas com velocidade extremamente baixa ( $1 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ )

Lagoa	Área com velocidade baixa (%)
Lagoa comum	4,09
Lagoa A	0,61
Lagoa B	1,31
Lagoa C	2,94
Lagoa D	0,03
Lagoa E	23,89

Verifica-se também que o modelo D apresenta a menor magnitude de campos com velocidade baixa, indicando desta forma que a configuração de entrada e saída, aliadas à introdução de chicanas, apresenta influência direta na eficiência hidrodinâmica de uma lagoa. Pode-se dizer que para as lagoas investigadas no presente estudo, a lagoa D foi a que apresentou o fluxo mais pistonado e o menor índice de zonas com baixas velocidades.

## 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Lagoas de estabilização de esgotos são extensivamente utilizadas para o tratamento de esgoto no Brasil. Para aumentar a eficiência de tratamento das lagoas é necessário ter um maior entendimento dos processos que ocorrem em seu interior, particularmente do comportamento hidrodinâmico. A maioria das pesquisas do comportamento hidrodinâmico tem usado o método dos traçadores. Essa técnica trata essencialmente a lagoa como se fosse uma “caixa-preta”, fornecendo conhecimento muito limitado do comportamento hidrodinâmico que ocorre no interior da lagoa. Nos estudos com traçadores, praticamente todos os pesquisadores tem identificado a existência de curtos-circuitos e zonas mortas. Entretanto, por meio do uso de CFD é possível visualizar a existência das zonas de mortas e curtos-circuitos que são intrínsecos a maioria das lagoas.

Neste estudo foi utilizada a ferramenta CFD para ampliar a compreensão da hidráulica de lagoas de estabilização com diferentes configurações incluindo chicanas. Os resultados mostram que lagoas com duas chicanas longitudinais são mais efetivas em termos de comportamento hidrodinâmico, no que se refere à geração de comportamentos mais homogêneos e minimização na presença de zonas com baixas velocidades. É importante destacar, entretanto, que as observações acima realizadas foram feitas de forma mais qualitativa, sendo necessária uma avaliação mais quantitativa, levando em consideração as outras variáveis envolvidas nesse sistema.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, H.; NASR, R.; SEIF, H. Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency. **Ecological Engineering**, v. 28, p. 25-34, 2006.
- ADAMSSON, A.; STOVIN, V.; BERGDAHL, L. Bed Shear Stress Boundary Condition for Storage Tank Sedimentation. **Journal of Environmental Engineering**. ASCE. p. 651-658, 2003.

- ALVARADO, A.; VEDANTAM, S.; GOETHALS, P.; NOPENS, I. A compartmental model to describe hydraulics in a full-scale waste stabilization pond. **Water Research**, v. 46, n. 2, p. 521-530, 2012.
- BANDA, C. G.; SLEIGH, P. A.; MARA, D. D. 3D-CFD modelling of E. coli removal in baffled primary facultative ponds: classical design optimization. In: IWA DOĞRUL, A; ARIKAN, Y; ÇELİK, F. A numerical investigation of multiphase flow and oil spill in Istanbul Strait. **Tojsat**, v. 1, n. 2, p. 8-15, 2011.
- FONSECA, P. W. **Avaliação do desempenho e caracterização de parâmetros em lagoas facultativas e de maturação**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- FRANCENER, S. F.; SOUZA, V. A. S.; PEREIRA, E. S.; BRUCHA, G.; SILVEIRA, A. Influência da hidrodinâmica no perfil de remoção de matéria orgânica em lagoa de estabilização anaeróbia da Amazônia Ocidental: estação de tratamento de esgoto sanitário do município de Cacoal RO. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 33, 2012, Salvador. **Anais...** Salvador: AIDIS, 2012.
- JOSHI, J. B. Computational flow modelling and design of bubble column reactors. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 5893-5933, 2001.
- MATSUMOTO, T.; TAKEUTI, M. R. S. Estudo da influência de chicanas na remoção de coliformes em lagoas de estabilização. In: CONGRESO DE LA ASOCIACION INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. **Anais...** Cancún: AIDIS, 2002.
- NAKAMURA, E. T., AUCAR JÚNIOR, J. J. M.; ZANOLLI, J. R.; MACHADO, W. V. Utilização de ferramentas CAD/CAE/CAM no desenvolvimento de produtos eletroeletrônicos: vantagens e desafios. **Revista T&C Amazônia**, Ano 1, n. 2, 2003.
- OLIJNYK, D. P.; BENTO, A. P.; PHILIPPI, L. S.; LAPOLLI, F. R. Distribuição vertical e nictimeral da comunidade fitoplanctônica em uma lagoa facultativa piloto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007. p. 1-8.
- OLUKANNI, D. O.; DUCOSTE, J. J. Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. **Ecological Engineering**, V. 37, n. 11, p. 1878-1888, 2011.
- PINHEIRO, L. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; SOUZA, L. R.; BILHALVA, J. S.; BRITO, D. C.; BRASIL JÚNIOR, A. C. P. Aplicação de simulação computacional à dispersão de poluentes no baixo rio Amazonas: Potenciais riscos à captação de água na Orla de Macapá-Amapá. **Revista Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v. 4, n. 7, 2008.
- SHILTON, A. **Studies into the hydraulics of waste stabilisation ponds**. Palmerston North: Massey University, 2001. Dissertation (Doctor of Philosophy in Environmental Engineering), Massey University, 2001. 280 p.
- SHILTON, A.; MARA, D.D. CFD (computational fluid dynamics) modelling of baffles for optimizing tropical waste stabilisation pond systems. **Water Science & Technology**, v. 51, n. 12, p. 103-106, 2005.
- SILVA FILHO, P. A. **Diagnóstico operacional de lagoas de estabilização**. Natal: UFRN, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007. 169 p.
- STAMOU, A. I. Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. **Chemical Engineering and Processing**, v. 47, p. 1179-1189, 2008.
- TEIXEIRA, E. C. Importância da hidrodinâmica de reatores na otimização de processos de desinfecção de águas de abastecimento: uma análise crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 18, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- TORRES J. J.; SOLER, A.; SÁEZ, J.; LEAL, L. M.; AGUILAR, M.I. Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPS in Spain. **Water Research**, vol. 33, n. 5, p. 1133-1140, 1999.
- VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. 2. ed., Belo Horizonte: DESA-UFGM, 2002.
- WOOD, M. G.; HOWES, T.; KELLER, J.; JOHNS, M. R. Two dimensional computational fluid dynamic models for waste stabilisation ponds. **Water Research**. v. 32, n. 3, p. 958-963, 1996.