

II-274 - OTIMIZAÇÃO DE LAGOAS DE ALTA TAXA VIA MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Carlos Adler Saraiva Paiva⁽¹⁾

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).

Taís Maria Nunes Carvalho⁽²⁾

Engenheira Ambiental pela UFC. Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela UFC.

André Bezerra dos Santos⁽³⁾

Engenheiro Civil pela UFC. Mestre em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pela UFC. Doutor em Saneamento Ambiental pela *Agricultural University - Wageningen*, Holanda.

Iran Eduardo Lima Neto⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela UFC. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos pela Universidade de Alberta, Canadá. Pós-doutorado pela Universidade de Cambridge, Inglaterra.

Silvano Porto Pereira⁽⁵⁾

Biólogo pela UFC. Mestre em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pela UFC. Doutor em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental) pela UFC. Gerente da GEPED/Cagece.

Endereço⁽¹⁾: 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

RESUMO

As lagoas de algas de alta taxa, *High Rate Algal Ponds (HRAP)*, podem ser utilizadas na produção de compostos de valor econômico, tratamento de efluentes e produção de biodiesel, dentre outras aplicações. A performance destas depende da mistura adequada a fim de que as algas recebam a radiação necessária para seu crescimento, não sedimentem e haja disponibilidade uniforme de nutrientes. O objetivo desse trabalho foi analisar a hidrodinâmica dessas lagoas a fim de se otimizar a eficiência e produção de biomassa algal. Para isso, foram realizadas simulações computacionais do fluido na lagoa, utilizando-se o modelo k- ϵ para examinar as características de turbulência. Foi analisado o comportamento hidrodinâmico em diferentes geometrias, inclusive com o uso de defletores, e o percentual de zonas mortas. Os modelos foram satisfatórios para analisar os efeitos hidrodinâmicos de diferentes aspectos geométricos e configurações de *HRAP*.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Dinâmica de Fluidos Computacional, CFD, Lagoa Algal de Alta Taxa, *High Rate Algal Ponds*, *HRAP*, Otimização, COMSOL Multiphysics.

INTRODUÇÃO

As lagoas de algas de alta taxa, *High Rate Algal Ponds (HRAP)*, têm sido usadas para o crescimento de algas para produção de nutracêuticos e tratamento de efluentes desde o final da década de 70 (LIFFMAN et al., 2013) e, mais recentemente, tem sido objeto de estudos visando a produção de biomassa algal para captura de CO₂ e transformação em biodiesel, com capacidade de produção de combustível estimada em 17.000 a 28.000 L/(ha.ano) (PUTT et al., 2011). Tipicamente, são construídas de canais, longos e rasos, em loop simples ou múltiplos com circulação promovida por impulsionadores mecânicos do tipo *paddle wheel* (Figura 1).

A radiação solar é a fonte de energia para a ocorrência de reações fotossintéticas que levam ao crescimento das algas e produção de substâncias com valor econômico, sendo o principal fator que determina a produtividade. Dessa forma, uma mistura adequada e uniforme na lagoa garante a exposição frequente das células algais à

radiação solar, homogeneiza os nutrientes, aumenta a utilização de CO_2 e evita a deposição das algas no fundo da lagoa (HADIYANTO et al., 2013).

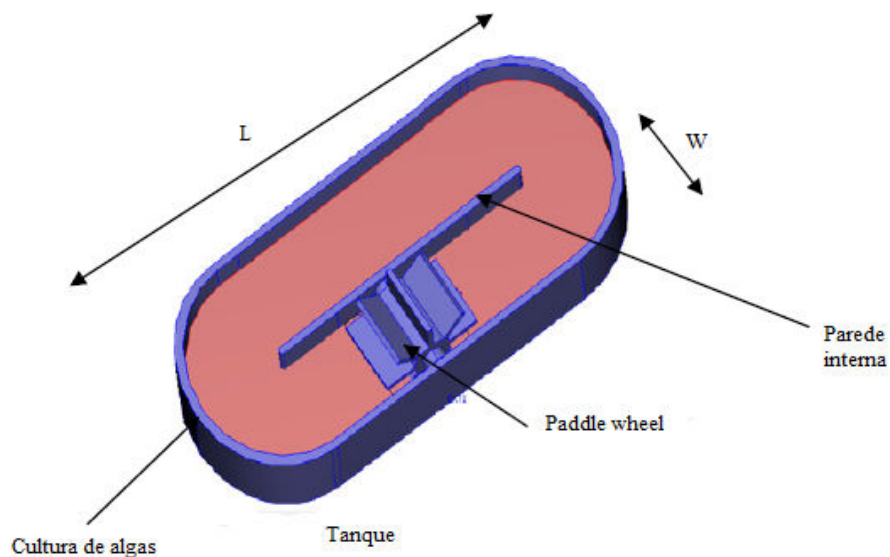


Figura 1: Lagoa de alga de alta taxa, *High Rate Algal Pond (HRAP)*.

O objetivo desse trabalho foi analisar a hidrodinâmica de lagoas de alta taxa utilizando mecânica dos fluidos computacional, a fim de se otimizar a produção de biomassa algal, seguindo as seguintes etapas:

- desenvolver modelos 2D e 3D para simulação do fluxo em lagoa de alta taxa com software COMSOL Multiphysics;
- avaliar a influência da geometria das lagoas de alta taxa, correlacionando parâmetros hidrodinâmicos com a produção de biomassa algal e eficiência energética do sistema;
- comparar modelos hidrodinâmicos com resultados encontrados na literatura.

MÉTODOS E MODELOS

O primeiro passo foi a definição das geometrias base das lagoas de alta taxa, para se validar com resultados experimentais. Malhas bidimensionais e tridimensionais foram geradas, como ilustrado na Figura 2.

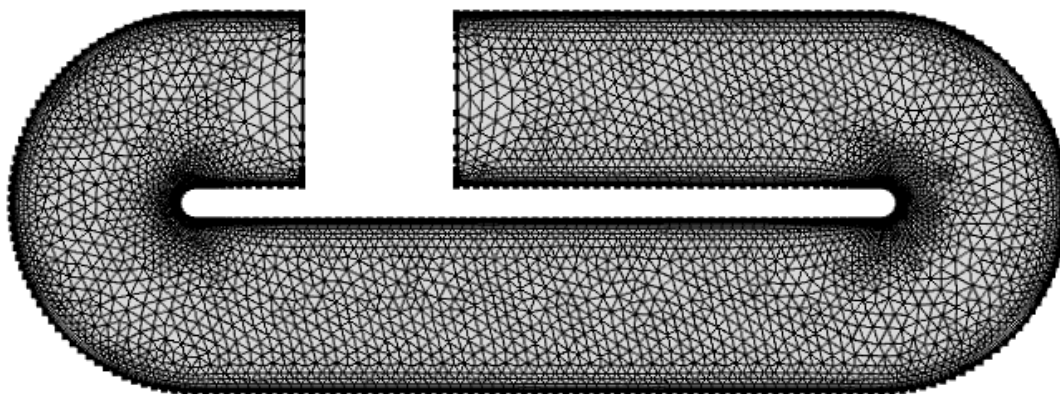


Figura 2: Malha bi-dimensional da lagoa de alta taxa

Os modelos foram simulados a partir de condições de contorno baseadas em resultados experimentais encontrados na literatura, considerando um sistema estacionário. O modelo k- ϵ foi usado para examinar as características de turbulência da lagoa e foi implementado usando-se o software comercial COMSOL Multiphysics 5.2.

Os modelos 2D e 3D foram comparados com as distribuições de velocidade apresentadas na literatura, a fim de se validar os modelos. Caso os resultados do modelo 2D sejam satisfatórios, o mesmo continuará a ser utilizado para avaliação dos efeitos das alterações geométricas da lagoa. Do contrário, somente os modelos 3D continuarão a ser utilizados.

Após a validação, aspectos geométricos das lagoas de alta taxa foram modificados, buscando-se mitigar a formação de zonas mortas. As zonas mortas foram estimadas com base em uma velocidade mínima de 0,1m/s, por se considerar essa como a velocidade limite para que as algas se sedimentem (WEISSMAN et al, 1988).

RESULTADOS OBTIDOS

O modelo bi-dimensional foi produzido com base nos parâmetros hidrodinâmicos de Hadiyanto et al (2012), e com a geometria de uma lagoa de alta em escala piloto existente na companhia de água e esgoto local, com comprimento total de 5 m, uma largura do canal igual a 1 m e uma parede interna de 0,2 m.

Realizou-se uma simulação estacionária com diferentes condições de contorno. O fluido foi considerado como incompressível e a turbulência foi incorporada por meio do modelo k- ϵ (LAUNDER; SPALDING, 1974).

Foram realizadas simulações considerando diferentes relações comprimento/largura (C/L), mantendo a mesma largura do canal: C/L = 5 (C = 5 m), C/L = 7 (C = 7 m) e C/L = 10 (C = 10 m). Dessa forma, foi possível avaliar o efeito da relação C/L no fluxo hidrodinâmico. O resultado para as simulações com velocidade de entrada igual a 0,3 m/s, realizadas para diferentes relações C/L pode ser visto nas Figura 3, 4 e 5.

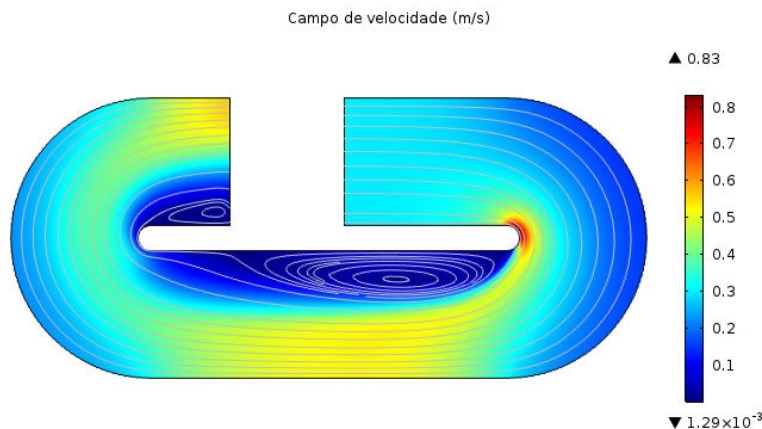


Figura 3: Simulação do campo de velocidade para C/L = 5, com velocidade superficial de 0.3 m/s

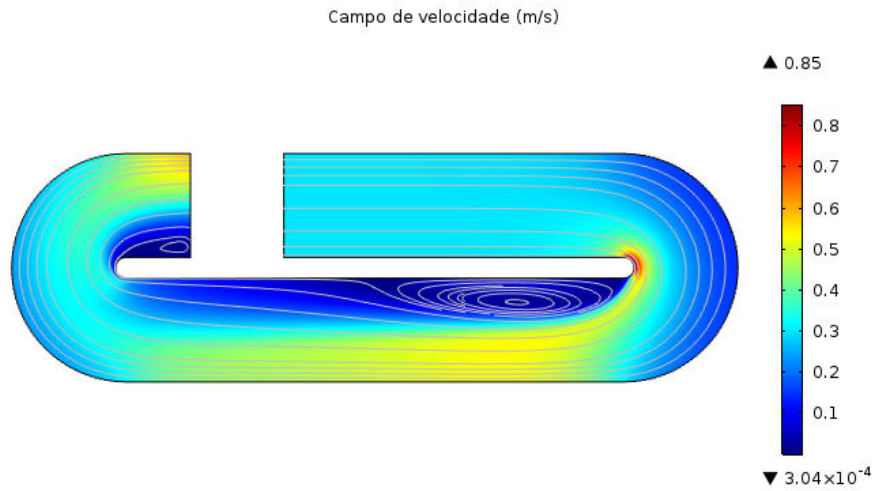


Figura 4: Simulação do campo de velocidade para $L/B = 7$, com velocidade superficial de 0.3 m/s

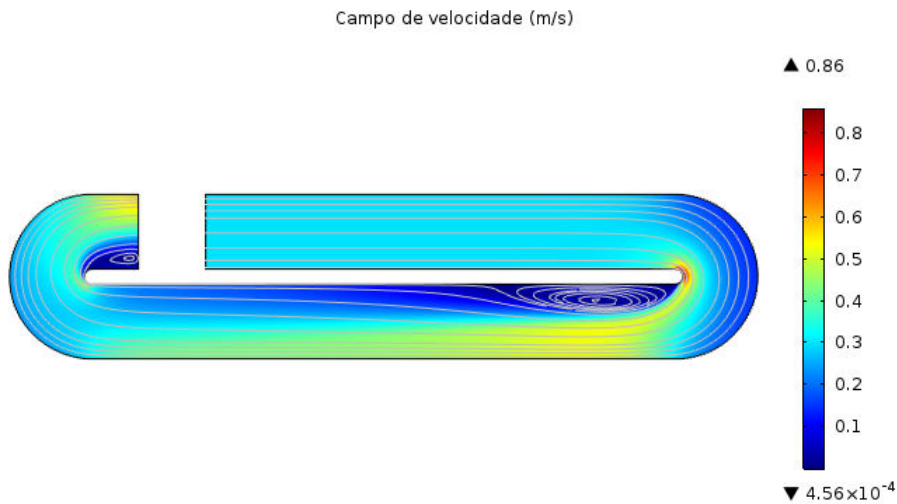


Figura 5: Simulação do campo de velocidade para $C/L = 10$, com velocidade superficial de 0.3 m/s

Também foram gerados modelos 3D, sob as mesmas condições e parâmetros, a fim de compará-los com as distribuições de velocidade apresentadas na literatura.

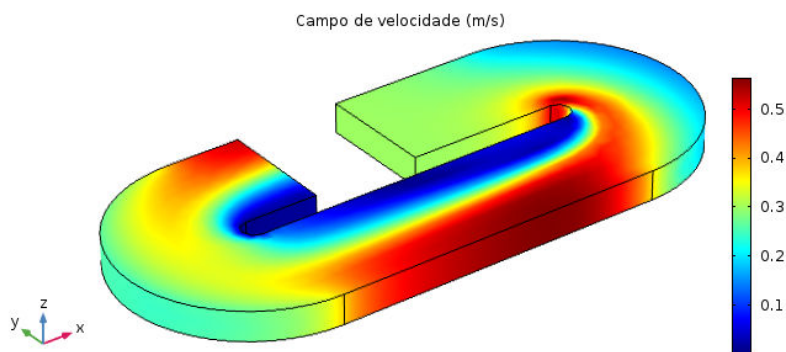


Figura 6: Simulação 3D do campo de velocidade para $C/L = 5$, com velocidade superficial de 0.3 m/s

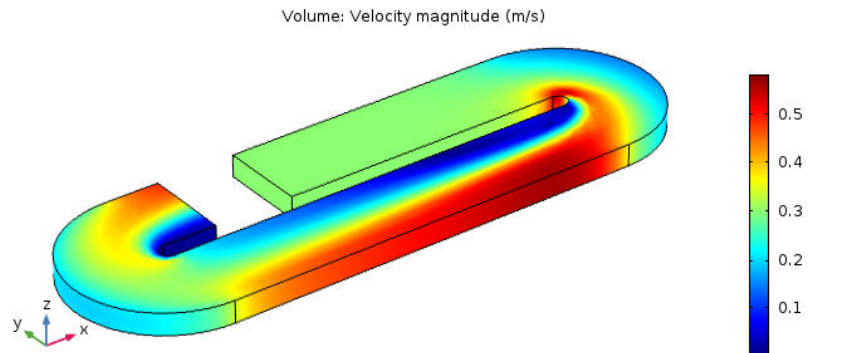


Figura 7: Simulação 3D do campo de velocidade para $C/L = 5$, com velocidade superficial de 0.3 m/s

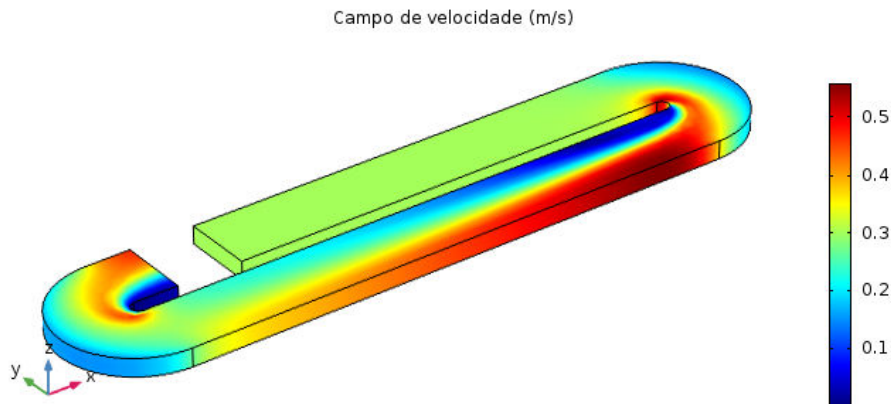


Figura 8: Simulação 3D do campo de velocidade para $C/L = 10$, com velocidade superficial de 0.3 m/s

Comparando-se a distribuição de velocidade com outros trabalhos (CHIARAMONTI et al, 2013; HAIYANTO et al, 2013; LIFFMAN et al, 2013), percebe-se de forma qualitativa que o modelo foi capaz reproduzir os resultados esperados, formando uma camada de fluido mais lento próximo à parede interna e mais acelerado na parede externa.

A Figura 9 apresenta o perfil de velocidade no ponto médio do canal de retorno ($L/2$) para três diferentes lagoas, considerando uma velocidade superficial de 0,3 m/s. Percebe-se que próximo a parede central as velocidades são menores em comparação com a parede lateral da lagoa. Além disso, para relações C/L mais altas, a velocidade varia de maneira mais uniforme (menor inclinação da curva do perfil de velocidade).

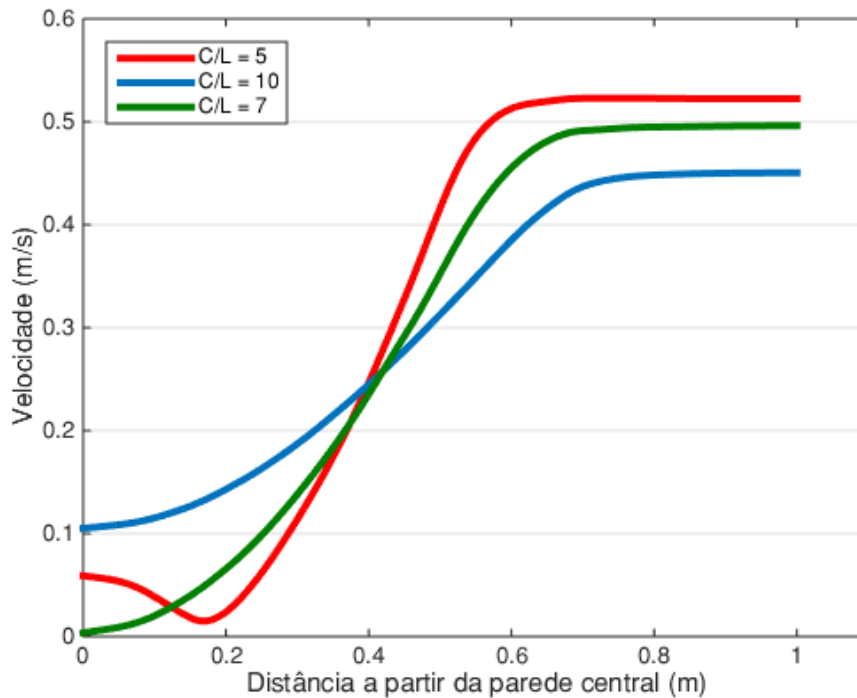


Figura 9: Perfil de velocidade no ponto médio do canal de retorno para diferentes relações C/L, com velocidade superficial de 0.3 m/s

ZONAS MORTAS

Para quantificar as zonas mortas no interior da lagoa, foi considerado que a menor velocidade de líquido necessária para evitar a sedimentação de algas na lagoa é 0.1 m/s (WEISSMAN et al, 1988). Dessa forma, foi calculado o volume de áreas em que a velocidade do fluido é inferior a esse valor.

$$\% \text{ Zonas mortas} = \frac{V_{v < 0.1}}{V_{\text{TOTAL}}} * 100\% \quad (\text{eq. 1})$$

Onde $V_{v < 0.1}$ é o volume do líquido com velocidade menor que 0.1 m/s.

Com base na distribuição de velocidade, a porcentagem de zona morta foi estimada e comparada com os resultados de Hadiyanto et al (2013), como ilustrado na Figura 10. Percebe-se que nosso modelo apresentou valores mais baixos, o que pode estar relacionado com a espessura da parede interna da lagoa de alta taxa, que apresentava uma espessura maior que a utilizada por Hadiyanto et al (2013), e, portanto, tende a reduzir o volume de zonas mortas (WEISSMAN et al, 1988).

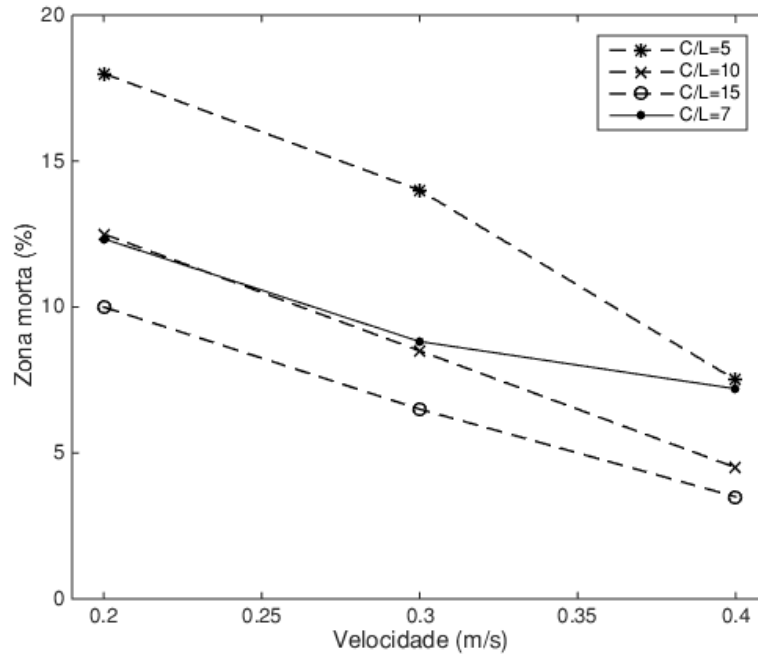


Figura 10: Zona morta para diferentes velocidades. As linhas pontilhadas são os resultados obtidos por Hadiyanto et al (2013).

Como pode ser observado na Figura 11, o aumento do comprimento da lagoa causa redução da quantidade de zonas mortas. Além disso, o aumento a velocidade do fluido também confere uma diminuição do volume de zonas mortas na lagoa.

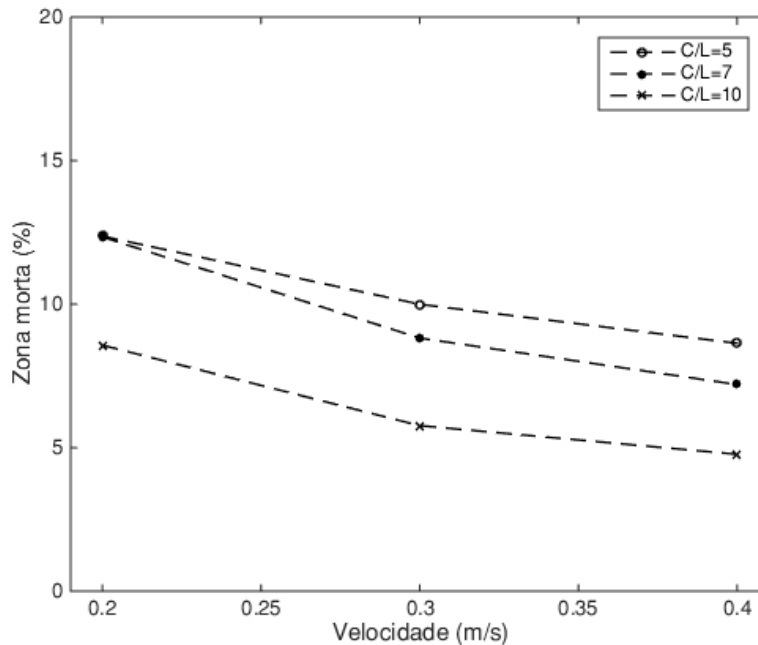


Figura 11: Zona morta para diferentes tamanhos de lagoas e velocidades.

CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS PARA LAGOAS DE ALTA TAXA

Com o objetivo de avaliar a influência de diferentes aspectos geométricos na formação de zonas mortas, foram realizadas simulações para configurações variadas. Em todas as alternativas, foi considerado um comprimento da lagoa igual a 7m. Uma possível modificação na geometria de lagoas de alta taxa é a instalação de defletores de fluxo nas extremidades da lagoa, visando evitar a formação de vórtices e a sedimentação de algas. (WEISSMAN et al, 1988). Podem ser acrescentados 1 ou 2 defletores, dependendo do comprimento do canal (HAIYANTO et al, 2013). Decidiu-se por estudar o comportamento do fluido considerando a instalação de dois defletores (Figura 12a).

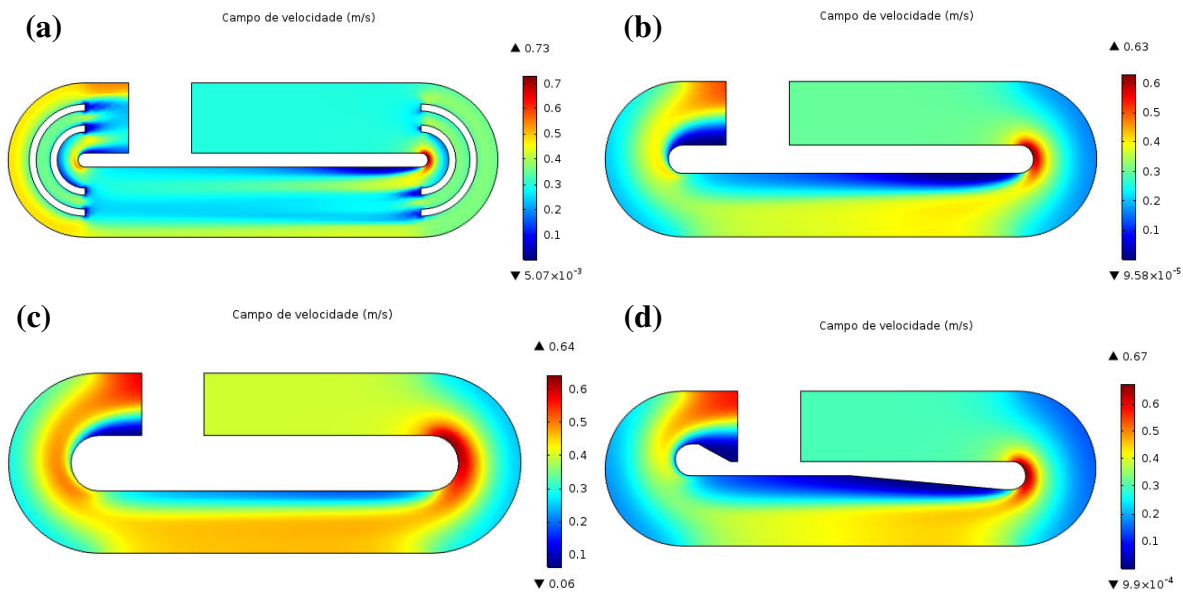


Figura 12: Possíveis configurações da lagoa da alta taxa para reduzir zonas mortas.

Outra possível modificação na geometria da lagoa é aumentar a largura da parede central (Figura 12b). Na simulação realizada, a parede teve o seu tamanho dobrado. Percebe-se que em comparação com a geometria original, houve uma redução das zonas de baixa velocidade na região próxima à parede central

Na Figura 12c é mostrado um aumento da largura total do canal da lagoa e um aumento ainda maior da parede central em comparação com o da Figura 12b. Nesse caso, o campo de velocidade se mostra mais uniforme.

Uma opção para reduzir a quantidade de zonas mortas é a instalação de “ilhas” associadas a parede central (Figura 12d). De acordo com Hadiyanto et al (2013), o princípio é substituir vórtices do fluxo no final da parede central por uma estrutura sólida (uma “ilha”). A largura da ilha na simulação equivale a cerca de 25% da largura do canal. O efeito dessa ilha é a compressão do fluxo, causando aumento da velocidade na parede lateral. Por outro lado, ainda se observa a presença de baixas velocidades ao longo da parede central.

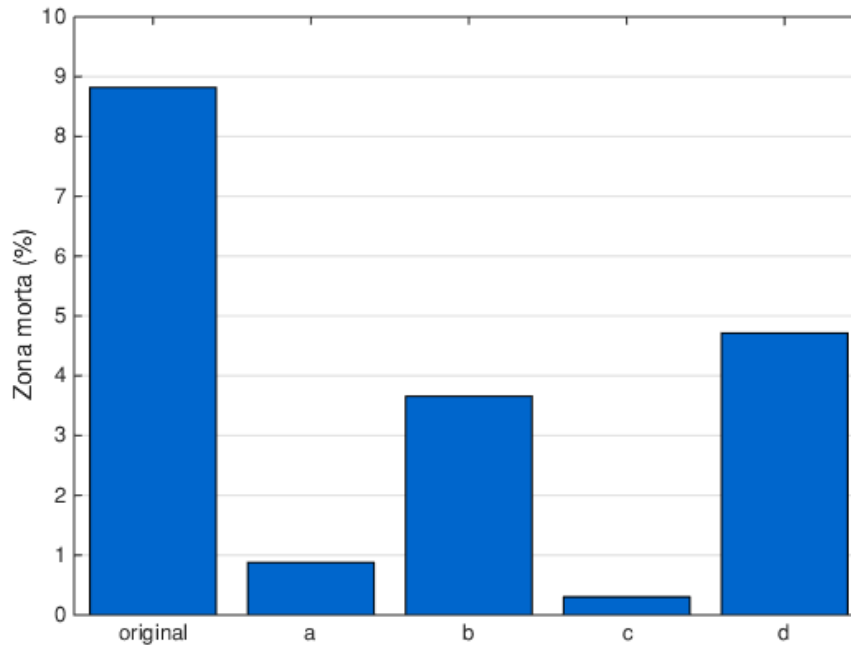


Figura 13: Porcentagem de zonas mortas para diferentes configurações da lagoa da alta taxa.

Seguindo a mesma metodologia utilizada anteriormente para a quantificação de zonas mortas, que considera a velocidade de 0,1 m/s como limite de sedimentação, foi calculada a porcentagem de zonas mortas para cada geometria simulada. Percebe-se que o aumento da largura do canal da lagoa, assim como da parede central, teve grande influência na redução de zonas mortas, que chegou a quase zerar.

A instalação de defletores nas extremidades da lagoa de alta taxa provocou uma redução bastante satisfatória nas zonas de baixa velocidade. Essa redução equivale a cerca de 90% das zonas mortas existentes na configuração original.

A utilização de ilhas associadas a parede central (d), como mencionado, provocou aumento da velocidade em determinadas áreas (causando, portanto, redução das zonas mortas). Porém, ainda há zonas de baixa velocidade, de forma que a diminuição de zonas mortas não é tão expressiva quanto as observadas nas configurações da Figura 12a e da Figura 12c.

CONCLUSÕES

Os modelos foram satisfatórios para analisar os efeitos hidrodinâmicos de diferentes aspectos geométricos e configurações de *HRAP*, reproduzindo de forma qualitativa a distribuição de velocidade em lagoas de alta taxa como apresentado em diferentes trabalhos na literatura (CHIARAMONTI et al, 2013; HAIYANTO et al, 2013; LIFFMAN et al, 2013). A análise do percentual de zonas mortas fornece subsídio para avaliação de possíveis geometrias. Além da otimização mencionada anteriormente, está prevista a validação dos resultados modelados com dados reais a serem obtidos em uma lagoa em escala piloto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. Boston: McGraw Hill, 2002. xxviii, 1408 p. ISBN 007124140X
2. CHIARAMONTI, D., PRUSSI, M., CASINI, D., TREDICI, M. R., RODOLFI, L., BASSI, N., ZITTELLI, G. C., BONDIOLI, P., Review of energy balance in raceway ponds of microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. *Applied Energy*, 102, 101-111, 2013.
3. HADIYANTO, H., ELMORE, S., GERVEN, T. V., STANKIEWICZ, A., Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, 217, 231-239, 2013.
4. LAUNDER, B.E., SPALDING, D.B., The numerical computation of turbulent flows. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering* 3, 269-289, 1974.
5. LIFFMAN, K., PATERSON, D. A., LIOVIC, P., BANDOPADHAYAY, P., Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond designs using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 221-226, 2013.
6. PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, jan. 2011. v. 102, n. 1, p. 35–42.
7. PUTT, R. et al. An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer. *Bioresource Technology*, fev. 2011. v. 102, n. 3, p. 3240–3245.
8. WEISSMAN, J.C., GOEBEL, R.P., BENEMANN, J.R., Photobioreactor design: mixing, carbon utilization, and oxygen accumulation. *Biotechnology and Bioengineering*, 31, 336-344, 1988.