

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

### 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).

#### Taís Maria Nunes Carvalho<sup>(2)</sup>

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

#### André Bezerra dos Santos<sup>(3)</sup>

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<sup>(4)</sup>

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<sup>(5)</sup>

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

**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: <u>carlos.saraiva@cagece.com.br</u>

### 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- $\varepsilon$  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 CO<sub>2</sub> 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



L L L Cultura de algas L Tanque

radiação solar, homogeneíza os nutrientes, aumenta a utilização de CO<sub>2</sub> 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 lago 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- $\epsilon$  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.







Campo de velocidade (m/s)



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

$$\% Zonas mortas = \frac{V_{\nu < 0.1}}{V_{lagoa}} * 100\%$$
(eq. 1)

Onde  $V_{p<0.1}$  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
- 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 Mechanic 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.