

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## USO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD) PARA COLHEITA DE MICROALGAS PRESENTES EM LAGOAS DE POLIMENTO

\*Willian Ribeiro Ide<sup>1</sup>  
Carlos Nobuyoshi Ide<sup>1</sup>  
Maria Lúcia Ribeiro<sup>1</sup>  
Marcelo Campos<sup>1</sup>  
Marc Árpád Boncz<sup>1</sup>

USE OF DISSOLVED AIR FLOTATION (DAF) FOR  
HARVESTING OF MICROALGAE FROM POLISHING  
PONDS

*Recibido el 20 de agosto de 2015; Aceptado el 29 de enero de 2016*

### Abstract

The harvest of microalgae has been one of the biggest difficulties for production of biofuels. The high cost and low efficiency achieved by different microalgae harvesting methods are the factors that have made the production of biodiesel unfeasible to date. The dissolved air flotation emerged as a promising alternative on microalgae harvesting. Its high efficiency and speed on the separation process are the main features of the system that has attracted attention. However, the process cost is still expensive. The determination of the best conditions of the different factors that interfere in this process is the key to decrease costs during the microalgae harvesting. This work aims to evaluate the efficiency of the flotation process by dissolved air, preceded by a process of coagulation / flocculation with ferric chloride ( $\text{FeCl}_3$ ), in the microalgae harvesting present in the effluent from a polishing pond, through a Flotateste, developed in scale bench. The dissolved air flotation, preceded by a process coagulation / flocculation with  $\text{FeCl}_3$  presented as a good technique for the separation and harvesting of microalgae present in polishing ponds and provided an efficiency of up to 96.22% at the conditions adopted for this research.

**Key Words:** Biomass, Ferric chloride, Flotateste.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

\*Autor correspondente: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Cidade Universitaria, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 79090-900. Brasil. Email: [willian.ide@ufms.br](mailto:willian.ide@ufms.br)

## Resumo

A colheita das microalgas tem sido uma das maiores barreiras na produção de biocombustíveis. O alto custo e a baixa eficiência obtida pelos diferentes métodos de colheita de microalgas são os fatores que tem tornado a produção de biodiesel inviável, até o momento. A flotação por ar dissolvido surge como uma alternativa promissora na colheita das microalgas. Sua elevada eficiência e rapidez no processo de separação são as principais características do sistema que tem chamado muita atenção. No entanto, o custo do processo ainda é elevado. A determinação das melhores condições dos diferentes fatores que interferem neste processo é a chave para redução dos gastos, durante a colheita das microalgas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido, precedida por um processo de coagulação/floculação com cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), na colheita de microalgas presentes no efluente de uma lagoa de polimento, através de um Flotateste desenvolvido em escala de bancada. A flotação por ar dissolvido, precedida por um processo de coagulação/floculação com  $\text{FeCl}_3$ , mostrou ser uma ótima técnica para separação e colheita de microalgas presentes em lagoas de polimento, apresentando uma eficiência de até 96.22%, nas condições adotadas para esta pesquisa.

**Palavras chave:** Biomassa, Cloreto Férrico, Flotateste.

## Introdução

A produção de biocombustíveis a partir de microalgas vem se tornando a cada dia uma das alternativas mais promissoras na área da bioenergia, ainda mais porque as microalgas podem ser cultivadas em ambientes adversos, como no esgoto tratado. A biomassa algal, produzida em sistemas de pós-tratamento de esgotos tratados por processos anaeróbios, como as lagoas de polimento, pode servir como uma excelente e barata matéria-prima para a produção de biocombustíveis. Estes efluentes apresentam uma carga orgânica significativa e um alto teor de N e P, elementos fundamentais para a produção de microalgas fototróficas ou mixotróficas. Assim como as algas cultivadas em fotobiorreatores, a biomassa produzida neste tipo de efluente pode conter um teor relativamente alto de óleos e gorduras, que pode ser aproveitado, tanto para produção de biodiesel, quanto para a produção de biogás.

No entanto, um problema ainda a ser enfrentado é a dificuldade de colher a biomassa algal de forma barata e eficaz, visto que as células são pequenas e não podem ser separados facilmente por meio de filtração ou sedimentação. Segundo Leite *et al.* (2013), o custo para obter uma colheita eficaz é, naturalmente, um grande desafio ainda não solucionado. De acordo com Demirbas e Fatih Demirbas (2011) e Grima *et al.* (2003), a colheita da biomassa é responsável por cerca de 20% a 30% do gasto total da produção de biocombustível. Para Greenwell *et al.* (2010), este custo pode passar de 50% do custo total da produção dos biocombustíveis. O tamanho reduzido das microalgas (menor que 10  $\mu\text{m}$  de diâmetro), o volume a ser coletado e a densidade semelhante da microalga com a da água são alguns dos fatores que tem tornado a colheita da biomassa um processo caro na produção do biodiesel (Kim *et al.*, 2013). Por esta razão, é cada vez mais importante a busca por tecnologias ou por combinações de tecnologias que sejam mais eficientes e capazes de reduzir os custos durante este processo.

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas na colheita de microalgas, como: sedimentação por gravidade (Mata *et al.*, 2010); centrifugação (Munir *et al.*, 2013); coagulação/floculação (Godos *et al.*, 2011); filtração (Bejor *et al.*, 2013); flotação (Milledge e Heaven, 2013); agregação ultrassônica (Gultom e Hu, 2013); e separação magnética (Cerff *et al.*, 2012). A decisão pelo método a ser utilizado depende das características da espécie a ser colhida, como a densidade e o tamanho da microalga, do produto desejado, da disponibilidade econômica, do gasto energético e da rapidez da colheita (Brennan e Owende, 2010). Franco *et al.* (2013) acrescentam que a escolha também deve ser baseada no tipo de cultivo e no uso da biomassa. Para Kiran *et al.* (2014), a seleção do método depende, principalmente, do produto desejado e dos processos subsequentes. Segundo Pahl *et al.* (2013) e Amaro *et al.* (2015), nenhuma tecnologia universal para a colheita eficiente de microalgas a um baixo custo foi introduzida até o momento. Para Uduman *et al.* (2010), não existe um método ideal para colheita de microalga. Por isso, de acordo com Azeredo (2012), a seleção da tecnologia mais adequada e a otimização do processo são cruciais, tanto do ponto de vista econômico quanto do técnico-operacional.

Entre as diferentes alternativas para colheita de microalgas, a flotação por ar dissolvido (FAD), precedida por um processo de coagulação/floculação, tem sido a mais promissora. A flotação por ar dissolvido é um processo de separação sólido / líquido (Kurama *et al.*, 2010) e líquido / líquido (Behin e Bahrami, 2012), que consiste na injeção de água saturada de ar em um tanque de flotação, por meio de bicos injetores, resultando na formação de microbolhas com diâmetros entre 10 a 100  $\mu\text{m}$  (Taylor *et al.*, 2007), as quais tendem a se agregar com as partículas suspensas e emergir até a superfície (Kiran *et al.*, 2014), para uma posterior remoção. A alta eficiência na separação e o tempo reduzido do processo são os principais motivos que tem tornado esta técnica tão atraente. No entanto, segundo Brennan e Owende (2010), ainda há muito poucas provas de sua viabilidade técnica e econômica.

O sucesso da colheita utilizando a coagulação/floculação/flotação depende de diversos fatores, tais como o pH, tipo de coagulante, dosagem do coagulante, tempo e gradiente de velocidade na coagulação e floculação, pressão e tempo de saturação; taxa de reciclo; e velocidade ascensional da flotação. Otimizar as condições com as quais o processo é operado é essencial para obter uma boa eficiência na colheita e uma redução dos custos deste processo.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência e as melhores condições de operação do processo de flotação por ar dissolvido, precedido por um processo de coagulação/floculação com cloreto férrico, na colheita de microalgas presentes nos efluentes de uma lagoa de polimento.

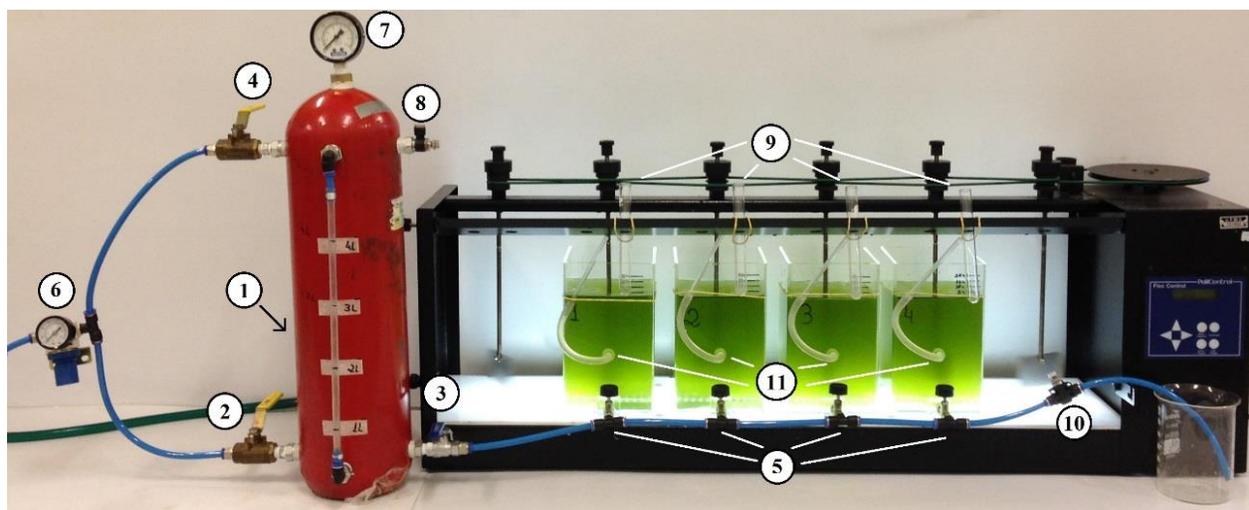
## Metodologia

### Microalgas

Para este experimento foram utilizadas microalgas presentes no efluente de uma lagoa de polimento, construído em escala piloto, localizada no campus da UFMS, a qual era alimentada diariamente por efluente doméstico de um digestor anaeróbio. O efluente era composto, na maior parte, por microalgas do gênero *Scenedesmus* e *Chlorella*. As microalgas foram armazenadas em um galão de 200 L e refrigerada a uma temperatura próxima de 4°C, para preservar suas características iniciais.

### Flotateste

Foi desenvolvido um equipamento de flotação (Figura 1), composto por quatro jarros adaptados, uma câmara de pressurização, um compressor de ar e um conjunto de motor-agitador, semelhante ao do Jar-test (Teste dos jarros), que permite o controle digital de velocidade dos misturadores. O equipamento foi projetado para trabalhar simultaneamente reduzindo, assim, erros durante os ensaios.



**Figura 1.** Esquema do sistema montado para os testes de flotação (1- registro para entrada de água; 2 - registro inferior para entrada de ar; 3 - registro para saída de água saturada; 4 - registro superior para entrada de ar; 5 - dosador de água saturada; 6 - regulador de pressão; 7 - manômetro; 8 - válvula agulha; 9 - dosador de coagulante; 10 - registro para descarte)

Os jarros foram construídos com acrílico transparente nas mesmas dimensões do jarro convencional (11.5 x 11.5 cm), cada qual podendo ser utilizado, tanto para ensaios de flotação, quanto para sedimentação. No jarro foi adaptado, a 1 cm de sua base, uma placa quadrada contendo 144 microfuros de diâmetro de 2 mm, espaçados a 0.95 cm, para permitir a introdução e distribuição uniforme de água saturada com ar e um tubo coletor de amostra a 7.5 cm da base. A Figura 2 apresenta o corte transversal e vista superior do jarro com suas respectivas dimensões.

O saturador foi construído utilizando um tanque cilíndrico resistente a alta pressão, com capacidade de 5 L. Neste cilindro foram adaptadas 4 (quatro) entradas para registros, 2 (duas) entradas para o acoplar o nível e 1 (uma) entrada para a válvula agulha, a qual controla a pressão dentro do saturador de ar. Na região superior foi instalado um medidor de pressão. Antes de cada teste, o saturador era lavado várias vezes para evitar interferência entre os experimentos.

#### Ensaio de flotação

Os ensaios foram realizados em 4 (quatro) etapas, com objetivo de investigar a influência do pH, dosagem do coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ), tempo e gradiente de velocidade na mistura rápida, tempo e gradiente de velocidade na floculação, pressão de saturação, taxa de recirculação e velocidade de flotação, sobre o processo de colheita das microalgas por flotação por ar dissolvido, conforme a Tabela 1. Em todos os casos, foi adotado uma turbidez inicial ( $C_0$ ) da solução de 100 UNT e um tempo de saturação de ar, no saturador, de 10 minutos.

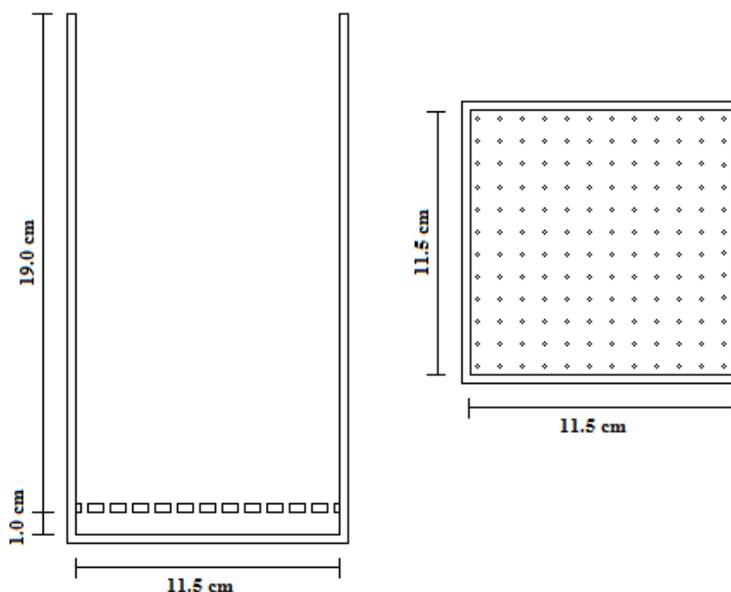


Figura 2. Corte transversal e vista superior do jarro

**Tabela 1.** Sumário dos experimentos realizados e dos parâmetros variados nos mesmos

Etapa	pH	FeCl <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Mistura rápida		Floculação		P <sub>sat</sub> (bar)	T <sub>r</sub> (%)	V <sub>asc</sub> (cm.min <sup>-1</sup> )
			T (s)	G (s <sup>-1</sup> )	T (min)	G (s <sup>-1</sup> )			
1	5.0	100/200/400/600	60	187	15	18	4	15	3,0
1	6.0	100/200/400/600	60	187	15	18	4	15	3,0
1	7.0	100/200/400/600	60	187	15	18	4	15	3,0
2	*	*	30	75/187/600	15	18	4	15	3,0
2	*	*	60	75/187/600	15	18	4	15	3,0
2	*	*	120	75/187/600	15	18	4	15	3,0
3	*	*	**	**	10	10/18/33	4	15	3,0
3	*	*	**	**	15	10/18/33	4	15	3,0
3	*	*	**	**	20	10/18/33	4	15	3,0
4	*	*	**	**	***	***	3	10	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	3	10	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	3	10	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	4	15	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	4	15	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	4	15	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	5	20	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	5	20	1.5/3.0/6.0
4	*	*	**	**	***	***	5	20	1.5/3.0/6.0

\*: melhor resultado da etapa 1; \*\*: melhor resultado da etapa 2; \*\*\*: melhor resultado da etapa 3.

T-Tempo; G-Gradiente de velocidade; P<sub>sat</sub>-Pressão de saturação; T<sub>r</sub>-Taxa de reciclo; V<sub>asc</sub>-Velocidade ascensional.

### Procedimento de ensaio de flotação

Todos os ensaios de flotação foram executados da mesma forma, iniciando-se o procedimento enchendo a câmara de saturação com 3 L de água e, em seguida, por meio de um compressor, a água era pressurizada até uma pressão levemente acima da pressão final desejada. Em seguida, através de uma válvula reguladora do tipo agulha, a pressão era justada até o valor desejado. A câmara foi mantida sob esta pressão por um tempo de 10 minutos, para garantir a concentração reproduzível de ar dissolvido na água contida no seu interior.

Após encher a câmara de saturação foram preparados os jarros, cada um sendo preenchido com 2 L da solução de microalgas homogeneizada, evitando a inclusão de bolhas de ar na base do jarro. Com um pHmetro, o pH em cada jarro foi ajustado até o valor desejado, usando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou hidróxido de sódio (NaOH) para baixar ou aumentar o pH, respectivamente. No momento da dosagem da solução coagulante/floculante foi iniciada a cronometragem do experimento. No tempo previsto, a válvula de regulagem foi aberta para possibilitar a entrada de água saturada com ar no fundo dos jarros simultaneamente, isto depois de eliminar totalmente o ar presente na mangueira. Após alcançar a quantidade desejada de água saturada no jarro, a

válvula de regulação foi fechada e, após um determinado tempo de espera, as amostras foram retiradas dos jarros (através do ponto de amostragem lateral), para posterior análise.

### Análise dos dados

Os parâmetros adotados para o controle do processo foram: alcalinidade; condutividade; pH; salinidade; turbidez; e temperatura. A turbidez foi utilizada para avaliar a eficiência da colheita de microalgas por flotação. O cálculo da eficiência foi realizado utilizando a equação 1.

$$E = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

Equação (1)

Onde

$E$ : eficiência de remoção (em %)

$C_o$ : turbidez inicial (UNT)

$C_f$ : turbidez final (UNT)

Todas as análises foram realizadas em triplicatas e de acordo com as técnicas e métodos preconizados no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 2012).

Os dados foram analisados e os tratamentos comparados através do teste de Mann-Whitney, com limite de confiança de 95% ( $\alpha = 0.05$ ), utilizando o programa estatístico Minitab®, versão 17. Este teste permite dizer se os tratamentos são estatisticamente diferentes (maior/menor) ( $p < 0.05$ ), ou se não há diferenças significativas entre os tratamentos ( $p > 0.05$ ).

## Resultados e discussões

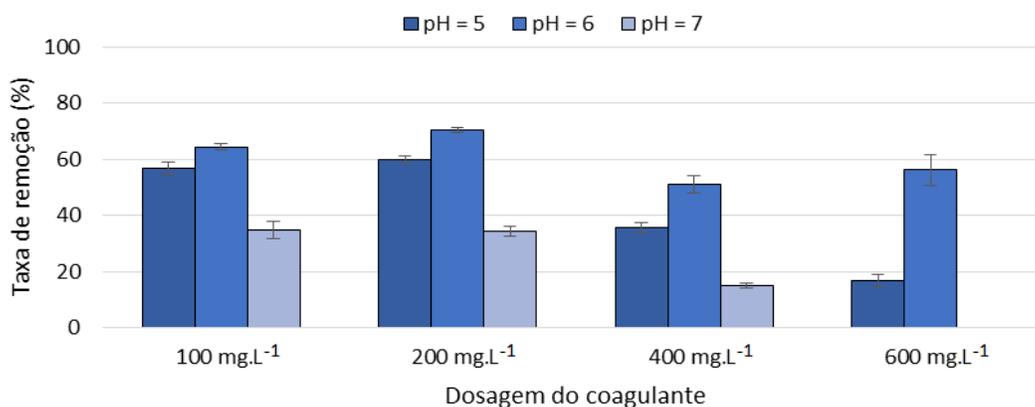
### Caracterização do efluente utilizado

O efluente da lagoa de polimento apresentou NMP.100mL<sup>-1</sup>, condutividade igual a 881.7  $\mu\text{S}^{-1}$ , salinidade igual 0.4 ‰, pH 7.26 e turbidez 255 UNT, valor próximo ao encontrado por Cruz *et al.* (2005). A quantidade de microalgas presentes nesta lagoa era de, aproximadamente, 240 mg.L<sup>-1</sup>.

### Ensaio de flotação

A Figura 3 apresenta o resultado da combinação de diversas dosagens de FeCl<sub>3</sub>, em diferentes pHs. Como pode ser observado, o pH apresenta grande influência na taxa de remoção, podendo encontrar uma variação em até 40%. Observa-se, também, que os melhores resultados de remoção de microalgas (remoção de 70.35%) ocorreram no pH 6, com uma dosagem de FeCl<sub>3</sub> de 200 mg.L<sup>-1</sup>. A partir dos testes estatísticos de Mann-Whitney foi possível comprovar que a taxa de remoção do grupo do pH 6 é superior a do pH 5 e 7. Em relação a dosagem, o teste não

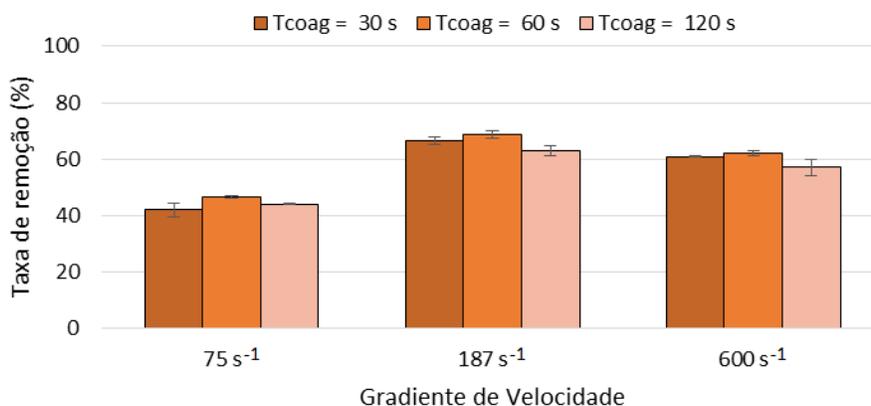
identificou diferenças significativas na taxa de remoção entre os grupos. Foi verificado também que, no pH 6, uma dosagem maior de  $\text{FeCl}_3$  ( $600 \text{ mg.L}^{-1}$ ) acaba interferindo na cor final da amostra, provavelmente devido ao excesso de ferro.



**Figura 3.** Taxa de remoção de algas em função do pH e da dosagem de coagulante

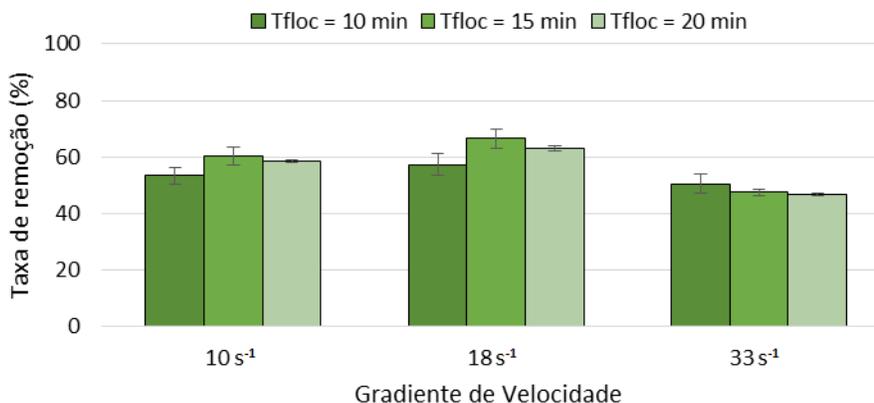
Após a determinação das melhores valores de pH e de dosagem de  $\text{FeCl}_3$ , foi realizado o teste de mistura rápida (Etapa 2). A Figura 4 mostra o efeito do tempo e da intensidade de agitação da mistura rápida na remoção das microalgas por flotação.

Na Etapa 2, foi possível observar a importância do gradiente de velocidade e do tempo de coagulação na flotação. Observou-se que valores baixos de gradiente de velocidade, como  $75 \text{ s}^{-1}$ , não são tão eficientes para remoção de algas por flotação por ar dissolvido, quando comparados a valores mais elevados de gradiente de velocidade, como  $187$  e  $600 \text{ s}^{-1}$ . Por outro lado, gradientes de velocidade muito elevados, como  $600 \text{ s}^{-1}$ , podem gerar flocos muito densos e acabar prejudicando o processo de flotação. Nesta etapa, verificou-se que o gradiente de velocidade ideal para este processo foi de  $187 \text{ s}^{-1}$ . O teste estatístico de Mann-Whitney mostrou que o grupo do  $187 \text{ s}^{-1}$  apresenta maior taxa de remoção, quando comparado aos grupos de  $75$  e  $600 \text{ s}^{-1}$ . Verificou-se também que os tempos de coagulação avaliados não tiveram muita influência na taxa de remoção. De acordo com o teste de Mann-Whitney, não existem diferenças de remoção para os diferentes tempos de coagulação. No entanto, o tempo de mistura rápida de 60s ainda foi mais eficiente que os demais avaliados. Logo, as condições que promoveram a maior taxa de remoção de algas (remoção de 68.72%) foram: gradiente de velocidade de  $187 \text{ s}^{-1}$ ; e tempo de coagulação de 60 s.



**Figura 4.** Taxa de remoção de algas em função do gradiente de velocidade e tempo de coagulação

Após a determinação das melhores condições na mistura rápida, foi realizado o teste de floculação (Etapa 3). A Figura 5 mostra o efeito do tempo e da intensidade de agitação da floculação na remoção das microalgas por flotação.

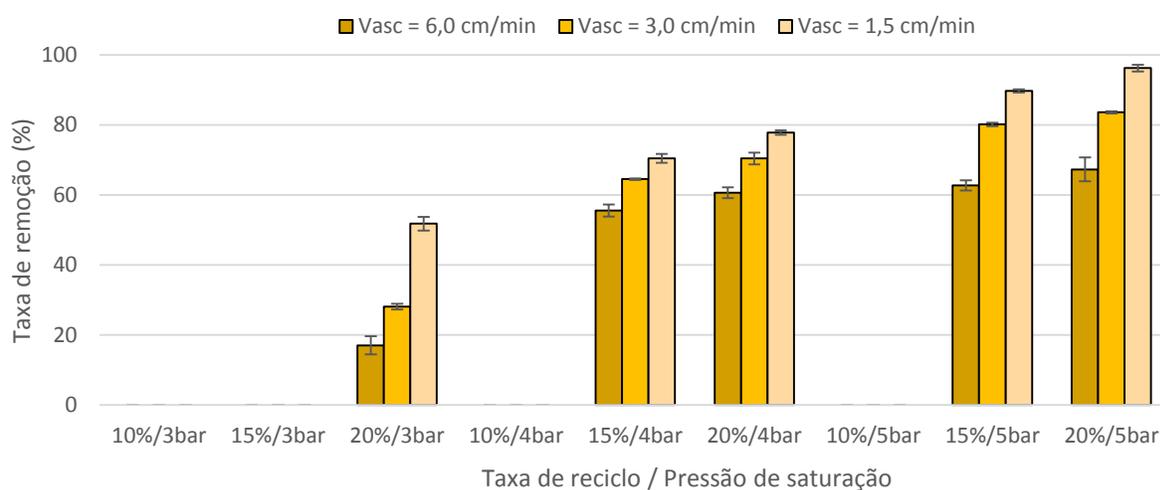


**Figura 5.** Taxa de remoção de algas em função do gradiente de velocidade e tempo de floculação

Assim como na etapa da mistura rápida, o gradiente de velocidade na floculação também apresentou uma influência direta na flotação por ar dissolvido. Observa-se que o maior gradiente de velocidade adotado ( $33 s^{-1}$ ), não favoreceu a remoção das microalgas como nos gradientes de velocidade mais baixos. Elevados valores de velocidade na floculação podem causar a ruptura dos flocos ou a agregação inadequada, reduzindo a eficiência na remoção por flotação. Nos gradientes de velocidade de 10 e  $18 s^{-1}$ , a diferença na taxa de remoção foi muito reduzida, sendo a maior diferença de, aproximadamente, 6%. Entretanto, o gradiente de velocidade de  $18 s^{-1}$

ainda foi o mais eficiente. O teste estatístico de Mann-Whitney mostrou que o grupo dos  $18 \text{ s}^{-1}$  apresenta maior taxa de remoção em relação aos grupos  $10$  e  $33 \text{ s}^{-1}$ . Da mesma forma que os tempos de coagulação não influenciaram muito na taxa de remoção, os tempos de floculação também não influenciaram. De acordo com o teste de Mann-Whitney, não existem diferenças de remoção para os diferentes tempos de floculação. Porém, observa-se que o tempo de 15 min ainda é melhor do que os demais. Logo, com um gradiente de velocidade de  $18 \text{ s}^{-1}$  a um tempo de 15 min de floculação foi possível obter uma remoção de 65.54% de algas.

Com os melhores resultados das etapas anteriores foi realizada a etapa 4, onde foram avaliadas 3 (três) condições diferentes, como a pressão de saturação, a taxa de recirculação e a velocidade ascensional dos flocos. A Figura 6 apresenta os resultados desta etapa.



**Figura 6.** Taxa de remoção de algas em função da velocidade ascensional e da taxa de recirculação a uma dada pressão de saturação

Na etapa 4, verificou-se, através do teste estatístico de Mann-Whitney, que valores maiores de taxa de recirculação e de pressão de saturação apresentam uma eficiência maior na remoção das microalgas. Quanto maior for a taxa de recirculação, maior será a quantidade de microbolhas que entrarão em contato com os flocos e que reduzirão a sua densidade para, então, flotar. Em relação a pressão de saturação, quanto maior for a pressão fornecida, maior será a queda de pressão do fluido quando este entrar em contato com pressão atmosférica. Quanto maior a quantidade de microbolhas formadas maior será a remoção. No entanto, a aplicação de uma taxa de reciclo e de uma pressão de saturação muito alta podem causar o cisalhamento dos flocos e prejudicar o processo. Observou-se, também, que a aplicação de uma baixa pressão de saturação

de ar, como de 3 bar, não é suficiente para remover mais de 60% das algas. Também foi observado, em ambos os casos, que aplicação de uma taxa de recirculação de 10% não é capaz de promover a remoção das algas. Neste caso, os valores foram desconsiderados, pois os flocos ao invés de flotar sedimentaram totalmente, devido a elevada densidade do floco. Quanto a velocidade ascensional dos flocos, valores mais baixos proporcionam maior tempo de contato da bolha com o floco. Por isto, a velocidade de  $1.5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  foi a que apresentou o melhor resultado.

A maior taxa de remoção (remoção de 96.22%) ocorreu nos maiores valores de taxa de recirculação (20%) e de pressão de saturação (5 bar) e nos menores valores de velocidade ascensional ( $1.5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Isto, em pH 6, dosagem de  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3$ , tempo e gradiente de velocidade na coagulação de 60 s e  $187 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, e tempo e gradiente de velocidade na floculação de 15 min e  $18 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Coutinho e Mendes (2013) obtiveram resultados semelhantes usando a flotação por ar dissolvido precedida por coagulação/floculação com cloreto férrico. Em seus estudos, foi obtida uma taxa de remoção ou de recuperação de algas de, aproximadamente, 95% a um pH 6.5 e a uma dosagem de  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3$ . Em um estudo realizado por Zhang *et al.* (2014), os autores, utilizando o mesmo processo, obtiveram uma eficiência de colheita maior que 90% de *Chlorella zofingiensis*, dosando  $250 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de sulfato férrico. Kwon *et al.* (2014) também obtiveram altas taxas de recuperação de microalgas *Tetraselmis* sp. Os autores conseguiram uma taxa de remoção de 85.6% com sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) a um pH 6 e dosagem de  $1200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 92.6% com sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) a um pH 6 e dosagem de  $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  e 93.0% com quitosana a um pH 7.5 e dosagem de  $5000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Hanotu *et al.* (2012), utilizando a flotação por ar disperso para recuperar *Dunaliella salina*, obtiveram uma eficiência de 99.2% com  $\text{FeCl}_3$ , 98.1% com  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  e 95.2% com  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , a uma dosagem de  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , em condições ácidas (pH 5).

É necessário salientar que, para este trabalho, foi considerada a melhor taxa de remoção como a melhor eficiência de colheita. Isto porque a melhor taxa de remoção de microalgas por flotação implica que maior parte das microalgas flotaram e ficaram acumuladas na superfície, facilitando uma possível remoção por transbordamento ou por pás raspadoras.

Através dos testes realizados, em escala de bancada, foi possível verificar que o pH apresenta uma forte influência no processo de coagulação/floculação/flotação e, por isso, deve ser sempre investigado para o efluente que deseja ser avaliado. Verificou-se, também, que o tempo de agitação na mistura rápida e na floculação não interfere tanto no resultado quanto o gradiente de velocidade fornecido nos dois processos interfere. Em ambos os casos, as maiores taxas de remoção de algas ocorreram em valores intermediários de tempo e gradiente de velocidade, resultado semelhante aos obtidos por Centurione Filho e Di Bernardo (2003). Nos testes de flotação foram constatados que maiores taxas de recirculação, valores de pressão e tempos de detenção hidráulica, favorecem muito mais o processo de flotação. No entanto, a aplicação de

valores maiores que os necessários implicam em maiores custos na remoção das algas e, também, em possíveis reduções nas taxas de remoção, como observado na pesquisa realizada por Azevedo (2013), onde a aplicação de uma taxa de recirculação de 30% apresentou uma remoção da turbidez um pouco menor do que a aplicação de 20%. Por isso, a determinação do valor ideal é essencial para uma colheita eficiente e econômica.

### Conclusões e recomendações

De acordo com os resultados obtidos e as análises realizadas, o estudo permitiu obter as seguintes conclusões:

- A flotação por ar dissolvido precedida por um processo de coagulação/floculação com cloreto férrico, mostrou ser uma ótima técnica para separação e colheita de microalgas presentes em efluentes de lagoas de polimento, alcançando uma eficiência de até 96%;
- pH apresenta uma forte influência no processo de coagulação/floculação/flotação e, por isso, deve ser sempre considerado;
- gradiente de velocidade apresenta maior influencia na taxa de remoção do que o tempo de agitação na mistura rápida e na floculação;
- Na flotação por ar dissolvido, maiores taxas de recirculação, maiores valores de pressão e maiores tempos de detenção hidráulica, proporcionam uma maior taxa de remoção de microalgas.

Recomenda-se realizar testes de flotação por ar dissolvido utilizando coagulantes alternativos, como por exemplo, a quitosana ou o extrato da semente da *Moringa oleifera*, que são composto orgânicos e biodegradáveis, e comparar a eficiência destes com as dos coagulantes químicos, apontando suas vantagens e desvantagens na produção de biodiesel.

### Referências Bibliográficas

- Amaro, H.M., Macedo, Â.C., Malcata, F.X. (2012) Microalgae: An alternative as sustainable source of biofuels?, *Energy*, **44**(1), 158–166. doi:10.1016/j.energy.2012.05.006.
- APHA, AWWA, WPCF. (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22<sup>a</sup> ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Azeredo, V.B.S. (2012) *Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético Universidade Federal de Rio de Janeiro, 171 pp.
- Azevedo, A.C. (2013) *Estudos de flotação de ar dissolvido com bomba multifásica (FAD-B) e sedimentação lamelar (SL) no tratamento de água bruta para abastecimento público (Canoas-RS)*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Behin, J., Bahrami, S. (2012) Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **59**, 1–8.
- Bejor, E.S., Mota, C., Ogarekpe, N.M., Emerson, K.U., Ukpata, J. (2013) Low-cost harvesting of microalgae biomass from wáter. *International Journal of Development and Sustainability*, **2**(1), 1–11. doi:10.1016/j.cep.2012.05.004.
- Brennan, L., Owende, P. (2010) Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(2), 557–577. doi:10.1016/j.rser.2009.10.009.
- Centurione Filho, P.L., Di Bernardo, L. (2003) Procedimento para execução de ensaios de flotação/ filtração em equipamento de bancada, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **8**(1) 39-44.
- Cerff, M., Morweiser, M., Dillschneider, R., Michel, A., Menzel, K., Posten, C. (2012) Harvesting fresh water and marine algae by magnetic separation: screening of separation parameters and high gradient magnetic filtration, *Bioresource Technology*, **118**, 289–295. doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.020.
- Coutinho, F.V., Mendes, M. C. (2013) A avaliação da flotação por ar dissolvido na remoção de algas de efluentes de lagoas de estabilização, visando a produção de biodiesel, *IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN*, Currais Novos, Brasil.
- Cruz, L.S., Souza, W.G., Keller, R.P., Cassini, S.T.A., Gonçalves, R.F. (2005) Variação temporal quali-quantitativa das comunidades fitoplanctônicas em uma lagoa de polimento de efluente anaeróbico, *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Brasil.
- Demirbas, A., Fatih Demirbas, M. (2011) Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, **52**(1), 163–170. doi:10.1016/j.enconman.2010.06.055.
- Franco, A.L.C., Lôbo, I.P., Cruz, R.S., Teixeira, C.M.L.L., Neto, J.A.A. (2013) Biodiesel de microalgas: avanços e desafios, *Química Nova*, **36**(3), 437–448.
- Godos, I., Guzman, H.O., Soto, R., García-Encina, P.A., Becares, E., Muñoz, R., Vargas, V.A. (2011) Coagulation/flocculation-based removal of algal-bacterial biomass from piggery wastewater treatment, *Bioresource Technology*, **102**(2), 923–927. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.036.
- Greenwell, H.C., Laurens, L.M.L., Shields, R.J., Lovitt, R.W., Flynn, K.J. (2010) Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges, *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, **7**(46), 703–726. doi:10.1098/rsif.2009.0322.
- Grima, E.M., Belarbi, E.-H., Ación Fernández, F.G., Medina, A.R., Chisti, Y. (2003) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics, *Biotechnology Advances*, **20**(7-8), 491–515.
- Gultom, S., Hu, B. (2013) Review of Microalgae Harvesting via Co-Pelletization with Filamentous Fungus, *Energies*, **6**(11), 5921–5939. doi:10.3390/en6115921.
- Hanotu, J., Bandulasena, H.C.H., Zimmerman, W.B. (2012) Microflotation performance for algal separation, *Biotechnology and bioengineering*, **109**(7), 1663–73. doi:10.1002/bit.24449.
- Kim, J., Yoo, G., Lee, H., Lim, J., Kim, K., Kim, C.W., Park, M.S., Yang, J.-W. (2013) Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, **31**(6), 862–876. doi:10.1016/j.biotechadv.2013.04.006.
- Kiran, B., Kumar, R., Deshmukh, D. (2014) Perspectives of microalgal biofuels as a renewable source of energy, *Energy Conversion and Management*, **88**, 1228–1244.
- Kurama, H., Karagüzel, C., Mergan, T., Çelik, M.S. (2010) Ammonium removal from aqueous solutions by dissolved air flotation in the presence of zeolite carrier, *Desalination*, **253**(1-3), 147–152. doi:10.1016/j.desal.2009.11.017.
- Kwon, H., Lu, M., Lee, E.Y., Lee, J. (2014) Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **19**(1), 143-149.
- Leite, G.B., Abdelaziz, A.E.M., Hallenbeck, P.C. (2013) Algal biofuels: challenges and opportunities, *Bioresource Technology*, **145**, 134–141. doi: 10.1016/j.biortech.2013.02.007.

- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), 217–232. doi:10.1016/j.rser.2009.07.020.
- Milledge, J.J., Heaven, S. (2013) A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **12**(2), 165–178. doi:10.1007/s11157-012-9301-z.
- Munir, N., Sharif, N., Naz, S., Saleem, F. (2013) Harvesting and processing of microalgae biomass fractions for biodiesel production (a review), *Journal of Science, Technology and Development*, **32**(3), 235–243.
- Pahl, S.L., Lee, K., Kalaitzidis, T., Ashman, P.J., Sathe, S., Lewis, D.M. (2013) Harvesting, Thickening and Dewatering Microalgae Biomass. En Borowitzka, M. A., Moheimani, N. R. (Eds.), *Algae for Biofuels and Energy*, Dordrecht, Springer Netherlands, 165–185.
- Taylor, P., Gorczyca, B., Zhang, G. (2007) Floc Size Distributions in Dissolved Air Flotation of Winnipeg Tap Water, *Environmental Technology*, **28**(3), 243–254.
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M.K., Forde, G.M., Hoadley, A. (2010) Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **2**(1), 1-15. doi: 10.1063/1.3294480.
- Zhang, X.Z., Hewson, J.C., Amendola, P., Reynoso, M., Sommerfeld, M., Hu, Q. (2014) Critical evaluation and modeling of algal harvesting using dissolved air flotation, *Biotechnology and Bioengineering*, **111**, 2477-2485. doi: 10.1002/bit.25300.