

LATS como sistemas sustentáveis para tratamento de efluentes e geração de matéria-prima para produção de energia

Hrap as sustainable systems for wastewater treatment and generation of raw materials for energy production

• **Data de entrada:**
19/09/2018

• **Data de aprovação:**
06/03/2019

Heytor Fabricio Arantes Frauches Reis¹ | Erlon Lopes Pereira^{2*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.055>

ORCID ID

Pereira EL  <https://orcid.org/0000-0002-9999-1590>

Resumo

As lagoas de alta taxa possuem elevada produtividade de biomassa algal, a qual tem despertado interesse para produção de biocombustíveis. Esse estudo traz uma revisão sobre essas lagoas, fatores que influenciam em sua eficiência, parâmetros de projeto e as limitações que apresentam para a geração de biocombustíveis. As operações de colheita e secagem são apontadas como os principais gargalos para a exploração da biomassa algal. Portanto, processos que necessitam de elevadas concentrações de matéria seca devem ser evitados. Os fatos apresentados no trabalho levam a crer que o biogás é a melhor alternativa de exploração energética da biomassa algal atualmente. Dois efluentes com potencial para essa exploração em larga escala são apresentados no trabalho: vinhaça de cana-de-açúcar e POME.

Palavras-chave: Biomassa. Bioenergia. Remoção de Nutrientes. Tratamento Aeróbio.

Abstract

The high rate algae ponds have elevated productivity of algae biomass, which has been awakening interest for biofuels production. This study brings a review about those lagoons, factors that influence their efficiency, project parameters and limitations that exhibit for biofuels generation. The operations of harvesting and drying are pointed as the main barriers for algae biomass exploration. Therefore, a process that requires high concentrations of dry matter should be avoided. The facts presented in this work lead us to believe that biogas is the best alternative for the energy exploration of algae biomass currently. Two effluents with potential for large-scale exploration are presented in this work: sugar cane vinasse and POME.

Keywords: Biomass. Bioenergy. Nutrient Removal. Aerobic Treatment.

¹ Universidade Federal de Viçosa - Viçosa - Minas Gerais - Brasil.

² Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autor correspondente:** erlonlopes@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

As lagoas de alta taxa (LAT) foram inicialmente estudadas como opção para o tratamento terciário de águas residuárias. A elevada produtividade da biomassa desses sistemas está associada à simbiose entre as microalgas e as bactérias, o que tem despertado interesse para a produção de biocombustíveis (KIM et al., 2014).

Segundo Brennan e Owende (2010), a definição de microalgas abrange microrganismos multicelulares e unicelulares, incluindo tanto microalgas procarióticas, i.e. cianobactérias (*Chloroxibacteria*), como microalgas eucarióticas, como as algas verdes (*Chlorophyta*), algas vermelhas (*Rhodophyta*) e diatomáceas (*Bacillariophyta*).

Oswald et al. (1957) e Golueke et al. (1957) foram pioneiros em relatar as vantagens da associação entre bactérias e algas no tratamento de águas residuárias e a propor a produção de algas como fonte de energia em larga escala. Segundo Oswald e Golueke (1960), isso é possível devido à complementaridade metabólica entre as algas e bactérias presentes. As algas são capazes de produzir oxigênio por meio da fotossíntese, que é necessária para a respiração aeróbica das bactérias. De maneira oposta, as bactérias geram dióxido de carbono, o que dá suporte à elevada síntese de biomassa das microalgas. A grande produtividade de biomassa desses sistemas seria impossível apenas com o suprimento de carbono do ar atmosférico. Estima-se que apenas 5% do CO₂ consumido em lagoas de alta taxa sejam provenientes desta fonte (STEPAN et al., 2002; PUTT et al., 2011).

Atualmente, a principal aplicação das lagoas de alta taxa é na remoção de nutrientes após digestão anaeróbica (CRAGGS et al., 2014; ASSIS et al., 2017). Entretanto, também são utilizadas no tratamento secundário de esgoto sanitário (RUPPERT CRAGGS et al., 2012; KIM et al., 2014).

A remoção de nutrientes em LATs ocorre por mecanismos diretos e indiretos. O mecanismo direto é relacionado à fixação dos nutrientes e à posterior separação da biomassa. O indireto ocorre devido à volatilização de amônia e à precipitação de ortofosfato, como consequência do aumento do pH pela atividade fotossintética (GARCIA et al., 2000).

Putt et al. (2011) estimaram potencial de 17 a 28 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de produção de combustíveis, baseado em um rendimento de biomassa de 20 g m⁻² d⁻¹ (BRENNAN; OWENDE, 2010). Jason e Park et al. (2011) e Craggs et al. (2012) relataram valores de produtividade de biomassa entre 2,5 e 40 g m⁻² d⁻¹.

Ao utilizar resíduos como matéria-prima para a produção de biomassa algal, reduzem-se gastos com fertilizantes (nutrientes para o cultivo das algas) e repartem-se os custos capitais dos produtos com o tratamento dos efluentes. Entretanto, no que tange o seu uso na produção de biocombustíveis, as operações de colheita e secagem são os principais gargalos à exploração comercial da biomassa das microalgas (MILLEDGE; HEAVEN, 2013). Devido a isso, muitos estudos têm sido desenvolvidos nesse campo, e as principais alternativas são apresentadas neste trabalho.

O presente estudo traz uma revisão sobre as vantagens e as limitações desses sistemas para o tratamento de resíduos, parâmetros de projeto, fatores que influenciam sua eficiência operacional e gargalos ao uso da biomassa algal como fonte renovável de energia.

2 METODOLOGIA

Este trabalho é baseado em revisão de publicações, sendo majoritariamente composto por arti-

gos publicados em periódicos internacionais, os quais foram obtidos através de banco de dados do SciELO, Science Direct e Google Acadêmico. A busca utilizou palavras-chaves como: *High Rate Algae Ponds*, *Design of High Rate Algae Ponds*, *High Rate Algae Ponds Models*, *High Rate Algae Ponds Review*, *Algae Harvesting*, *Algae Drying*, *Algae Biofuel*, *Algae Ethanol*, *Algae Biogas*, *Algae Biodiesel*, *Algae Pyrolysis* etc. A escolha dos artigos ocorreu por ordem de relevância (citações), pelas ferramentas disponíveis nos bancos de dados citados. O trabalho revisa publicações de 1957 até 2017, com o intuito de elucidar o desenvolvimento das pesquisas na área ao longo do tempo.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Parâmetros Construtivos

As lagoas de altas taxas são uma opção de tratamento com baixo gasto energético se comparadas a, por exemplo, sistemas de lodos ativados. Porém, para a mesma remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demandam área aproximadamente 50 vezes superior (PARK; CRAGGS; SHILTON, 2011a). Portanto, as lagoas serão aconselháveis em locais sem grandes limitações por área, seja de ordem física ou econômica.

Usualmente as LATs são construídas com o formato de elipses, subdividas por uma ou mais chicanas e com agitação por rodas de pás. A função das rodas de pás é manter boa mistura para evitar a sedimentação das microalgas e homogeneizar os nutrientes (HADIYANTO et al., 2013). Além disso, é importante que o regime de escoamento seja turbulento para evitar fotoinibição nas microalgas devido à exposição demasiada à radiação solar nas camadas superiores das lagoas (KROON et al., 1989).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros construtivos adotados para LATs, as respectivas eficiências de remoção de nutrientes e de matéria orgânica, para diferentes águas residuárias. É comum que esses sistemas operem com diferentes tempos de detenção hidráulico (TDH) durante o ano, como forma de compensar a menor radiação solar durante as estações mais frias (CRAGGS et al., 2014). Por isso, algumas referências apresentam esse parâmetro em faixas.

Buhr e Miller (1983) desenvolveram modelagem para as interações entre microalgas e bactérias em lagoas. Com a modelagem, os autores construíram um ábaco, no qual é possível estimar a produtividade da lagoa em função do TDH, temperatura e profundidade. A Fig. 1 apresenta o ábaco adaptado desenvolvido pelos autores.

A modelagem considerou os principais fenômenos físico-químicos presentes nas LATs e foram assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras: I) não há limitação de luz, provocada por diferença de profundidade, ao crescimento das microalgas; II) não há perda de amônia para o ambiente por volatilização; III) as lagoas podem ser modeladas como uma série de reatores de mistura perfeita; IV) a taxa de crescimento das bactérias pode ser modelada pela cinética de Monod com três substratos limitantes (substrato orgânico, oxigênio e nitrogênio); V) a taxa de crescimento das microalgas pode ser modelada pela cinética de Monod com dois substratos limitantes (dióxido de carbono e nitrogênio), multiplicados por um fator de intensidade luminosa.

A influência da intensidade luminosa em relação à profundidade (densidade de fluxo de fótons) na produtividade das microalgas foi modelada por Kroon et al. (1989). O objetivo foi encontrar estratégias de gerenciamento do tempo de retenção hidráulico e, conseqüentemente, da profundidade, em diferentes condições climáticas. O

modelo mostrou boa concordância com dados de literatura para valores de densidade de fluxo de fótons superiores a 20 mol m⁻² dia⁻¹. Os autores também introduziram um novo conceito: a taxa de absorção compensativa, a qual é a quantidade equivalente de fótons capturados pelas microalgas para compensar o consumo pela fotossíntese.

Hadiyanto et al. (2013) utilizaram a simulação com fluidodinâmica computacional para avaliar a geometria das LATs. Os autores verificaram que

à medida que se eleva a relação comprimento/largura (C/L), as zonas mortas tendem a diminuir. Entretanto, também há maior consumo energético quando essa relação é aumentada. Os autores recomendaram relações C/L superiores a 10 para o projeto das LATs para obter boa uniformidade de velocidade e evitar danos consideráveis as microalgas por cisalhamento. Uma alternativa para construir lagoas com esse perfil é a construção de chicanas.

Tabela 1: Parâmetros construtivos, remoção de nutrientes e carbono para diferentes efluentes em lagoas de alta taxa.

Água Residuária	TDH (d)	Remoção de nutrientes e carbono (%)	Profundidade (m)	Velocidade linear das rodas (m/s)	Referência
Sintética	4 a 7	65,6-78,7 (N) 18,0-92,9 (P) 35,0-30,8 (DQO)	0,25	0,2	(CROMAR; FALLOWFIELD, 1997)
Esgoto sanitário	3 a 10	57-73 (N)	0,30	0,09	(GARCIA et al., 2000)
Esgoto sanitário diluído 1:1	4 a 8	86 -98 (N-amoniaco) 52-68 (P)	0,30	0,15	(PARK et al., 2011b)
Esgoto sanitário	-	65 (N-amoniaco) 19 (P) 50 (DBO)	0,35	0,2	(CRAGGS et al., 2012)
Esgoto sanitário	2	92,68 (N) 82,65 (P) 85,44 (DQO)	0,3	0,3	(KIM et al., 2014)
Esgoto sanitário efluente de UASB	5	-	0,3	0,1-0,15	(ASSIS et al., 2017)
Esgoto sanitário	3 a 7	-	0,6	0,1	(HOM-DIAZ et al., 2017)
Suinocultura (diluído)	10	88 (N) 76 (DQO)	0,3	0,20	(GODOS et al., 2009)
Suinocultura (diluído)	10	98 (N-amoniaco) 56 (DQO)	0,3	-	(GODOS et al., 2010)
Suinocultura (após floculação)	40 a 80	90 (amoniaco) 90 (DQO)	0,26	-	(AGUIERRE et al., 2011)
Água residuária de piscicultura	5 a 10	78-85 (N) 64- 94 (P) 64-77 (DQO)	0,15	0,22	(POSADAS et al., 2015)
Água residuária de piscicultura + Esgoto sanitário (1:1)	7	88 (N) 79 (P) 70 (DQO)	0,15	0,22	

Nota: (N) – Nitrogênio total, (N-amoniaco) – Nitrogênio na forma de amônio, (P) – Fósforo, (DQO) – Demanda química de oxigênio, (DBO) – Demanda bioquímica de oxigênio.

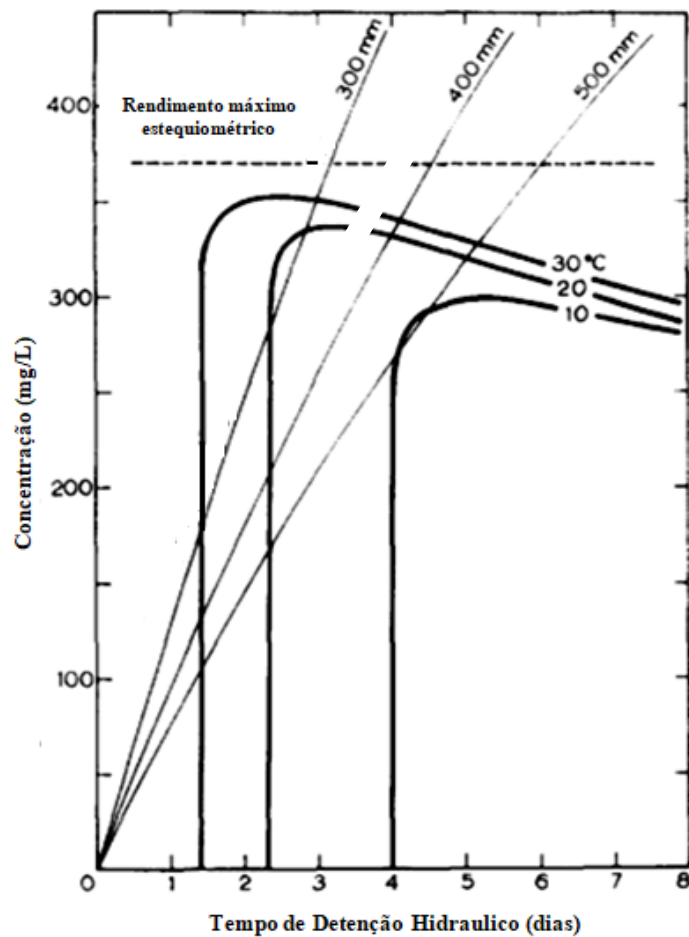


Figura 1: Ábaco para estimar a concentração de biomassa algal (eixo vertical, em mg L^{-1}) em função do tempo de detenção hidráulico (eixo horizontal, em dias), profundidade (curvas transversais, em mm) e temperatura (curvas principais, em $^{\circ}\text{C}$). Fonte: Adaptado de Buhr e Miller (1983).

3.2 Temperatura, pH e Carbonatação

A temperatura afeta a taxa metabólica das microalgas e das bactérias. A maior parte das espécies de microalgas possui temperatura ótima entre 15°C e 25°C (SUTHERLAND et al., 2015). Além da faixa de temperatura, as microalgas também são sensíveis a variações bruscas desta variável.

A temperatura também modifica a solubilidade dos gases. Com isso, o equilíbrio do dióxido de carbono na água é afetado, e consequentemente o pH, e a remoção de amônia. Craggs et al. (2012) mostraram que a temperatura das lagoas é diretamente afetada pela temperatura do ar e pela

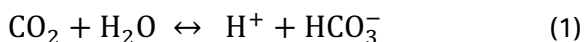
radiação solar. Os autores estudaram 4 lagoas de alta taxa em escala real, com 1,25 hectare cada e controle de pH (7,5-8,5) por adição de CO_2 . A remoção de nitrogênio e a produtividade de microalgas foram afetadas positivamente pelo aumento da temperatura.

Entretanto, essa melhora deve estar vinculada, principalmente, aos mecanismos indiretos de remoção, visto que Do Couto et al. (2015) não observaram diferença significativa na assimilação de nitrogênio ao comparar LATs operando sem limitação e com limitação parcial de radiação solar incidente. Os autores argumentam que apesar de o metabolismo fotossintético se

reduzir quando há restrição da radiação solar, as bactérias podem crescer satisfatoriamente e produzir um efeito compensatório na fixação de nitrogênio.

Sob condições de limitação de carbono, o pH tende a aumentar rapidamente como consequência do desequilíbrio entre a fotossíntese e a respiração. Esse parâmetro pode variar consideravelmente durante o dia e atingir valores superiores a 10 ao final da tarde (SUTHERLAND et al., 2015).

A fotossíntese consome CO_2 por meio da fixação de carbono e provoca redução na concentração de prótons, como mostra a Eq. 1. De maneira oposta, a respiração força o equilíbrio a reduzir o pH. Em condições de pH elevado, os prótons são consumidos e amônia é produzida, como mostra a Eq. 2.



É importante frisar que nas LATs o principal mecanismo indireto de remoção de nitrogênio é a formação de amônia (GARCIA et al., 2000), uma vez que a desnitrificação ocorre em meio anóxico e as LATs apresentam alta taxa fotossintética, ou seja, possuem oxigênio dissolvido. Entretanto, essa desnitrificação já foi reportada em LATs operando com alta carga orgânica (GODOS et al., 2009).

O pH elevado pode causar danos às microalgas tanto pela inibição por amônia como pela redução da atividade da enzima RuBisCo (SUTHERLAND et al., 2015). Para evitar esses problemas, o pH deve ser mantido entre 7,5 e 8,5 para o bom funcionamento das lagoas (CRAGGS; SUTHERLAND; CAMPBELL, 2012).

De acordo com Putt et al. (2011), devido à baixa concentração de CO_2 na atmosfera (cerca de 400

ppm), é recomendável a utilização da carbonatação em razão mínima de 5% (v/v) para sustentar uma alta taxa de crescimento das microalgas. A carbonatação também é uma forma de controle do pH na operação das LATs (CRAGGS; SUTHERLAND; CAMPBELL, 2012).

A adição de CO_2 é usualmente realizada em pontos específicos da lagoa com maior profundidade, semelhante a poços (STEPAN et al., 2002; CRAGGS et al., 2014). Porém Putt et al. (2011) relataram que a utilização de coluna de absorção apresentou maior eficiência em termos de transferência de massa e pode ser uma alternativa para reduzir os custos da carbonatação.

A fonte de gás carbônico deve ser de baixo custo. Gases efluentes de queima de caldeiras, incineradores e termoelétricas podem ser utilizados. Outra opção é a utilização de biogás, que geralmente contém de 15-35% de CO_2 , o que traria a vantagem adicional de elevar o poder energético do biogás e remover o H_2S (HEUBECK et al., 2007).

3.3 Reciclo

O reciclo consiste em devolver às LATs parte das microalgas presentes nos efluentes, de forma semelhante ao que ocorre em sistemas de lodo ativado (CRAGGS et al., 2014). Park et al., (2011b) investigaram o efeito do reciclo de biomassa sedimentada na dominância e na eficiência de colheita em lagoas de alta taxa. Para isso, os autores compararam uma unidade com reciclo após sedimentação em tanques *imhoff* com uma lagoa sem reciclo (controle). Ao longo do experimento, que durou 1 ano, o reciclo variou de 66 a 212 g de sólidos por kg de alga removida do sistema pelos tanques *imhoff*.

Verificou-se que a lagoa com reciclo apresentou maior dominância (90%) em relação ao controle (50%) de microalgas do gênero *Pediastrum sp.* e também maior tamanho das colônias, devido ao

aumento do tempo de retenção celular. Como consequência, a eficiência de separação da biomassa nas lagoas com reciclo foi superior (85%) ao controle (60%).

3.4 Competição

Os principais predadores naturais das microalgas são os fitoplânctons. Em estudo realizado por Assemany et al. (2015), foram identificados 32 gêneros nas lagoas, sendo a classe *Chlorophyceae* a mais abundante durante o período analisado. Os indivíduos dos gêneros *Desmodesmus* também foram abundantes no verão e no outono, e o gênero *Chlorella* no inverno e na primavera. Também segundo os autores, a competição com outros microrganismos por espaço e nutrientes e a predação pelos fitoplânctons foram mais prejudiciais às microalgas do que a fotoinibição.

3.5 Colheita e Secagem

A concentração de sólidos totais (ST) nos efluentes de lagoas de alta taxa é da ordem de 0,02 a 0,05% (MILLEDGE; HEAVEN, 2013). Consequentemente, para aproveitar as microalgas, seja para fins energéticos ou não, são necessárias operações unitárias para concentrar (colheita) e secar a biomassa. A colheita das microalgas também é fundamental para a remoção dos nutrientes das águas residuárias de forma direta.

Além da baixa concentração, o pequeno diâmetro e a densidade semelhante à da água são os principais desafios para viabilizar técnica e economicamente as operações unitárias que visam concentrar as microalgas. Segundo Greenwell et al. (2009), esses processos podem ser responsáveis por até 50% dos custos dos produtos finais obtidos da biomassa algal.

Dentre as operações utilizadas na colheita estão a sedimentação, a floculação, a flotação e a filtração. Quanto à secagem, alguns métodos

utilizados são o *spray dry*, a liofilização, o secador de tambor e a secagem ao sol (GRIMA et al., 2003), de acordo com a finalidade de uso para a biomassa algal.

3.5.1 Sedimentação

A sedimentação por ação da gravidade em sistemas particulados ocorre quando a velocidade terminal da partícula é maior do que a velocidade ascensional do fluido. Em regime laminar, a velocidade de sedimentação (V_s) de partículas esféricas pequenas em sistema diluído pode ser calculada pela lei de Stokes, apresentada na Eq. 3. Nota-se que a velocidade de sedimentação é proporcional ao quadrado do raio da partícula (r^2), à diferença entre a massa específica da partícula (ρ_p) e do fluido (ρ_f) e inversamente proporcional à viscosidade do fluido (μ).

$$V_s = \frac{9}{2} [r^2 g (\rho_p - \rho_f)] / \mu \quad (3)$$

A massa específica das microalgas varia de 1080 a 1130 kg m⁻³, e o seu diâmetro varia de 20 a 70 micrômetros (LAVOIE; NOÛÉ, 1987; BRENNAN; OWENDE, 2010). Devido a essas características, os valores de velocidades de sedimentação são muito baixos, da ordem de centímetros por dia. Com isso, com a sedimentação obtêm-se concentrações de apenas 0,5 a 3% de ST. Entretanto, esse é o método mais barato de colheita (MILLEDGE; HEAVEN, 2013).

3.5.2 Floculação

A floculação em si não é um método de recuperação da biomassa das microalgas, mas uma etapa que visa facilitar a separação por métodos de sedimentação, centrifugação ou filtração, pela

agregação das células. De acordo com Brennan e Owende (2010), as microalgas possuem carga negativa, por isso saís de cátions multivalentes (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ou polímeros catiônicos são usualmente empregados. A floculação seguida de sedimentação obtém concentrações de 3 a 8% de ST (MILLEDGE; HEAVEN, 2013).

3.5.3 Flotação forçada

A flotação geralmente ocorre de forma mais rápida do que a floculação, devido à baixa densidade dos flocos formados pelas células das microalgas (MILLEDGE; HEAVEN, 2013). Entretanto, este é um processo mais caro, visto que necessita de aeração. Concentrações de 7 a 10% de ST podem ser obtidas por essa rota tecnológica.

3.5.4 Filtração

A filtração convencional é aplicável a poucas microalgas que apresentam dimensões superiores a 70 micrômetros, como os gêneros *Coelastrum* e *Spirulina*, enquanto para a maior parte apenas a micro ou ultrafiltração são viáveis (BRENNAN; OWENDE, 2010). Uma vantagem da filtração é a facilidade para escalonar os sistemas com base em experimentos ou plantas piloto (GREENWELL et al., 2009).

Segundo Mohn (1980), a filtração contínua pode obter concentrações de sólidos totais de 7,5%, para filtro tipo cilindro rotativo, e 18% para filtro tipo filtro de esteira, com respectivos gastos energéticos de 0,3 e 0,5 kWh m⁻³. Entretanto, o filtro prensa, que possui operação descontínua, apresentou a melhor capacidade de concentrar os sólidos (22 a 27%), com gasto energético de 0,88 kWh m⁻³.

3.5.5 Centrifugação

A centrifugação é um método extremamente eficaz para concentrar microalgas. Eficiências

de separação superiores a 95% podem ser obtidas quando é aplicada aceleração equivalente a 13000 vezes a gravidade, 60% com 6000 ou 40% com 1300 (MOLINA GRIMA et al., 2003). A concentração de biomassa obtida é de 12-22%, ou seja, semelhante à da filtração (MOHN, 1980).

Contudo, devido ao alto custo de capital, manutenção e consumo energético na faixa de 1 a 1,4 kWh m⁻³ (MILLEDGE; HEAVEN, 2013), a centrifugação só é utilizada na recuperação de produtos com alto valor agregado, não sendo atualmente opção viável para a produção de biocombustíveis. Por exemplo, caso seja produzido biodiesel de microalgas, se a centrifugação for aplicada como único método de separação, esta consumirá 4 vezes mais energia do que o obtido no produto (MILLEDGE; HEAVEN, 2013).

3.5.6 Métodos de Secagem

A biomassa concentrada de microalgas deve ser seca rapidamente para evitar sua deterioração, especialmente em locais quentes, assim como para o seu processamento. Alguns métodos utilizados são *spray dry*, liofilização, secador de tambor e secagem ao sol (GRIMA et al., 2003).

Tanto o *spray dry* como a liofilização são métodos extremamente caros, sendo aplicáveis apenas para produtos sensíveis e com alto valor agregado ou em pesquisas (GRIMA et al., 2003).

A secagem ao sol é o método mais barato, entretanto requer muita área e provoca degradação das biomoléculas das microalgas (BRENNAN; OWENDE, 2010).

A secagem a tambor pode ser considerada a rota mais razoável de secagem, pois é mais barata que a liofilização e o *spray dry*, mas apresenta melhor preservação da biomassa que a secagem ao sol.

Devido ao alto custo para a evaporação da água nos processos de secagem, para viabilizar o ba-

lanço energético de produção de energia a partir das microalgas é preferível a utilização de métodos que dispensem a secagem (MILLEDGE; HEAVEN, 2013), visto que os custos para a redução do teor de água durante os processos de colheita são bem inferiores se comparados aos métodos disponíveis para secagem.

3.6 Outros sistemas para o cultivo de microalgas

Com o objetivo de facilitar a colheita das microalgas, têm sido desenvolvidos sistemas que produzem efluentes com maior concentração do que as LATs. Algumas alternativas propostas na literatura são os fotobiorreatores e sistemas com crescimento aderido.

Os fotobiorreatores são sistemas tubulares transparentes onde as microalgas são cultivadas. Os fotobiorreatores são capazes de produzir concentrações de 1 até 6 g L⁻¹ (CHEN et al., 2011; PEREIRA et al., 2017). Outras vantagens em relação às lagoas de alta taxa são as possibilidades de melhor controle e menor contaminação por outras espécies de micro-organismos, como os fitoplânctons (UGWU et al., 2008). Entretanto, os custos dos produtos obtidos com esses sistemas se tornam bem maiores do que o das LATs (XIN et al., 2016). Além disso, os fotobiorreatores apresentam problemas operacionais no *scale-up* como: gradientes de pH, problemas na transferência de gases e incrustações (UGWU; AOYAGI; UCHIYAMA, 2008).

Assis et al. (2017) investigaram a produção de microalgas em sistemas híbridos compostos por LATs e um sistema de crescimento aderido, intitulado reatores de biofilme. Os reatores consistiam em placas planas de acrílico com um meio suporte para o crescimento das microalgas. As placas foram instaladas verticalmente e recebiam fluxo descendente de efluentes das LATs. Na base das placas o líquido percolado era coletado por uma

calha, com concentrações entre 8,4 e 11,7% de ST. Além de facilitar a colheita das microalgas, os reatores de biofilme podem reduzir os custos com a carbonatação, visto que o maior contato com a atmosfera permite melhor aproveitamento do CO₂ presente no ar e da radiação solar.

3.7 Aplicações da Biomassa Algal na Produção de Biocombustíveis

3.7.1 Etanol de terceira geração

Etanol pode ser obtido através da fermentação direta de açúcares armazenados nas células das microalgas ou de polímeros celulares, amido e celulose, previamente hidrolisados. A fermentação escura também tem sido estudada como rota alternativa para a conversão de açúcares em etanol.

Hirano et al. (1997) estudaram a produção de etanol do amido. O polímero foi extraído, saccharificado e fermentado por leveduras. A microalga estudada foi do gênero *Chlorella*, a qual apresentou 37% de amido em sua composição em peso seco. Foi obtida taxa equivalente a 65% da taxa teórica de conversão de amido em etanol e concentração final de etanol de 0,24% (m/m).

O mesmo estudo também verificou o uso da fermentação escura como rota para a produção de etanol com o amido intracelular. A alga *Chlamydomonas reinhardtii* apresentou maior produção, obtendo-se um teor de 1% (m/m) de etanol após a fermentação. Os resultados indicaram que a produção de etanol intracelular é mais simples e menos intensiva em gasto energético do que a rota tradicional.

Utilizando a fermentação escura, Ueno et al. (1998) obtiveram produtividade máxima do etanol de 450 μmol g⁻¹ ST a 30 °C. *Chlorococcum littorale* foi a espécie estudada, a qual continha 27% de amido em peso seco. Além do etanol,

acetato, hidrogênio e gás carbono foram obtidos como produtos da fermentação.

Hossain et al. (2015) propuseram um processo para a produção de etanol utilizando a *Spirulina*. A biomassa seca era moída, sofria hidrólise ácida, autoclavagem e filtração para obter uma solução com $15,2 \text{ g L}^{-1}$ de açúcares, em média. A solução teve o pH ajustado e foi fermentada por *Saccaromyce cerevisiae*. O teor de etanol ao final da fermentação (3 a 7 dias) variou de 0,85 a 1% (m/m), valor bem inferior ao obtido com a fermentação de caldo de cana, que varia de 1 a 6%, de acordo com Silva et al. (2008).

3.7.2 Biogás

A produção de biogás é obtida da digestão anaeróbica da biomassa algal concentrada pelos métodos de colheita. Apenas a sedimentação é suficiente para obter concentração de sólidos adequada para a biometanização. Devido a essas características, a biometanização é um proces-

so mais direto de produção de energia, visto que necessita de baixas concentrações e utiliza toda a biomassa como substrato, o que não ocorre na produção de etanol ou biodiesel, por exemplo (AXELSSON et al., 2012).

Esse processo apresenta quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetanogênese e metanogênese. Em substratos complexos, como as microalgas, a hidrólise da matéria orgânica é a etapa limitante. A acidogênese e acetanogênese convertem os produtos da hidrólise em substratos que as archaeas metanogênicas possam metabolizar, os quais são, majoritariamente, H_2 , CO_2 e acetato. A biodigestão necessita de pH próximo à neutralidade e pode ocorrer tanto na fase mesofílica (20–40 °C) quanto na termofílica (40–60 °C).

A Tabela 2 apresenta rendimentos obtidos em alguns estudos de digestão anaeróbica da biomassa algal. A diferença na produção entre espécies está associada à variação na composição das células. Microalgas com alto teor de lipídeos tendem a produzir mais metano (MERHABADI et al., 2015).

Tabela 2: Produção específica de metano a partir de biomassas algais, em condições mesofílicas, por tipo de reator e tempo de detenção hidráulico.

Gênero	Reator	T (°C)	TDH (horas)	Rendimento ($\text{LCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{SV}^{-1}$)	Referência
<i>Arthrospira platensis</i>	Batelada	38	32	0,29	MUSSGNUG et al., 2010)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Batelada	38	32	0,39	
<i>Chlorella kessleri</i>	Batelada	38	32	0,22	
<i>Dunaliella salina</i>	Batelada	38	32	0,32	
<i>Euglena gracilis</i>	Batelada	38	32	0,32	
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Batelada	38	32	0,18	
<i>Spirulina platensis</i>	Batelada	33	30	0,28	(ZAMALLOA et al., 2012)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Batelada	33	30	0,21	
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Batelada	33	30	0,35	
Mix de espécies	Contínuo	35	15	0,13	(PASSOS et al., 2014)
Mix de espécies	Contínuo	35	20	0,17	

3.7.3 Biodiesel

A principal rota comercial para a produção de biodiesel é a transesterificação metílica via catálise alcalina de triglicerídeos. O biodiesel é um dos biocombustíveis mais estudados para o aproveitamento da biomassa algal atualmente (ASSEMANY et al., 2016). Um dos motivos para esse interesse é que as microalgas são a única fonte com potencial para substituir totalmente o diesel fóssil (CHISTI, 2008), visto que as microalgas possuem produtividades de óleo pelo menos 10 vezes superiores a qualquer cultura agrícola (CHISTI, 2007).

Segundo Lira et al. (2012), as microalgas produzem grande quantidade de ácidos graxos poli-insaturados, que apresentam menor estabilidade. Em contrapartida, possuem menor ponto de fusão do que ácidos graxos saturados ou mono-saturados. Com isso, o biodiesel proveniente das microalgas se torna melhor do que os de matérias-primas vegetais para locais frios.

Todavia, além das operações de colheita e secagem, a produção de biodiesel também necessita de outra operação cara com as microalgas, a extração do óleo. Isso torna os custos do biodiesel proibitivos no cenário atual. Chisti (2007) estimou que o custo de produção do óleo de microalgas precisaria ser reduzido em quase 6 vezes para se tornar competitivo com o petróleo.

Em estudo mais recente, Xin et al. (2016) encontraram custos de produção de biodiesel estimados de 0,42 a 3,55 \$ L⁻¹ na literatura, em sistema utilizando LATs para o cultivo de microalgas. Segundo o autor, essa ampla faixa de variação é causada por diferentes pressupostos nos estudos, como produtividade e teor de óleo nas microalgas, além de extrapolação de dados de escala laboratorial. Chisti et al. (2007) afirmam que para ser competitivo com a palma, o custo de produção do biodiesel de microalgas deve ser de no máximo 0,66 \$ L⁻¹. Em estudo mais recente,

Socol et al. (2017), ao comparar com o biodiesel de soja, afirmam que o preço final não deve ultrapassar 0,81 US\$ L⁻¹.

3.7.4 Pirólise

A pirólise é um processo de conversão termoquímica que ocorre entre 300 e 700°C na ausência de oxigênio, tendo como produtos carvão, bio-óleo e gás (CHIARAMONTI et al., 2017). A proporção entre os produtos depende da matéria-prima e das condições do processo. A pirólise rápida tende a produzir mais óleos e gases, e a lenta, carvão. Dependendo do tipo de microalga, o rendimento da produção de bio-óleo pode chegar a 59% da massa de microalgas processadas (BORGES et al., 2014). Para utilizar a pirólise, a biomassa algal deve passar por secagem prévia.

Chiaromonti et al. (2017) investigaram a pirólise de duas amostras de *Nannochloropsis sp.*, uma com alto teor de proteínas (A) e outra com elevado teor de lipídeos (B). Ambas as amostras foram pirolisadas a 450 °C para priorizar a produção de bio-óleo. O rendimento obtido para ambas foi de 36% em massa. Em termos de rendimento energético, foi observada pouca diferença entre as amostras: 46% (A) contra 41% (B). Esses resultados indicam que para a pirólise não é necessário priorizar a produção de lipídeos das microalgas, o que é um fator limitante ao rendimento de matéria seca total.

4 PERSPECTIVAS E SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS

A literatura está bastante avançada sobre o manejo das variáveis operacionais para aumentar a eficiência das lagoas de alta taxa e modelos confiáveis foram desenvolvidos. Vários métodos para aproveitar o potencial energético das microalgas também foram estudados. Entretanto, mais estudos sobre simulação e otimização são

necessários para testar os diferentes arranjos de processo e suas respectivas rentabilidades econômicas, uma vez que estudos desse tipo em escala real apresentariam custos proibitivos.

Pelos fatos expostos no presente trabalho, o biogás aparece como a rota tecnológica mais atrativa para a produção de biocombustíveis, uma vez que a concentração da biomassa necessita apenas de sedimentação simples e custos com secagem são evitados. Ademais, a digestão da biomassa algal pode ser realizada nos reatores anaeróbicos que precedem as LATs em sistemas de tratamento, por meio de reciclo.

Como o reciclo de biomassa sedimentada das lagoas é alcalino e possui baixa relação de carbono:nitrogênio (C:N) para a digestão anaeróbica (MEHRABADI; CRAGGS; FARID, 2015), uma água residuária adequada para a produção integrada de biogás e microalgas deve possuir alta concentração de matéria orgânica, relação C:N elevada e baixo pH. Outro fator importante é que os locais onde serão instaladas as lagoas possuam baixo custo pela terra e disponibilidade de gases de combustão como fonte barata para a carbonatação. Portanto, agroindústrias tendem a serem boas alternativas.

Dois efluentes importantes que se encaixam nessas características são a vinhaça da produção de etanol de cana-de-açúcar e os efluentes de indústria de óleo de palma, conhecidos como POME (*Palm Mill Oil Effluent*). Ambas agroindustriais possuem escala e a peculiaridade de possuírem suas unidades industriais próximas às lavouras, devido à perecibilidade de suas matérias primas. Nas indústrias de palma (HUSAIN et al., 2002; ARRIETA et al., 2007; NASUTION, et al., 2014) e sucroenergética (BRASIL, 2017a), também é largamente empregada a cogeração e a venda de eletricidade, o que facilitaria a integração da produção de biogás com fins energéticos.

Segundo Brasil (2017b), a produção brasileira de etanol na safra 2015/2016 foi de 30.492.728 m³, com estimativa de alcançar 67 milhões de metros cúbicos em 2030 (BRASIL, 2007). A produção de etanol gera pelo menos 10 vezes o volume equivalente de vinhaça que apresenta, em média, pH de 4,3; DQO 23,8 g L⁻¹ e relação de C:N de 16 a 21 (UNICA, 2016).

Marques et al. (2013) relataram que é possível integrar o cultivo das microalgas na indústria sucroenergética. Os autores obtiveram produção de 0,116 m³CH₄ kg_{DQO}⁻¹, através da digestão anaeróbica da vinhaça, e taxa de produção de 70 mg L⁻¹ d⁻¹ para *Chlorella vulgaris*, cultivada na vinhaça após a digestão.

A palma de óleo é a principal cultura oleaginosa do mundo, responsável por quase 40% da produção global de óleos vegetais. A USDA (2017) estimou produção de 18,04 milhões de toneladas de cachos de palma para a safra 2016/2017. O processamento desses frutos gera efluentes líquidos equivalentes a 87% da massa dos cachos processados (PRASERTSAN; PRASERTSAN, 1996). Esses efluentes possuem pH da ordem de 4,7; DQO 50 g L⁻¹ e relação C:N em torno de 30 (RUPANI et al., 2010).

Segundo Kamarudin et al (2015), a integração de sistemas de cultivo de microalgas junto ao tratamento convencional do POMME aparenta ser promissor e viável. O POMME é usualmente tratado em séries de lagoas anaeróbicas e aeróbicas, com tempo de retenção total em torno de 100 dias (KAMARUDIN et al., 2015), portanto a integração da produção de microalgas poderia utilizar a própria estrutura instalada, o que reduziria os custos de implantação. Além disso, espera-se que o uso das microalgas reduza o tempo de tratamento e auxilie na remoção de contaminantes. Todavia, estudos acerca do tratamento do POMME com microalgas fotossintéticas são escassos e recentes (KAMARUDIN et al., 2015).

5 CONCLUSÕES

As lagoas de alta taxa são uma alternativa de baixo custo energético para a remoção de nutrientes de águas residuárias. Entretanto, devido à elevada demanda por área e necessidade de fonte barata para a carbonatação, sua aplicação é restrita.

As operações de colheita e secagem são os principais gargalos para a exploração comercial das microalgas. Portanto, rotas que necessitam de elevadas concentrações de matéria seca devem ser evitadas para viabilizar a produção de bioenergia. Devido a essas restrições, o biogás aparece como a alternativa mais plausível atualmente. Dois efluentes com potencial para essa exploração em larga escala foram apresentados: vinhaça de cana-de-açúcar e POME.

A partir da revisão realizada, percebe-se que a literatura está bastante avançada sobre os fenômenos que ocorrem nas lagoas de alta taxa e que vários métodos para aproveitar o potencial energético das microalgas também foram estudados. Recomenda-se então, para estudos futuros, a simulação de diferentes arranjos, condições operacionais, integração energética etc., a fim de investigar as melhores rotas para o aproveitamento energético da biomassa algal e para o tratamento eficaz das diversas águas residuárias.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Paula et al. Treatment of piggery wastewater in experimental high rate algal ponds. **Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal**, v. 2, n. 2, p. 57-66, 2011.

ARRIETA, F. R. P. et al. Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 7, p. 503-511, 2007.

ASSEMANY, P. P. et al. Algae / bacteria consortium in high rate ponds: Influence of solar radiation on the phytoplankton community. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 154-162, 2015.

ASSEMANY, P. P. et al. Energy potential of algal biomass cultivated in a photobioreactor using effluent from a meat processing plant. **Algal Research**, v. 17, p. 53-60, 2016.

ASSIS, L. R. DE et al. Microalgal biomass production and nutrients removal from domestic sewage in a hybrid high-rate pond with biofilm reactor. **Ecological Engineering**, v. 106, p. 191-199, 2017.

AXELSSON, L. et al. Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 3, p. 246-256, 2012.

BORGES, Fernanda Cabral et al. Fast microwave-assisted pyrolysis of microalgae using microwave absorbent and HZSM-5 catalyst. **Bioresource technology**, v. 166, p. 518-526, 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> >. Acesso em: nov. de 2017.

BRASIL. Empresa de pesquisa energética (2007). **Plano Nacional De Energia. (PNE 2030)**. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx> >. Acesso em: out. de 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (2017). **Produção Brasileira De Cana-De-Açúcar, Açúcar E Etanol**. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-precos/producao-brasileira-de-cana-de-acucar-acucar-e-etanol.pdf/view> >. Acesso em: Out. de 2017.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2010.

BUHR, H. O.; MILLER, S. B. A dynamic model of the high-rate algal-bacterial wastewater treatment pond. **Water Research**, v. 17, n. 1, p. 29-37, 1983.

CHEN, C. Y. et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011.

CHIARAMONTI, D. et al. Review and experimental study on pyrolysis and hydrothermal liquefaction of microalgae for biofuel production. **Applied Energy**, v. 185, p. 963-972, 2017.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. **Trends in Biotechnology**, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2008.

- CRAGGS, R. et al. High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. **New Zealand Journal of Botany**, v. 52, n. 1, p. 60–73, 2014.
- CRAGGS, R.; SUTHERLAND, D.; CAMPBELL, H. Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. **Journal of Applied Phycology**, v. 24, n. 3, p. 329–337, 2012.
- CROMAR, N. J.; FALLOWFIELD, H. J. Effect of nutrient loading and retention time on performance of high rate algal ponds. **Journal of Applied Phycology**, v. 1, p. 301–309, 1997.
- DO COUTO, Eduardo de Aguiar et al. Influence of solar radiation on nitrogen recovery by the biomass grown in high rate ponds. **Ecological Engineering**, v. 81, p. 140–145, 2015.
- GARCIA, J.; MUJERIEGO, R.; HERNANDEZ-MARINE, M. High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal. **Applied Phycology**, v. 12, p. 331–339, 2000.
- GODOS, I. DE et al. Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 19, p. 4332–4339, 2009.
- GODOS, I. DE et al. Influence of flue gas sparging on the performance of high rate algae ponds treating agro-industrial wastewaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1–3, p. 1049–1054, 15 jul. 2010.
- GOLUEKE, C. G.; OSWALD, W. J.; GOTAAS, H. B. Anaerobic digestion of Algae. **Applied microbiology**, v. 5, p. 47–55, 1957.
- GREENWELL, H. C. et al. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. **Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society**, v. 7, n. 46, p. 703–726, 2009.
- HADIYANTO, H. et al. Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. **Chemical Engineering Journal**, v. 217, p. 231–239, 2013.
- HEUBECK, S.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. Influence of CO₂ scrubbing from biogas on the treatment performance of a high rate algal pond. **Water Science and Technology**, v. 55, n. 11, p. 193–200, 2007.
- HIRANO, A. et al. CO₂ fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation. **Energy**, v. 22, n. 2–3, p. 137–142, 1997.
- HOM-DIAZ, A. et al. Ciprofloxacin removal during secondary domestic wastewater treatment in high rate algal ponds. **Chemosphere**, v. 180, p. 33–41, 2017.
- HOSSAIN, M. N. BIN; BASU, J. K.; MAMUN, M. The Production of Ethanol from Micro-Algae Spirulina. **Procedia Engineering**, v. 105, n. 1, p. 733–738, 2015.
- HUSAIN, Z.; ZAINAL, Z. A.; ABDULLAH, M. Z. Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 2, p. 117–124, 2002.
- KAMARUDIN, K. F. et al. A review on wastewater treatment and microalgal by-product production with a prospect of palm oil mill effluent (POME) utilization for algae. **Der Pharma Chemica**, v. 7, n. 7, p. 73–89, 2015.
- KIM, B.-H. et al. Nutrient Removal and Biofuel Production in High Rate Algal Pond Using Real Municipal Wastewater. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 8, p. 1123–1132, 2014.
- KROON, B. M. A. et al. Modelling microalgal productivity in a High Rate Algal Pond based on wavelength dependent optical properties. **Journal of Applied Phycology**, v. 1, n. 3, p. 247–256, 1989.
- LAVOIE, A.; DE LA NOÛE, J. Harvesting of *Scenedesmus obliquus* in wastewaters: Auto- or bioflocculation? **Biotechnology and Bioengineering**, v. 30, n. 7, p. 852–859, 1987.
- LIRA, A. R. et al. Nota Técnica: As Microalgas Como Alternativa À Produção De Biocombustíveis. **Revista Engenharia Na Agricultura-Reveng**, v. 20, n. 5, p. 389–403, 2012.
- MARQUES, S. S. I. et al. Growth of *Chlorella vulgaris* on sugarcane vinasse: the effect of anaerobic digestion pretreatment. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 171, n. 8, p. 1933–1943, 2013.
- MEHRABADI, A.; CRAGGS, R.; FARID, M. M. Wastewater treatment high rate algal ponds (WWT HRAP) for low-cost biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 202–214, 2015.
- MILLEDGE, J. J.; HEAVEN, S. A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 12, n. 2, p. 165–178, 2013.
- MOHN, F. H. Experiences and strategies in the recovery of biomass from mass cultures of microalgae. **Algae biomass: production and use**/[sponsored by the National Council for Research and Development, Israel and the Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), Munich, Germany]; editors, Gedaliah Shelef, Carl J. Soeder, 1980.
- MOLINA GRIMA, E. et al. Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. **Biotechnology Advances**, v. 20, n. 7–8, p. 491–515, 2003.
- MUSSGUG, J. H. et al. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. **Journal of Biotechnology**, v. 150, n. 1, p. 51–56, 2010.
- NASUTION, M. A.; HERAWAN, T.; RIVANI, M. Analysis of palm biomass as electricity from palm oil mills in north sumatera. **Energy Procedia**, v. 47, n. January, p. 166–172, 2014.
- OSWALD, W. J. et al. Photosynthesis in sewage treatment. **American Society of Civil Engineers**, v. 2849, p. 33, 1957.

- OSWALD, W. J.; GOLUEKE, C. G. Biological Transformation of Solar Energy. **Advances in Applied Microbiology**, v. 2, p. 223–262, 1960.
- PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 35–42, 2011a.
- PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. N. Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond. **Water Research**, v. 45, n. 20, p. 6637–6649, 2011b.
- PASSOS, F. et al. Long-term anaerobic digestion of microalgae grown in HRAP for wastewater treatment. Effect of microwave pretreatment. **Water Research**, v. 49, 2014.
- PEREIRA, E. G. et al. Outdoor cultivation of *Scenedesmus obliquus* BR003 in stirred tanks by airlift. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 5, p. 1041–1055, 2017.
- POSADAS, E. et al. A case study of a pilot high rate algal pond for the treatment of fish farm and domestic wastewaters. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 90, n. 6, p. 1094–1101, 2015.
- PRASERTSAN, S.; PRASERTSAN, P. **Biomass residues from palm oil mills in Thailand: An overview on quantity and potential usage Biomass and Bioenergy**, 1996.
- PUTT, R. et al. An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3240–3245, 2011.
- RUPANI, P. F. et al. Review of Current Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Methods: Vermicomposting as a Sustainable Practice. **World Applied Sciences Journal**, v. 11, n. 1, p. 70–81, 2010.
- SILVA, J. A. et al. Aplicação da metodologia de planejamento fatorial e análise de superfícies de resposta para otimização da fermentação alcoólica. **Química Nova**, v. 31, n. 5, p. 1073–1077, 2008.
- SOCOL, C. R. et al. Pilot scale biodiesel production from microbial oil of *Rhodospiridium toruloides* DEBB 5533 using sugarcane juice: performance in diesel engine and preliminary economic study. **Bioresource technology**, v. 223, p. 259–268, 2017.
- STEPAN, D. J. et al. **Carbon Dioxide Sequestering Using Microalgal**. Pittsburgh: [s.n.].
- SUTHERLAND, D. L. et al. Enhancing microalgal photosynthesis and productivity in wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 222–229, 2015.
- UENO, Y.; KURANO, N.; MIYACHI, S. Ethanol production by dark fermentation in the marine green alga, *Chlorococum littorale*. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 86, n. 1, p. 38–43, 1998.
- UGWU, C. U.; AOYAGI, H.; UCHIYAMA, H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. **Bioresource Technology** v. 99, p. 4021–4028, 2008.
- XIN, C. et al. Comprehensive techno-economic analysis of wastewater-based algal biofuel production: A case study. **Bioresource Technology**, v. 211, p. 584–593, 2016.
- UNICA. União das Usinas de Cana-de-Açúcar (2017). Estado da arte da vinhaça. Disponível em: <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35414851>. Acesso em: out. de 2017.
- USDA. United States Department of Agriculture (2017). **Oilseeds: World Market and Trade**. Disponível em <<https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade>>. Acesso em: out. de 2017.
- ZAMALLOA, C.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. Anaerobic digestibility of *Scenedesmus obliquus* and *Phaeodactylum tricornutum* under mesophilic and thermophilic conditions. **Applied Energy**, v. 92, p. 733–738, 2012.