

Análise do potencial energético de lodos algáceos obtidos por diferentes coagulantes

Renan Barroso Soares

Faculdade Multivix Vitória e
Universidade Federal do Espírito Santo – Brasil
renanbarroso.offshore@hotmail.com

Ricardo Franci Gonçalves

Universidade Federal do Espírito Santo – Brasil
rfg822@gmail.com

Márcio Ferreira Martins

Universidade Federal do Espírito Santo – Brasil
marcio.martins@ufes.br

ABSTRACT

The production of microalgae in Waste Water Treatment Plants (WWTP) is no longer seen as a problem and is now seen as a raw material for obtaining biofuel. Algal sludge has a higher heating value (HHV) similar to that of wood and can be used in thermochemical processes for the generation of energy. However, the energetic analysis of the algae sludge needs more attention, since the literature normally presents HHV for pure species of microalgae and without the presence of coagulants. This work analyzed the influence of different commercial coagulants on HHV of algae sludge obtained in high rate ponds with UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) effluent. In addition to traditional inorganic coagulants, cationic polymers have also been evaluated. The dosages used were based on Jar Test assays and a cost analysis was also addressed. The results showed that in the natural pH range of the pond (between 8.07 and 9.07), the coagulant polymer cation polydadmac had the best cost benefit and the HHV of this sludge was 21.19MJ / kg. This value is slightly lower than the HHV obtained for coagulant-free algal sludge, which was 21.58MJ / kg. The second highest HHV was 16.18 MJ / kg, obtained with the polysynthetic cationic polymer, while the traditional inorganic coagulants further reduced HHV.

Keywords: Microalgae, coagulant; energy.

1. INTRODUÇÃO

O uso de energia está associado ao desenvolvimento econômico-social e garantir a segurança energética, de maneira sustentável, é um dos maiores esforços da sociedade (RAHEEM *et al.*, 2015). Atualmente, com o ritmo de consumo mundial diário de óleo e de gás, estima-se que as reservas durem 49 e 70 anos, respectivamente (SOREANU *et al.*, 2017). Além da depleção das reservas, o uso extenso de combustíveis fósseis tem contribuído para a emissão de gases do efeito estufa. Este contexto motiva a busca por novas fontes de energia, mais limpas e renováveis. Dentre as opções possíveis, a energia de biomassa é vantajosa, uma vez que atende a necessidade de combustível líquido e gasoso, para integrar a infraestrutura já existente (PATEL *et al.*, 2016), e pode ser ajustada, conforme a necessidade momentânea de consumo (HEIDENREICH e FOSCOLO, 2015). Para suprir toda essa demanda, é improvável que a biomassa de agricultura seja suficiente e as microalgas são consideradas a alternativa mais promissora (VANDAMME *et al.*, 2013).

A produção de biomassa algácea apresenta várias vantagens se comparada a biomassa tradicional de culturas terrestres. A taxa de crescimento pode ser até cem vezes superior à das plantas terrestres, dobrando sua biomassa em menos de um dia (LAM e LEE, 2014). Outras vantagens são a possibilidade de cultivo em áreas inférteis, como desertos e regiões costeiras, em águas salinas, salobras, e águas residuárias. Além disso, o cultivo ainda permite a incorporação de CO₂ gerado em processos industriais, adicionando-se um benefício extra (JANKOWSKA *et al.*, 2017). Por tudo isso, as microalgas têm se consolidado como matriz essencial para os biocombustíveis de terceira geração, abrindo uma nova dimensão na indústria de energia renovável (PENG *et al.*, 2017).

Atualmente, a produção de microalgas para a geração de biocombustível não é economicamente viável. O motivo principal é alto custo de colheita, estimado em 30% do custo total de produção da biomassa (GERCHMAN *et al.*, 2017), podendo chegar a 60% do custo total do biocombustível produzido (CASTRILLO *et al.*, 2013). A dificuldade na colheita de microalgas está associada com a diluição da cultura, que se apresenta com baixa concentração de biomassa. O processo de floculação tem sido considerado o melhor método para colher microalgas, devido a sua capacidade de processar uma grande quantidade de volume em um custo relativamente baixo. No entanto, a incorporação desses compostos químicos à biomassa pode afetar os processos subsequentes. Cloretos de alumínio, por exemplo, podem inibir as reações de transesterificação e prejudicar a produção de biodiesel (WAN *et al.*, 2015). Sulfato de alumínio e cloreto férrico podem afetar a digestão anaeróbia, prejudicando a geração de biogás (ANTHONY *et al.*, 2013). Para os processos termoquímicos, como incineração, gaseificação e pirólise, a adição de frações inorgânicas na biomassa reduz o seu poder calorífico e esta alteração não está totalmente compreendida e quantificada na literatura. Normalmente, o poder calorífico de microalgas é descrito para espécies puras e isentas de coagulantes. Contudo, o cultivo de uma única espécie de microalga e a colheita por processos que não envolvam o uso de coagulantes, como centrifugação e filtração, por exemplo, não se inserem no contexto mais provável para a valorização energética de microalgas. No curto prazo, a combinação de tratamento de esgoto com a produção de biocombustível tem sido apontada como o cenário mais plausível para aplicação comercial do cultivo de microalgas (MANARA e ZABANIOTOU, 2012) e isso envolve a obtenção de um lodo algáceo composto por diferentes espécies de microalgas e a presença de coagulantes químicos.

Este trabalho analisa a influência do coagulante no PCS de lodos algáceos, obtidos em lagoas de alta taxa com efluente de reator UASB. Além dos coagulantes inorgânicos tradicionais, compostos orgânicos também são avaliados. As dosagens utilizadas estão baseadas em ensaios de Jar Test e uma análise de custos também é abordada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As microalgas são organismos unicelulares, que usam a luz do sol, a água e o CO₂ atmosférico para crescer, convertendo o CO₂ absorvido na fotossíntese em biomassa. Sua estrutura não é diferenciada, não possuindo raiz, caule e folhas, como ocorre nas macroalgas. Sua biomassa geralmente consiste de lipídeo (9,5 a 42%), carboidrato (17 a 57%) e proteína (20 a 50%) e suas proporções variam conforme a espécie e as condições de crescimento. O número de espécies identificadas gira em torno de 100 mil, embora apenas 35 mil tenham sido caracterizadas (JANKOWSKA *et al.*, 2017). Atualmente, somente poucas espécies estão sendo produzidas em escala

de centenas de milhares de toneladas, tal como a *Chlorella*, enquanto que cerca de 10 espécies adicionais são produzidas em menor escala. Apesar da produção comercial de microalgas já ocorrer há muitas décadas, a produção atual é voltada, principalmente, para produtos de alto valor comercial, como suplementes nutricionais e pigmentos naturais (VANDAMME *et al.*, 2013). O uso de microalgas para a produção de biocombustível só passou a receber grande interesse nos últimos anos, com a necessidade de novas fontes de energia limpa e renovável (JANKOWSKA *et al.*, 2017). Mais de 150 empresas no mundo, incluindo grandes petrolíferas como ExxonMobil e Shell, estão interessadas em produzir biocombustível a partir de microalga (PENG *et al.*, 2017).

De uma maneira geral, as microalgas demandam mais nutrientes para seu metabolismo do que as plantas terrestres, o que intensifica o uso de energia embutido no cultivo (MINOWA e SAWAYAMA, 1999). Quando o transporte de nutrientes e água não é necessário, uma quantidade significativa de energia pode ser salva (DUMAN *et al.*, 2014). Isso tem despertado o interesse em usar águas residuárias como meio nutricional, oferecendo uma importante economia no cultivo (RAHEEM *et al.*, 2015). Microalgas cultivadas no esgoto têm sido reportadas com alta produtividade, sugerindo uma ótima alternativa para a produção de biocombustível de forma econômica e sustentável (MANARA e ZABANIOTOU, 2012). Mesmo neste cenário, a avaliação do poder calorífico de lodos algáceos é pouco reportada na literatura. A maior parte dos autores descreve o PCS de espécies puras, produzidas em condições controladas de laboratório, conforme pode ser observado na **Tabela 1**. A influência dos coagulantes também é pouco conhecida, uma vez que a biomassa é obtida por processos de colheita inviáveis para o uso em grande escala, como a de biocombustíveis. Sendo assim, este trabalho visa entender melhor a influência dos coagulantes no processo de colheita e do esgoto como meio de cultivo, no conteúdo energético da biomassa final obtida, denominada neste trabalho de lodo algáceo.

Tabela 1. Poder calorífico superior (PCS) relatado para microalgasna

Referência	Espécie/Lodo algáceo	PCS (MJ/kg)
ELLIOTT <i>et al.</i> , 2012	<i>Chlorella vulgaris</i>	21,10
ONWUDILI <i>et al.</i> , 2013	<i>Chlorella vulgaris</i>	23,20
RAHEEM <i>et al.</i> , 2015	<i>Chlorella vulgaris</i>	22,50
ONWUDILI <i>et al.</i> , 2013	<i>Spirulina platensis</i>	21,20
BROWN <i>et al.</i> 2010	<i>Nannochloropsis sp.</i>	19,00
MILLER <i>et al.</i> , 2012	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	21,12
LANE, D.J. <i>et al.</i> , 2014	<i>Tetraselmis sp.</i>	15,50
ZHU, Y. <i>et al.</i> 2016	<i>Scenedesmus sp.</i>	15,40
CAPUTO <i>et al.</i> , 2016	<i>Acutodesmus obliquus</i>	23,30

3. METODOLOGIA

3.1 Cultivo de microalgas

O cultivo de microalgas foi feito na estação de tratamento piloto de Araçás, localizada no município de Vila Velha, no estado do Espírito Santo. Duas lagoas de alta taxa foram construídas em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), cada uma com volume útil total 13,7m³, com dois canais com comprimento de 10,0m, largura de 2,4m e área de 22,8m² (**Figura 1**). As lagoas foram

alimentadas com o efluente anaeróbico do tratamento de esgoto no reator UASB, construído em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), com diâmetro de 1,0m, altura útil de 4,8m, volume útil total de 3,8m³ vazão média de operação de 0,14L/s. Um sistema de gradeamento, preliminar ao reator UASB, foi usado para remover os sólidos grosseiros do esgoto bruto. O efluente das lagoas foram coletados em uma bombona plástica de 80L e os ensaios de Jar Test foram feitos logo após a coleta.

Figura 1. Coleta de lodo algáceo sem o uso de coagulantes



Fonte: Autor, 2018.

3.2 Ensaios de Jar Test

Os ensaios de Jar Test foram feitos em triplicata, na condição de pH natural da lagoa. O procedimento operacional foi baseado em FERRARI (2004), com velocidade de 105rpm por 2min para o período de mistura e velocidade de 30rpm por 10min para o período de floculação. O tempo de decantação foi de 30min. O pH foi mensurado em pHmêtro digital e a eficiência de separação foi estimada com base na densidade óptica a 750nm, confrontando-se os valores inicial e final do meio, conforme reportado por DAS *et al.* (2016) e dado pela equação 1. Em cada jarro do equipamento, um volume de 2L da cultura foi adicionado e as amostragens do sobrenadante foram tomadas no ponto de coleta do jarro, a 1L do fundo, após o tempo de decantação. O pH do sobrenadante também foi mensurado.

$$\text{Eficiência da colheita} = \frac{OD_i - OD_f}{OD_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde OD_i é a densidade óptica inicial do meio de cultura e OD_f é a densidade óptica final do sobrenadante após a decantação.

Todos os materiais usados como coagulantes foram obtidos de forma comercial, evitando-se o uso de reagentes laboratoriais de alta pureza, para representar um cenário mais real. As dosagens utilizadas se referem ao produto comercial e não ao teor do componente ativo dentro do produto comercial. Quando necessário, diluições foram feitas com água destilada, para ajustar a concentração do coagulante para os ensaios. Foram testados cloreto férrico, sulfato de alumínio ferroso, policloreto de alumínio, polímero catiônico polissintético de óxidos ácidos e derivados nitrogenados e polímero catiônico polyadmac. Além desses, cal hidratada também foi usada como meio de coleta de microalgas, visto que muitas espécies podem ser colhida, com eficiência superior a 95%, pelo simples aumento de pH (CASTRILHO *et al.* 2013; WAN *et al.*, 2015). Além disso, o custo do material é extremamente baixo e a presença de cálcio na biomassa pode ser benéfica para alguns processos termoquímicos, tal como a gaseificação, uma vez o material pode absorver gases contaminantes, indesejáveis no processo (LÓPEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2014). Para cada ensaio, os coagulantes foram

adicionados simultaneamente. O mesmo foi feito com a amostragem do sobrenadante, para que os tempos de agitação e decantação fossem iguais para todas as concentrações avaliadas em cada jarro.

3.3 Processo de colheita

Uma vez determinado a dosagem ótima de cada coagulante nos ensaios de Jar Test, 200L do meio de cultura foram colocados em uma bombona plástica. O coagulante foi adicionado e um agitador mecânico foi acoplado sobre a bombona, mantendo-se agitação por 30min. O material foi deixado em repouso para decantação por 24h e a água foi drenada por torneiras acopladas na bombona. Ao final, o lodo algáceo obtido no fundo da bombona foi adensado em tecido. O processo de colheita do lodo algáceo com o uso de coagulantes é mostrado na **Figura 2**. O processo de colheita se repetiu para os diversos coagulantes avaliados, de forma a produzir lodos distintos.

Figura 2. Processo de colheita do lodo algáceo com o uso de coagulantes

Da esquerda para a direita: Bombona para drenagem do lodo; Dreno em funcionamento; Lodo algáceo decantado após a drenagem; Filtração do lodo em tecido.



Fonte: Autor, 2018.

Para avaliar o lodo algáceo sem a presença de coagulantes, um sistema de filtração a vácuo foi montado com kitassato e funil de buncher. O reboco de lodo algáceo, aderido ao papel de filtro, foi removido delicadamente com espátula e colocado em um cadinho, para posterior secagem. Este método de colheita é apresentado na **Figura 3**.

Figura 3. Processo de colheita de lodo algáceo sem o uso de coagulantes



Fonte: Autor, 2018.

3.4 Preparação das amostras e determinação do poder calorífico

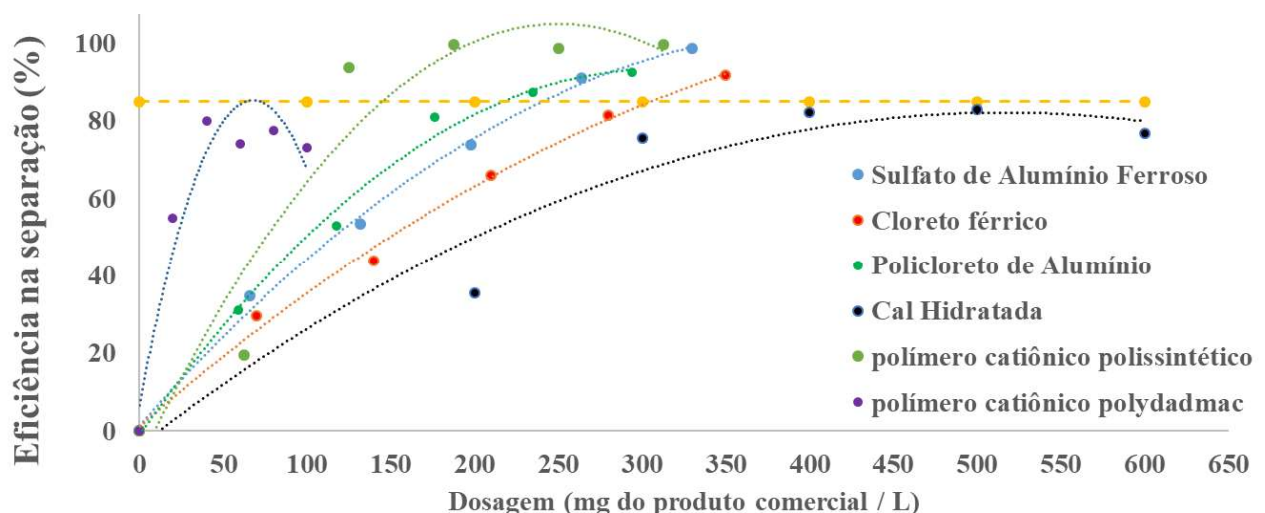
As amostras de lodo foram colocadas em bandejas de alumínio e deixadas em uma estufa de pré-secagem a 60°C, em ambiente externo, para remover o excesso de umidade e os odores. Após, a higienização do lodo e a remoção da umidade foi completada em uma estufa convencional a 103°C,

por no mínimo 12h. Cada amostra foi então triturada em moinho de argola, até a obtenção de um pó muito fino, e submetida aos ensaios de poder calorífico. A análise do poder calorífico superior foi feita em triplicata, no calorímetro de modelo C2000, do fabricante IKA- Werke. Foi realizada a pesagem da amostra em microbalança de precisão, para obter uma massa próxima de 0,5g. A amostra foi acondicionada, em pó, no cadinho da bomba calorimétrica, juntamente com o fio de algodão empregado para realizar a ignição da reação de combustão. A bomba foi fechada e carregada até 30bar, de forma automática pelo próprio equipamento de análise, com uma carga de oxigênio puro. O resíduo gerado após a combustão, composto pelas cinzas, foi coletado para análise posterior. Os aspectos da biomassa algal, antes e após a etapa de moagem, assim como das cinzas obtidas após o determinação do PCS, foram registrados. Os aspectos do lodo algáceo, antes e após a etapa de moagem, assim como das cinzas obtidas após o determinação do PCS, foram registrados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O **Gráfico 1** apresenta a eficiência obtida na colheita, para os diferentes coagulantes testados, em diferentes dosagens, enquanto que a **Tabela 2** traz os resultados de pH, dosagem recomendada, eficiência e custo. A dosagem recomendada foi definida para uma eficiência mínima de colheita de 85%. Este valor foi definido com base no **Gráfico 1**, uma vez que representa uma eficiência média próxima da ideal, para todos os coagulantes testados. Nota-se que alguns produtos, especialmente o polímero catiônico polydadmac, apresentaram um ponto de máximo em sua curva de eficiência, com declínio acentuado para concentrações mais altas. Assim, recomenda-se um estudo exaustivo de Jar Test para estes coagulantes, antes de sua aplicação, para que a eficiência na colheita seja a maior possível e não ocorram resultados indesejados. Apenas a cal hidratada e o polímero catiônico polydadmac não atingiram uma eficiência experimental de 85%, ficando ligeiramente abaixo.

Gráfico 1. Eficiência dos coagulantes para a colheita de microalgas



Fonte: Autor, 2018.

Tabela 2. Dados obtidos nos ensaios de Jar Test e análise financeira

Coagulante	pH médio do meio	Dosagem utilizada mg/L	Eficiência média na colheita (%)	pH médio final do sobrenadante	Preço R\$/Kg	Custo para 1000m ³ (R\$)
Polímero catiônico polissintético	8,53	0,125	93,93	7,83	4,47	558,75
Sulfato de alumínio ferroso	8,27	0,264	91,13	6,90	0,75	198,00
Policloreto de alumínio	8,70	0,235	91,80	7,23	3,18	747,30
Cloreto Férrico	8,70	0,350	91,80	6,17	3,09	1.081,50
Polímero catiônico polydadmac	9,07	0,040	80,15	9,07	5,50	220,00
Cal hidratada	8,07	0,300	75,59	11,43	0,56	168,00

O pH médio da lagoa teve pequena variação durante as amostragens, com mínimo de 8,07 e máximo de 9,07. Esses valores levemente básicos estão dentro da faixa esperada, devido a atividade fotossintética e ao consumo de carbono inorgânico nas lagoas (LOPES, 2018). Após a adição dos coagulantes, o pH médio do sobrenadante variou entre 6,17 e 11,43, atingindo o mínimo e o máximo quando foram usados cloreto férrico e cal hidratada, respectivamente. Isso significa que apenas a cal hidratada exigiria uma correção no pH do sobrenadante antes do descarte, de acordo com a resolução do CONAMA, que especifica um intervalo de pH entre 5 e 9 para o descarte de efluentes. Os custos dos produtos comerciais foram obtidos diretamente com os fornecedores e também estão dispostos na **Tabela 2**. O custo com coagulantes para o processamento de 1000m³ de efluente da lagoa, nas condições estudadas, variaram amplamente, desde R\$ 168,00 para a cal hidratada, até R\$ 1081,00 para o cloreto férrico. Coagulantes mais caros não necessariamente resultaram em um maior custo final, uma vez que as dosagens usadas variam significativamente.

Na **Figura 4**, os aspectos dos lodos algáceos obtidos, após a etapa secagem e após a etapa de moagem, são apresentados, assim como as cinzas obtidas após os ensaios de poder calorífico.

Figura 4. Lodo algáceo seco (da esquerda para a direita: polímero catiônico polydadmac; cal hidratada, cloreto férrico, sulfato de alumínio ferroso, polímero catiônico polissintético, policloreto de alumínio, sem coagulante).



Fonte: Autor, 2018.

Conforme pode ser observado, o uso de polímeros catiônicos conferiu ao lodo um aspecto menos fragmento, como se o material estivesse unido por um tipo de “cola”. De forma oposta, o lodo algáceo

obtido sem a presença de coagulantes foi o mais fragmentado. Os lodos produzidos com o uso de cal hidratada e cloreto férrico, devido à grande quantidade destes materiais, apresentaram coloração esbranquiçada e avermelhada, respectivamente. Já os lodos produzidos com os polímeros catiônicos apresentaram tons esverdeados, semelhantes à coloração do lodo algáceo obtido sem a presença de coagulantes. Isso foi atribuído à menor quantidade destes materiais incorporados na biomassa, pela menor dosagem utilizada. Os lodos obtidos com coagulantes a base de alumínio apresentaram uma coloração cinza prateada fosca, típica deste metal. A coloração das cinzas também variou, podendo-se notar tons mais coloridos para a presença de metais de transição como o ferro, nos lodos obtidos com cloreto férrico e sulfato de alumínio ferroso, enquanto que tons mais claros e esbranquiçados foram observados para a presença de metais do bloco *s* e *p* da tabela periódica, como cálcio e alumínio. Isso está dentro do esperado e, segundo LEE (1999), é causado pela maior facilidade de transição de elétrons para os metais com orbitais *d* incompletos.

A **Tabela 3** apresenta o PCS dos diferentes lodos algáceos avaliados, assim como de outras fontes de energia, para efeito de comparação.

Tabela 3. Poder calorífico superior do lodo algáceo e de outros resíduos

AMOSTRA	PCS Médio (MJ/Kg)	Desvio Padrão / Referência
Lodo algáceo sem coagulante	21,58	0,036
Lodo algáceo com polímero catiônico polydadmac	21,19	0,045
Lodo algáceo com polímero catiônico polissintético	16,18	0,074
Lodo algáceo com cloreto férrico	14,45	0,013
Lodo algáceo com sulfato de alumínio ferroso	12,91	0,061
Lodo algáceo com policloreto de alumínio	12,19	0,091
Lodo algáceo com cal hidratada	3,37	0,034
Carvão	27 - 31	MOLINO <i>et al.</i> , 2017
Madeira	12 - 19	MOLINO <i>et al.</i> , 2017
Plástico e papel	17,6 - 20	MANARA e ZABANIOTOU, 2012

O lodo algáceo sem a presença de coagulantes apresentou o maior PCS, 21,58MJ/Kg. Este valor é compatível com os dados reportados na literatura para as espécies de microalgas mais comuns (supracitadas na **Tabela 1**) e é similar ao da madeira, do plástico e do papel, ratificando seu potencial energético. A pequena quantidade do polímero catiônico polydadmac utilizada praticamente não alterou o poder calorífico do lodo e colaborou para um custo final baixo, o terceiro menor. No entanto, todos os outros coagulantes utilizados reduziram de forma significativa o PCS da biomassa final. O lodo obtido com cal hidratada apresentou um poder calorífico de apenas 3,37MJ/Kg, o que o torna inviável para a recuperação de energia. A enorme quantidade de cal demandada para elevar o pH e separar as microalgas, causou um excesso de fração inorgânica no lodo e justifica este número. No entanto, o custo com este material foi o mais barato e este tipo de colheita poderia ser usada quando não se deseja reaproveitar o lodo para fins energéticos, com reciclagem da cal hidratada. Os demais coagulantes

reduziram o PCS mas não o suficiente para inviabilizar a recuperação energética, uma vez que os valores estão no mesmo intervalo da madeira. O cloreto férrico gerou um lodo algáceo de PCS intermediário, quando comparado aos demais. No entanto, o alto custo observado, o maior entre todos os avaliados, desmotiva sua aplicação. O lodo obtido com policloreto de alumínio apresentou o segundo menor PCS e o segundo maior custo, o que significa um balanço final desfavorável para sua utilização. Os lodos obtidos com polímero catiônico polissintético e com sulfato de alumínio ferroso apresentaram valor intermediários, tanto para o PCS quanto para os custos envolvidos e poderiam ser melhor avaliados, junto com o polímero catiônico polydadm, que teve o melhor resultado. Recomenda-se um estudo mais aprofundado para estes coagulantes, com ensaios de Jar Test para diferentes condições de pH e com avaliações de cenários econômicos diferentes. É possível que seja vantajoso investir em alcalinizantes e/ou acidificantes e em etapas adicionais para ajustar o pH no processo, visando reduzir a quantidade de coagulante e seus impactos no custo e no poder calorífico.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho quantificou o PCS do lodo de microalgas, cultivada em lagoas de alta taxa com efluente de reator UASB, tratando esgoto doméstico. Pôde-se observar que os coagulantes utilizados na etapa de colheita interferem largamente no PCS do lodo algáceo produzido. Dentre os coagulantes testados, os mais vantajosos do ponto de vista energético e financeiro, foram o polímero catiônico polydadm, o polímero catiônico polissintético e sulfato de alumínio ferroso. Todos esses compostos reduziram o PCS do lodo algáceo, embora os valores observados ainda sejam similares ao da madeira, o que sugere uma possível viabilidade em processos termoquímicos, para geração de energia. Na faixa de pH natural da lagoa avaliada, entre 8,07 e 9,07, o coagulante polímero catiônico polydadm teve o melhor custo benefício e o PCS do lodo algáceo obtido foi de 21,19MJ/Kg.

REFERÊNCIAS

- ANTHONY, R. J. et al. Effect of coagulant/flocculants on bioproducts from microalgae. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 65–70, 2013.
- BROWN, T. M. et al. Hydrothermal liquefaction and gasification of *Nannochloropsis* sp. **Energy and Fuels**, v. 24, n. 6, p. 3639–3646, 2010.
- CAPUTO, G. et al. Supercritical water gasification of microalgae and their constituents in a continuous reactor. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 118, 2016.
- CASTRILLO, M. et al. High pH-induced flocculation-sedimentation and effect of supernatant reuse on growth rate and lipid productivity of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 324–329, 2013.
- CONAMA. Resolução No 430, de 13 de maio de 2011. Publicada no DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89.
- DAS, P. et al. Microalgae harvesting by pH adjusted coagulation-flocculation, recycling of the coagulant and the growth media. **Bioresource Technology**, v. 216, p. 824–829, 2016.
- DUMAN, G. et al. Hydrogen production from algal biomass via steam gasification. **Bioresource Technology**, v. 166, 2014.
- ELLIOTT, D. C. et al. Chemical processing in high-pressure aqueous environments. 9. Process development for catalytic gasification of algae feedstocks. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 33, p. 10768–10777, 2012.
- FERRARI, F. G. Pós-tratamento do efluente de lagoa facultativa primária através da utilização de coagulantes metálicos e polímeros. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018

- GERCHMAN, Y. et al. Effective harvesting of microalgae: Comparison of different polymeric flocculants. **Bioresource Technology**, v. 228, p. 141–146, 2017.
- HEIDENREICH, S.; FOSCOLO, P. U. New concepts in biomass gasification. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 46, p. 72–95, 2015.
- JANKOWSKA, E. et al. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. October 2015, p. 692–709, 2017.
- LAM, M.K.; LEE, K.T. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in a pilot-scale sequential-baffled column photobioreactor for biomass and biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 88, 2014.
- LANE, D.J. et al. Combustion behavior of algal biomass: Carbon release, nitrogen release, and char reactivity. **Energy and Fuels**, v. 28, n. 1, 2014.
- LEE, J.D. Química inorgânica não tão concisa. Tradução da 5ª ed. Inglesa, São Paulo, Editora Edgard Bluche, 1999.
- LOPES, N. T. Influência do tempo de detenção hidráulica e da profundidade no desempenho de lagoas de alta taxa aplicadas ao pós-tratamento de efluente de reatores UASB. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2018.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, D. et al. Comparison of the steam gasification performance of three species of microalgae by thermogravimetric-mass spectrometric analysis. **Fuel**, v. 134, 2014.
- MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2566–2582, 2012.
- MILLER, A. et al. Exploration of the gasification of *Spirulina* algae in supercritical water. **Bioresource Technology**, v. 119, p. 41–47, 2012.
- MINOWA, T; SAWAYAMA, S. A novel microalgal system for energy production with nitrogen cycling. **Fuel**, v. 78, n. 10, p. 1213–1215, 1999.
- MOLINO, A. et al. Supercritical water gasification of *scenedesmus dimorphus* μ -algae. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 15, n. 4, 2017.
- ONWUDILI, J.A. et al. Catalytic hydrothermal gasification of algae for hydrogen production: Composition of reaction products and potential for nutrient recycling. **Bioresource Technology**, v. 127, 2013.
- PATEL, B. et al. A review on hydrothermal pre-treatment technologies and environmental profiles of algal biomass processing. **Bioresource Technology**, v. 199, 2016.
- PENG, G. et al. Catalytic Supercritical Water Gasification: Continuous Methanization of *Chlorella vulgaris*. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 56, n. 21, 2017.
- RAHEEM, A. et al. Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, 2015.
- SOREANU, G. et al. CO₂ gasification process performance for energetic valorization of microalgae. **Energy**, v. 119, 2017.
- VANDAMME, D. et al. Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. **Trends in Biotechnology**, v. 31, n. 4, p. 233–239, 2013.
- WAN, C. et al. Current progress and future prospect of microalgal biomass harvest using various flocculation technologies. **Bioresource Technology**, v. 184, p. 251–257, 2015.
- ZHU, Y. et al. Fluidized Bed Co-gasification of Algae and Wood Pellets: Gas Yields and Bed Agglomeration Analysis. **Energy and Fuels**, v. 30, n. 3, 2016.