

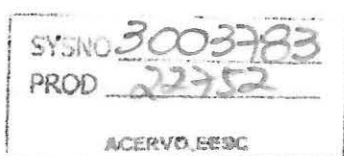


V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida

Gestão do ciclo de vida nos trópicos

19 a 22 de setembro de 2016 | Fortaleza-CE

ANAIS COMPLETO



Comparação dos escopos do ciclo de vida de dois sistemas na produção de biodiesel por microalgas cultivadas em vinhaça em uma usina sucroalcooleira

Paulo Henrique da Silva Pereira¹, Paulo Vagner dos Santos¹, Aldo Roberto Ometto², Maria do Carmo Calijuri¹.

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, phsp93@gmail.com

² Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

Resumo. Com o aumento da produção de biocombustíveis e o Brasil como um dos maiores produtores de etanol do mundo, o número de usinas sucroalcooleiras cresce e se desenvolve para cada vez mais aperfeiçoar seu rendimento. Atualmente são produzidos etanol e açúcar como principais produtos além do calor e vapor para a produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Com vista na sustentabilidade das indústrias, as usinas sucroalcooleiras podem gerar outros produtos e coprodutos a fim de aproveitar o máximo suas entradas e saídas, como a produção de biodiesel com a utilização da vinhaça como meio de cultivo para microalgas que são a matéria-prima para a extração de óleo. O presente estudo compara duas vias de produção de biodiesel, com o pensamento do ciclo de vida do produto, para verificar qual sistema é o mais promissor para a implantação da tecnologia. Os sistemas foram modelados a partir de levantamento de dados bibliográficos em revisão de literatura de periódicos internacionais, teses e dissertações, e também por dados primários obtidos em usinas de produção de açúcar e álcool no estado de São Paulo. Os resultados indicam que o sistema de cultivo utilizando o fotobiorreator (FBT) apresentam semelhanças em nível tecnológico e operacional em relação ao cultivo em uma lagoa de alta taxa (LAT), mas diferem na quantidade de produtos a serem utilizados em alguns processos, fato que o primeiro sistema apresenta uso menor de vinhaça para produzir a mesma quantidade de biodiesel que o segundo.

Palavras-chave. Ciclo de vida, biocombustível, microalgas, vinhaça, sustentabilidade.

Introdução

O Brasil encontra-se entre os maiores produtores de biocombustíveis no mundo, justificado ao fato que o país apresentar condições de clima e incidência solar adequadas, aliado com grande extensão territorial evitando a competitividade de agricultura voltada à produção de energia com a demanda por alimentos (PARRELLA et al., 2012).

Um dos biocombustíveis mais produzidos no Brasil é o etanol, a partir de processo de fermentação da cana-de-açúcar. Segundo dados levantados pela (CONAB, 2015) o Brasil produziu 634,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra de 2014/2015 que resultou em uma produção de etanol total de 28,6 bilhões de litros.

Uma das problemáticas da produção de etanol é o resíduo gerado do processo de destilação, a vinhaça, que possui uma proporção de 12 litros de vinhaça a cada litro de etanol (SACCHI, 2015). A vinhaça é um líquido que possui alto poder poluente, pois possui elevados teores de matéria orgânica e minerais, baixo pH, alto potencial corrosivo e taxas elevadas de DQO e DBO (BONINI, 2012). No Brasil a principal destinação da vinhaça é o uso na fertilização do solo da própria lavoura. No entanto, caso não seja controlado, esse processo pode causar danos ao meio ambiente, como a contaminação do solo e das águas subterrâneas (DIAS et al., 2015).

Muitos estudos visam novas destinações para vinhaça devido ao seu potencial de poluição e consequente aumento na quantidade produzida devido à expansão da produção de etanol. Santos (2013) realizou um estudo onde a vinhaça foi utilizada como meio de cultivo de microalgas com o objetivo de produção de biodiesel, que segundo o autor, o efluente apresenta as concentrações de minerais, como o nitrogênio e fósforo maiores que o necessário para o crescimento da biomassa algal.

De acordo com Lardon et al. (2009) e Clarens et al. (2010) o uso de fertilizantes químicos representa um aspecto negativo e limitante para a produção de biodiesel por microalgas, em aspectos econômicos e ambientais. Com isso, o uso da vinhaça supera a necessidade de fertilização e apresenta um ponto positivo para a busca de melhores condições de produção de biodiesel por essa rota tecnológica.



O biodiesel é obtido através de reações químicas, de esterificação ou transesterificação, entre óleo e um álcool onde geralmente são empregados o metanol ou o etanol, com a presença de um catalizador. O óleo é a principal matéria prima, podem ser de origem animal ou vegetal, como a soja, palma, girassol, gordura animal e óleos servidos. Porém outras fontes vêm sendo estudadas, como os lipídios da célula de seres vivos como algumas espécies de fungos e microalgas (BARBOSA, 2011).

As microalgas são consideradas por muitos autores como a forma mais viável de produzir biodiesel para atender a demanda energética sem competir com os alimentos. Segundo Rawat et al. (2013) as microalgas apresentam produtividade, medida em termos de quantidade gerada de lipídios por hectare, cerca de vinte vezes superior às atingidas por outros tipos de alimentos. Outra vantagem das microalgas está no fato destas apresentarem rápido crescimento, podendo se desenvolver em qualquer ambiente e apresentar teores de óleo de cerca de 50% de seu peso celular (REWAT et al., 2013).

O sistema de cultivo de microalgas constitui um fator importante para o sucesso da produção do biodiesel. Tem a função de oferecer iluminação adequada, sistema funcional de distribuição de líquido/gás, fácil operação, controle da contaminação da cultura, baixos custos de investimento/operação e área mínima de uso (LAM; LEE, 2012; XU et al., 2009).

As lagoas de alta taxa (*raceways ponds*) são promissoras na produção de microalgas, especialmente em grande escala. As lagoas abertas possuem profundidade entre 10 e 50 cm, a fim de, proporcionar iluminação apropriada para as microalgas autotróficas. Elas apresentam, também, baixo custo de construção e operação para o processo de mistura e circulação de gases, fácil operação a cultura fica exposta ao ambiente externo, e ocorre evaporação da camada de água controlando, assim, a temperatura do meio (JORQUERA et al., 2010).

Por outro lado, sistemas de cultivo fechado, como os fotobiorreatores, superam algumas limitações das lagoas abertas. Existem diversos projetos e configurações de fotobiorreatores, podendo ser tubular vertical, de placas planas e outros. A vantagem do sistema fechado de reatores está o fato destes permite um controle mais eficiente da cultura, mantendo melhores condições de crescimento da biomassa, e da produtividade de lipídios (JORQUERA et al., 2010; LAM; LEE, 2012).

Para auxiliar na tomada de decisão, referente ao uso de fotobiorreatores ou de lagoas de alta taxa, para a produção em escala industrial da produção de biodiesel em uma usina sucroalcooleira, será utilizada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Será utilizada a ACV por essa ser capaz de fornecer informações ambientais importantes sobre a toda a cadeia de produção do ciclo de vida do produto.

Este estudo tem por objetivo comparar os escopos do ciclo de vida da produção de biodiesel com a utilização do óleo de microalgas cultivadas na vinhaça de usina sucroalcooleira, em dois sistemas de cultivo: o primeiro utilizando fotobiorreator (FBR) e o segundo com lagoa de alta taxa (LAT).

Método

Foram utilizados os princípios e os procedimentos de avaliação do ciclo de vida (ACV), o qual possui normatização internacional pela ISO, com a ABNT sendo a correspondente brasileira, com as normas ABNT NBR ISO 14.040 (2009) e ABNT NBR ISO 14.044 (2009) para a elaboração do escopo comparativo entre os dois sistemas de produto, o primeiro pelo fotobiorreator (FBR) e o segundo pela lagoa de alta taxa (LAT).

Os dados foram coletados de fontes primárias e complementados de dados secundários. Os dados primários foram obtidos em usinas de cana-de-açúcar localizadas no estado de São Paulo, Brasil. Os dados secundários foram coletados por revisão bibliográfica de artigos publicados em periódicos de circulação internacional obtidos na base Web of Science, e em dissertações e teses obtidas no Google Scholar e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP.

Desenvolvimento

Função do Sistema: A função do biodiesel é ser utilizado como combustíveis em veículos automotores, fornecendo trabalho, medida no campo agrícola em tempo de serviço.

Unidade Funcional: A unidade funcional para o estudo é de 4 minutos de tempo de serviço por um trator com 189 cv de potência, com um consumo de 15,8 L/horas.

Fluxo de referência: Para obter-se a unidade funcional de 4 minutos de serviço de um veículo nas condições antes descritas, faz-se necessário o consumo 1,1 L biodiesel. Dado que a massa específica do combustível a temperatura ambiente é 0,895 kg/L (MATHIMANI; UMA; PRABAHARAN, 2015), determinou-se por fluxo de referência desta comparação o consumo de 1,0 kg de biodiesel.

Fronteira do sistema de produto: A fronteira do sistema foi definida pelo critério de corte por massa e significância ambiental. Pelo critério de massa são excluídos os insumos em quantidades menores que 5% do total de insumos diretamente utilizados. Os processos anteriores ao tratamento da vinhaça não foram considerados no ciclo de vida do produto devido ao fato do mesmo ser um resíduo da cadeia produtiva anterior, sendo assim, é considerada a matéria-prima para a produção do biodiesel.

Procedimento de alocação: Para a etapa do uso do biodiesel será realizada alocação por critério de massa, visto que na etapa de conversão do biodiesel formam-se dois produtos, o biodiesel e glicerina.

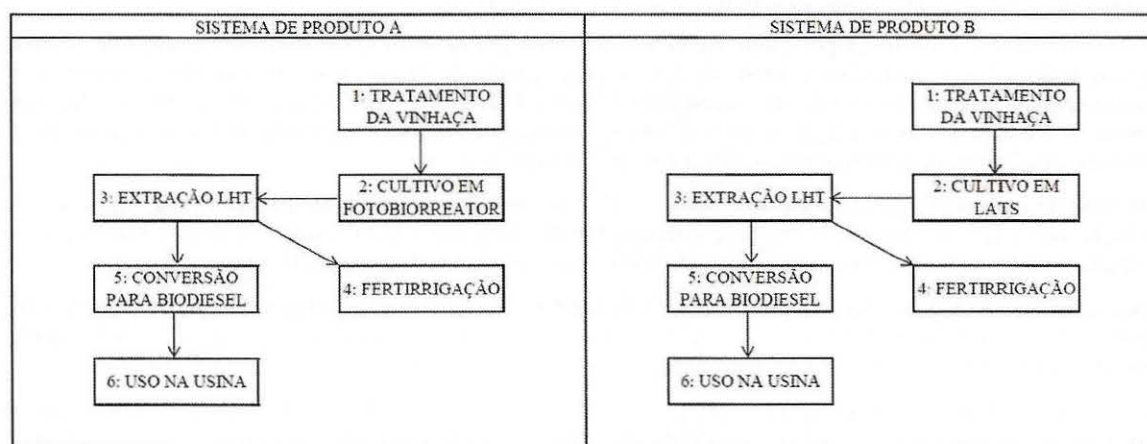
Tipos de impactos, método de avaliação de impacto: Este estudo de ACV, utilizará para a avaliação de impacto o método do EDIP 97, segundo Wenzel et al. (1997). As categorias de impacto utilizadas pelo método são o consumo de recursos renováveis, de não-renováveis, de água e de energia, também são avaliados os potenciais de impacto ambientais, como: aquecimento global, formação fotoquímica de ozônio troposférico, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana.

Requisitos dos dados: Os dados primários foram obtidos em usinas de cana-de-açúcar localizadas no estado de São Paulo, Brasil. Os dados secundários foram coletados em literaturas disponíveis atuais de pesquisas no assunto.

Os dados da extração de carbonato de cálcio (CaCO_3), produção de diesel e o consumo de diesel nos veículos, serão obtidos através de banco de dados, com o uso do software GaBi. Para a produção de fertilizantes foram utilizados dados do estudo de Ribeiro (2009).

Os processos elementares que compõem os sistemas de produto são:

Figura 1 – Fluxogramas dos sistemas de produto A e B.



Sistema de Produto A: Tratamento da vinhaça; Cultivo de microalgas em FBR; Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT); Fertilização; Conversão do óleo em biodiesel; Uso do biodiesel.

Sistema de Produto B: Preparo do solo; Tratamento da vinhaça; Cultivo de microalgas em LAT; Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT); Fertilização; Conversão do óleo em biodiesel; Uso do biodiesel.

Pressupostos: O estudo baseia-se nas técnicas usuais em uma usina sucroalcooleira, com a inclusão de um sistema para produção de biodiesel, que ainda não existe em larga escala, escolhendo as rotas mais promissoras publicadas em trabalhos científicos pelo mundo, do ponto de vista à aplicabilidade da tecnologia. A fronteira do sistema tem como início o tratamento da vinhaça, sustentado no

Para a obtenção de 1 kg de biodiesel é necessário à extração de 1,25 kg de óleo das microalgas, considerando uma eficiência de conversão de 80% (NAN et al., 2015).



A partir de dados obtidos em Santos (2013) a quantidade de biomassa necessária é de 10,26 kg com a utilização de 13.297 litros de vinhaça para o uso de FBR.

Segundo dados primários são produzidos em média 12 litros de vinhaça para cada litro de etanol, então para produção de 1,11 litros de biodiesel é necessário produzir 1108,08 litros de etanol. Dados obtidos no relatório da CONAB (2015), sobre a safra 2015/2016, aponta que a produtividade da cana-de-açúcar é de 74,95 t/ha, e para cada tonelada de cana são produzidos 76,51 litros de etanol. A quantidade de área necessária para a produção de 1 kg de biodiesel é de 0,19 ha.

Para estimar a produtividade da biomassa em LAT, foi utilizado a relação obtida por Raes et al. (2014), com 67 mg/l.dia e 36 mg/l.dia da produtividade da biomassa em um fotobiorreator e uma lagoa de alta taxa, respectivamente. Projetando os dados de Santos (2013), para a unidade funcional, são necessários 24.485 litros de vinhaça, que corresponde à produção de 2.040,48 litros de etanol. Com isso, a área necessária para a produção de 1 kg de biodiesel é de 0,36 ha.

Sistema de produto A:

Tratamento da vinhaça: O tratamento da vinhaça será realizado a fim de tornar o meio adequado para o cultivo e crescimento das microalgas, necessitando clarificar o meio e regular o pH. A clarificação realizada é descrita por Sacchi (2015) onde a vinhaça passa por um processo de coagulação seguido por microfiltração tangencial em membrana polimérica tubular com aberturas de poros de 0,2 μ m.

O tratamento químico é realizado para elevar o pH da vinhaça que varia na faixa de pH 4,3 até atingir pH 9,2, condições ideais para o cultivo de microalgas da espécie *Chlorella sp.* (SANTOS, 2013). Para a unidade funcional, são necessários 13.297 litros de vinhaça, a dosagem dos insumos são de 66,48 g de Superfloc C492 e 25,53 kg de NaOH.

Cultivo de microalgas em fotobiorreator: O CO₂ utilizado no meio de cultivo é obtido dos processos do próprio sistema de produto. Foi considerado que a fixação é de 1,89 g de CO₂ a cada grama de biomassa (NASCIMENTO et al., 2015). Para a unidade funcional, são necessários 10.265,3 g de biomassa, resultando em 19.401,4 g de CO₂, em uma concentração de 5% com o ar atmosférico.

O fotobiorreator é constituído por tubos cilíndricos de vidro borossilicato, com diâmetro externo de 65 mm, espessura de 2,2 mm, com comprimento de 5,5 m, com volume de 15,86 litros. Para atender a demanda de vinhaça para a unidade funcional, são necessários 840 tubos, dispostos em 6 blocos, de 10 níveis com duas fileiras de 7 tubos, unidas com ligação em U e coletores em cada extremidade para unir as fileiras e os níveis. É utilizada uma bomba de centrífuga monofásica com potência de ¼ cv.

Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT): As condições de operação do reator para o processo de extração por LHT, acontece nas condições otimizadas descritas por Couto (2016). O tempo reação para o processo é de 15 minutos, com a temperatura de 300°C a pressão de 150 bar e razão biomassa/água 1/10.

Após o término da reação, são formados óleos, CO₂, sólidos totais e o meio líquido. Como o processo de LHT ocorre a lise celular, os nutrientes fixados pelas microalgas se tornam disponíveis novamente ao meio líquido efluente, dando boas condições para ser utilizada na agricultura como fertilizante.

Fertirrigação: Para o processo de fertirrigação é considerado que toda vinhaça utilizada no cultivo, após o processo de extração do óleo por LHT, será utilizada com as concentrações antes do cultivo. A composição de nutrientes e metais presentes na vinhaça foi obtida através de Santos (2013). Para a unidade funcional os principais componentes são: 4,14 kg de NTK, e 0,35kg de P-Total, 38,96 kg de Potássio e 22,14 kg de Cálcio. Segundo dados primários, para a unidade funcional é formado 420,03 kg de torta de filtro.

Conversão do óleo em biodiesel: A técnica utilizada para converter o óleo de microalgas em biodiesel é através da transesterificação com pré-tratamento. A transesterificação segue o procedimento experimental realizado por Nan et al. (2015) com a espécie de microalgas *Chlorella protothecoides*, e o pré-tratamento do óleo segundo Torres et al. (2013).

O pré-tratamento do óleo é realizado em um reator com a temperatura de 60 °C com a utilização de 281,32 g de metanol e 6,51 ml de ácido sulfúrico e 1,25 kg de óleo. A transesterificação acontece em um reator com temperatura de 340 °C e uma pressão de 170 bar, com 2,22 kg de etanol por 1,25 kg de óleo, em um tempo de 35 minutos.



Uso do biodiesel: 1 kg de biodiesel produzido será utilizado na própria unidade produtora por um trator de 189 cv, com um consumo médio de 15,8 l/h (BARBOSA, 2011).

Sistema de produto B:

Tratamento da vinhaça: O tratamento da vinhaça é o mesmo que para o sistema de produto A. Sendo necessários 24.485,8 litros de vinhaça para obter a unidade funcional, a dosagem dos insumos são de 122,43 g de Superfloc C492 e 47,01 kg de NaOH.

Cultivo de microalgas em LAT: Para a unidade funcional, são necessários 10.265,3 g de biomassa, resultando em 19.401,4 g de CO₂, em uma concentração de 5% com o ar atmosférico.

Serão utilizadas 21 LATs, com área de 4 m² e com profundidade de 30 cm, cada uma, construídas de fibra de vidro, pedais de PVC com duas lâminas, movimentadas com por motor elétrico de 1 cv. As características do reator descrito foram obtidas do estudo de Couto (2016).

Extração do óleo por Liquefação Hidrotérmica (LHT): As condições de operação do reator para o processo de extração por LHT, acontece nas condições otimizadas descritas por Couto (2016). O tempo reação para o processo é de 15 minutos, com a temperatura de 300°C a pressão de 150 bar e razão biomassa/água 1/10.

Após o término da reação, são formados óleos, CO₂, sólidos totais e o meio líquido. Como o processo de LHT ocorre a lise celular, os nutrientes fixados pelas microalgas se tornam disponíveis novamente ao meio líquido efluente, dando boas condições para ser utilizada na agricultura como fertilizante.

Fertirrigação: Para o processo de fertirrigação no sistema B, as considerações são as mesmas que realizado pelo sistema A, com a quantidade de 24.485 litros de vinhaça.

Toda a torta de filtro que é formada no processo industrial de produção do etanol é utilizada na adubação do solo. A quantidade formada para a unidade funcional é de 773,42 kg de torta de filtro.

Conversão do óleo em biodiesel: A técnica utilizada para converter o óleo de microalgas em biodiesel é através da transesterificação com pré-tratamento. A transesterificação segue o procedimento experimental realizado por Nan et al. (2015) com a espécie de microalgas *Chlorella protothecoides*, e o pré-tratamento do óleo segundo Torres et al. (2013).

O pré-tratamento do óleo é realizado em um reator com a temperatura de 60 °C com a utilização de 281,32 g de metanol e 6,51 ml de ácido sulfúrico e 1,25 kg de óleo. A transesterificação acontece em um reator com temperatura de 340 °C e uma pressão de 170 bar, com 2,22 kg de etanol por 1,25 kg de óleo, em um tempo de 35 minutos.

Uso do biodiesel: 1 kg de biodiesel produzido será utilizado na própria unidade produtora por um trator de 189 cv, com um consumo médio de 15,8 l/h (BARBOSA, 2011).

Conclusões

Os sistemas de produtos comparados apresentaram semelhanças quanto ao serviço executado, procedimentos e nível tecnológico em seus processos, com exceção do processo de cultivo das microalgas, onde um foi através de fotobiorreator e o segundo uma lagoa de alta taxa.

O sistema através do uso de lagoa de alta taxa apresentou maior consumo de vinhaça para o meio de cultivo, que a quantidade usada pelo fotobiorreator, necessitando de maior consumo de produtos químicos para adaptar as condições necessárias de desenvolvimento das microalgas.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, A. L. P. B. F. **Diesel, biodiesel de mamona e de soja: Desgaste do motor de trator agrícola em operação de preparo do solo.** 2011. 83f. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2011.

BONINI, M. A. **Cultivo heterotrófico de *Aphanethece microscopia* Nügli e *Chlorella vulgaris* em diferentes fontes de carbono e em vinhaça.** 2012. 96f. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em Agricultura e Ambiente, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos. Araras, 2012.



V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida

19 a 22 de Setembro 2016 - Fortaleza, CE

CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A.; COLOSI, L. M. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 5, p. 1813–1819, mar. 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB: Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Quarto Levantamento da safra 2014/15 e Primeiro Levantamento da safra 2015/16. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-4o_lev_-14-15.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2015.

DIAS, M. O. S.; MACIEL FILHO, R.; MANTELATTO, P. E.; CAVALETT, O.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A.; LEAL, M. R. L. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, v. 15, p. 35–51, 2015.

JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. a.; EMBIRUÇU, M.; GHIRARDI, M. L. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 4, p. 1406–1413, 2010.

LAM, M. K.; LEE, K. T. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, v. 30, n. 3, p. 673–690, 2012.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.-P.; BERNARD, O. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 17, p. 6475–6481, set. 2009.

MATHIMANI, T.; UMA, L.; PRABAHARAN, D. Homogeneous acid catalysed transesterification of marine microalga *Chlorella* sp. BDUG 91771 lipid - An efficient biodiesel yield and its characterization. *Renewable Energy*, v. 81, p. 523–533, 2015.

NAN, Y.; LIU, J.; LIN, R.; TAVLARIDES, L. L. The Journal of Supercritical Fluids Production of biodiesel from microalgae oil (*Chlorella protothecoides*) by non-catalytic transesterification in supercritical methanol and ethanol : Process optimization. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 97, p. 174–182, 2015.

NASCIMENTO, I. A.; CABANELAS, I. T. D.; SANTOS, J. N.; NASCIMENTO, M. A.; SOUSA, L.; SANSONE, G. Biodiesel yields and fuel quality as criteria for algal-feedstock selection: Effects of CO₂-supplementation and nutrient levels in cultures. *Algal Research*, v. 8, p. 53–60, 2015.

OMETTO, A. R. Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos edip, exergia e emergia. 2005. 200f. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em hidráulica e saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

PARRELLA, R. A. D. C.; MENEGUCI, J. L. P.; RIBEIRO, A.; SILVA, A. R.; PARRELLA, N. N. L. D.; RODRIGUES, J. a D. S.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em diferentes ambientes visando a produção de etanolXXVIII Congresso nacional de milho e sorgo. [s.l: s.n.].

RAES, E. J.; ISDEPSKY, A.; MUYLAERT, K.; BOROWITZKA, M. A.; MOHEIMANI, N. R. Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. *Journal of Applied Phycology*, v. 26, n. 1, p. 247–255, 2014.

RAWAT, I.; RANJITH KUMAR, R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, v. 103, p. 444–467, mar. 2013.

REBITZER, G.; EKVAL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W.-P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

SACCHI, G. D. Flotação por ar dissolvido aplicado à separação de microalgas cultivadas em fotobiorreator, alimentado com vinhaça pré-tratada fisio-quimicamente, com vista à exploração de seu potencial bioenergético. 2015. 305f. Tese (doutorado). Programa de pós-graduação em hidráulica e saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

SANTOS, P. V.. Seleção de cepas oleaginosas de microalga *Chlorella* spp. e otimização do seu cultivo em meio sintético e vinhaça visando à produção sustentável de biodiesel. 2013. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SOUZA, S. P.; GOPAL, A. R.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. *Energy*, v. 81, p. 373–381, 2015.

TORRES, C. M.; RIOS S. D.; TORRAS C.; SALVADO, J.; MATO-SANZ, J. M.; JIMENEZ L. Microalgae-based biodiesel: A multicriteria analysis of the production process using realistic scenarios. *Bioresource Technology*, v. 147, p. 7–16, 2013.

XU, L.; WEATHERS, P. J.; XIONG, X.-R.; LIU, C.-Z. Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities. *Engineering in Life Sciences*, v. 9, n. 3, p. 178–189, jun. 2009.