



XXII CONGRESSO  
BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
23 a 26 de Setembro de 2018  
Hotel Maksoud Plaza  
São Paulo – SP



XVII ENCONTRO BRASILEIRO  
SOBRE O ENSINO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
27 a 28 de Setembro de 2018  
USP  
São Paulo – SP

# BALANÇO ENERGÉTICO DO SISTEMA INTEGRADO DE BIO-COMBUSTÃO

SEVERO IA, FAVERO YN, DEPRÁ MC, FAGUNDES MB, ZEPKA LQ e JACOB-LOPES E.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Tecnologia e  
Ciência de Alimentos

E-mail para contato: ihana.aguiar@gmail.com

**RESUMO** – *O objetivo do trabalho foi estabelecer o balanço energético do processo integrado de bio-combustão. Os experimentos foram feitos em um fotobiorreator de coluna de bolhas com volume de 2L, luminosidade de 15 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/s, aeração de 1VVM com 15% de CO<sub>2</sub>. O fotobiorreator foi integrado a um forno de bio-combustão projetado em escala laboratorial. O balanço de energia foi determinado através do equacionamento que relaciona a energia renovável de saída pela energia fóssil de entrada, estimado em termos de MJ. Os resultados obtidos indicaram que o balanço energético do processo de bio-combustão melhorou 69,5% ao integrar os gases de exaustão do fotobiorreator.*

## 1. INTRODUÇÃO

As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), relacionadas ao uso de energia não renovável, têm direcionado os esforços científicos para desenvolver tecnologias sustentáveis e mitigar as mudanças climáticas. As tecnologias de captura de carbono, por exemplo, são apropriadas para reduzir as emissões, contudo, tais abordagens não apresentam as vantagens técnicas, econômicas e ambientais que um processo industrial requer (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015).

Assim, a captura de carbono e utilização biológica (BCCU) tem sido considerada como uma potencial estratégia de engenharia para melhorar processos consolidados. Esta nova rota tecnológica está baseada em sistemas mediados por microalgas, os quais são desenvolvidos em fotobiorreatores. Estes equipamentos, entretanto, devem ser projetados para alcançar uma eficiente biotransformação do CO<sub>2</sub> em produtos metabólicos de interesse comercial (Jacob-Lopes *et al.*, 2017).

Recentemente, Severo *et al.* (2018) desenvolveram um processo de BCCU aplicado à um sistema de bio-combustão. A tecnologia integra os gases de exaustão do fotobiorreator, contendo compostos orgânicos voláteis (COVs), O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> não convertido, em um forno de combustão, os quais são reutilizados como biocombustíveis gasosos, comburente e diluente de nitrogênio, respectivamente. Embora os resultados tenham demonstrado um aumento na eficiência térmica, existem algumas operações ao longo do processo que podem apresentar impactos ambientais desfavoráveis.

Dessa forma, surge a necessidade de abordar questões energéticas para melhorar a sustentabilidade dos sistemas de produção. A análise de ciclo vida (ACV) é uma ferramenta que ajuda a identificar os fluxos de massa e energia e as emissões ao longo de um processo, possibilitando avaliar o uso de recursos e proporcionar oportunidades de melhorias (Deprá *et al.*, 2017). Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi estabelecer o balanço energético do processo integrado de bio-combustão através da ACV.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Definição do objetivo e escopo

A ferramenta de ACV foi utilizada de acordo com as normas da Organização Internacional de Padronização (ISO, 2006). A ACV neste estudo foi baseada a partir de dados experimentais em escala laboratorial obtidos em Severo *et al.* (2018). Considerando que os processos baseados em microalgas ainda não são tecnologias consolidadas, os dados foram padronizados para uma unidade funcional de 1 MJ de energia e 1 kg de massa para comparação com uma futura escala industrial. A Figura 1 mostra o escopo resumido do processo integrado com os fluxos de energia em cada etapa durante o seu ciclo de vida.

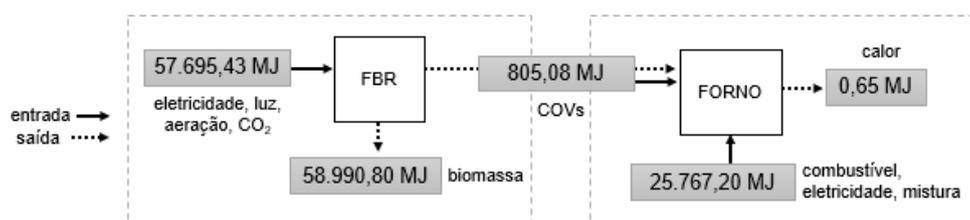


Figura 1 – Escopo do processo integrado de bio-combustão e fluxos de energia.

### 2.2. Análise de inventário

A coleta de dados foi baseada no consumo e produção de energia, tanto para o fotobiorreator quanto para o forno, quantificando e compilando informações para todos os fluxos de entrada e saída de energia durante cada etapa do processo (Figura 1).

### 2.3. Microrganismo e condições de cultivo

A microalga utilizada foi a *Scenedesmus obliquus* (UTCC5) obtida da Coleção de Culturas de Algas e Cianobactérias da Universidade de Toronto, Canadá. As culturas estoque foram propagadas e mantidas em meio sintético BG11 (Rippka *et al.*, 1979) e pH 7,6. As condições de incubação usadas foram: temperatura de 30°C, intensidade luminosa de 15  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , fotoperíodo de 12h e agitação constante de 1VVM (volume de ar por volume de cultura por minuto).

### 2.4. Descrição do processo integrado de bio-combustão

As análises foram feitas em um fotobiorreator de coluna de bolhas (Maroneze *et al.*, 2016), iluminado com 45 lâmpadas de LED (consumo total de 0,01125 kWh), localizadas em uma câmara de fotoperíodo. As condições experimentais foram: concentração celular inicial de 100mg/L, temperatura de 25°C, luminosidade de 150  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  e aeração de 1VVM com ar enriquecido de 15% de CO<sub>2</sub>. O fotobiorreator foi mantido em regime intermitente, alimentado com 2L de meio de cultura. Os testes foram realizados em triplicata.

O forno de bio-combustão integrado ao fotobiorreator foi projetado em escala laboratorial e os experimentos foram conduzidos de acordo com a metodologia descrita em Severo *et al.* (2018). Os gases de exaustão de fotobiorreator, contendo COVs, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, foram encaminhados para a câmara de combustão. O combustível utilizado foi o coque de petróleo. As condições experimentais foram: massa inicial de coque de 1,0 g, tempo total de combustão



XXII CONGRESSO  
BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
23 a 26 de Setembro de 2018  
Hotel Maksoud Plaza  
São Paulo - SP



XVII ENCONTRO BRASILEIRO  
SOBRE O ENSINO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
27 a 29 de Setembro de 2018  
USP  
São Paulo - SP

de 20 min e vazão de ar de 1,0 L/min.

## 2.5. Balanço de energia

De acordo com os limites do sistema, o balanço de energia, expresso em termos de megajoules (MJ), foi calculado a partir do somatório de todos os fluxos de energia do processo, através da Eq. 1 (Jorquera *et al.*, 2010):

$$EB = \sum \text{entrada} - \sum \text{saída} \quad (1)$$

Adicionalmente, a taxa de energia líquida, denominada de “*net energy ratio*” (NER), a qual é definida como a razão da energia total produzida e requerida para as operações, foi calculada de acordo com a Eq. 2:

$$NER = \sum E_{\text{saída}} / \sum E_{\text{entrada}} \quad (2)$$

A energia de saída do forno de bio-combustão foi definida pela Segunda lei da Termodinâmica, calculada a partir da Eq. 3 e suas variáveis:

$$Q = m_F \times C_F \times (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad (3)$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor perdido nos gases de exaustão,  $m_F$  é a massa total de combustível,  $C_F$  é o calor específico médio do combustível,  $T_{\text{saída}}$  é a temperatura dos gases de exaustão e  $T_{\text{entrada}}$  é a temperatura antes da combustão.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o balanço energético do processo integrado de bio-combustão, os fluxos de entrada e de saída de energia das operações foram quantificados e os valores do NER foram determinados (Tabela 1).

Tabela 1 –Taxa de energia líquida dos processos.

Energia	NER
Fotobiorreator	1,03
Forno de bio-combustão	$2,5 \times 10^{-5}$
Processo integrado	0,70

Conforme mostrado na Tabela 1 e na Figura 1, ao considerar os processos independentes, a análise do balanço de energia do fotobiorreator indicou uma energia de entrada e de saída de 57.695,43 MJ e 59.795,88, respectivamente, resultando em um NER de 1,03. Os resultados mostraram que a energia de saída, contida na biomassa e nos COVs (energia primária), é maior que a energia de entrada no sistema. De acordo com Jorquera *et al.* (2010), um balanço de energia positivo ( $NER > 1$ ), que englobe todo o processo, é necessário para justificar a implementação real de tecnologias baseadas em microalgas. Muitos estudos têm relatado altos valores de NER, demonstrando que, em teoria, o consumo de energia é menor que a produção. No entanto, tentativas têm sido dificultadas pelo fato de que, até o momento, nenhum fotobiorreator foi projetado para operar em maiores escalas.



XXII CONGRESSO  
BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
23 a 26 de Setembro de 2018  
Hotel Maksoud Plaza  
São Paulo – SP



XVII ENCONTRO BRASILEIRO  
SOBRE O ENSINO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
27 a 29 de Setembro de 2018  
USP  
São Paulo – SP

Por outro lado, para o forno de bio-combustão, a energia de entrada e de saída foram de 26.572,28 MJ e 0,65 MJ, respectivamente, resultando em um NER de  $2,5 \times 10^{-5}$ . Embora o NER seja muito inferior ao valor ideal estabelecido, deve-se levar em conta que em uma escala industrial, os sistemas tradicionais de combustão são altamente dependentes do aporte de energia não renovável para operação. Estes processos são caracterizados por reações exotérmicas, onde os produtos da combustão são menos energéticos que os reagentes e, assim, o balanço tende a ser negativo (Glassman *et al.*, 2015).

Alternativamente, ao considerar o processo integrado, o NER obtido foi de 0,70, evidenciando uma melhoria de aproximadamente 69,5% no sistema, ao reutilizar os gases de exaustão do fotobiorreator. Diversos estudos têm demonstrado que a integração de energia pode melhorar a sustentabilidade de outros processos (Slade & Bauen, 2013). Paralelamente, a biomassa gerada no bioprocessamento apresenta considerável conteúdo energético, a qual pode ser explorada como fonte adicional de energia renovável de entrada.

## 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que os fotobiorreatores têm potencial para serem integrados como equipamentos melhoradores aos processos convencionais de combustão, aumentando a eficiência térmica. O balanço energético global do sistema pode, portanto, apresentar desempenho ambiental favorável, desde que os excedentes gerados também sejam explorados adequadamente.

## 5. REFERÊNCIAS

- CUÉLLAR-FRANCA RM, AZAPAGIC A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *J. CO<sub>2</sub> Util.* v. 9, p. 82-102, 2015.
- DEPRÁ MC, ZEPKA LQ, JACOB-LOPES E. Introductory Chapter: Life Cycle Assessment as a Fundamental Tool to Define the Biofuel Performance. In: *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*. InTech, 2017.
- GLASSMAN I, YETTER RA, GLUMAC NG. *Combustion (5<sup>th</sup> Ed.)*. Academic Press, Elsevier, 774p., 2015.
- ISO. International Standard 14040. Environmental Management – Life cycle assessment. Principles and framework. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneva, 2006.
- JACOB-LOPES E, SEVERO IA, BIZELLO RS, BARIN JS, MENEZES CRD, CICHOSKI AJ, WAGNER R, SUZUKI S, PEREIRA TR, TISCHER B, MENEZES MFLD, ZOTTIN LS. Process and system for re-using carbon dioxide transformed by photosynthesis into oxygen and hydrocarbons used in an integrated manner to increase the thermal efficiency of combustion systems. Patent WO 2017/112984 A1, 2017.
- JORQUERA O, KIPERSTOK A, SALES EA, EMBIRUÇU M, GHIRARDI ML. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresour. Technol.* v. 101, p. 1406-1413, 2010.
- MARONEZE MM, SIQUEIRA SF, VENDRUSCOLO RG, WAGNER R, MENEZES CRD, ZEPKA LQ, JACOB-LOPES E. The role of photoperiods on photobioreactors – A potential strategy to reduce costs. *Bioresour. Technol.* v. 219, p. 493-499, 2016.
- RIPPKA R, DERUELLES J, WATERBURY JB, HERDMAN M, STANIER, RY. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *J. Gen. Microbiol.* v. 111, p. 1-61, 1979.
- SEVERO IA, DEPRÁ MC, BARIN JS, WAGNER R, MENEZES CRD, ZEPKA LQ, JACOB-LOPES E. Bio-combustion of petroleum coke: The process integration with photobioreactors. *Chem. Eng. Sci.* v. 177, p. 422-430, 2018.
- SLADE R, BAUEN A. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass Bioenerg.* V.53, p.29-38, 2013.