

REVISTA AIDIS

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

UM NOVO MODELO DE FOTOBIORREATOR TUBULAR HELICOIDAL PARA PRODUÇÃO DE MICROALGAS

*Willian Ribeiro Ide¹
Carlos Nobuyoshi Ide¹
Keila Roberta Ferreira de Oliveira Dissan¹
Maria Lúcia Ribeiro¹
Marc Árpád Boncz¹

A NEW MODEL OF HELICAL TUBULAR PHOTOBIOREACTOR FOR THE MICROALGAE PRODUCTION

Recibido el 25 de enero de 2017; Aceptado el 4 de mayo de 2018

Abstract

Microalgae have been used as feedstock for many high value-added products. However, some problems have been observed during its production. The high cost, low efficiency and ease of contamination are some of the factors that has hampered the production. This study aimed to develop a new helical tubular photobioreactor model, in pilot-scale, artificially and internally illuminated, more efficient, simpler and potentially more economical. From the daily monitoring of the microalgae growth for turbidity and total suspended solids, it was concluded that the helical photobioreactor proposed has a high microalgae production capacity in a short time and also a low cost of installation and operation. However, the proposed reactor still depend on a substantial energy consumption for cooling due to overheating.

Keywords: *Chlorella* sp., microalgae cultivation, technologic innovation.

¹ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

*Autor correspondente: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Cidade Universitária, Campo Grande, Mato Grosso do Sul. 79090-900. Brasil. Email: willian.ide@ufms.br; willian.ide@hotmail.com

Resumo

As microalgas têm sido utilizadas como matéria-prima de diversos produtos de alto valor agregado. Entretanto, alguns problemas têm sido observados durante a sua produção. O custo elevado, a baixa eficiência e a facilidade de contaminação, são alguns dos fatores que tem dificultado a produção. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um novo modelo de fotobiorreator tubular helicoidal, em escala piloto, iluminado artificialmente e internamente, mais eficiente, mais simples e potencialmente mais econômico. A partir do monitoramento diário do crescimento das microalgas pela turbidez e sólidos suspensos totais, foi possível concluir que o fotobiorreator helicoidal proposto, apresenta uma alta capacidade de produção de microalgas em um curto período de tempo e, também, um custo de instalação e operação reduzido. Entretanto, o reator proposto ainda depende de um consumo considerável de energia para refrigeração, devido ao superaquecimento.

Palavras chave: *Chlorella* sp., Cultivo de microalgas, Inovação tecnológica.

Introdução

Nos últimos anos, as microalgas têm sido vistas como uma fonte alternativa de diferentes produtos de alto valor agregado. No entanto, a produção das microalgas ainda apresenta algumas barreiras. O alto custo da instalação do sistema e operação, a baixa eficiência dos reatores, a facilidade de contaminação, são alguns dos principais problemas relacionados a produção de microalgas. Por estas razões, tem sido intensificada a busca por sistemas mais eficientes, capazes de produzir maior quantidade de microalgas em menor custo e em tempo reduzido.

As microalgas são microrganismos fotossintetizantes (Demirbas, 2011), procariontes ou eucarioentes (Rashid, 2014), capazes de converter energia solar em energia química (Kiran *et al.*, 2014; Zeng *et al.*, 2011) e de direcionar toda esta energia para seu crescimento e reprodução com mais eficiência que as plantas mais sofisticadas, devido a sua simples estrutura celular. Por estes motivos, as microalgas se duplicam com mais rapidez em intervalos de tempo menores, comparado as demais culturas. De acordo com Chisti (2007), as microalgas duplicam a sua biomassa, geralmente, em 24 horas e, durante a fase de crescimento exponencial, o tempo de duplicação pode atingir o valor de 3.5 horas. Ziolkowska e Simon (2014) relatam que as microalgas podem crescer 20-30 vezes mais rápido que as culturas alimentares. Trata-se de um dos organismos mais robustos da terra, capazes de crescer em uma ampla gama de condições (Singh e Sharma, 2012) incluindo, segundo Kiran *et al.* (2014), água, rochas, solo e até mesmo em ambientes extremos, como águas vulcânicas e águas salgadas.

As microalgas são constituídas, basicamente, por três tipos de componentes: carboidratos; proteínas; e lipídios (Ghorbani *et al.*, 2014). Por esta razão, inúmeras espécies de algas têm sido cultivadas para fins comerciais, como na produção de energia, corantes naturais, compostos farmacêuticos, fonte de nutriente animal e humana, e também para outras finalidades, como tratamento de águas residuais e remoção do CO₂ do ar. Segundo (Zhu *et al.*, 2014), existem 50,000 espécies de microalgas, mas apenas cerca de 30,000 espécies foram estudadas e analisadas até

agora. Entre as mais utilizadas, a *Chlorella* sp, destaca-se devido seu alto teor de lipídios e facilidade de produção.

As microalgas podem ser cultivadas, tanto em sistemas abertos, como lagoas de circuito, quanto em sistemas fechados, como fotobiorreatores (Rawat *et al.*, 2013; Mata *et al.*, 2010; Greenwell *et al.*, 2010). Segundo Singh e Sharma (2012), os sistemas fechados apresentam diversas vantagens como: minimização da contaminação; possibilidade de cultivo de apenas uma única espécie; controle sobre as condições de pH, temperatura, luz e concentração de CO₂; menor perda de CO₂; menor perda de água por evaporação; permite obter concentrações mais elevadas de células; e permite a produção de produtos biofarmacêuticos complexos.

Existem diversas configurações de fotobiorreatores que podem ser utilizados na produção de microalgas. Entre os fotobiorreatores mais comuns, destacam-se: tubulares (Michels *et al.*, 2014; Scoma *et al.*, 2012; Boran *et al.*, 2012); placas planas (Wang *et al.*, 2014; Tamburic *et al.*, 2011); coluna de *airlift* (Pirouzi *et al.*, 2014; Nayak *et al.*, 2014; Kumar e Das, 2012; Yuan *et al.*, 2011); coluna de bolhas (Nauha e Alopaeus, 2013; Valdés *et al.*, 2012; Rasoul-Amini *et al.*, 2011); tanque agitado; (Kumar *et al.*, 2013; Zhang, 2013; Camacho *et al.*, 2011); e helicoidal (Concas *et al.*, 2010; Briassoulis *et al.*, 2010; Travieso *et al.*, 2001). Atualmente, não existe um método de cultivo ideal para produção das microalgas, pois ambos (aberto e fechado) apresentam desvantagens. Por isso, tem sido intensificada a busca por novas tecnologias, as quais proporcionam um ponto ótimo de equilíbrio entre o custo do projeto, seu funcionamento e a capacidade de produção.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um novo modelo de fotobiorreator tubular helicoidal, em escala piloto, iluminado artificialmente e internamente, mais eficiente, mais simples e potencialmente mais econômico.

Metodologia

Modelo Proposto

Foi desenvolvido um novo modelo de fotobiorreator tubular helicoidal, em escala piloto. Trata-se de um reator composto por um sistema externo e um interno de mangueiras, o qual permite o aproveitamento de 100% da iluminação artificial fornecida e o aumento do tempo de contato das microalgas com a luz, devido a maior capacidade volumétrica do sistema. A Figura 1 apresenta a vista frontal e o corte transversal do fotobiorreator projetado.

O fotobiorreator foi projetado para trabalhar em fluxo ascendente, tanto no sistema externo, quanto no interno. A capacidade total do fotobiorreator é de 12 L, sendo 8 L pertencente ao sistema externo e 4 L ao interno.

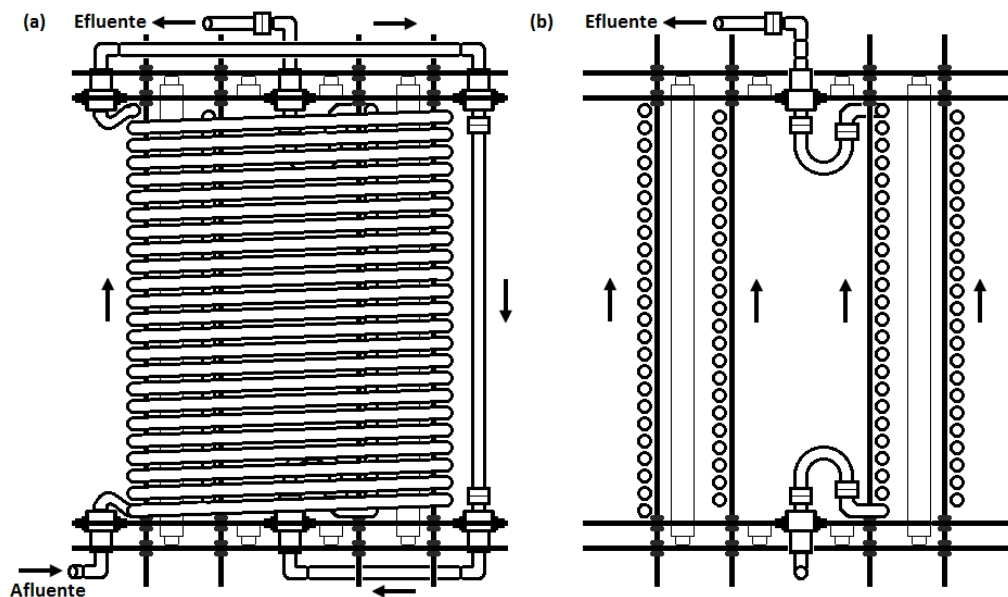


Figura 1. (a) Vista frontal e (b) corte transversal do fotobiorreator

Construção do reator

Para a construção do reator, foram utilizados 42 m de mangueira 3/4" (20 mm) com espessura de 2 mm, sendo 28 m pertencente ao sistema externo e 14 m ao sistema interno. Para decidir o tipo de mangueira a ser utilizada, foram avaliadas 5 marcas diferentes de mangueiras 3/4" (20 mm) com espessura de 2 mm (AFA, Plastic, Ibirá, Mantec e Olivar). No protótipo foi utilizado a mangueira de PVC da marca Ibirá, devido a menor absorvância e por não permitir a penetração da radiação ultravioleta. A Figura 2 apresenta a absorvância de cada mangueira testada para diferentes comprimentos de onda.

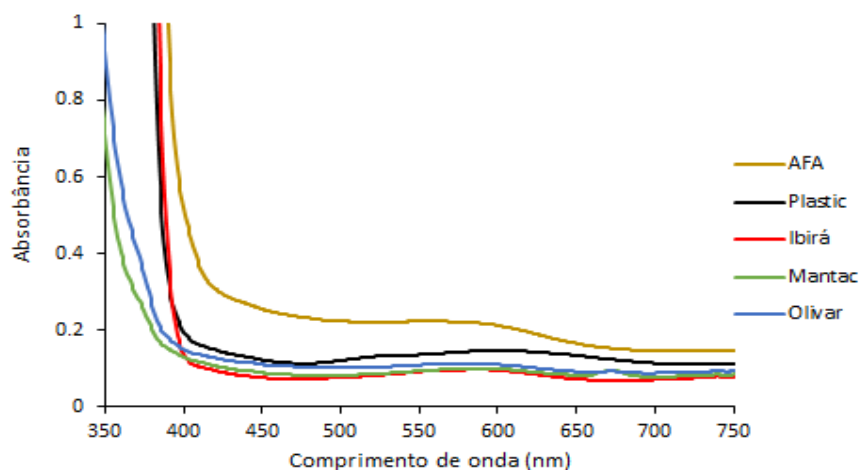


Figura 2. Absorvância das mangueiras

Para a estrutura do fotobiorreator foram utilizadas 12 barras de rosca sem fim 3/8" (10 mm), com comprimento de 73.0 cm, e 4 placas quadradas de madeiras (43.1x43.1 cm²) (Figura 3). As placas de madeiras foram projetadas com furos de 3/8" (10 mm) de diâmetro, para receber as barras de rosca sem fim e a fiação dos soquetes, e com furos de 3/4" (20 mm) de diâmetro, para receber as lâmpadas e as conexões da mangueira. As placas foram dispostas no fotobiorreator na ordem ABCD, conforme apresentado na Figura 4. A Figura 4 também apresenta as dimensões utilizadas no fotobiorreator.

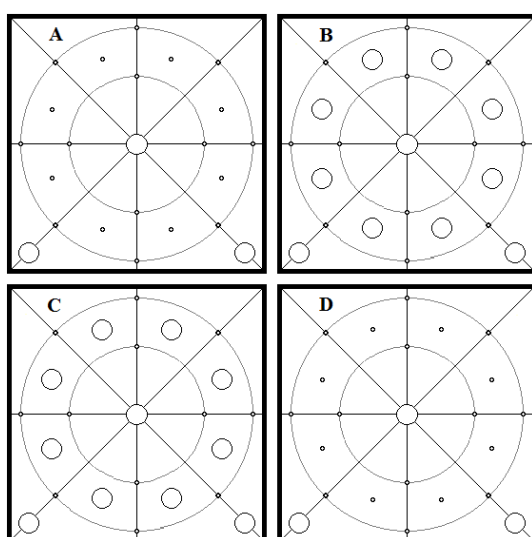


Figura 3. Placas de madeira

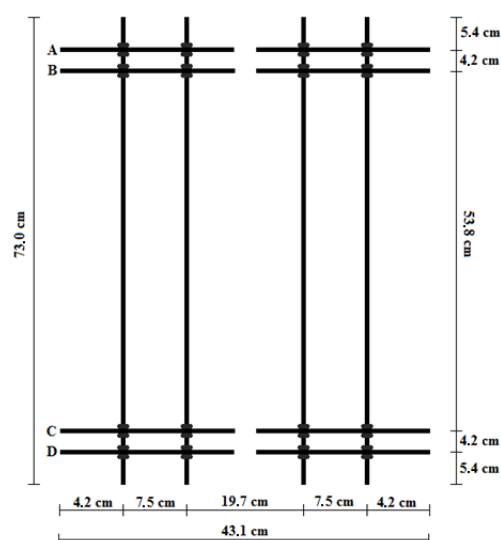


Figura 4. Dimensões do fotobiorreator

Para o sistema de iluminação foram utilizados 4 reatores com capacidade para duas lâmpadas de 20 W por reator e 8 lâmpadas de 20 W (60 cm) da marca Phillips, as quais ficaram ligadas em soquetes, nas placas de madeira A e D.

Avaliação do fotobiorreator

Microalga e meio de cultivo

Para avaliar o desempenho do fotobiorreator em produzir algas foram utilizadas microalgas do gênero *Chlorella* sp. O meio de cultivo adotado foi o *Bold's Basal Medium* (BBM) (Nichols, 1973). A composição química do meio BBM (em mg.L⁻¹) foi de: NaNO₃, 250; CaCl₂.2H₂O, 25; MgSO₄.7H₂O, 75; K₂HPO₄, 75; KH₂PO₄, 175; NaCl, 25; EDTA, 50; KOH, 31; FeSO₄.7H₂O, 4.98; H₃BO₃, 11.42; ZnSO₄.7H₂O, 8.82; MnCl₂.4H₂O, 1.44; MoO₃, 0.71; CuSO₄.5H₂O, 1.57; Co(NO₃)₂.H₂O, 0.49.

Avaliação da eficiência do fotobiorreator

Para avaliar o potencial de produção de microalgas no novo modelo de fotobiorreator helicoidal, foi construído um sistema conforme apresentado na Figura 5. Este sistema é composto por um reservatório de 10 L (1), uma bomba aeradora (2), uma bomba centrífuga (3); um fotobiorreator (4); um ponto de coleta (5) e uma câmara de refrigeração.

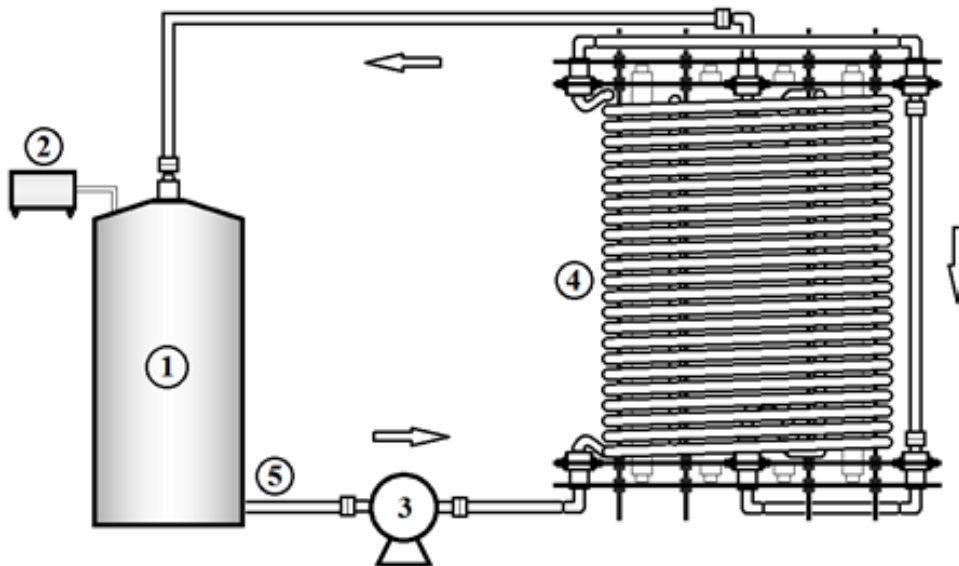


Figura 5. Esquema do sistema

O sistema foi preenchido com um volume de 18 L, sendo 13.4 L de água destilada, 3.6 L (20% do volume total) de uma suspensão de microalgas a uma concentração equivalente de 200 UNT e 1 L de uma mistura de água destilada e meio de cultura BBM, preparado para 18 L.

A aeração foi realizada por um aerador com vazão de dióxido de carbono (CO_2) de, aproximadamente, $0.06 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$. Foi fornecida uma intensidade luminosa contínua de 7000 LUX, uma temperatura constante de 30°C e uma vazão de recirculação de $1.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Amostragem e Análise dos dados

O sistema foi avaliado durante cinco dias. As coletas das amostras foram feitas diariamente e ao mesmo horário. Os parâmetros adotados para as análises foram: pH; sólidos suspensos totais (SST); turbidez; e temperatura. Para avaliar o crescimento das microalgas foi utilizado, tanto o SST, quanto a turbidez. A determinação da taxa de crescimento (μ, d^{-1}) foi realizada, utilizando a seguinte equação (equação 1):

$$\mu = \frac{\ln X_t - \ln X_0}{t - t_0}$$

Equação (1)

Onde X_t e X_0 representa a concentrações de biomassa, obtida pela turbidez (UNT) e SST (mg.L^{-1}) no tempo t e t_0 (dias).

Todas as análises foram realizadas em triplicatas e de acordo com as normas estabelecidas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2012).

Resultados

A Figura 6 apresenta o protótipo do reator e o sistema em operação.



Figura 6. Imagem do reator proposto e do sistema em operação, respectivamente

Para avaliar o potencial de produção das microalgas *Chlorella* sp. no fotobiorreator tubular helicoidal foi realizado o monitoramento diário dos parâmetros turbidez e SST. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos durante 5 dias de avaliação.

Tabela 1. Resultados do monitoramento da produção de microalgas

Análise	Unidade	Início		1° dia		2° dia		3° dia		4° dia		5° dia	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
T _{ambiente}	°C	23.1	0.2	25.0	0.1	24.0	0.0	20.0	0.1	23.1	0.1	23.0	0.1
T _{amostra}	°C	23.1	0.2	31.0	0.1	32.1	0.1	27.1	0.1	29.0	0.0	29.0	0.1
T _{reator}	°C	36.0	0.1	39.1	0.1	39.0	0.0	34.0	0.1	36.0	0.1	36.0	0.0
Turbidez	UNT	25.2	0.4	122.0	3.6	250.0	2.0	644.0	1.7	967.0	10.8	1212.0	85.4
pH	-	6.8	0.0	7.7	0.0	9.1	0.0	9.6	0.0	9.2	0.0	8.7	0.0
SST	mg.L ⁻¹	52.0	2.0	170.3	0.6	380.0	2.0	605.3	2.1	740.3	3.2	1090.0	11.0

Ao nível de confiança de 95%, as variáveis, turbidez e SST, seguiram uma distribuição normal pelo método de Shapiro-Wilk. *T* - temperatura; *DP* - desvio padrão.

Com os resultados do monitoramento, foram construídas curvas de crescimento relacionadas a turbidez e aos SST, conforme podem ser vistos na Figura 7 e 8, respectivamente.

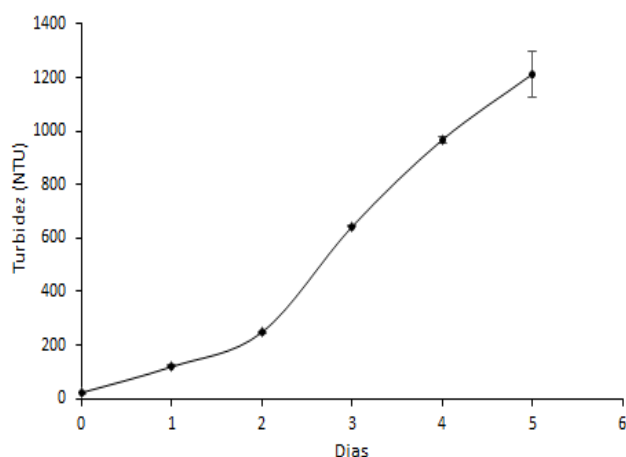


Figura 7. Curva de crescimento relacionada à turbidez

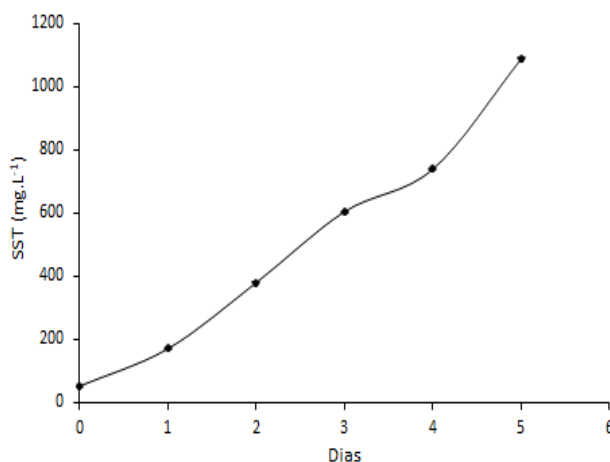


Figura 8. Curva de crescimento relacionada ao SST

Verifica-se que o crescimento das microalgas *Chlorella* sp. utilizando o modelo de fotobiorreator proposto foi elevado, chegando a uma taxa de crescimento específico de 0.775 d⁻¹, em relação a turbidez, e 0.609 d⁻¹, em relação aos sólidos suspensos totais. A taxa de crescimento máxima ocorreu no 1° dia, onde chegou a 1.579 d⁻¹, em termos de turbidez, e a 1.187 d⁻¹, em termos de SST. Esses valores foram maiores comparados aos obtidos por Frumento *et al.* (2013), onde os autores, utilizando um fotobiorreator tubular helicoidal comum, obteve uma taxa de crescimento

específico de 0.283 d^{-1} , cultivando *Chlorella vulgaris* durante 18 dias. Chiu *et al.* (2008) produzindo *Chlorella sp.* em um fotobiorreator cilíndrico de vidro durante 8 dias, também obteve taxas de crescimento específico elevadas, como $0.58 - 0.66 \text{ d}^{-1}$. No entanto, para alcançar esta taxa, os autores utilizaram uma aeração com CO_2 na concentração de 2 - 15%, respectivamente.

Visto que as curva do crescimento das microalgas relacionadas à turbidez e aos SST apresentam uma relação linear, foi realizada a correlação entre estas duas variáveis (Figura 9), verificando se existe ou não uma correlação significativa.

A partir das análises realizadas, foi possível obter um coeficiente de correlação de Person (R) igual a 0.982, o que indica a existência de uma correlação linear significativa. Ribeiro *et al.* (2005) encontraram uma correlação linear maior que 0.896. Reali *et al.* (2003), em seus estudos, também encontraram uma correlação significativa entre SST e turbidez e um coeficiente de determinação elevado ($R^2=0.986$). Neste trabalho, também foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) elevado, o que indica o quanto a curva de regressão fica bem determinada em função da correlação entre pontos experimentais. A equação obtida a partir da correlação foi $\text{SST} = 0.7817 \times \text{Turbidez} + 86.8080$.

Em relação ao consumo de energia, foi elaborada uma tabela (Tabela 2), que descreve os equipamentos utilizados e o consumo de energia de cada equipamento, para melhor visualizar a eficiência energética do sistema e o custo necessário com energia, para a produção das microalgas.

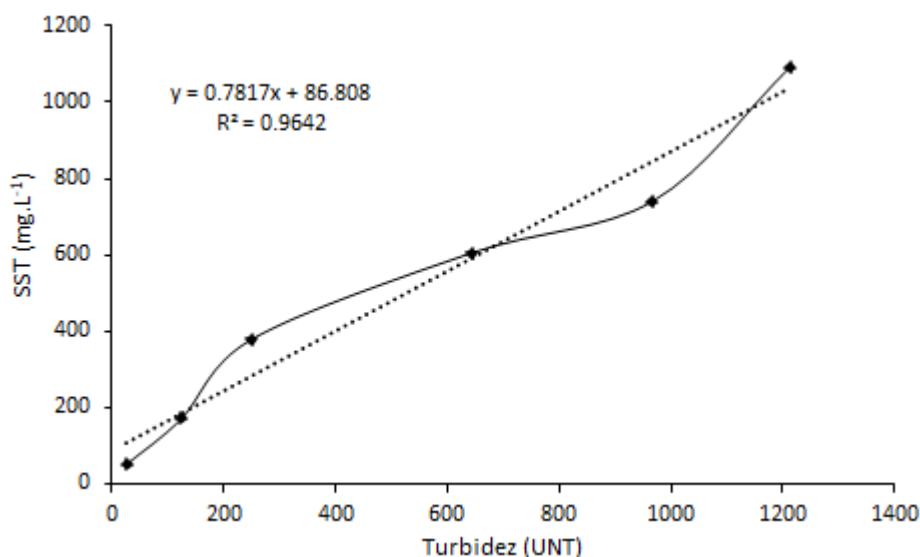


Figura 9. Correlação entre Turbidez e SST

Durante os 5 dias de teste, foram consumidos cerca de 66.12 kWh. A média de produção de microalgas foi de 207.6 mg.L⁻¹ para cada 13.2 kWh de energia. Nota-se que o maior consumo de energia foi proveniente da câmara de refrigeração. Para este reator, a refrigeração foi indispensável, pois o sistema superaquecia muito rápido, podendo elevar a temperatura da água em até 50°C. Isto ocorre devido ao tamanho reduzido do reator, problema que pode ser facilmente resolvido se construído em dimensões maiores. A remoção do sistema de refrigeração possibilitaria uma redução de 64% do custo total com energia.

Tabela 2. Relação dos equipamentos utilizados e seus respectivos consumos de energia

Equipamento	Qtdd. (unidade)	Potência (W)	Potência Total (kW)	Tempo (h)	Consumo diário (kWh)
Lâmpadas	8	20	0.160	24	3.84
Bomba aeradora	1	4	0.004	24	0.096
Bomba de máquina	1	37	0.037	24	0.888
Câmara de refrigeração	1	350	0.350	24	8.4

Qtdd. - Quantidade.

Por outro lado, os custos para implantação do sistema proposto são inferiores ao dos reatores convencionais, os quais utilizam materiais caros, como tubos ou chapas de acrílicos, e a área para instalação do reator também é bem reduzida. Por tratar-se de um reator do tipo helicoidal e circular, ainda há a possibilidade de aumentar o sistema na vertical, sem aumentar a área de instalação do sistema. Além disso, o aproveitamento da iluminação na região interna do reator permite o aumento da área de contato das microalgas com a luz, proporcionando uma maior capacidade de produção do sistema. Enfim, o fotobiorreator tubular helicoidal proposto, iluminado artificialmente, mostrou ser um modelo muito eficiente na produção das microalgas *Chlorella* sp., nas condições citadas anteriormente.

Conclusões

Foi desenvolvido e avaliado um novo modelo de fotobiorreator tubular helicoidal, iluminado internamente por 8 lâmpadas fluorescentes tubulares de 20 W, para produção mais eficiente, controlada e econômica de microalgas. A partir do monitoramento diário da produção das microalgas no reator, foi possível concluir que o modelo proposto apresenta alta capacidade de produção de *Chlorella* sp. em um curto período de tempo e a um custo de implantação reduzido. Porém, depende de um consumo elevado de energia para refrigerar o sistema.

Conclui-se também que é possível quantificar indiretamente a *Chlorella* sp. utilizando métodos mais simples e rápidos, como a turbidez, e que é possível estimar a quantidade de sólidos suspensos totais através da turbidez, a partir da equação $SST = 0.7817 \times \text{Turbidez} + 86.8080$, obtida da correlação entre estes dois parâmetros.

Recomenda-se que o reator proposto seja reconstruído com dimensões maiores e com furos nas placas superiores e inferiores, para permitir a troca de calor e, assim, reduzir o superaquecimento do reator.

Referências Bibliográficas

- APHA, AWWA, WPCF (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22^a ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Boran, E., Özgür, E., Yücel, M., Gündüz, U., Eroglu, I. (2012) Biohydrogen production by *Rhodobacter capsulatus* Hup-mutant in pilot solar tubular photobioreactor, *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**(21), 16437-16445. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.171>
- Briassoulis, D., Panagakis, P., Chionidis, M., Tzenos, D., Lalos, A., Tsinos, C., Berberidis, K., Jacobsen, A. (2010) An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp., *Bioresource Technology*, **101**(17), 6768-77. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.103>
- Camacho, F.G., Rodríguez, J.J.G., Mirón, A.S., Belarbi, E.H., Chisti, Y., Grima, E.M. (2011) Photobioreactor scale-up for a shear-sensitive dinoflagellate microalga, *Process Biochemistry*, **46**(4), 936-944. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.01.005>
- Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, **25**(3), 294-306. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Chen, C.-H., Kuan, T.-C., Ong, S.-C., Lin, C.-S. (2008) Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor, *Bioresource Technology*, **99**(9), 3389-96. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.013>
- Concas, A., Pisu, M., Cao, G. (2010) Novel simulation model of the solar collector of BIOCOIL photobioreactors for CO₂ sequestration with microalgae, *Chemical Engineering Journal*, **157**(2-3), 297-303. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.059>
- Demirbas, M.F. (2011) Biofuels from algae for sustainable development, *Applied Energy*, **88**(10), 3473-3480.
- Frumento, D., Casazza, A.A., Al Arni, S., Converti, A. (2013) Cultivation of *Chlorella vulgaris* in tubular photobioreactors: A lipid source for biodiesel production, *Biochemical Engineering Journal*, **81**, 120–125. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.bej.2013.10.011>
- Ghorbani, A., Rahimpour, H.R., Ghasemi, Y., Zoughi, S., Rahimpour, M.R. (2014) A Review of Carbon Capture and Sequestration in Iran: Microalgal Biofixation Potential in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **35**, 73-100. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.013>
- Greenwell, H.C., Laurens, L.M.L., Shields, R.J., Lovitt, R.W., Flynn, K.J. (2010) Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges, *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, **7**(46), 703-726.
- Kiran, B., Kumar, R., Deshmukh, D. (2014) Perspectives of microalgal biofuels as a renewable source of energy, *Energy Conversion and Management*, **88**, 1228-1244. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.022>
- Kumar, K., Das, D. (2012) Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in airlift and bubble column photobioreactors, *Bioresource Technology*, **116**, 307-13. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.074>

- Kumar, K., Sirasale, A., Das, D. (2013) Use of image analysis tool for the development of light distribution pattern inside the photobioreactor for the algal cultivation, *Bioresource Technology*, **143**, 88-95. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.117>
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, N.S. (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), 217-232. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Michels, M.H.A., Slegers, P.M., Vermuë, M.H., Wijffels, R.H. (2014) Effect of biomass concentration on the productivity of *Tetraselmis suecica* in a pilot-scale tubular photobioreactor using natural sunlight, *Algal Research*, **4**, 12-18. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.011>
- Nauha, E. K., Alopaevs, V. (2013) Modeling method for combining fluid dynamics and algal growth in a bubble column photobioreactor, *Chemical Engineering Journal*, **229**, 559-568. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.065>
- Nayak, B.K., Roy, S., Das, D. (2014) Biohydrogen production from algal biomass (*Anabaena* sp. PCC 7120) cultivated in airlift photobioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**(14), 7553-7560. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.120>
- Nichols, H.W. (1973) *Growth media—freshwater, Handbook of Phycological Methods: Culture Methods and Growth Measurements*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Pirouzi, A., Nosrati, M., Shojaosadati, S. A., Shakheshi, S. (2014) Improvement of mixing time, mass transfer, and power consumption in an external loop airlift photobioreactor for microalgae cultures, *Biochemical Engineering Journal*, **87**, 25-32. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.bej.2014.03.012>
- Rashid, N., Ur Rehman, M.S., Sadiq, M., Mahmood, T., Han, J.-I. (2014) Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 760-778. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.104>
- Rasoul-Amini, S., Montazeri-Najafabady, N., Mobasher, M.A., Hoseini-Alhashemi, S., Ghasemi, Y. (2011) *Chlorella* sp.: A new strain with highly saturated fatty acids for biodiesel production in bubble-column photobioreactor, *Applied Energy*, **88**(10), 3354-3356. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.040>
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., Bux, F. (2013) Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production, *Applied Energy*, **103**, 444-467. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.004>
- Reali, M.A.P., Moruzzi, R.B., Patrizzi, L.J. (2003) Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de águas que apresentam picos de turbidez, *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Santa Catarina.
- Ribeiro, T.A.P., Airoidi, R.P.S., Paterniani, J.E.S., Silva, M.J.M. (2005) Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **9**(3), 295-301.
- Scoma, A., Giannelli, L., Faraloni, C., Torzillo, G. (2012) Outdoor H₂ production in a 50-L tubular photobioreactor by means of a sulfur-deprived culture of the microalga *Chlamydomonas reinhardtii*, *Journal of Biotechnology*, **157**(4), 620-627. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.06.040>
- Singh, R.N., Sharma, S. (2012) Development of suitable photobioreactor for algae production – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**(4), 2347-2353. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.026>
- Tamburic, B., Zemichael, F.W., Crudge, P., Maitland, G.C., Hellgardt, K. (2011) Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**(11), 6578-6591. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.091>
- Travieso, L., Hall, D.O., Rao, K.K., Benã, F., Sã, E. (2001) A helical tubular photobioreactor producing *Spirulina* in a semicontinuous mode, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **47**, 151-155.

- Valdés, F.J., Hernández, M.R., Catalá, L., Marcilla, A. (2012) Estimation of CO₂ stripping/CO₂ microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. Application to *Nannochloropsis oculata* microalgae culture, *Bioresource Technology*, **119**, 1-6. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>
- Wang, L., Tao, Y., Mao, X. (2014) A novel flat plate algal bioreactor with horizontal baffles: structural optimization and cultivation performance, *Bioresource Technology*, **164**, 20-7. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.100>
- Yuan, X., Kumar, A., Sahu, A.K., Ergas, S.J. (2011) Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an airlift photobioreactor, *Bioresource Technology*, **102**(3), 3234-9. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.019>
- Zeng, X., Danquah, M.K., Chen, X.D., Lu, Y. (2011) Microalgae bioengineering: From CO₂ fixation to biofuel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(6), 3252–3260. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.014>
- Zhang, T. (2013) Dynamics of fluid and light intensity in mechanically stirred photobioreactor, *Journal of Biotechnology*, **168**(1), 107–116. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.07.007>
- Zhu, L.D., Hiltunen, E., Antila, E., Zhong, J.J., Yuan, Z.H., Wang, Z.M. (2014) Microalgal biofuels: Flexible bioenergies for sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **30**, 1035-1046. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.003>
- Ziolkowska, J.R., Simon, L. (2014) Recent developments and prospects for algae-based fuels in the US, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 847-853.