

**Tratamento de águas residuárias em fotobiorreatores de fluxo contínuo iluminados por luz artificial e solar**

**Wastewater treatment in flow photobioreactors continuous illuminated by artificial and solar light**

**Tratamiento de aguas residuales en fotobiorreactores de flujo continuo iluminado por luz artificial y solar**

Recebido: 20/04/2020 | Revisado: 21/04/2020 | Aceito: 22/04/2020 | Publicado: 23/04/2020

**Rafael Souza Leopoldino Nascimento**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7313-3427>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: [rsln.bio@gmail.com](mailto:rsln.bio@gmail.com)

**Ludymyla Marcelle Lima Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6027-1986>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: [ludymyla.marcelle@gmail.com](mailto:ludymyla.marcelle@gmail.com)

**Lucas Periard**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0482-7593>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: [lucasperiard@hotmail.com](mailto:lucasperiard@hotmail.com)

**Aníbal da Fonseca Santiago**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6743-6752>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: [anibal@ufop.edu.br](mailto:anibal@ufop.edu.br)

**Resumo**

A tecnologia de fotobiorreatores de microalgas e iluminados por LEDs tem sido amplamente estudada para o tratamento de águas residuárias. Porém, a luz solar é um recurso gratuito e deve ser aproveitado. Mas permanece a dúvida se os fotobiorreatores iluminados por luz natural (solar) em combinação com luz artificial podem ter maior estabilidade operacional ou maior desempenho quando comparados com sistema iluminados só por luz artificial. Neste contexto, fotobiorreatores de fluxo contínuo iluminados por Diodos Emissores de Luz (LEDs)

combinados, ou não, com luz solar foram operados e tiveram seu desempenho avaliado. As variáveis analisadas foram pH, OD, demanda química de oxigênio (DQO), clorofila *a* e sólidos suspensos totais. Os fotobiorreatores foram eficazes para a remoção de matéria orgânica, sendo  $75 \pm 15\%$  no fotobiorreator iluminado por LED e  $65 \pm 10\%$  no fotobiorreator iluminado por luz solar e LED. Os resultados mostraram que o uso da iluminação combinada favorece a produção de oxigênio dissolvido, e garante maior estabilidade operacional na remoção de matéria orgânica carbonácea.

**Palavras-chave:** Fotoperíodo; Iluminação combinada; LEDs; Microalgas.

### **Abstract**

The technology of microalgae photobioreactors and illuminated by LEDs has been widely studied for the treatment of wastewater. However, sunlight is a free resource and should be taken advantage of. But the question remains whether photobioreactors illuminated by natural (sunlight) light in combination with artificial light can have greater operational stability or greater performance when compared to systems illuminated only by artificial light. In this context, continuous flow photobioreactors illuminated by Light Emitting Diodes (LEDs) combined, or not, with sunlight were operated and had their performance evaluated. The variables analyzed were pH, OD, chemical oxygen demand (COD), chlorophyll - a and total suspended solids. The photobioreactors were effective for removing organic matter, with  $75 \pm 15\%$  in the photobioreactor illuminated by LED and  $65 \pm 10\%$  in the photobioreactor illuminated by sunlight and LED. The results showed that the use of combined lighting favors the production of dissolved oxygen and ensures greater operational stability in the removal of carbonaceous organic matter.

**Keywords:** Combined lighting; LEDs; Microalgae; Photoperiod.

### **Resumen**

La tecnología de los fotobiorreactores de microalgas e iluminados por LED ha sido ampliamente estudiada para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, la luz solar es un recurso gratuito y debe aprovecharse. Pero la pregunta sigue siendo si los fotobiorreactores iluminados por luz natural (solar) en combinación con luz artificial pueden tener una mayor estabilidad operativa o un mayor rendimiento en comparación con los sistemas iluminados solo por luz artificial. En este contexto, los fotobiorreactores de flujo continuo iluminados por diodos emisores de luz (LED) combinados, o no, con luz solar fueron operados y se evaluó su rendimiento. Las variables analizadas fueron pH, OD, demanda química de oxígeno (DQO), clorofila *a* y sólidos suspendidos totales. Los fotobiorreactores fueron efectivos para eliminar la materia orgánica, con  $75 \pm 15\%$  en el fotobiorreactor iluminado por LED y  $65 \pm 10\%$  en el fotobiorreactor iluminado por la luz solar y LED. Los resultados mostraron que

el uso de iluminación combinada favorece la producción de oxígeno disuelto y garantiza una mayor estabilidad operativa en la eliminación de la materia orgánica carbonosa

**Palabras clave:** Fotoperíodo; Iluminación combinada; LEDs; Microalgas.

## 1. Introdução

Há uma crescente demanda por tecnologias capazes de tratar águas residuárias envolvendo baixo consumo energético, a mitigação dos gases de efeito estufa e a possibilidade da geração de produtos com valor agregado (Hwang *et al.*, 2016). O uso de consórcios de microalgas (microalgas e microalgas - bactérias) satisfaz essa demanda, tendo a capacidade de tratar águas residuárias, obtendo elevadas taxas de remoção de poluentes e a possibilidade da geração de biomassa e bioprodutos (Olguin, 2012; Unnithan *et al.*, 2014; Gonçalves *et al.*, 2017).

Os sistemas de tratamento de águas residuárias com microalgas tem sua eficiência prejudicada em condições de baixa intensidade de luz ou em determinados comprimentos de onda (Wang *et al.*, 2007). Ao ar livre, a intensidade da luz instável pode causar inibição no crescimento de microalgas, resultante de uma intensidade de luz insuficiente durante os dias chuvosos e nublados ou de iluminação excessiva durante os dias de sol. Assim, o uso de fontes de luz artificiais para cultivar microalgas é uma solução alternativa (Pilon *et al.*, 2011), que garante maior controle operacional dos fotobiorreatores.

Nos estudos de cultivos de microalgas com luz artificial, tem-se utilizado os diodos emissores de luz (LEDs) (Wang *et al.*, 2007; Yan *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2020). Os LEDs apresentam menor consumo energético, não contêm componentes tóxicos (Chevremont *et al.*, 2012), além disso, a aplicação de LEDs nos cultivos de microalgas pode interferir diretamente na quantidade biomassa produzida (Schulze *et al.*, 2014). A aplicação de LEDs azuis como fonte de energia em cultivos de diferentes microalgas fotoestimulou a produção de biomassa e remoção de poluentes (Atta *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2020).

No entanto, apesar dos benefícios do uso de LEDs, deve-se levar em conta que a luz solar é um recurso gratuito e de acordo com as condições climáticas pode ser uma excelente fonte de energia luminosa para os sistemas de tratamento com microalgas. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de um fotobiorreator iluminado com o uso combinado de sol e LED com um fotobiorreator iluminado somente com LED em termos de remoção de matéria orgânica e crescimento de biomassa.

## **2. Metodologia**

### **2.1 Água residuária**

A água residuária utilizada neste estudo foi sintética (OECD, 1996). A composição era: triptona ( $160 \text{ mgL}^{-1}$ ), extrato de carne ( $650 \text{ mgL}^{-1}$ ), ureia ( $30 \text{ mgL}^{-1}$ ), fosfato monopotássico ( $28 \text{ mgL}^{-1}$ ), cloreto de sódio ( $7 \text{ mgL}^{-1}$ ), cloreto de cálcio dihidratado ( $4 \text{ mgL}^{-1}$ ), sulfato de magnésio heptahidratado ( $2 \text{ mgL}^{-1}$ ).

### **2.2 Inóculo de microalgas**

O inóculo foi produzido a partir de três litros de amostra (que continha um consórcio de espécies de microalgas) proveniente de um tanque de criação de tilápias, localizado no Horto Botânico do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas (ICEB) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O tanque foi escolhido por ser um ambiente com acúmulo de nutrientes, o que favorece o crescimento de microalgas. A amostra do tanque foi misturada com 20 L de água residuária sintética.

O fotobiorreator para o cultivo do inóculo foi montado em uma caixa retangular de polietileno preto, com 24 L de volume útil. O fotoperíodo do fotobiorreator foi de 24 horas de claro/zero de escuro. A iluminação foi realizada por meio de uma placa luminosa ( $0,41 \text{ m} \times 0,33 \text{ m}$ ), compostas por fitas de LED branco (marca: IP, modelo: 3528 IP20 3M, China), com fluxo luminoso de  $160 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### **2.3 Análises físicas e químicas**

As variáveis e suas respectivas metodologias utilizadas foram: demanda química de oxigênio filtrada ( $\text{DQO}_f$  - APHA (2012) 5220 D); sólidos suspensos totais (SST - APHA (2012) 2540 A); clorofila - *a* (NUSH, 1981). Para as análises de  $\text{DQO}_f$  as amostras foram submetidas ao processo de filtração à vácuo com membrana de nitrocelulose com porosidade de  $0,45 \mu\text{m}$ .

As análises de pH, oxigênio dissolvido e temperatura foram realizadas com o multiparâmetro (marca: HACH, modelo: HQ40D e sondas LDO101 e pH101, Alemanha). Para a temperatura padronizou-se o uso do valor indicado pelo termômetro do eletrodo de pH. O fluxo luminoso nos fotobiorreatores foi medido na superfície do líquido com um Foto/Radiômetro PAR (marca: Delta OHM, modelo: HD21012.1, Itália).

## 2.4 Fotobiorreatores

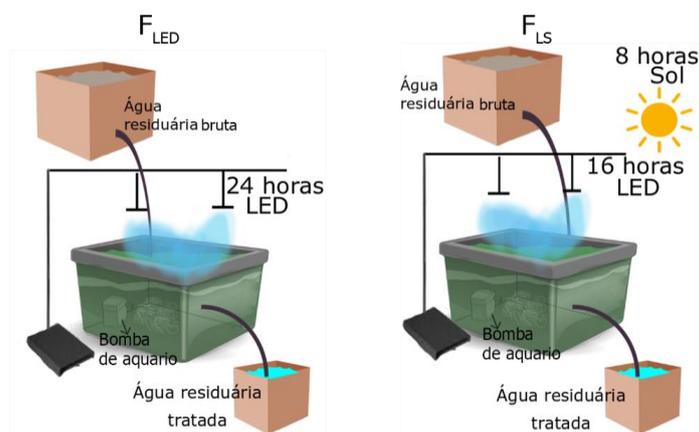
Dois fotobiorreatores foram construídos em recipientes de polietileno ( $0,2 \times 0,09$  m), ambos com um volume útil de 4 L (Figura 1). Para iniciar os experimentos foram adicionados, 1 litro de inóculo e 2 litros de água residuária sintética em cada fotobiorreator, que foram operados em regime de fluxo contínuo.

O experimento foi dividido em duas fases. A Fase 1 teve duração de dez dias e o tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 12 horas (TDH = 0,5 dia). Durante a fase 1 notou-se que o valor de oxigênio dissolvido (OD) permaneceu baixo para um sistema com microalgas (faixa de 0 -  $4,8 \text{ mg.L}^{-1}$ ), comparados com outros estudos, por isso houve uma alteração no TDH para 24 horas (1 dia). A alteração no TDH marcou o início da Fase 2, que durou 60 dias.

A vazão de entrada nos fotobiorreatores na Fase 1 foi de  $2,8 \text{ mL.min}^{-1}$  e na Fase 2 de  $1,4 \text{ mL.min}^{-1}$ . Foi instalado um sistema de agitação lenta abaixo da lâmina d'água nos fotobiorreatores, utilizando bombas de aquário submersas (marca: Sarlo Better, modelo SB 1000A, Brasil) com o objetivo de uniformizar o contato da biomassa com a luz disponibilizada.

Um dos fotobiorreatores ( $F_{LED}$ ) foi iluminado somente com LEDs da cor azul (marca: Maxtel, modelo: R100RGB, China) e fluxo luminoso de  $700 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$  e o outro fotobiorreator foi iluminado com a luz solar e LEDs ( $F_{LS}$ ) com a mesma configuração dos usados no  $F_{LED}$ . O fluxo luminoso e a cor dos LEDs escolhido a partir dos resultados obtidos nas pesquisas de Silva *et. al* (2020), a qual avaliou fotobiorreatores com diferentes iluminações e fluxo luminoso.

**Figura 1** – Desenho esquemático dos fotobiorreatores no experimento.



Os dois fotobiorreatores tiveram um fotoperíodo de 24 horas sob iluminação. O F<sub>LED</sub> foi iluminado com os LEDs azuis por todo o tempo, e o F<sub>LS</sub> foi exposto à luz solar (natural) durante 8 horas por dia e as outras 16 horas do dia foi exposto aos LEDs (Fotobiorreator iluminado com Sol e LED).

## 2.5. Identificação das espécies de microalgas

A identificação das microalgas foi realizada por taxonomia utilizando as chaves de identificação. Foi utilizado um microscópio Olympus CX 31 equipado com câmera SC30, acoplado a um computador, e a partir do programa *Analysis get it* versão 5.1, foram tiradas fotos das amostras. As amostras foram preservadas em etanol (proporção 1:1), conforme descrito por (Eland *et al.*, 2012). Foram utilizados dados do site [www.algabase.org](http://www.algabase.org), que funciona como banco de dados de informações sobre algas.

## 2.6. Análise estatística

Foi utilizado o teste *t* não paramétrico com um intervalo de 95% de confiança. O teste *t* foi realizado para a Fase 2 de operação, pois na Fase 1 o TDH não foi considerado adequado para o pleno funcionamento dos sistemas. O software *Ghaphad Prism* versão 5 foi utilizado para as análises estatísticas e confecção dos gráficos.

# 3. Resultados e Discussão

## 3.1. Identificação das microalgas

A partir da microscopia observou-se que o mesmo gênero estava presente em ambos fotobiorreatores. O filo era *Clorophyta*, classe: *Trebouxiophyceae*, ordem: *Chlorellales*, família: *Chorellaceae* e gênero: *Chlorella* Beyerinck 1890 (Beijerinck). Os estudos de Silva *et al.* (2017; 2020) apontam que esses gêneros são eficazes em sistemas de fotobiorreatores iluminados por LEDs para a remoção de poluentes.

Os indivíduos desse gênero são solitários e de vida livre. As células são em geral esféricas, elipsoidais ou ovoides. Os representantes desse gênero são habitantes principalmente de plânctons de sistemas de águas paradas, como lagos e reservatórios. Compreendem cerca de 14 ou 15 espécies conhecidas no mundo inteiro. No Brasil são conhecidas 4 espécies: *C. homosphaera*, *C. minutíssima*, *C. oocystoides* e *C. vulgaris* (Bicudo & Menezes, 2006).

### 3.2. Comportamento do pH, Temperatura e OD

As variáveis pH, temperatura e o OD foram monitorados diariamente. Nos dois fotobiorreatores o comportamento do pH foi similar. A média do valor do pH foi de  $8,1 \pm 0,06$  e coeficiente de variação (CV) 6% em ambos (Figura 2). Este valor é considerado ideal para o crescimento das microalgas de água doce (Park *et al.*, 2011). Não houve diferença no comportamento do pH entre o sistema iluminado com LED e sol ( $F_{LS}$ ) e somente com LED ( $F_{LED}$ ).

A temperatura é um fator importante para a produtividade de biomassa, sendo que a temperatura ideal da água necessária para o cultivo de microalgas varia de 20 °C a 30 °C (Lourenço, 2006). A temperatura média encontrada no presente estudo foi de 24,8° C para o  $F_{LED}$  (CV 3 %) e 26,4° C (CV 7 %) para o  $F_{LS}$  (Figura 2). Isso indica que, assim como o pH, a temperatura se manteve dentro da faixa considerada adequada para o cultivo das microalgas em ambos fotobiorreatores.

O valor inicial de OD nos fotobiorreatores foi de aproximadamente  $6,7 \pm 0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ . Isso pode ser explicado pela utilização da água de torneira para a preparação da água residuária sintética introduzida nos fotobiorreatores, na qual se mediu uma concentração de OD de aproximadamente  $7,0 \pm 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ . Após o segundo dia de operação esse valor abaixou para aproximadamente  $0,3 \pm 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ , possivelmente devido ao consumo de OD para a degradação da matéria orgânica pelas bactérias aeróbias.

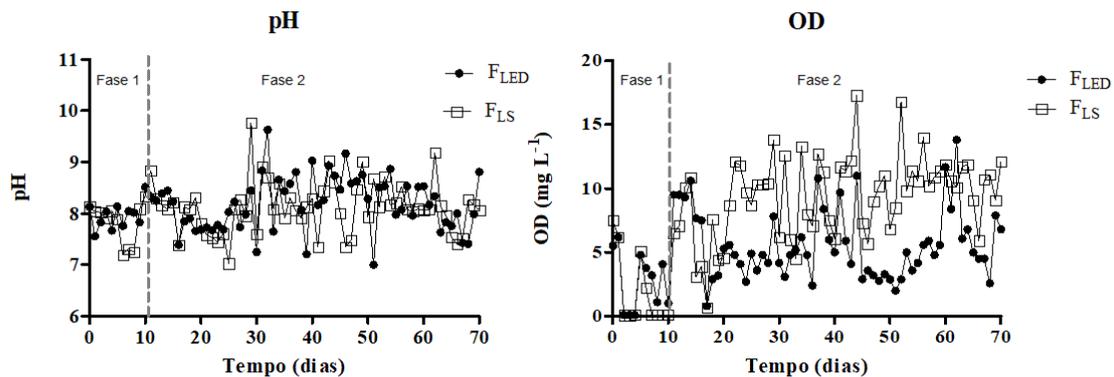
Na Fase 1 observou-se que em ambos fotobiorreatores o oxigênio dissolvido (OD) manteve-se baixo, com valores na faixa de 0,1 - 4,8  $\text{mg.L}^{-1}$ . Os valores de OD estavam inferiores aos encontrados em estudos similares (Silva *et al.* 2017; 2020), assim sendo o TDH foi alterado para 24 horas. Na Fase 2, com o ajuste do TDH houve um aumento na concentração de OD nos fotobiorreatores (Figura 2), a média do OD no  $F_{LED}$  foi de  $5,6 \pm 0,3$  (CV 48%) e no  $F_{LS}$  foi de  $9,7 \pm 0,4$  (CV 33%). O aumento na concentração de OD na Fase 2 indicou que havia uma quantidade remanescente de OD em ambos os sistemas.

Com o teste *t* não paramétrico (aplicado na Fase 2) foi possível concluir que houve uma diferença significativa entre os valores de OD do  $F_{LED}$  e o  $F_{SL}$ , foi obtido um *p* valor menor do que 0,0001. O que indicou que a taxa fotossintética foi influenciada positivamente pela exposição combinada a luz solar e LED, dado que houve uma maior produção de OD no  $F_{LS}$ .

A produção de OD pelas microalgas está ligada ao processo de fotossíntese, que é influenciada pela iluminação. O fotossistema das microalgas tem maior sensibilidade, nas

faixas de comprimento de onda do vermelho (610 - 630 nm) e do azul (430 nm), ocorrendo assim uma maior atividade fotossintética nestas bandas. O F<sub>LED</sub> foi exposto somente ao comprimento de onda azul, enquanto o F<sub>LS</sub> foi exposto a todos os comprimentos de onda. Tal fato, pode ter favorecido ao aumento da taxa fotossintética no F<sub>LS</sub> devido a exposição a uma maior faixa de comprimentos de onda.

**Figura 2** – Comportamento do oxigênio dissolvido e pH.

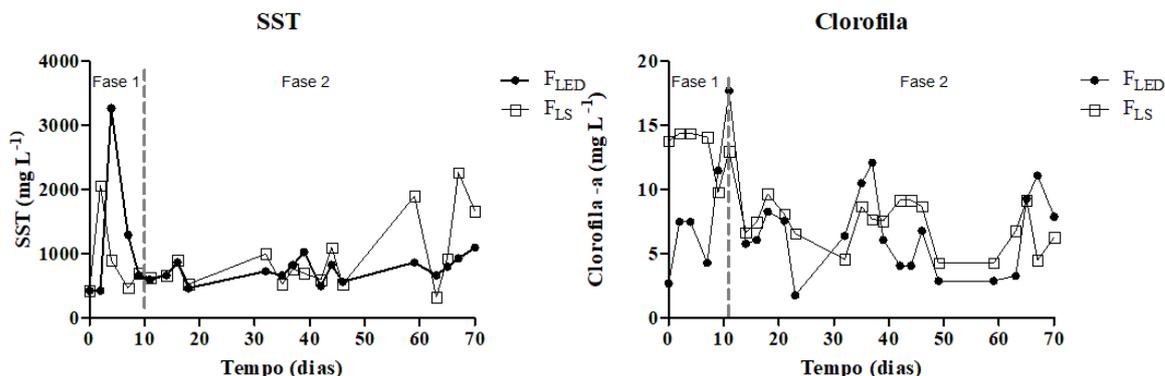


### 3.3. Indicadores de Produção de biomassa

No início da Fase 1 ocorreu um aumento da biomassa (representada pelos sólidos suspensos totais - SST) até o quarto dia, após esse período houve uma redução, sendo a menor concentração no décimo dia. Uma das hipóteses para a redução da biomassa nos fotobiorreatores foi o baixo TDH, ocasionando o carreamento da biomassa. Com o ajuste do TDH para 24 horas no 11º dia de operação (Fase 2) a concentração de biomassa nos fotobiorreatores manteve-se mais constante (Figura 3), exceto no final da operação no F<sub>LS</sub>.

A média de biomassa (SST) durante a Fase 2 nos sistemas F<sub>LED</sub> e F<sub>SL</sub> foram  $758,4 \pm 45,5$  (CV 23%) e  $941,69 \pm 136,2$  mg.L<sup>-1</sup> (CV 56%), respectivamente. Não houve diferença significativa entre a concentração de sólidos do F<sub>LED</sub> e o F<sub>SL</sub>, foi obtido um *p* valor de 0,2130. Mesmo não havendo diferença estatística entre as produções de biomassas, notou-se pela análise do CV que o F<sub>LED</sub> apresentou maior estabilidade operacional, visto que o valor de CV menor do que o do F<sub>LS</sub>.

**Figura 3** – Comportamento da biomassa e clorofila -a.



Os maiores valores de SST estão próximos dos medidos por Godos *et al.* (2009), que encontraram valores de SSV, na faixa de 1315 mg.L<sup>-1</sup>. Seu estudo se baseou em lagoas de alta taxa (LAT) iluminadas pelo sol, com volume útil de 464 L com um TDH de 10 dias. Park & Craggs (2011) obtiveram em seus experimentos com LATs a maior concentração de sólidos suspensos voláteis na faixa de 1000 mg.L<sup>-1</sup>. Em seu estudo, a LAT iluminada pela luz solar apresentou volume útil de 8000 L, operou a um TDH de 8 dias, e utilizou água residuária sanitária. Nesta pesquisa foi utilizado um TDH inferior (1 dia) ao dos estudos citados e as concentrações de sólidos foram similares, o que indicou que sistemas com baixos TDH apresentam uma produção de biomassa similar à de sistemas com maiores TDH (8 dias ou mais).

Os resultados da clorofila - a e dos SST podem ser correlacionados, notou-se que o aumento na concentração de SST, também implicou em um aumento na concentração de clorofila a e, quando ocorre uma diminuição da concentração de SSV, também ocorre diminuição nos valores de clorofila - a. A clorofila - a e os SST são indicadores da biomassa presente nos fotobiorreatores, porém, os SST estão associados a toda biomassa microbiana e não apenas aos organismos fotossintetizantes como no caso da clorofila a. Tal comportamento, indicou que nos fotobiorreatores havia uma maior prevalência de microrganismos fotossintetizantes.

Os valores médios de clorofila - a encontrados durante a Fase 2 para o F<sub>LED</sub> e F<sub>LS</sub> foram de  $7,1 \pm 0,9$  mg.L<sup>-1</sup> e  $7,5 \pm 0,5$  mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores de clorofila - a foram semelhantes aos obtidos por Park e Craggs (2011), que obtiveram valores médios de 7,0 mg.L<sup>-1</sup>.

Não houve diferença significativa entre a concentração de clorofila - *a* do F<sub>LED</sub> e o F<sub>SL</sub>, foi obtido um *p* valor de 0,6879. O resultado do teste *t* indicou que no sistema iluminado com LED e sol e no sistema somente com LED não houve diferença na produção de clorofila - *a*

A produção de OD apresentou diferença entre o F<sub>LED</sub> e o F<sub>LS</sub>, enquanto a produção de clorofila - *a* não apresentou. Tal fato, pode estar relacionado a diferença dos comprimentos de ondas aos quais os fotobiorreatores foram expostos. O F<sub>LS</sub> foi exposto há um espectro maior de luz (vermelho), que favoreceu ao processo de fotossíntese, e o F<sub>LED</sub> foi exposto somente ao comprimento de onda azul. A diferença de exposição aos comprimentos de onda não proporcionou diferença no crescimento de biomassa e produção de clorofila - *a*, mas aumentou a taxa fotossintética.

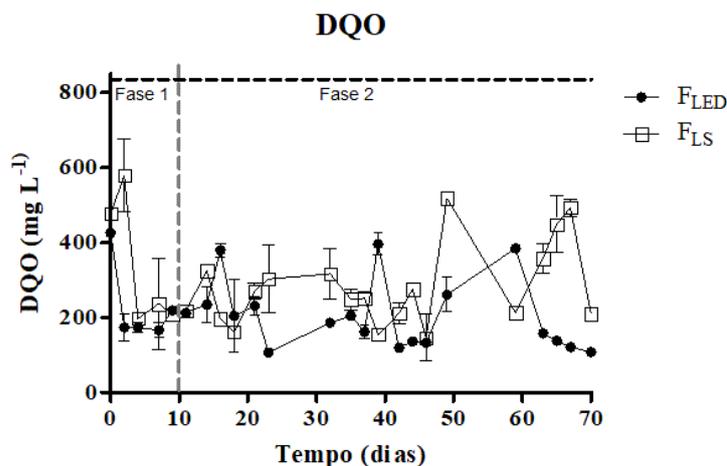
### 3.4. Remoção de matéria orgânica carbonácea

O valor médio de DQO para o água residuária sintética bruta, afluyente aos fotobiorreatores era de  $839 \pm 60 \text{ mg.L}^{-1}$ . A água residuária tratada do F<sub>LED</sub> durante a Fase 2 apresentou um valor médio de  $204 \pm 21 \text{ mg.L}^{-1}$  (CV 44%) de DQO, que representou uma eficiência de remoção média de  $75 \pm 15 \%$ . O F<sub>LS</sub> obteve uma eficiência de remoção de  $65 \pm 10 \%$ , e a água residuária tratada apresentou um valor médio de  $280 \pm 25 \text{ mg.L}^{-1}$  (CV 38%). O F<sub>LED</sub> demonstrou uma eficiência 10% superior do que o F<sub>LS</sub> na remoção de DQO (Figura 4).

O teste *t* não paramétrico, constatou-se que que houve diferença significativa na remoção de matéria orgânica carbonácea entre F<sub>LED</sub> e o F<sub>LS</sub>, foi obtido um *p* valor de 0,0269. Embora o tenha F<sub>LED</sub> apresentado uma eficiência 10% superior, uma vantagem da iluminação combinada entre a luz solar e a artificial é que ela garante estabilidade do sistema na remoção de DQO, como pode ser observado na comparação do valor de CV do F<sub>LED</sub> e F<sub>LS</sub>.

Os resultados de remoção de DQO encontrados foram similares aos de Yan *et al.* (2013) que alcançaram remoções de DQO de  $76,02 \pm 4,02\%$  utilizando o comprimento de onda vermelho e intensidade luminosa de  $2000 \mu\text{.mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Com o LED azul e intensidade de  $2000 \mu\text{.mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , o melhor resultado obtido para remoção de DQO foi de 48%. Cabe destacar que o estudo acima citado operou em batelada e com intensidades luminosas maiores, e nesse estudo optou-se por operar em fluxo contínuo e com intensidade luminosa menor, o que pode refletir em menor consumo de energia.

**Figura 4** – Comportamento da remoção de DQO.



Nota: a linha tracejada horizontal indica a concentração inicial de DQO na água residuária. Os valores apresentados são referentes a DQO da água residuária tratada, após sair do fotobiorreator.

Os resultados de Silva *et al.* (2020), que trabalhou com LEDs azuis e no mesmo fluxo luminoso que esta pesquisa ( $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), apresentou uma remoção de 90 % de DQO em 15 dias de operação em batelada. Oliveira (2018) realizou um estudo em LAT (TDH de 7 dias), com a iluminação de LEDs azuis e vermelhos, e obteve uma eficiência de remoção de DQO de  $91\% \pm 1,3\%$ . Ambos os estudos tiveram uma maior eficiência do que os encontrados nesta pesquisa, o que pode ser justificada pelo TDH. O TDH utilizado nesta pesquisa foi de 1 dia, valor inferior ao dos estudos citados.

Diante do exposto, foi possível concluir que o cultivo de microalgas em fotobiorreatores iluminados com LEDs objetivando o tratamento de água residuária sintética e operada em regime contínuo, com TDH de 1 dia, foi eficiente na remoção de DQO, com percentuais de remoção similares dos apresentados na literatura estudada. O F<sub>LED</sub> apresentou melhor eficiência, enquanto o F<sub>LS</sub> apresentou melhor estabilidade operacional.

Não foi realizado o controle de um fotobiorreator iluminado somente com a luz solar, pois outros estudos já demonstraram que o sol é eficiente para a remoção de matéria orgânica carbonácea, porém apresenta instabilidade devido às variações das condições climáticas (Silva *et al.*, 2020).

Com esse estudo foi possível notar que o F<sub>LS</sub> apresentou maior produção de OD, e melhor estabilidade operacional para a remoção de matéria orgânica. O F<sub>LED</sub> apresentou melhor eficiência na remoção de matéria orgânica carbonácea, apesar da menor estabilidade. Não houve diferença entre as produções de biomassa nos fotobiorreatores.

A estabilidade operacional é importante em um sistema de tratamento de águas residuárias, pois garante melhor controle. Diante disso, apesar da eficiência 10% inferior para a remoção de DQO o uso da iluminação combinada entre luz solar e LEDs mostra-se como uma alternativa atrativa.

#### 4. Conclusão

A luz solar em conjunto com o LED aumentou a produção de oxigênio dissolvido no sistema possivelmente devido a exposição a diferentes comprimentos de onda. Houve uma diferença entre as remoções de matéria orgânica entre o  $F_{LED}$  e o  $F_{LS}$ . Porém, o  $F_{SL}$  apresentou melhor estabilidade operacional. O baixo TDH usado neste estudo mostra o potencial de sistemas compactos com microalgas e iluminados por LEDs e luz natural, para o tratamento de águas residuárias.

#### Referências

APHA- American Public Health Association/ American Water Works Association/Water Environment Federation (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC, USA.

Atta, M., Idris, A., Bukhari, A., Wahidin, S. (2013). Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in freshwater microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 148, 373-378. doi:10.1016/j.biortech.2013.08.162.

Bicudo C.E.M. & Menezes M. (2006). *Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições*. São Carlos - SP: Rima.

Chevremont, A. C., Farnet, A.M., Coulomb, B.; Boudenne, J.L. (2012). Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution. *Science of the Total Environment*, 426, 304 - 310. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.043

Eland, E. L., Davenport, R., Mota, C. R. (2012). Evaluation of DNA extraction methods for freshwater eukaryotic microalgae. *Water Research*, 45 (16), 5355-5364. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.023

Godos, I., Blanco, S., Encina, P. A. G., Becares, E., Munõz, R. (2009). Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates. *Bioresource Technology*, 100 (19), 4332 – 4339. doi:10.1016/j.biortech.2009.04.016.

Gonçalves, R. F. (Coordenador). (2003). *Desinfecção de efluentes sanitários*. Rio de Janeiro: ABES, Rima.

Hwang, J., Church, J, Lee, Seung, J, Park, J, Lee, W H. (2016). Use of Microalgae for Advanced Wastewater Treatment and Sustainable Bioenergy Generation. *Environmental Engineering Science*, 33 (11), 882-897. doi: 10.1089/ees.2016.0132

Lourenço, S.O. (2006). *Cultivo de microalgas marinhas: Princípios e aplicações*. São Carlos - SP: Rima.

NUSH, Nederlands Norm (NEN 6520). (1981). Norma holandesa sobre determinação de clorofila *a* pelo método do etanol.

OEDC - Organization for Economic Co-operation and Development. (1996). *Guidelines for testing of chemicals simulation teste-Aerobic sewage treatment*. Technical Report, Paris.

Olguin, E. J. (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30, 1031–1046. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.05.00.

Park, J. B. K., Craggs, R. J., Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102 (1), 35 - 42. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.158.

Park, J. B. K. & Craggs, R. J. (2011). Nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science and Technology*, 63 (8), 1758–1764. doi: 10.2166/wst.2011.114.

Pilon L, Berberoglu H, Kandilian R. (2011). Radiation transfer in photobiological carbon dioxide fixation and fuel production by microalgae. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112 (17), 2639 - 2660. doi: 10.1016/j.jqsrt.2011.07.004.

Schulze, P. S. C., Barreira, L. A., Pereira, H.G. C., Pareles, J. A., Varela, J. C.S. (2014). Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. *Trends in Biotechnology*, 32 (8), 422 - 430. doi: 10.1016/j.tibtech.2014.06.001.

Silva, L. M. L., Santiago, A. F., Silva, G. M. Z., Vassoler, F., Braga, M. C. R. (2017). Tratamento de efluentes em fotobiorreatores iluminados por diodos emissores de luz (LEDs) de baixa intensidade luminosa. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 10 (1), 87 -103. doi: 10.22201/iingen.0718378xe.2017.10.1.54836.

Unnithan V.V., Unc A., Smith G. B. (2014). Mini-review: a priori considerations for bacteria-algae interactions in algal biofuel systems receiving municipal wastewaters. *Algal Research*, 4, 35 – 40. doi: 0.1016/j.algal.2013.11.009.

Wang C. Y., Fu, C. C., Liu Y. C. (2007). Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*, 37(1), 21 - 25. doi: 10.1016/j.bej.2007.03.004.

Yan, C., Luo, X., Zheng, Z. (2012). Performance of purifying anaerobic fermentation slurry using microalgae in response to various LED light wavelengths and intensities. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88 (9), 1622 - 1630. doi: 10.1002/jctb.4010.

Yan, C., Zhang, L., Luo, X.; Zheng, Z. (2013). Effects of various LED light wavelengths and intensities on the performance of purifying synthetic domestic sewage by microalgae at different influent C/N. *Ecological Engineering*, 51, 24 - 32. doi: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.051.

**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Rafael Souza Leopoldino Nascimento – 25%

Ludymyla Marcelle Lima Silva – 25%

Lucas Periard – 25%

Aníbal da Fonseca Santiago – 25%