

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM BIORREATOR RACEWAY INSTRUMENTADO PARA O CULTIVO DE MICROALGAS

M. E. S. N. Chiari¹, M. M. Wong¹, V. H. N. Bortoletto¹, G. M. Simão¹, C. C. Ribeiro¹, A. A. Morandim-Giannetti², B. Ramos¹

¹Laboratório de Engenharia Microfluídica e Fotoeletroquímica (μ -FEC), ²Laboratório de Bioprocessos (LaBio2), Departamento de Engenharia Química, Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil (brunoramos@fei.edu.br)

Este trabalho apresenta o projeto, a construção e a validação de um biorreator aberto do tipo *raceway pond* para cultivo de microalgas. O protótipo em acrílico foi dimensionado em CAD, avaliado por CFD e equipado com roda de pás, controle PID e sensores conectados a uma interface web. Ensaios com *Chlorella vulgaris* atingiram 0,54 g L⁻¹ em 173 h, com consumo de 11,25 W, demonstrando mistura adequada, baixo cisalhamento e viabilidade do sistema.

Palavras-chave: Fotobiorreator; Raceway Pond; *Chlorella vulgaris*; Fluidodinâmica Computacional; Instrumentação.

INTRODUÇÃO

As microalgas são matérias-primas de interesse para a produção de biomassa, pigmentos, proteínas, biocombustíveis e outros produtos de valor agregado. O desempenho desses bioprocessos depende da capacidade do sistema de cultivo de fornecer luz, nutrientes e carbono, ao mesmo tempo em que mantém as células em suspensão e limita as tensões de cisalhamento. Entre as configurações disponíveis, os *raceway ponds* se destacam pela construção simples, baixo custo relativo e facilidade de ampliação de escala, características especialmente atraentes para espécies robustas de *Chlorella* (Chisti, 2007; Masojídek et al., 2023).

A relevância tecnológica desses microrganismos decorre de uma combinação pouco comum de rápido crescimento, uso de áreas não agricultáveis e capacidade de converter carbono inorgânico em biomassa com composições variadas. Espécies do gênero *Chlorella* podem fornecer proteínas, lipídios, pigmentos e antioxidantes, além de participar da remoção de nitrogênio, fósforo e contaminantes de águas residuárias. A biomassa obtida pode ser direcionada a suplementos, ingredientes para alimentação animal, biocombustíveis ou matérias-primas para processos químicos, desde que a qualidade do meio e a etapa de recuperação sejam compatíveis com o produto pretendido (Ali et al., 2023; Souza et al., 2016).

O potencial biológico, entretanto, não se converte automaticamente em produtividade industrial. Em cultivos fototróficos, a luz é absorvida nas camadas próximas à superfície, enquanto as regiões mais

profundas podem permanecer limitadas à luz. O aumento da densidade celular acentua o autossombreamento e cria ciclos de claro e escuro que dependem do regime de mistura. Temperatura, pH, disponibilidade de carbono, concentração de nutrientes e oxigênio dissolvido também interagem com a irradiância. Assim, o reator não é apenas um recipiente: sua geometria determina a forma como a energia e a matéria chegam às células (Molina Grima et al., 1999; Darvehei et al., 2018).

Os sistemas de cultivo podem ser abertos, fechados ou híbridos. Fotobiorreatores fechados permitem maior controle de contaminação, da temperatura e da transferência de gases, mas exigem superfícies transparentes, bombeamento e procedimentos de limpeza mais complexos. Sistemas abertos apresentam menor investimento e manutenção simplificada, embora sejam mais expostos à evaporação, variações meteorológicas e entrada de organismos competidores. Por isso, a seleção deve considerar a robustez da cepa, o valor da biomassa, o clima, a disponibilidade de área e o custo energético, não existindo uma configuração universalmente superior (Masojídek et al., 2023).

O *raceway* é um reator aberto e raso, formado por um canal fechado sobre si mesmo e dividido longitudinalmente. Uma roda de pás promove a circulação contínua do meio, reduz a sedimentação e conduz, alternadamente, as células entre regiões mais e menos iluminadas. A geometria das curvas, a profundidade do líquido e a velocidade imposta pelas pás condicionam a formação de zonas mortas, vórtices e gradientes de velocidade. Estudos de CFD mostram que esses fenômenos podem ser antecipados

ainda na etapa de projeto e utilizados para melhorar a mistura e a transferência de massa (Xu et al., 2014; Kusmayadi et al., 2020).

Em instalações de maior porte, os canais podem alcançar dezenas ou centenas de metros, geralmente com pequena profundidade para favorecer a penetração luminosa. A divisão central fecha o circuito hidráulico e as extremidades curvas redirecionam o escoamento. Defletores e curvas suaves podem reduzir as perdas de carga e as regiões de baixa velocidade. A roda de pás precisa fornecer energia suficiente para impedir sedimentação e favorecer a transferência de CO_2 e O_2 , sem impor cisalhamento excessivo nem consumir energia em uma mistura que não gere ganho biológico proporcional (Filali et al. 2019; Bolzani, 2023).

Raceways também são investigados para o tratamento de efluentes, recuperação de nutrientes e processos fotoquímicos, aplicações nas quais a capacidade de processar grandes volumes e a acessibilidade da superfície são vantagens importantes. Em contrapartida, a qualidade sanitária da biomassa, a evaporação e a dependência do ambiente precisam ser incorporadas ao projeto e à estratégia de operação. O uso de sensores e controle de baixo custo não elimina essas limitações, mas permite quantificá-las e responder mais rapidamente a desvios (Cabrera-Reina et al., 2021; Rachelle, 2024).

Além da hidrodinâmica, a operação reprodutível requer o acompanhamento de variáveis como temperatura, irradiância, nível de líquido e rotação do agitador. A integração de sensores de baixo custo, microcontroladores e armazenamento remoto permite registrar desvios, manter a velocidade das pás e acompanhar o cultivo em tempo real. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi projetar, construir e validar, em escala de bancada, um biorreator raceway instrumentado para o cultivo de microalgas, com ênfase na concepção mecânica, simulação fluidodinâmica, fabricação, automação e desempenho experimental.

MATERIAL E MÉTODOS

Concepção e dimensionamento

O desenvolvimento seguiu uma sequência de engenharia composta por definição de requisitos, modelagem tridimensional, simulação, fabricação e validação experimental. A geometria foi elaborada no Siemens NX. O reator possui 900 mm de comprimento total, 300 mm de largura e 100 mm de profundidade geométrica. A região reta interna tem 600 mm e as extremidades apresentam raio de 150

mm, formando retornos semicirculares. O canal foi dividido por uma parede central, e as laterais foram especificadas com espessura reduzida para reduzir massa e custo, sem comprometer a rigidez do protótipo.

Os requisitos funcionais adotados foram: manter a biomassa em suspensão, maximizar a área superior iluminada, permitir a limpeza e a amostragem, limitar os vazamentos e separar os componentes eletrônicos do meio líquido. A profundidade foi tratada como um compromisso entre o volume útil e o caminho óptico. Uma lâmina muito profunda aumenta o volume por unidade de área, mas reduz a fração efetivamente iluminada; uma lâmina excessivamente rasa é mais sensível à evaporação, ao aquecimento e às variações de nível. O raio das curvas foi escolhido para reduzir mudanças bruscas de direção e facilitar a conformação das paredes de acrílico.

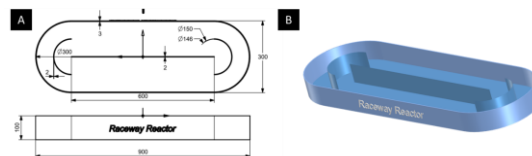


Figura 1. Projeto do raceway: desenho técnico e modelo tridimensional.

A configuração rasa amplia a superfície iluminada em relação ao volume e facilita a troca gasosa com a atmosfera. As curvas de retorno foram adotadas para evitar mudanças bruscas de direção, enquanto o espaço central da divisória foi ampliado para 20 mm na construção, permitindo o alojamento de componentes elétricos sem contato com o meio. Os principais elementos do protótipo são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações do protótipo raceway.

Elemento	Especificação
Geometria	900 × 300 × 100 mm; curvas com raio de 150 mm
Estrutura	Acrílico de 3 mm, silicone e cola acrílica
Agitação	Roda de pás, motor CC de 6 V com redução
Controle	Arduino UNO, shield L293D e algoritmo PID
Sensores	DS18B20, VL53L0X, LDR e LM393/encoder
Aquisição	ESP32, Wi-Fi, Firebase e interface HTML

Simulação fluidodinâmica

A geometria do domínio líquido foi preparada a partir do modelo CAD e discretizada para análise no ANSYS Fluent 2025 R1. O movimento da roda de

pás foi representado pela imposição de uma velocidade média de $0,01 \text{ m s}^{-1}$. Adotou-se regime laminar, conforme a estimativa das condições de bancada, e foram injetadas partículas inertes com propriedades representativas das células, de modo a avaliar trajetórias e tempos de circulação. O procedimento permitiu observar o campo de velocidades, as recirculações nas curvas e a dispersão das partículas. A aplicação de CFD a sistemas microalgais é uma ferramenta consolidada para investigar a mistura, o transporte e possíveis regiões de acúmulo (Ahmad et al., 2024).

A análise teve caráter comparativo e de apoio ao projeto. Foram verificados a continuidade do circuito, a distribuição relativa de velocidades, o surgimento de recirculações nas curvas e a presença de regiões com baixo deslocamento. A trajetória de partículas foi usada como aproximação para avaliar a tendência de suspensão e o tempo necessário para

completar uma volta. Essa representação não substitui um modelo multifásico completo das células, mas é útil para identificar problemas geométricos antes da fabricação e reduzir o número de alterações físicas no protótipo.

A literatura mostra que pequenas modificações na geometria de raceways podem alterar significativamente a uniformidade do fluxo. Velocidades muito baixas favorecem a deposição; velocidades elevadas aumentam as perdas e a potência necessária. A combinação de roda de pás, curvas e, em escala industrial, injeção de CO_2 pode criar uma mistura horizontal e vertical mais eficaz do que o aumento isolado da rotação. Consequentemente, a CFD foi empregada como elo entre os requisitos biológicos e as decisões mecânicas, e não apenas como etapa de visualização (Kusmayadi et al., 2020; Xu et al., 2014).

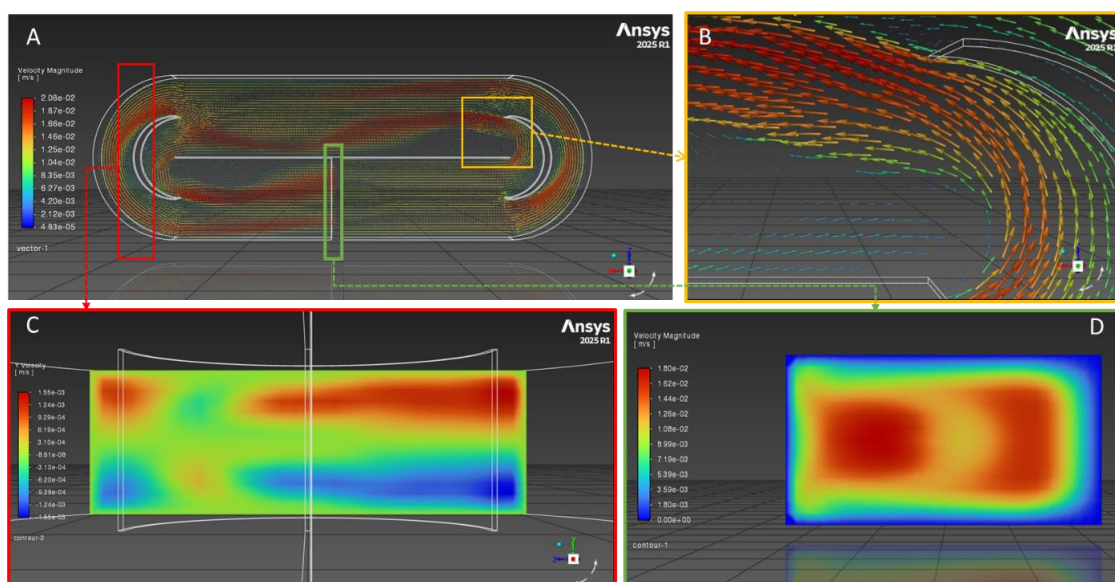


Figura 2. Perfis de velocidade obtidos por CFD: vetores no plano central, recirculação nas curvas e região da roda de pás. Fonte: Autores.

Fabricação e montagem mecânica

O fundo, as laterais e a divisória foram cortados em chapas de acrílico de 3 mm de espessura com uma cortadora a laser. As partes retas foram posicionadas conforme o desenho e unidas com cola acrílica; silicone foi aplicado nas juntas como vedação secundária. As curvas foram aquecidas com soprador térmico e conformadas até que acompanhassem o raio previsto. Após a cura, o conjunto foi submetido a teste de estanqueidade com água, e os pontos de vazamento foram novamente selados.

A escolha do acrílico foi motivada pela transparência, baixa massa, disponibilidade

comercial e compatibilidade com corte a laser. Embora adequado para protótipos, o material exige cuidado com as concentrações de tensão, os solventes e a dilatação térmica. A cola acrílica promoveu união estrutural entre superfícies bem ajustadas, enquanto o silicone compensou pequenas irregularidades e atuou como barreira adicional. O teste hidráulico foi realizado antes da instalação definitiva da eletrônica, evitando que uma falha de vedação danificasse sensores ou controladores.

O eixo e a roda de pás foram fabricados em ABS no FEI Maker Lab e acoplados a um motor CC de 6 V com caixa de redução e eixo duplo. O alinhamento do eixo foi ajustado para evitar o contato das pás com

o fundo e reduzir as oscilações. A solução modular permitiu remover o conjunto de agitação para limpeza e manutenção. A Figura 3 mostra o protótipo concluído, incluindo o canal, a divisória e a montagem do acionamento.

A montagem foi concebida para permitir a inspeção do eixo, a retirada da roda e o acesso ao interior do canal. Essas características são relevantes porque superfícies molhadas tendem a acumular biofilme, sais e biomassa, alterando a rugosidade e o escoamento ao longo do tempo. Em uma ampliação de escala, mancais, proteção do motor, seleção de materiais resistentes à radiação e procedimentos de higienização devem ser tratados como requisitos de processo, e não como acessórios posteriores.



Figura 3. Biorreator raceway construído em acrílico.
Fonte:

Instrumentação e controle

A rotação do motor foi controlada por um Arduino UNO conectado ao shield L293D. Um disco encoder de 20 aberturas e o comparador LM393 forneceram a realimentação de velocidade. O sinal foi tratado por média móvel e utilizado por uma rotina PID para corrigir a tensão aplicada ao motor e manter o valor de referência. O operador selecionou o setpoint por teclado, com apresentação da rotação em display LCD 16×2 . O conjunto L293D permite o acionamento e a inversão de motores CC a partir de sinais lógicos (Texas Instruments, 2016; Arduino S.R.L., 2025).

O controle em malha fechada foi adotado porque a carga sobre a roda varia com o nível, a viscosidade aparente, o desalinhamento e o acúmulo de material. Um acionamento em tensão fixa não garante a mesma rotação ao longo de toda a batelada. O encoder converteu o movimento em pulsos, a média

móvel reduziu o ruído e o controlador corrigiu o sinal enviado ao motor. Dessa forma, a condição hidrodinâmica tornou-se mais reprodutível entre os ensaios.

A temperatura do meio foi medida com o sensor digital DS18B20; o nível, com o sensor de distância por tempo de voo VL53L0X; e a iluminação, com um LDR. Um ESP32 reuniu as leituras e as transmitiu via Wi-Fi para uma base de dados Firebase, utilizada por uma interface HTML para monitoramento em tempo real. Esses componentes foram montados em placa de circuito impresso e instalados em caixa de acrílico, mantendo conectores e microcontroladores removíveis para facilitar o diagnóstico e a manutenção (Espressif, 2019; STMicroelectronics, 2016; Maxim Integrated Products, 2019; Texas Instruments, 2020).

O sensor de nível também teve a função potencial de indicar perdas por evaporação ou vazamento. A medição luminosa por LDR foi usada como indicador operacional, mas não como substituta direta de um sensor PAR calibrado, pois a resposta espectral e a intensidade da fonte podem variar. O armazenamento remoto criou um histórico para correlacionar alterações de processo com os dados de crescimento. Fusíveis, diodos, reguladores e conectores modulares foram incluídos na placa para proteger os circuitos e simplificar a manutenção.

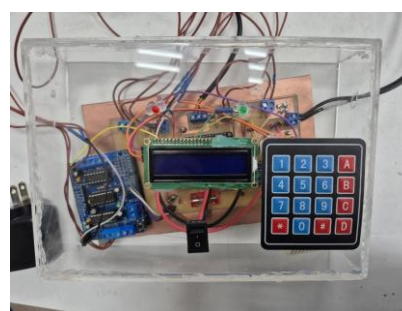


Figura 4. Placa de controle e instrumentação finalizada.

Ensaio de cultivo

O sistema foi instalado no Laboratório de Bioprocessos sob uma lâmpada LED tubular branca de 5000 K. A irradiância fotossinteticamente ativa calculada na superfície foi de $12,21 \mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram conduzidas bateladas com *Chlorella* sp. (Pozzillo), de origem marinha, e *Chlorella vulgaris*, de água doce. A agitação foi mantida pela roda de pás, e a temperatura variou conforme o

ambiente, entre 16 e 22 °C, com média aproximada de 20 °C. Amostras periódicas foram analisadas por espectroscopia UV-Vis a 680 nm e convertidas em concentração por curva de calibração.

Os inóculos corresponderam a aproximadamente 10% do volume de operação. Antes de cada batelada, o reator e os utensílios de amostragem foram higienizados para reduzir interferências externas. Aliquotas de 5 mL foram retiradas periodicamente e a absorbância foi medida a 680 nm, região associada à clorofila. A relação entre absorbância e concentração seca foi previamente determinada por meio de uma curva de calibração, o que permite expressar o crescimento em $g\ L^{-1}$.

A taxa específica foi obtida pela linearização da fase exponencial, a partir da relação entre o logaritmo da concentração e o tempo. O tempo de geração foi calculado como a razão entre $\ln(2)$ e a taxa específica. Além da comparação direta entre as cepas, os resultados de *C. vulgaris* foram interpretados com base em modelos de dependência da luz e da temperatura descritos na literatura. Esses modelos não substituem novos ensaios, mas permitem estimar a distância entre a condição experimental e uma faixa potencialmente mais produtiva (Dauta et al., 1990; Concas et al., 2016; Darvehei et al., 2018).

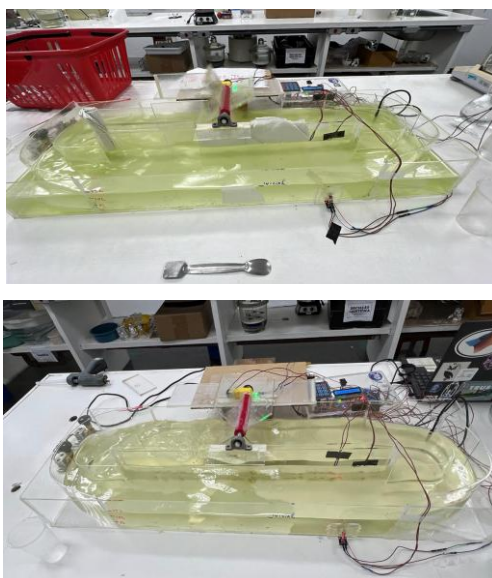


Figura 5. Raceway em operação com *C. pozzillo* e *C. vulgaris*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento hidrodinâmico e construtivo

Os vetores de velocidade indicaram circulação contínua ao longo do canal e formação de vórtices

nas curvas. O escoamento apresentou componente vertical alternada: o líquido tendeu a subir no início do retorno e a descer na região oposta, criando o comportamento ondulatório desejado para renovar a exposição das células à luz. Na região da roda de pás, o núcleo do canal apresentou as maiores velocidades, e a uniformidade calculada foi de aproximadamente 0,8. As trajetórias das partículas acompanharam o fluido e apresentaram tempos de circulação predominantemente entre 100 e 200 s, sem evidência de zonas extensas de deposição.

O campo simulado também mostrou poucas regiões de elevada tensão de cisalhamento. Esse resultado é favorável porque a mistura deve ser suficiente para suspender a biomassa, mas não tão intensa a ponto de danificar as células. A presença de recirculações nas curvas concorda com a literatura, segundo a qual a geometria do canal e a velocidade de agitação governam a renovação das camadas de fluido e a redução de zonas mortas em raceways (Xu et al., 2014).

A alternância entre movimentos ascendentes e descendentes é particularmente importante em um cultivo fototrófico: células que permanecem junto à superfície podem sofrer excesso de luz, enquanto células retidas no fundo recebem energia insuficiente. A circulação observada tende a distribuir o tempo de exposição, criando ciclos de claro e escuro. Embora o presente trabalho não tenha medido individualmente a história luminosa das células, o padrão hidrodinâmico é coerente com o objetivo de renovar a posição das células no canal (Molina Grima et al., 1999).

A fabricação em acrílico reproduziu adequadamente o modelo CAD. O uso de peças cortadas a laser simplificou o alinhamento, enquanto a conformação térmica permitiu obter as curvas sem conexões adicionais. A etapa crítica foi a vedação das interfaces entre o fundo, as paredes e os retornos. A combinação de cola acrílica e silicone produziu um conjunto estanque e transparente, adequado à inspeção visual e à incidência de luz. A divisória central com alojamento seco organizou a eletrônica e reduziu o comprimento dos cabos.

Durante a construção, verificou-se que detalhes pouco relevantes no modelo virtual, como as tolerâncias das peças, a sequência de colagem e o acesso para a aplicação do selante, influenciam diretamente a qualidade final. A prototipagem em escala de bancada permitiu corrigir esses aspectos com baixo consumo de material. Para versões maiores, recomenda-se incorporar nervuras estruturais, pontos de drenagem, proteção contra

transbordamento e uma roda de pás cujo perfil possa ser substituído para comparação experimental.

Operação, consumo e crescimento

O controle manteve a rotação das pás durante os ensaios, e a aquisição remota permitiu acompanhar a temperatura, o nível e a luminosidade. Interrupções no fornecimento elétrico causaram perda parcial de dados em uma batelada, mas não impediram a avaliação do crescimento. O consumo do raceway, incluindo o motor e o sistema de monitoramento e controle, foi de 11,25 W; a iluminação não foi incluída, por ser comum às configurações avaliadas no TCC.

A baixa potência do conjunto é uma característica favorável, pois a agitação é um custo contínuo ao longo da batelada. Entretanto, a potência nominal isolada não é suficiente para avaliar a eficiência: devem ser considerados o volume útil, a produtividade de biomassa, o tempo de operação e a energia de iluminação. O resultado de 11,25 W demonstra a viabilidade do acionamento em escala de bancada e fornece uma referência inicial para futuros balanços energéticos.

Tabela 2. Resultados cinéticos dos cultivos realizados em raceway.

Microalga	Tempo (h)	Concentração final (g L ⁻¹)	$\mu_{\max}$ (h ⁻¹)	tg (h)
<i>C. pozzillo</i>	121	0,30	0,0067	103,45
<i>C. vulgaris</i>	173	0,54	0,0072	96,27

Os resultados devem ser interpretados considerando que a temperatura não foi controlada e permaneceu abaixo do ponto ótimo estimado para *C. vulgaris*. A modelagem apresentada no TCC indicou um máximo próximo de 30 °C e sugeriu que a taxa poderia alcançar 0,0105–0,011 h⁻¹ nessa condição. Também há margem para aperfeiçoar a irradiância, o suprimento de CO₂ e a geometria das pás. Ainda assim, o protótipo demonstrou que uma solução aberta, de baixa potência e construída com processos acessíveis pode produzir uma mistura adequada e um crescimento mensurável.

A temperatura média de aproximadamente 20 °C ficou abaixo do ótimo de 30 °C reportado para *C. vulgaris* por Dauta et al. (1990). A irradiância empregada também foi relativamente baixa quando comparada a muitos sistemas produtivos, embora suficiente para suspensões diluídas. Esses fatores ajudam a explicar os longos tempos de geração. Por outro lado, operar sem aquecimento permitiu avaliar o comportamento do protótipo com menor demanda elétrica e em condições próximas às de um sistema aberto.

No cultivo de *C. vulgaris*, a concentração atingiu 0,54 g L⁻¹ em 173 h. Para *C. pozzillo*, a concentração atingiu 0,30 g L⁻¹ em 121 h, seguida de redução. Os ajustes exponenciais forneceram taxas específicas de crescimento de 0,0072 h⁻¹ para *C. vulgaris* e 0,0067 h⁻¹ para *C. pozzillo*, correspondentes a tempos de geração de 96,27 e 103,45 h, respectivamente. A maior produtividade de *C. vulgaris* no raceway foi atribuída à combinação de circulação, de troca gasosa com a atmosfera e de maior adequação do meio às necessidades dessa cepa.

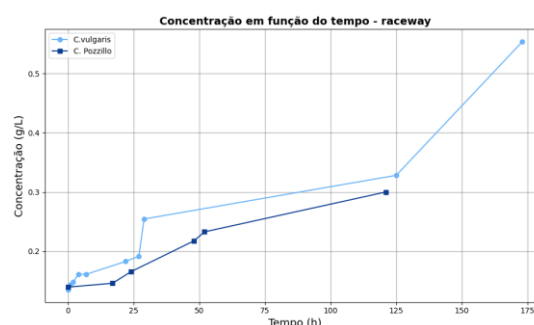


Figura 6. Concentração de microalgas em função do tempo no raceway.

A *C. pozzillo* apresentou crescimento inicial, mas entrou em declínio antes da *C. vulgaris*. Como as cepas têm origens e necessidades distintas, o resultado não deve ser interpretado apenas como efeito da geometria do reator. A composição do meio, a salinidade, a adaptação do inóculo e a faixa térmica podem ter limitado o desempenho. A comparação evidencia a necessidade de ajustar o processo à cepa e de não assumir que uma condição otimizada para *C. vulgaris* será adequada a outra cepa de *Chlorella*.

Do ponto de vista de engenharia, a correspondência entre CAD, CFD e protótipo foi essencial. O CAD definiu interfaces e dimensões; a simulação antecipou o padrão de circulação; a construção revelou requisitos de vedação, alinhamento e manutenção; e a instrumentação permitiu verificar o comportamento real. Essa integração reduz o risco de ampliar uma geometria inadequada e fornece uma base para estudos posteriores de escala, produtividade e custo.

Limitações e perspectivas de ampliação

As principais limitações foram o número reduzido de bateladas, a ausência de controle ativo de temperatura e pH no raceway e a perda parcial de dados durante interrupções elétricas. A CFD representou o acionamento por uma condição simplificada de velocidade e não incluiu simultaneamente a superfície livre, a troca gasosa, a radiação e o crescimento celular. Assim, seus resultados devem ser interpretados como tendências do escoamento, e não como uma previsão completa do bioprocessamento.

Os próximos desenvolvimentos devem incluir ensaios em réplicas, medição de PAR calibrada, controle ou registro de pH, balanço de CO₂, quantificação da evaporação e análise da produtividade por energia consumida. Também é recomendável comparar perfis de pás, rotações e profundidades, validando os campos simulados com medições de velocidade. Para ampliação de escala, a razão entre comprimento, largura e profundidade, a potência por volume e o tempo de circulação devem ser preservados ou deliberadamente reotimizados.

Uma estratégia híbrida pode empregar um sistema fechado para a preparação do inóculo e o raceway para a produção, reduzindo o risco de contaminação na fase inicial, sem perder a vantagem econômica do sistema aberto. Aplicações em efluentes são especialmente promissoras, pois nutrientes presentes na água podem substituir parte do meio sintético, e a biomassa pode atuar na recuperação de nitrogênio e fósforo. Nesses casos, a segurança, o destino da biomassa e a variabilidade do efluente devem integrar a avaliação (Ali et al., 2023; Filali et al., 2019).

CONCLUSÃO

Foi projetado e construído um biorreator raceway de bancada com estrutura em acrílico, agitação por roda de pás, controle PID e monitoramento remoto. A geometria de 900 × 300 × 100 mm pôde ser fabricada por meio de corte a laser, conformação térmica e adesivos comerciais, resultando em um protótipo estanque, modular e de fácil inspeção.

A simulação indicou circulação ondulatória, recirculação nas curvas, boa dispersão de partículas e poucas regiões de alto cisalhamento. Nos ensaios, o sistema consumiu 11,25 W e sustentou o crescimento de ambas as cepas avaliadas. A *C. vulgaris* atingiu 0,54 g L⁻¹ em 173 h e apresentou a maior taxa específica no raceway. Portanto, o projeto demonstrou viabilidade construtiva e operacional e oferece uma plataforma para a otimização de

temperatura, iluminação, injeção de CO₂ e do desenho das pás.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI, ao FEI Maker Lab, ao Laboratório de Bioprocessos e aos demais laboratórios e grupos que disponibilizaram infraestrutura, materiais e suporte técnico para a execução do projeto.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, I.; HUSAIN, S.; HASSAN, L. H. S.; KHAN, N. A.; ZAHMATKESH, S.; NI, B.-J. Computational fluid dynamics (CFD) simulation modeling for the cultivation of microalgal monoculture in axenic enclosed bubble column photobioreactor (BCPBR). *Algal Research*, v. 83, p. 103725, 2024. DOI: 10.1016/j.algal.2024.103725.
- ALI, A.; KHALID, Z.; AHMED, A. A.; AJAREM, J. S. Wastewater treatment by using microalgae: insights into fate, transport, and associated challenges. *Chemosphere*, v. 338, p. 139501, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139501.
- ARDUINO. Arduino UNO R3 user manual. SKU A000066. [S. l.]: Arduino, 2025.
- BOLZANI, H. R. Fotobioreator Flat Panel e Lagoa Raceway: avaliação do cultivo de microalgas nativas para tratamento e recuperação de nutrientes provenientes de esgoto sanitário anaeróbio de alta carga. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Estadual Paulista, 2023.
- CABRERA-REINA, A.; MIRALLES-CUEVAS, S.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; SALAZAR, R. Application of solar photo-Fenton in raceway pond reactors: a review. *Science of the Total Environment*, v. 800, p. 149653, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149653.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
- CONCAS, A.; PISU, M.; CAO, G. A novel mathematical model to simulate the size-structured growth of microalgae strains dividing by multiple fission. *Chemical Engineering Journal*, v. 287, p. 252–268, 2016. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.021.
- DARVEHEI, P.; BAHRI, P. A.; MOHEIMANI, N. R. Model development for the growth of microalgae: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 97, p. 233–258, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.027.
- DAUTA, A.; DEVAUX, J.; PIQUEMAL, F.; BOUMNICH, L. Growth rate of four freshwater algae in relation to light and temperature. *Hydrobiologia*, v. 207, n. 1, p. 221–226, 1990. DOI: 10.1007/BF00041459.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series Datasheet. [S. l.]: Espressif Systems, 2019.

FILALI, R.; TAIDI, B.; PAREAU, D. Optimization of a raceway pond system for wastewater treatment: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 39, n. 3, p. 422–435, 2019. DOI: 10.1080/07388551.2019.1571007.

KUSMAYADI, A.; PHILIPPIDIS, G. P.; YEN, H.-W. Application of computational fluid dynamics to raceways combining paddlewheel and CO₂ spargers to enhance microalgae growth. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 129, n. 1, p. 93–98, 2020. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2019.06.013.

MASOJÍDEK, J.; LHOTSKÝ, R.; ŠTĚRBOVÁ, K.; ZITTELLI, G. C.; TORZILLO, G. Solar bioreactors used for the industrial production of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 107, n. 21, p. 6439–6458, 2023. DOI: 10.1007/s00253-023-12733-8.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. DS18B20: programmable resolution 1-wire digital thermometer. Rev. 6. [S. l.]: Maxim Integrated Products, 2019.

MOLINA GRIMA, E.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; GARCÍA CAMACHO, F.; CHISTI, Y. Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology*, v. 70, n. 1–3, p. 231–247, 1999. DOI: 10.1016/S0168-1656(99)00078-4.

RACHELLE, F. P. Degradação de fenol por processos Foto-Fenton em reator raceway pond. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2024.

SOUZA, L. S. de. Caracterização morfofisiológica, produção de lipídios e carotenoides em diferentes condições de cultivo de duas microalgas com potencial biotecnológico. 2016. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

STMICROELECTRONICS. VL53L0X: world's smallest time-of-flight ranging and gesture detection sensor. Datasheet. [S. l.]: STMicroelectronics, 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. L293x quadruple half-H drivers. Datasheet. [S. l.]: Texas Instruments, 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. LM393B, LM2903B, LM193, LM293, LM393 and LM2903 dual comparators. Datasheet. [S. l.]: Texas Instruments, 2020.

XU, B.; LI, P.; WALLER, P. Study of the flow mixing in a novel ARID raceway for algae production. *Renewable Energy*, v. 62, p. 249–257, 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2013.06.049.