

AUTOMAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA UM BIORREATOR

Lara da Cruz Wetzker, Leonardo H. Ferrari Pereira, Maryan Guimarães Alves, Uesclei C. Santos e Mauro Sergio Braga

Resumo: Biorreatores automatizados têm papel fundamental no cultivo controlado de microalgas e cianobactérias, porém o alto custo de aquisição e manutenção ainda limita sua aplicação em laboratórios acadêmicos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de uma automação de baixo custo para um, utilizando um ESP32 como unidade central de processamento, integrado a sensores de temperatura, pH e umidade, além de atuadores para controle de iluminação e circulação de ar. Os dados foram monitorados localmente via *display* LCD e enviados em tempo real para o Firebase e Google Sheets, permitindo registro e análise contínua do cultivo. A proposta busca garantir reprodutibilidade, facilidade de operação e acesso a um sistema eficiente para estudantes e pesquisadores.

Palavras-chave: Automação de biorreator. Microalgas. Medição de variáveis. Controle de processos. Monitoramento de variáveis.

Abstract: Automated bioreactors play a key role in the controlled cultivation of microalgae and cyanobacteria; however, their high acquisition and maintenance costs still limit their adoption in academic laboratories. This work presents the development and implementation of a low-cost automation system for such a bioreactor, using an ESP32 as the central processing unit integrated with temperature, pH, and humidity sensors, as well as actuators for lighting and air circulation control. The data were monitored locally via an LCD display and transmitted in real time to Firebase and Google Sheets, allowing continuous recording and analysis of the culture. The proposal aims to ensure reproducibility, ease of operation, and access to an efficient system for students and researchers.

Keywords: Bioreactor automation. Microalgae. Variable measurement. Process control. Variable monitoring.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço das tecnologias aplicadas à biotecnologia tem ampliado de forma expressiva as perspectivas de produção sustentável de compostos de interesse industrial, farmacêutico e ambiental. Nesse contexto, os biorreatores se destacam como equipamentos essenciais, pois possibilitam o cultivo controlado de microrganismos, células vegetais, tecidos e microalgas em condições ideais de temperatura, pH, aeração e luminosidade (Gallo Ramírez *et al.*, 2015). A partir desses sistemas, é possível desenvolver pequenas pesquisas laboratoriais até processos

industriais complexos voltados à produção de biomassa, biocombustíveis, fármacos, enzimas, pigmentos naturais, proteínas, biopolímeros e bioplásticos (VARGAS, 2018; CHAKRABORTY et al., 2023).

Os biorreatores podem ser classificados de diversas formas, de acordo com o tipo de mistura, aeração e iluminação utilizados. Entre os principais tipos, destacam-se os biorreatores de tanque agitado, amplamente utilizados em processos de fermentação e cultivo de células animais devido à sua eficiência na homogeneização do meio; os biorreatores de coluna de bolhas, que utilizam o ar comprimido para promover a agitação e são indicados para cultivos de microrganismos sensíveis ao cisalhamento; e os biorreatores *airlift*, que operam por meio de circulação natural do fluido, apresentando baixo consumo energético e boa transferência de gases. Além desses, os fotobiorreatores se destacam por possibilitarem o cultivo de microalgas e cianobactérias, uma vez que incorporam sistemas de iluminação controlada que simulam a radiação solar, sendo amplamente empregados em pesquisas voltadas à produção de biocombustíveis, bioplásticos e biofertilizantes (KUMAR et al., 2015; JORQUERA et al., 2010).

Devido à sua versatilidade, os biorreatores possuem aplicações em diferentes setores da indústria e da pesquisa científica. Na área da saúde, esses sistemas são amplamente empregados na cultura de células para obtenção de vacinas, anticorpos e medicamentos biotecnológicos, devido à capacidade de manter condições precisas de crescimento celular e controle rigoroso de contaminações (GALLO RAMÍREZ et al., 2015). No setor alimentício, os biorreatores contribuem para o desenvolvimento de bebidas fermentadas, enzimas e suplementos nutricionais, promovendo maior padronização, eficiência e qualidade nos processos biotecnológicos (SANTOS et al., 2023).

Na agricultura, o uso de biorreatores tem se mostrado uma alternativa promissora para a produção de biofertilizantes e inoculantes biológicos a partir do cultivo de microalgas e bactérias fixadoras de nitrogênio, promovendo práticas mais sustentáveis e redução do uso de fertilizantes químicos (RAHMAN et al., 2023). Por fim, no setor ambiental, esses sistemas têm sido empregados no tratamento de efluentes e na captura de dióxido de carbono (CO₂) utilizando microalgas e cianobactérias em processos de biofixação e purificação da água, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais (SAN et al., 2020).

Apesar de seu grande potencial, o cultivo em laboratórios de pesquisa e ensino ainda é frequentemente realizado de forma manual e empírica, sem o monitoramento contínuo de variáveis críticas como temperatura, pH e intensidade luminosa. Em sistemas manuais, a ausência de automação e sensoriamento dificulta o acompanhamento em tempo real do cultivo, o que pode comprometer significativamente os resultados experimentais (D'AGOSTIN et al., 2017). Além disso,

a ausência de monitoramento contínuo impede a detecção antecipada de alterações nas curvas de tendência dos parâmetros de cultivo, dificultando intervenções corretivas rápidas e precisas; estudos demonstram que sistemas automatizados com sensores múltiplos e controle em tempo real aumentam a produtividade e reduzem falhas nos processos de cultivo (APPL. SCI., 2025).

O monitoramento automatizado, portanto, não apenas assegura condições estáveis e controladas durante todo o processo, como também permite o registro e análise de dados em tempo real, aumentando a precisão, a reprodutibilidade e o valor pedagógico dos experimentos (MARIANO et al., 2017).

Porém, os biorreatores industriais ou comerciais automatizados possuem alto custo de aquisição e manutenção, o que os torna inviáveis para muitas instituições acadêmicas e grupos de pesquisa com restrições orçamentárias (VARGAS, 2018).

Diante desse cenário, cresce a demanda por soluções de baixo custo e alto potencial didático, que alinhem simplicidade construtiva, automação e possibilidade de monitoramento remoto. O uso de microcontroladores e sensores acessíveis, como os presentes em plataformas abertas, a exemplo do Arduino e do ESP32, tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas capazes de monitorar e controlar variáveis essenciais do processo - como temperatura, pH, agitação, aeração e iluminação - de maneira eficiente e econômica (MARIANO et al., 2017, 2020; MARQUES FILHO et al., 2021).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo projetar e implementar um biorreator automatizado de baixo custo com monitoramento remoto, destinado a aplicações acadêmicas e pesquisa. O sistema proposto busca permitir o cultivo e a comparação de organismos fotossintéticos – microalgas e cianobactérias – sob as mesmas condições controladas, analisando parâmetros fundamentais para a eficiência do processo.

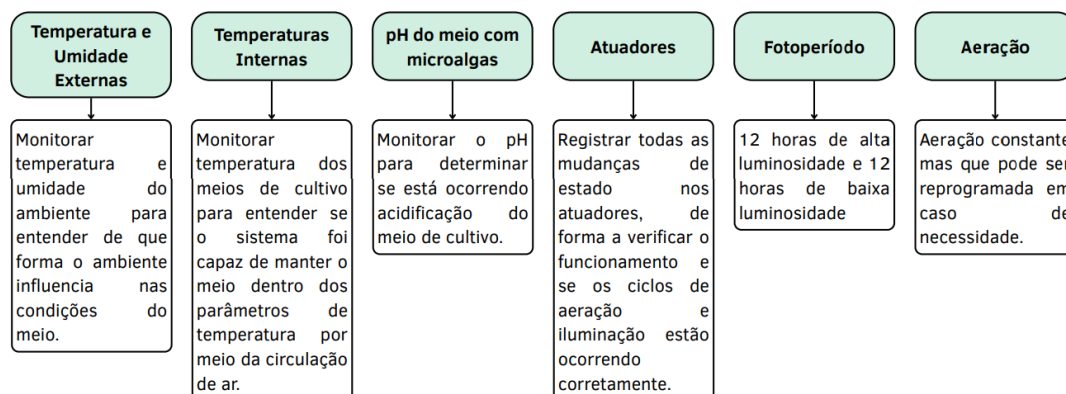
Além de facilitar o acesso à experimentação em bioprocessos, o projeto também busca promover a formação técnica e científica dos alunos e fomentar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis voltadas à produção de bioplásticos e outros compostos de interesse industrial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição do Sistema de Automação

Primeiramente, foi necessário definir quais seriam as variáveis a serem controladas, as condições de operação e os métodos de acionamento dos atuadores, conforme apresentado na Figura 1.

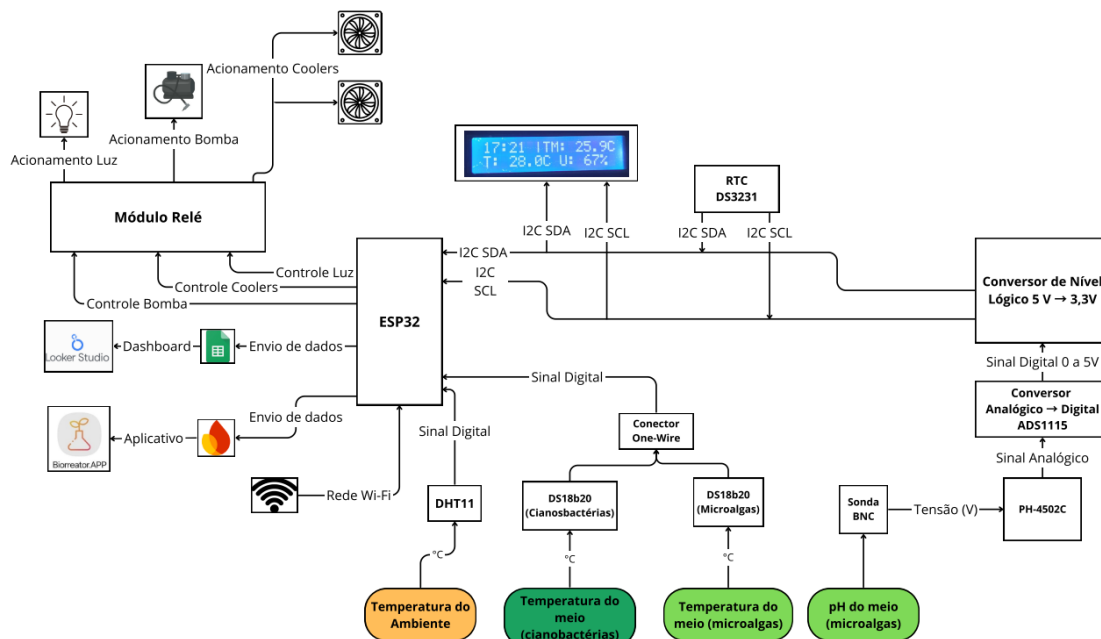
Figura 1 – Variáveis estudadas no biorreator



Fonte: Autores

Após a identificação dos requisitos, todos os componentes necessários foram listados e o circuito eletrônico esquematizado como forma de compreender as conexões entre os módulos (Figura 2), sensores e atuadores, bem como verificar compatibilidade elétrica e necessidade de adaptações.

Figura 2 - Esquema de conexão.



Fonte: Autores

Com o circuito já definido, partiu-se para a aquisição dos módulos e componentes individuais e iniciou-se o processo de verificação de integridade do *hardware* de cada elemento a ser utilizado no desenvolvimento do protótipo. Foram realizados testes individuais para cada módulo, sensor e atuador, incluindo, quando necessário, a

calibração e configuração dos componentes que exigiam ajustes prévios à utilização. Após os testes individuais, deu-se início à integração dos elementos.

Com a função de controlar e gerenciar os dispositivos, foi utilizada uma placa de desenvolvimento ESP32-WROOM-32 (38 pinos), configurada via Arduino IDE.

Para o acionamento dos atuadores, foi utilizado um módulo relé de 8 canais com capacidade de comutação de até CC 30V/10A e CA 250V/10A e isolamento óptico. A alimentação das bobinas dos relés (JD-VCC) foi feita com 5V, no entanto, a parte lógica do circuito (VCC, circuito de controle e optoacopladores) foi alimentada com 3,3V provenientes do ESP32. Essa conexão assegura a interpretação adequada dos níveis lógicos de controle, evitando instabilidades nos acionamentos e garantindo compatibilidade elétrica entre o microcontrolador e o módulo. A conexão dos sinais digitais do microcontrolador para o módulo relé foi feita por meio dos pinos GPIO 27, GPIO 33 e GPIO 32.

Como controle temporal, foi empregado o módulo de relógio em tempo real DS3231, amplamente utilizado para oferecer registros de data e hora em sistemas embarcados, apresentando baixo consumo de energia e grande precisão e estabilidade na contagem do tempo (variação de cerca de $\approx \pm 1$ minuto/ano).

O controle temporal é essencial para o controle do fotoperíodo, que a partir de pesquisas relacionadas ao cultivo de microalgas, estabeleceu-se em 12 horas de iluminação e 12 horas sem iluminação, utilizando-se duas luminárias LED de 12V, acionadas por meio do relé correspondente ao canal conectado no GPIO 27.

A aeração do meio foi possível com a utilização do compressor de ar BIG AIR - A320, com capacidade de 3,5 litros/minuto, que também pode ser controlado pelo módulo relé (canal conectado ao GPIO 33) caso seja necessário estabelecer um ciclo de aeração específico, para o presente projeto, adotou-se um ciclo de aeração contínuo. Quanto ao controle térmico, identificou-se na literatura a faixa de 28 °C como ideal para o crescimento dos micro-organismos. Entretanto, considerando que as temperaturas na região de desenvolvimento do projeto são elevadas, optou-se por ajustar o limite para 20 °C. Dessa forma, sempre que o sensor de temperatura e umidade (DHT11) detectar valores superiores a esse limite, o controlador aciona o relé dos *coolers*, promovendo a circulação de ar e a troca térmica.

Com o objetivo de acompanhar o pH do meio das microalgas, adicionou-se uma sonda conectada ao módulo PH-4502C.

Figura 3 - Sensores utilizados no sistema, funções e precisões.

Sensor	Função no sistema	Precisão
DHT11	Medição da temperatura e umidade do ambiente para controle térmico e acionamento dos coolers.	Temperatura: ± 2 °C
DS18B20	Medição da temperatura interna do meio de cultivo ou do recipiente, com maior precisão e estabilidade que o DHT11.	$\pm 0,5$ °C (faixa -10 °C a 85 °C)
Sonda de pH + Módulo PH-4502C	Monitorar o pH do meio das microalgas para avaliar condições de crescimento e estabilidade do cultivo.	$\pm 0,1$ a $\pm 0,2$ pH

Fonte: Autores

O monitoramento local do sistema é realizado por meio de um display LCD 16×2 conectado via protocolo I2C pelos pinos SDA e SCL, no qual são exibidos: o processo de inicialização, as leituras dos sensores e o relógio externo. Já o monitoramento remoto ocorre por intermédio de um aplicativo Android desenvolvido na plataforma *MIT App Inventor*. O microcontrolador ESP32, conectado à rede *Wi-Fi*, envia em tempo real as leituras de todos os sensores para o banco de dados *Google Firebase*, que armazena essas informações e as disponibiliza instantaneamente ao aplicativo, permitindo acompanhar o estado das variáveis monitoradas a distância.

Todos os dados coletados são armazenados em uma planilha do *Google Sheets*. Como o ESP32 não pode se comunicar com a planilha nativamente, o envio ocorre por meio de uma *Web App* criada no *Google Apps Script*. O ESP32, conectado à rede *Wi-Fi*, transmite periodicamente, a cada 30 segundos, os valores dos sensores para a URL disponibilizada pelo *Web App*, que registra automaticamente os dados. Os dados mais recentes são alocados em uma tabela que atualiza a cada envio e o histórico completo em uma tabela que registra cada envio linha após linha, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Cabeçalho da tabela de dados mais recentes e histórico.

Dados mais recentes Biorreator									
Data	Hora	Luz	Coolers	Bomba	Temp Cianos (°C)	Temp Microalgas (°C)	Umidade	Temp Ambiente (°C)	pH

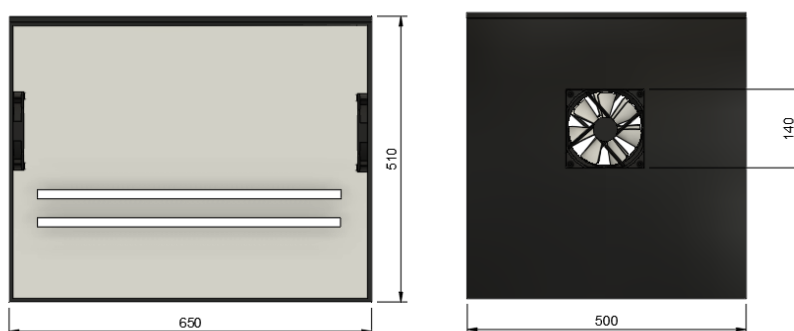
Fonte: Autores

A planilha é vinculada ao *Google Looker Studio* por meio do conector nativo para *Google Sheets*. Dessa forma, os dados armazenados passam a ser exibidos em gráficos e indicadores atualizados em tempo real.

Construção do aparato experimental

Para a montagem, primeiramente, foi necessário criar uma estrutura para acomodar o circuito, a fonte de alimentação, as luminárias de led, e posicionar os *coolers* e os recipientes que concentram o cultivo. Para esse fim, empregou-se o *software* Fusion 360, que permitiu a criação e a avaliação preliminar do modelo estrutural antes de sua implementação prática.

Figura 5 - Dimensões da estrutura em mm.



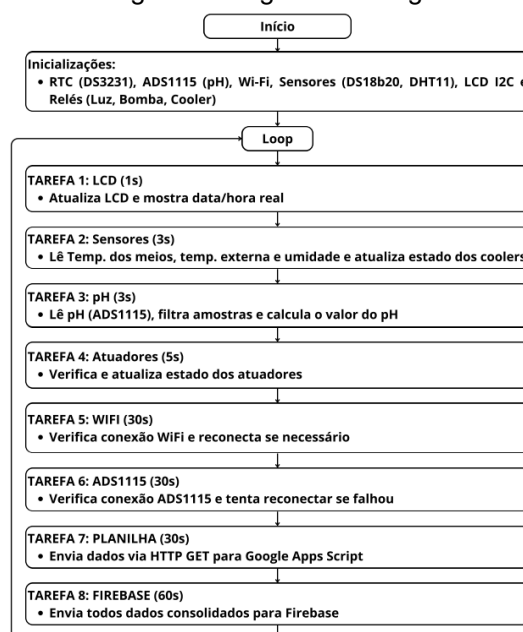
Fonte: Autores

Em sequência, para a construção da estrutura, foram empregados painéis de MDF com 6mm de espessura, grampos, cantoneiras, parafusos, porcas e arruelas. As paredes laterais foram confeccionadas a partir de placas de MDF, nas quais foram realizados cortes com aberturas destinadas à fixação dos *coolers*.

O código foi desenvolvido em linguagem baseada em C++ na plataforma Arduino IDE. Com ele é realizada a leitura de sensores, exibindo as informações em um display LCD I2C 16x2 e enviando os dados para o *Firestore Realtime Database* e para a planilha do *Google Sheets* via *Google Apps Script*.

O código, conforme mostrado a lógica na Figura 6, também executa o acionamento automático dos relés que controlam o cooler, a bomba de circulação e a iluminação, com base em condições pré-definidas e no horário obtido pelo módulo RTC DS3231. As leituras e transmissões de dados são organizadas por intervalos de tempo específicos, o que otimiza o desempenho do ESP32 e evita sobrecarga no processamento. Cada variável é atualizada conforme sua necessidade de amostragem, garantindo estabilidade, eficiência e atualização constante das informações exibidas e enviadas ao banco de dados.

Figura 6 - Lógica do Código.



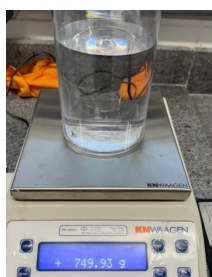
Fonte: Autores

Para uma análise preliminar da viabilidade do sistema e observação da resposta dos organismos em ambientes controlados, foram realizados testes iniciais em dois frascos esterilizados com álcool 70% e, posteriormente, enxaguados com água deionizada e desmineralizada, cada um com capacidade de 1 litro.

A preparação do meio de cultivo envolveu a pesagem de 0,03 g do fertilizante NPK 20-20-2 — um composto contendo 20% de nitrogênio, 20% de fósforo e 20% de potássio — dissolvido em 750 mL de água deionizada e desmineralizada, assegurando a completa homogeneização da solução.

Após esse preparo, cada recipiente recebeu microrganismos distintos: no frasco 1 foram inoculados 50 mL de uma suspensão de Cianobactérias, enquanto no frasco 2 foram inoculados 50 mL de Microalgas, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - a) Preparo do meio de cultivo



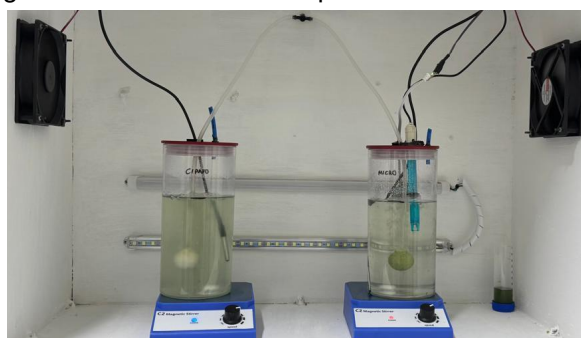
b) Meio de cultivo com microrganismos.



Fonte: Autores

Essa etapa teve como finalidade comparar o comportamento dos dois grupos de organismos sob condições semelhantes, permitindo avaliar aspectos como adaptação ao meio, crescimento e estabilidade do cultivo. Durante os testes, os recipientes permaneceram sob as mesmas condições ambientais controladas pelo sistema (Figura 8) — iluminação, temperatura e aeração — que consistiram em fotoperíodo de 12 h claro / 12 h escuro, temperatura mantida entre 25 °C e 27 °C e aeração constante durante 55 minutos. Esses parâmetros foram adotados para garantir a estabilidade do cultivo e verificar a eficiência das condições definidas para o desenvolvimento adequado dos organismos.

Figura 8 - Sistema montado para os testes



Fonte: Autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificação dos Sensores

Realizou-se o monitoramento contínuo das variáveis de temperatura do ambiente, temperatura do meio — tanto para as cianobactérias quanto para as microalgas —, pH da solução, umidade do ambiente, fotoperíodo e funcionamento dos atuadores ao longo de sete dias consecutivos, com medições registradas automaticamente na plataforma *Google Sheets* e atualizadas em intervalos regulares de 30 segundos. Esse monitoramento inicial teve como objetivo validar o comportamento do protótipo, verificar a estabilidade das leituras e confirmar a capacidade de atuação do sistema frente às condições definidas.

Ainda na fase de ensaio do projeto, durante a calibração do pHmêtro, utilizando a solução de pH 7,0, obteve-se o valor de 2,6278V como primeiro resultado de leitura. Em seguida, a sonda foi limpa em água deionizada e realizado nova leitura, desta vez na solução de pH 4,0, obtendo-se o valor de 3,1465V. Os valores obtidos foram incluídos na função de leitura do código principal, definido os valores de tensão em pH neutro e tensão em pH ácido. Para verificação de que a coleta de dados estava correta, há conversão ADC do valor lido pelo eletrodo, a partir do ADS1115 - um conversor de valor analógico para digital - com faixa máxima de 6,144V e resolução

de 16 bits, e filtrando as amostras coletadas, para uma melhor precisão do sensor, removendo 20% das coletas maiores e 20% das coletas menores, obtendo a fórmula:

Equação 1- Média de amostras filtradas

$$\text{Média de amostras filtradas} = \frac{1}{30} \sum_{i=10}^{40} amostras[i]$$

(1)

Após o cálculo da média de amostras filtradas, pode-se deduzir a fórmula de tensão lida pelo eletrodo, dado por:

Equação 2 - Cálculo da tensão

$$\text{Tensão obtida} = \text{média de amostras filtradas} \times \left(\frac{\text{faixa máxima de tensão do ADS1115}}{2^{16}} \right)$$

(2)

Tendo obtido o valor da tensão lida, há a conversão desta tensão no valor de pH obtido. Para isso, é calculado o valor de variação de pH em 1V, sendo a fórmula:

Equação 3 - Variação de pH por volt

$$\text{Variação de pH} = \frac{(\text{pH de solução neutra} - \text{pH de solução ácida})}{(\text{tensão de pH neutro} - \text{tensão de pH ácido})}$$

(3)

Por fim, é calculado o valor do pH obtido:

Equação 4 - Cálculo do pH obtido

$$\text{pH obtido} = \text{pH de solução neutra} + \frac{(\text{tensão obtida} - \text{tensão de pH neutro}) \times \text{variação de pH}}{1 \text{ V}}$$

(4)

Validação do Sistema de Automação

Para acelerar os ganhos na taxa de crescimento e produtividade de biomassa, as lâmpadas de LED foram configuradas em 12 horas de exposição à luz e 12 horas em escuridão (KRZEMINSKA et al., 2013). Assim, após ensaio, foi observado que a comutação do relé que controla as lâmpadas estava em perfeito funcionamento, sem atrasos ou falhas no acionamento, indicando que a sincronização do RTC foi bem-sucedida.

Figura 9 - Monitoramento do funcionamento das variáveis

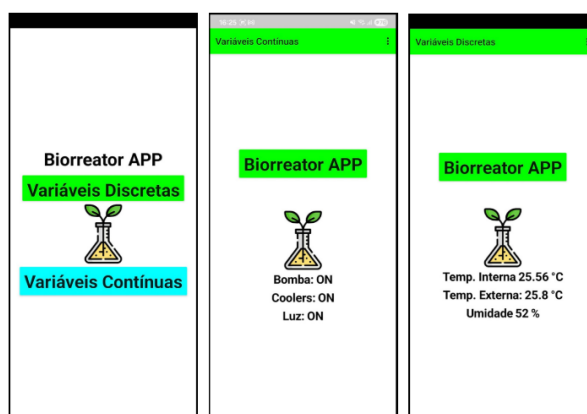
Data	Hora	Luz	Coolers	Bomba
8/11/2025	12:53:41	ON	ON	ON
8/11/2025	12:54:42	ON	ON	ON
8/11/2025	12:55:29	ON	ON	OFF
8/11/2025	12:56:15	ON	ON	OFF
8/11/2025	12:57:15	ON	ON	OFF
8/11/2025	12:58:02	ON	ON	OFF
8/11/2025	12:58:48	ON	ON	OFF
8/11/2025	12:59:48	ON	ON	OFF
8/11/2025	13:00:35	ON	ON	ON
8/11/2025	13:01:20	ON	ON	ON

Fonte: Autores.

Segundo a literatura, valores de temperatura acima de 28 °C podem afetar negativamente o metabolismo de diversas espécies de microalgas, reduzindo a eficiência fotossintética e alterando o pH do meio. Assim, o limite de 20 °C foi adotado como referência operacional, a fim de prevenir oscilações térmicas excessivas durante o cultivo. Também foram utilizados *coolers* para troca de calor, a fim de evitar que a temperatura ultrapassasse esta faixa de temperatura. A análise das leituras demonstra que o sistema conseguiu manter a temperatura dentro da faixa estipulada, ainda que as variações ambientais interfiram gradualmente no comportamento térmico do meio. Além disso, a literatura indica que níveis mais elevados de umidade relativa do ar promovem maior estabilização do sistema, resultando em menor taxa de evaporação e, conseqüentemente, em maior estabilidade térmica.

Durante o período observado, foi possível acompanhar continuamente os valores das variáveis por meio da plataforma Firebase e do *dashboard* no *Looker Studio*. A aplicação desenvolvida com *Firebase* no aplicativo móvel oferece uma visualização simplificada, permitindo ao usuário um acompanhamento remoto e intuitivo das variáveis em tempo real (Figura 10).

Figura 10 - Telas do Aplicativo Android

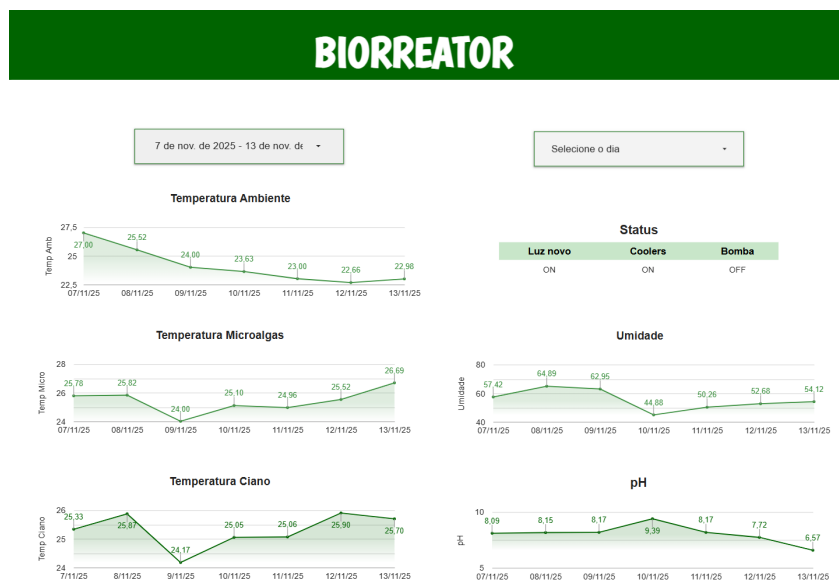


Fonte: Autores

Em relação ao *dashboard*, este pode ser acessado tanto pelo desktop quanto por dispositivos móveis, proporcionando ao usuário uma análise mais detalhada e

temporal dos resultados, com possibilidade de filtragem por períodos específicos ou por dias individuais, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Dashboard da tela de acompanhamento das variáveis do Biorreator.



Fonte: Autores

Testes Biológicos

Para a validação dos resultados experimentais, foram realizados dois ensaios utilizando microalgas e cianobactérias. No primeiro ensaio, foram coletados apenas os dados de temperatura do meio de cultivo, temperatura e umidade do ambiente, assim como a exposição à luz por 12h diárias, durante um período de 13 dias. Como pode ser observado na Figura 12, no primeiro recipiente contendo cianobactérias e no segundo contendo microalgas - da esquerda para direita, respectivamente - a coloração do meio de ambas as espécies ficou mais forte ao longo dos dias que foram realizados o teste, indicando um aumento no crescimento da clorofila, e consequentemente da concentração de biomassa proveniente do crescimento celular. Também é possível observar que os níveis de volume dos dois meios de cultivo reduziram em 200mL por dia de teste, sendo necessário complementação do meio.

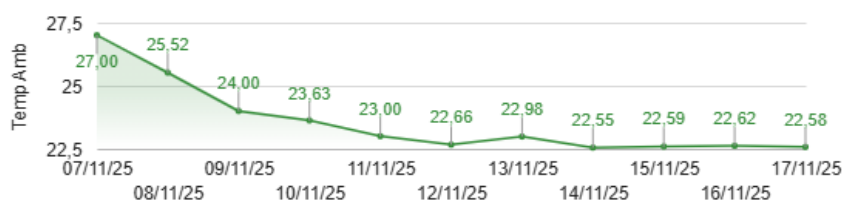
Figura 12 - Comparativo do crescimento do teste inicial



Para o segundo teste, este em definitivo já com o equipamento finalizado e devidamente instrumentado, foram utilizados amostras do primeiro teste, inicialmente com as cianobactérias, ficando em observação por 11 dias. Os valores de temperatura ambiente (Figura 13(a)) e do meio de cultivo (Figura 13(b)), e umidade (Figura 13(c)) em valores ideais para proporcionar o crescimento. Não há coleta de dados do pH das cianobactérias pois o sensor estava sendo utilizado integralmente para o cultivo de microalgas.

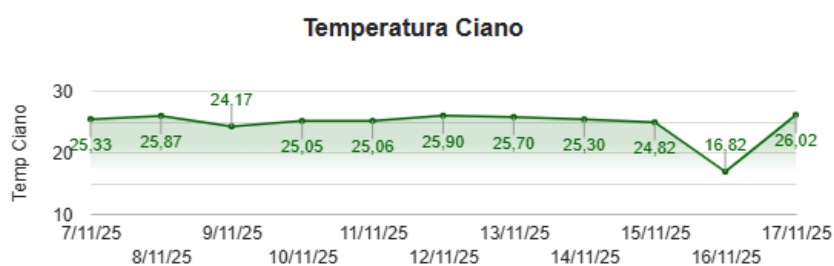
Figura 13- Temperatura ambiente

Temperatura Ambiente



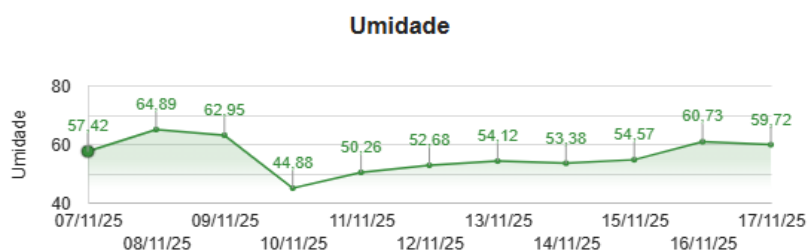
Fonte: Autores

Figura 13 (b) - Temperatura do meio de cultivo de cianobactérias



Fonte: Autores

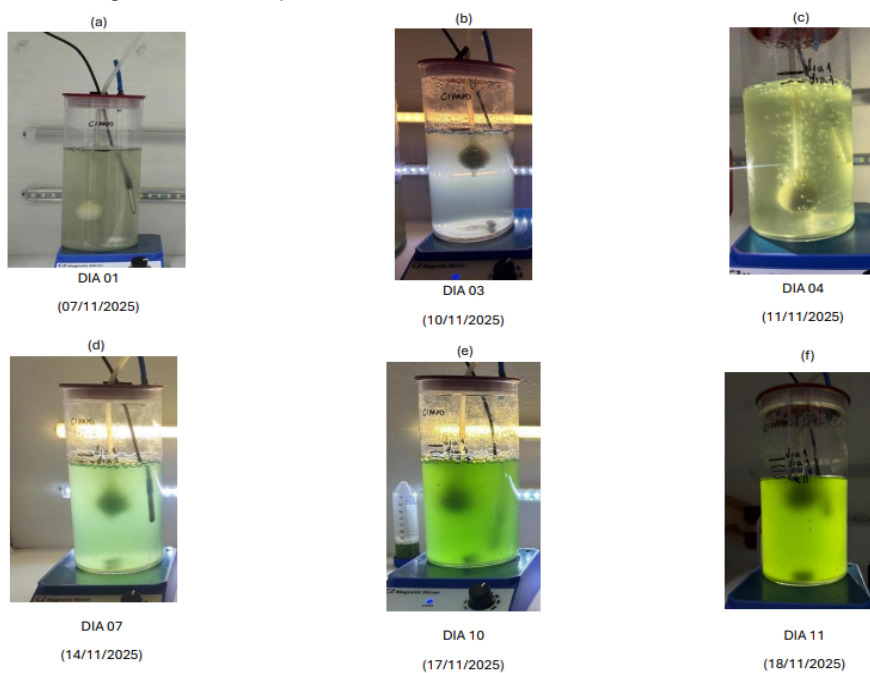
Figura 13 (c) - Umidade do ambiente



Fonte: Autores

Conforme observado durante este período de testes, o recipiente com cianobactéria demonstrou visualmente um crescimento lento porém eficiente ao longo do tempo e nota-se também que o nível do volume do meio de cultivo diminui com o passar do tempo: forte indicador de crescimento celular e produção de biomassa. É possível observar na Figura 14.

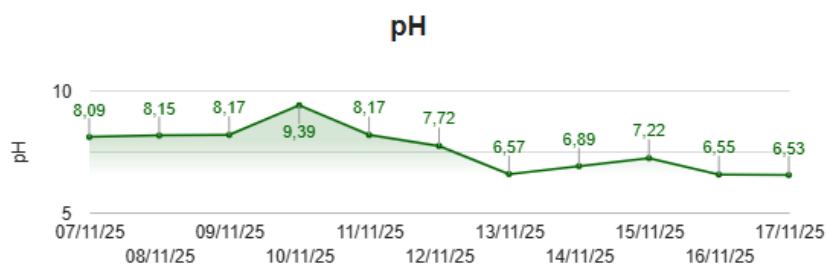
Figura 14 - Comparativo do crescimento das Cianobactérias



Fonte: Autores

Durante o mesmo período, foram coletados os dados das microalgas para observar o comportamento das mesmas frente ao nutriente utilizado no meio de cultivo, porém não foi obtido um bom resultado visual, mesmo com os níveis de pH diminuindo (Figura 15), sendo um indicador de que há produção de biomassa e crescimento celular.

Figura 15 - Monitoramento do pH.



Fonte: Autores.

CONCLUSÕES

O biorreator automatizado de baixo custo desenvolvido neste trabalho mostrou-se funcional e adequado para aplicações acadêmicas e de pesquisa. O sistema integrou sensores, atuadores e o microcontrolador ESP32 de forma eficiente, permitindo o controle contínuo de temperatura, pH, iluminação e aeração, além do monitoramento remoto por meio do *Firestore* e *Google Sheets*.

Os testes com microalgas e cianobactérias confirmaram o bom desempenho do protótipo, evidenciando estabilidade das variáveis e crescimento dos organismos, especialmente das cianobactérias. Apesar de algumas limitações observadas no cultivo das microalgas, o sistema demonstrou potencial para ajustes e otimizações futuras.

Conclui-se que o projeto atende aos objetivos propostos e oferece uma alternativa acessível, replicável e de grande valor didático, podendo ser aprimorado com a adição de novos sensores, melhorias nas medições e expansão para múltiplos cultivos simultâneos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos de forma especial à Dra. Louise Hase Gracioso, da Universidade de São Paulo (USP), pela valiosa colaboração com este trabalho. Sua disponibilidade, atenção e generosidade em fornecer os inóculos de cianobactérias e microalgas foram fundamentais para a realização dos experimentos e para o avanço deste projeto. Além do suporte técnico, sua experiência e dedicação à pesquisa em biotecnologia e cultivo de microalgas serviram como grande inspiração, contribuindo não apenas para o desenvolvimento científico deste estudo, mas também para nosso aprendizado e crescimento acadêmico.

Estendemos também nossos sinceros agradecimentos ao Dr. José Henrique Vallim, da Embrapa Meio Ambiente, cujo apoio, orientação e conhecimento técnico foram essenciais para aprimorar as etapas experimentais e a compreensão dos processos envolvidos no desenvolvimento do biorreator. Sua disponibilidade e suas contribuições práticas enriqueceram significativamente a execução e a qualidade deste trabalho.

Agradecemos igualmente ao Prof. Dr. Walter Jaimes Salcedo, da Escola Politécnica da USP, pela orientação acadêmica e pela visão crítica que ajudaram a direcionar e fortalecer este projeto. Registramos ainda nossa profunda gratidão à Prof. Dra. Elen Aquino Perpetuo, da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), pela atenção, pelo apoio e pelas contribuições acadêmicas que auxiliaram na consolidação deste trabalho.

Somos profundamente gratos a todos pela confiança, pela receptividade e pela disposição em compartilhar conhecimento, o que tornou possível a execução prática e o avanço científico deste trabalho sobre o biorreator.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, Preeti et al. *Cyanobacteria as a promising alternative for sustainable environment: synthesis of biofuel and biodegradable plastics.* *Frontiers in Microbiology*, v. 13, p. 939347, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.939347/full>. Acesso em: 29 out. 2025.

AHMAD, Shahbaz et al. *Sustainable and eco-friendly approaches for remediation of heavy metals from industrial wastewater by microbial biopolymers: a review.* *Biotechnology and Sustainable Materials*, v. 2, n. 1, p. 10, 2024. Disponível em: <https://biotechsustainablematerials.biomedcentral.com/articles/10.1186/s44316-024-00010-1>. Acesso em: 29 out. 2025.

AMMAR, S. H. Cultivation of microalgae *Chlorella vulgaris* in airlift photobioreactor for biomass production using commercial NPK nutrients. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, v. 12, n. 1, p. 90-99, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/299597219_Cultivation_of_Microalgae_Chlorella_vulgaris_in_Airlift_photobioreactor_for_Biomass_Production_using_commercial_NPK_Nutrients. Acesso em: 4 set. 2025.

APPLIED SCIENCES. *Multi-sensing monitoring of the microalgae biomass cultivation systems for biofuels and added value products synthesis—challenges and opportunities.* *Applied Sciences*, v. 15, n. 13, p. 7324, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7324>. Acesso em: 6 nov. 2025.

BOROWITZKA, M. A.; MOHEIMANI, N. R. (Eds.). *Algae for Biofuels and Energy.* Dordrecht: Springer, 2013.

CHAKRABORTY, Bikram; GAYEN, Kalyan; BHOWMICK, Tridib K. *Transition from synthetic to alternative media for microalgae cultivation: a critical review.* *Science of the Total Environment*, v. 897, p. 165412, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723040354>. Acesso em: 6 nov. 2025.

CHAKRABORTY, Sudip et al. *A comparative analysis of natural fiber reinforced polymer composites with traditional synthetic composites for sustainable applications in automotive industries.* *Materials*

Today: *Proceedings*, v. 84, p. 19–24, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221192642300111X>. Acesso em: 29 out. 2025.

D'AGOSTIN, D. A. L.; DOMENE, G. M.; OLIVEIRA, A. S.; BONFIM, M. J. C.; MARIANO, A. B. *Automated system for continuous microalgae cultivation in photobioreactors. Revista de Engenharia Térmica*, v. 16, n. 2, p. 3–9, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325180309_AUTOMATED_SYSTEM_FOR_CONTINUOUS_MICROALGAE_CULTIVATION_IN_PHOTOBIOREACTORS. Acesso em: 6 nov. 2025.

FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. *Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>. Acesso em: 5 nov. 2025.

GALLO RAMÍREZ, L. E.; NIKOLAY, A.; GENZEL, Y.; REICHL, U. *Bioreactor concepts for cell culture-based viral vaccine production. Expert Review of Vaccines*, v. 14, n. 9, p. 1181–1191, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26178380>. Acesso em: 6 nov. 2025.

GROSS, C. L. *Aquisição e controle de pH de um biorreator de bancada para fermentação de leite por grãos de kefir utilizando a plataforma Arduino*. 2023. Artigo científico. Disponível em: <https://doi.org/10.56083/RCV3N9-129>. Acesso em: 9 nov. 2025.

INOXPA. *Biorreatores: máxima precisão e eficiência em todos os processos*. Indaiatuba: INOXPA Brasil, 30 set. 2024. Disponível em: <https://www.inoxpa.com.br/empresa/atualidade/biorreatores-maxima-precisao-e-eficiencia-em-todos-os-processos#accept>. Acesso em: 5 nov. 2025.

JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; EMBIRUÇU, M.; GHIRARDI, M. L. *Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. Bioresource Technology*, v. 101, n. 4, p. 1406–1413, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.09.038. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19800784/>. Acesso em: 6 nov. 2025.

KRZEMIŃSKA, I.; PAWLIK-SKOWROŃSKA, B.; TRZCIŃSKA, M. et al. *Influence of photoperiods on the growth rate and biomass productivity of green microalgae. Bioprocess Biosyst Eng* 37, 735–741 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1044->. Acesso em: 17 nov. 2025

KUMAR, K.; MISHRA, S. K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M. S.; YANG, J.-W. *Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 875–885, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.033. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v51y2015icp875-885.html>. Acesso em: 6 nov. 2025.

MARIANO, André Bellin; ALMEIDA, Andressa Ruviano; MOREIRA, Gabriel Francisco Nicolas; BOEHME, Jackson Heinz; LIMA, Jardel Machado de; MONTEIRO, Lee Vinagre; LOPES, Pedro Henrique Peres Moraes; BELTRÃO, Rafael Kazuhito Vidal; GANDIN, Yuri Eduardo Mendes. *Monitoramento automatizado de parâmetros no cultivo de microalgas em sistemas fotoautotrófico com foco na produção de biocombustíveis*. In: XXVIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE, 2017, Ijuí. Anais [...]. Ijuí: UNIJUÍ, 2018. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/cricte/article/view/8846/7552>. Acesso em: 06 nov. 2025.

MARQUES FILHO, A. C.; RODRIGUES, J. P.; DAL PONTE, G. B. *Plataforma Arduino aplicada no desenvolvimento de um sistema de coleta de dados microambientais em casas de vegetação. BIOENG*, v. 15, n. 2, p. 190–206, 2021. DOI: 10.18011/bioeng2021v15n2p190-206. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwJV1s_yseeQAxUuqZUCHe9ClqwQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fseer.tupa.unesp.br%2FBIOENG%2Farticle%2Fdownload%2F1018%2F508%2F3794&usq=AOvVaw0Tiw7ePACnVmGh0_CO-E6t&opi=89978449. Acesso em: 10 nov. 2025.

MEMBRANE TECHNOLOGIES FOR BIOENGINEERING MICROALGAE: sustainable applications in biomass production, carbon capture, and industrial wastewater valorization. *Membranes*, v. 15, n. 7, p. 205, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/15/7/205>. Acesso em: 6 nov. 2025.

MOLINA GRIMA, E.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J. M. *Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>. Acesso em: 5 nov. 2025.

RAHMAN, M. A. et al. *Microalgae as biofertilizers: a sustainable way to improve soil fertility and plant growth*. *Sustainability*, v. 15, n. 16, p. 12413, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/16/12413>. Acesso em: 6 nov. 2025.

RAWAT, I.; RANJITH KUMAR, R.; MUTANDA, T.; BUX, F. *Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production*. *Applied Energy*, v. 88, n. 10, p. 3411–3424, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.001. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v88y2011i10p3411-3424.html>. Acesso em: 6 nov. 2025.

RICHMOND, A.; HU, Q. (Eds.). *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013.

SAN, Z.; LIANG, Z.; LI, Z. et al. *Investigation into the novel microalgae membrane bioreactor with internal circulating fluidized bed for marine aquaculture wastewater treatment*. *Membranes*, v. 10, n. 11, p. 353, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/11/353>. Acesso em: 6 nov. 2025.

SANTOS, F. A. M. et al. *Fermentação de alimentos e bebidas: aplicações e avanços biotecnológicos*. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 26, p. e2023064, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjft/i/2023.v26>. Acesso em: 6 nov. 2025.

VALIGURA, Aline Eurich da Silva. *Influência da adição de sistema de reflexão luminosa em biorreator no crescimento da microalga Spirulina platensis*. 2022. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/34045/1/influenciacrescimentobiorreatorspirulina.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2025.

VARGAS, Rodrigo. *Desenvolvimento de um biorreator modular, com funcionalidades customizadas para utilização em laboratório universitário*. 2018. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, UERGS. Disponível em: https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1621/2_uergs_ai_-_aluno_rodrigo_vargas_-_tcc_final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Acesso em: 9 mai. 2025.