

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Energia solar fotovoltaica aplicada à agitação do cultivo de cianobactérias em tanques abertos

Vinícius Maciel da Costa
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025

VINÍCIUS MACIEL DA COSTA

Energia solar fotovoltaica aplicada à agitação do cultivo de cianobactérias em tanques abertos

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marcio Aredes Martins

Coorientador: Joao V. Pereira Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C837e
2025
Costa, Vinícius Maciel da, 1998-
Energia solar fotovoltaica aplicada à agitação do cultivo de
cianobactérias em tanques abertos / Vinícius Maciel da Costa. –
Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (54 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Márcio Arêdes Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 45-49.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.495>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Energia solar na agricultura. 2. Algas - Cultura e meios
de cultura. 3. Sequestro de carbono. 4. Tanques. I. Martins,
Márcio Arêdes, 1972-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 621.471

VINÍCIUS MACIEL DA COSTA

Energia solar fotovoltaica aplicada à agitação do cultivo de cianobactérias em tanques abertos

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 21 de julho de 2025.

Assentimento:

Vinícius Maciel da Costa
Autor

Marcio Aredes Martins
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 05/08/2025 às 09:39:27 e pelo orientador em 12/08/2025 às 16:48:29. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BMOF.4SL1.N4KO** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais e à minha querida avó Inez (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda a força proporcionada aos meus pais e a mim durante todos esses anos.

Aos meus pais, Eliane e José Luiz, e ao meu irmão, Luiz Guilherme, pela confiança, amor e determinação, cedendo em muitos momentos benefícios pessoais, em troca da possibilidade desse momento.

À minha namorada, Jeane, por todo o amor, companheirismo e suporte dado nos momentos em que eu mais precisava de apoio.

Aos meus orientadores, professor Marcio Arêdes Martins e professor João Victor Pereira Oliveira, pelo empenho em sempre ajudar e por toda dedicação a esse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela estrutura e qualidade oferecida durante todo esse processo.

Aos membros do Núcleo Agrícola de Automação, Controle, Sistemas Embarcados e Instrumentação e Robótica (NAACSIR) e do Laboratório de Biocombustíveis. Gratidão aos técnicos administrativos, Dilson Novais Rocha, Elder Peixoto Xavier e Maurício de Oliveira Leite, pelo tratamento cordial e suporte oferecido. Agradeço também ao Marco Túlio e ao Jeferson dos Santos Vieira por todo auxílio durante a pesquisa.

A todos os meus amigos e familiares que sempre estiveram dispostos a me ajudar a chegar nesse momento. Inclusive à minha avó Inez que infelizmente não consigo mais abraçar todas as vezes que retorno para Viçosa, mas sinto sua presença e amor no meu coração.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

COSTA, Vinícius Maciel da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Energia solar fotovoltaica aplicada à agitação do cultivo de cianobactérias em tanques abertos.** Orientador: Marcio Aredes Martins. Coorientador: Joao Victor Pereira Oliveira.

O cultivo de microalgas e cianobactérias em tanques abertos associa alta taxa de fixação de dióxido de carbono com a ampla variedade de produtos obtidos a partir desses microrganismos. Essa é uma estratégia biológica promissora. Entretanto, o consumo de energia elétrica para a agitação das células do cultivo nos tanques é um ponto a ser observado. Desse modo, este estudo avaliou a aplicação de energia solar fotovoltaica para manutenção autônoma da agitação do cultivo de um consórcio de cianobactérias composto por linhagens de *Dendronalium* sp. e *Leptolyngbya* sp. em um tanque *raceway* com agitação por sistema de roda de pás (*paddle wheel*) e em um tanque com agitação por placa de mistura (*mixing-board*). O consumo de energia elétrica do tanque *mixing-board* correspondeu a apenas 5% da energia elétrica total consumida no tanque *raceway* e o consumo específico para a produção de biomassa foi 24 vezes menor, o que também reflete na necessidade 19 vezes menor de potência fotovoltaica, 7 vezes menos baterias e uma área ocupada de módulos fotovoltaicos 14 vezes menor no sistema *mixing-board* em comparação ao *raceway*. Apesar dessas significativas diferenças, os sistemas alcançaram crescimento e produtividade de biomassa similares. O tanque *mixing-board* se destacou pelo baixo consumo específico de energia elétrica, ainda que comparado a estudos realizados com tanques *raceway* da literatura. Esse baixo consumo específico viabiliza infraestruturas de energia solar fotovoltaica mais compactas, econômicas e otimiza o uso da área em fazendas de microalgas e cianobactérias, contribuindo para o contrabalanceamento de emissões de dióxido de carbono, uma vez que utiliza uma fonte de energia elétrica que não emite durante o processo de operação. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na concentração final de biomassa, na produtividade diária e na taxa específica de crescimento entre os cultivos nos dois tipos de tanques.

Palavras-chave: microalgas; *mixing-board*; *raceway*; sequestro de carbono

ABSTRACT

COSTA, Vinícius Maciel da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Application of photovoltaic solar energy to the agitation of cyanobacteria cultivation in open ponds.** Adviser: Marcio Aredes Martins. Co-adviser: Joao Victor Pereira Oliveira.

The cultivation of microalgae and cyanobacteria in open ponds combines a high carbon dioxide fixation rate with a wide variety of products obtained from these microorganisms. This is a promising biological strategy. However, the consumption of electrical energy for agitating the culture cells in the ponds is a point to be observed. Therefore, this study evaluated the application of photovoltaic solar energy for autonomous maintenance of the agitation of a cyanobacteria consortium culture, composed of *Dendronalium* sp. and *Leptolyngbya* sp. strains, in a raceway pond with agitation by a paddle wheel system and in a pond with mixing-board agitation. The electrical energy consumption of the mixing-board pond corresponded to only 5% of the total electrical energy consumed in the raceway pond, and the specific consumption for biomass production was 24 times lower. This also reflected a 19-times lower need for photovoltaic power, 7-times fewer batteries, and a 14-times smaller occupied area for photovoltaic modules in the mixing-board system compared to the raceway. Despite these significant differences, both systems achieved similar growth and biomass productivity. The mixing-board pond stood out due to its low specific electrical energy consumption, even when compared to studies conducted with raceway ponds in the literature. This low specific consumption enables more compact and economical photovoltaic solar energy infrastructures and optimizes area usage in microalgae and cyanobacteria farms, contributing to the counterbalancing of carbon dioxide emissions, as it utilizes an electricity source that does not emit during operation. No statistically significant differences were observed in the final biomass concentration, daily productivity, and specific growth rate between the cultures in the two types of ponds.

Keywords: carbon sequestration; microalgae; mixing-board; raceway

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tanques utilizados nos cultivos: (a) <i>mixing-board</i> e (b) <i>raceway</i> . (1) Sentido do fluxo de água; (2) Motores de corrente contínua (CC); (3) Placa metálica de agitação; (4) Módulo FV; (5) Bateria; (6) Roda de pás; (7) Motor de indução trifásico e sistema de redução de velocidade.....	16
Figura 2 – Circuito auxiliar para medição da tensão aplicada nos motores do agitador do <i>mixing-board</i>	18
Figura 3 – Procedimentos para avaliação da produtividade: (a) Coleta da amostra nos tanques; (b) Amostras de 30 mL de cada tanque; (c) Medição de pH; (d) Amostras homogeneizadas e preenchimento da microplaca; (e) Microplaca pronta para análise; e (f) Leitura no espectrofotômetro	20
Figura 4 – Consumo de energia diário durante os cultivos para (a) <i>mixing-board</i> e (b) <i>raceway</i>	29
Figura 5 – Nível do líquido dos tanques durante os cultivos.....	31
Figura 6 – Distribuição de umidade relativa do ar interna e externa à casa de vegetação durante os períodos de cultivo.....	32
Figura 7 – Distribuição de temperatura interna e externa à casa de vegetação durante os períodos de cultivo.....	33
Figura 8 – Horas de sol pleno na área externa em todos os dias de cultivo.....	35
Figura 9 – Estimativa de biomassa seca durante os cultivos.....	37
Figura 10 – Concentração final de biomassa nos tanques para todos os cultivos....	38
Figura 11 – Produtividade diária de biomassa nos tanques para todos os cultivos...	39
Figura 12 – Taxa específica de crescimento nos tanques para todos os cultivos.....	40
Figura 13 – Consumo específico de energia elétrica para produção de biomassa...	42
Figura 14 – Curva da potência e tensão elétrica para agitação do tanque <i>mixing-board</i> no dia 05/04/2025.....	50
Figura 15 – Curva da potência e tensão elétrica para agitação do tanque <i>raceway</i> no dia 14/04/2025.....	51
Figura 16 – Temperatura média e desvio padrão na área externa.....	52
Figura 17 – Temperatura média e desvio padrão no interior da casa de vegetação.	52

Figura 18 – Umidade relativa do ar média e desvio padrão na área externa.....	53
Figura 19 – Umidade relativa do ar média e desvio padrão no interior da casa de vegetação.....	53
Figura 20 – Horas de sol pleno no interior da casa de vegetação.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia para a agitação dos tanques durante os cultivos...	28
Tabela 2 – Horas de sol pleno para a área externa à casa de vegetação durante os cultivos.....	34
Tabela 3 – Potência de pico de módulos FV necessária para cada cultivo.....	36
Tabela 4 – Composição da biomassa do cultivo 2.....	41
Tabela 5 – Horas de sol pleno para o interior da casa de vegetação.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO.....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1	Condições de cultivo.....	15
3.2	Determinação do consumo de energia elétrica.....	17
3.3	Avaliação da produtividade dos cultivos.....	19
3.4	Avaliação da irradiação solar, temperatura e umidade	21
3.5	Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	Consumo de energia elétrica nos cultivos.....	28
4.2	Dados climáticos durante os cultivos.....	32
4.3	Módulos FV e banco de baterias.....	36
4.4	Produção de biomassa.....	37
5	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A - CURVAS DE POTÊNCIA E TENSÃO ELÉTRICA PARA REVOLVIMENTO DOS TANQUES.....	50
	APÊNDICE B - TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA DURANTE OS CULTIVOS.....	52
	APÊNDICE C - HORAS DE SOL PLENO NO INTERIOR DA CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE OS CULTIVOS.....	54

1. INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO₂) é apontado como principal agente do efeito estufa (Vale *et al.*, 2020). Alternativas para atingir neutralidade de carbono passam por compensar emissões oriundas de ações antropogênicas e aumentar a capacidade de sequestro de CO₂ (Cheng, 2020; Wang *et al.*, 2021). Embora existam tecnologias físicas e químicas para a captura de CO₂, o método biológico se mostra econômico e sustentável (Bhola *et al.*, 2014). Dentre esses métodos, a fixação de carbono por microalgas e cianobactérias é um dos mais importantes e eficazes, possuindo, dentre suas vantagens, economia de energia em comparação com os métodos químicos e físicos, uma vez que a energia solar pode ser utilizada diretamente no processo (Xu *et al.*, 2019; Ighalo *et al.*, 2022).

Microalgas são organismos eucariontes e cianobactérias são procariontes, embora muitas vezes ambas sejam classificadas como algas devido a ecologia e fisiologia semelhantes entre esses seres (Thoré *et al.* 2023). Essa questão é constantemente debatida por taxonomistas, que buscam um consenso sobre a classificação das cianobactérias como microalgas ou bactérias (Palinska;Surosz, 2014; Hachicha *et al.*, 2022).

Microalgas e cianobactérias realizam fotossíntese e possuem a característica marcante apresentar alta taxa de crescimento e eficiência no sequestro CO₂, superando as plantas terrestres (Bhola *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2019; Zahra *et al.*, 2020; Ighalo *et al.*, 2022). Singh e Ahluwalia (2013) observaram uma eficiência fotossintética das microalgas 10 vezes maior do que na maioria das plantas terrestres. Bhola *et al.* (2014) verificaram um valor ainda maior na literatura, relatando que essa eficiência pode variar entre 10 a 50 vezes. Ademais, esses microrganismos têm grande adaptabilidade ambiental e capacidade de gerar produtos, agregando valor econômico à captura de CO₂ por meio da fotossíntese (Xu *et al.*, 2019; Zahra *et al.*, 2020; Hachicha *et al.*, 2022; Wang; Wang; Zhu, 2024), que pode ser um método estratégico para indústrias alcance as metas de emissões em programas de compensação de carbono (Skifa *et al.*, 2025).

A condução do cultivo de microalgas e cianobactérias pode ocorrer em tanques abertos, fotobiorreatores ou arranjos híbridos. Embora os fotobiorreatores ofereçam um controle aprimorado das condições de cultivo e, por sua vez, uma

maior produção de biomassa, a escolha mais comum para a produção em larga escala são os tanques abertos, ainda que isso limite a quantidade de espécies que possam ser utilizadas. Essa preferência é justificada pela facilidade de implementação e pela relação custo-benefício favorável (Diao *et al.*, 2024; Abbaszadeh; Maldonado; De Almeida, 2024; Rame; Purwanto; Sudarno, 2023).

O cultivo em tanques abertos é realizado em canais rasos e com agitação forçada, normalmente construídos em forma oval ou circular, expostos à luz solar natural e ao CO₂ ambiente. Dessa forma, como a taxa de crescimento desses microrganismos é afetada por condições do ambiente como a disponibilidade de luz e nutrientes, pH, salinidade, temperatura, oxigênio dissolvido e concentração de CO₂ e outros aspectos relacionados a características das espécies, além do risco extremamente elevado para a contaminação, esse método de cultivo se torna um desafio (Diao *et al.*, 2024; Rame; Purwanto; Sudarno, 2023; Skifa *et al.*, 2025).

Uma técnica adotada para mitigar os efeitos negativos na produtividade de biomassa é a agitação do cultivo no tanque, o que garante melhor exposição à luz, difusão de nutrientes e gases, além de evitar a sedimentação desses microrganismos no fundo do tanque (Abbaszadeh; Maldonado; De Almeida, 2024). Essa agitação pode ser realizada de forma mecânica ou pneumática. O método considerado como mais eficiente em sistemas abertos é a agitação realizada por uma roda de pás (*paddle wheel*), que pode ser encontrada na configuração plana, zigue-zague e curvada (Kirnev *et al.*, 2022). Estudos para otimizar o rendimento geral e a produtividade da cultura em tanques abertos têm sido desenvolvidos, no entanto novas pesquisas são necessárias para desenvolver sistemas eficientes e sustentáveis de cultivo de microalgas e cianobactérias (Barboza-Rodríguez *et al.*, 2024).

O processo de agitação é o principal responsável pelo consumo de energia durante o cultivo (Li *et al.*, 2013; Sawant *et al.*, 2019). O consumo de energia para a agitação do cultivo está associado com as características construtivas do tanque, bem como com a escolha do modelo de agitador, sendo um critério relevante para o dimensionamento de tanques com agitação forçada (Kirnev *et al.*, 2022). Outro aspecto que impacta no consumo de energia do sistema de agitação é a profundidade do cultivo (Mendoza *et al.*, 2013), que sofre influência direta da evaporação natural da água devido às características construtivas do tanque (Quiroz *et al.*, 2021). Dessa forma, estudar sobre a eficiência energética em diferentes

situações climáticas, produtividade e uso de fontes de energia elétrica com ausência de emissões de CO₂ durante o cultivo é um passo importante para avançar na utilização de microalgas e cianobactérias em ambientes industriais, tanto na compensação do nível de CO₂ emitido como no tratamento de águas residuais.

Li *et al.* (2013) avaliaram o consumo de energia elétrica para agitação em um tanque aberto em escala de bancada, analisando diferentes configurações de pás, volume de água e velocidade de rotação. Sawant *et al.* (2019) investigaram os efeitos de diversos aspectos construtivos no tanque aberto *raceway* na redução da quantidade de zonas mortas e do consumo de energia, visando uma otimização energética e redução de custo operacionais. Inostroza *et al.* (2021) propuseram melhorias em um projeto de tanque aberto *raceway* em escala real por meio de resultados de simulações e verificaram que no caso analisado que a velocidade de rotação da roda de pás de 18 rpm ocasionou o menor consumo de energia com a mistura adequada. No entanto, analisar a viabilidade técnica e econômica do uso de uma fonte de energia renovável para manutenção da agitação pode ser uma outra forma de aprimorar o uso de energia elétrica durante o cultivo.

Técnicas de agitação nos cultivos de microalgas e cianobactérias podem contribuir para o aumento de produtividade e saúde do meio, mas precisam de energia para tal. A energia solar fotovoltaica é uma alternativa promissora, pois, além de não contrabalancear (em operação) o sequestro de CO₂ da atmosfera pelas microalgas e cianobactérias, também se utiliza do Sol, o que possibilita um menor investimento em armazenamento de energia elétrica, uma vez que a simultaneidade entre geração e consumo será alta. Soma-se a isso a flexibilidade de instalação de sistemas isolados de geração solar fotovoltaica e a possibilidade de acionamento, sem necessidade de inversores, de motores de corrente contínua. Dessa forma, desenvolver estudos para associar o uso de energia solar fotovoltaica para independência energética parcial ou total em técnicas de agitação nos cultivos, ainda que para um período específico do ano, é fundamental para aprimorar o cultivo de microalgas e cianobactérias como técnica de compensação de emissões.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Avaliar o consumo de energia para a produção de biomassa e viabilidade técnica da aplicação de energia solar fotovoltaica para agitação de cultivos em tanques *raceway - paddle wheel e mixing-board*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Biocombustíveis do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Brasil (Latitude: 20° 46' 14" S; Longitude: 42° 52' 25" W). Foram realizados três cultivos em duas plantas pilotos de tanques abertos já existentes na casa de vegetação localizada no laboratório, sendo um do modelo *raceway* e outro do modelo *mixing-board*. Todos os cultivos foram realizados no mês de abril de 2025, no modo semi-batelada, em que aproximadamente 50% do volume do cultivo foi utilizado como inóculo do cultivo subsequente. O cultivo 1 aconteceu no período entre 12:00 do dia 01/04/2025 e 12:00 do dia 10/04/2025, o cultivo 2 entre 12:00 do dia 11/04/2025 e 12:00 do dia 20/04/2025 e o cultivo 3 entre 12:00 do dia 21/04/2025 e 12:00 do dia 30/04/2025. Dessa forma, todos os cultivos tiveram duração de 9 dias, que representa cada período de 24 horas completas após o início dos cultivos.

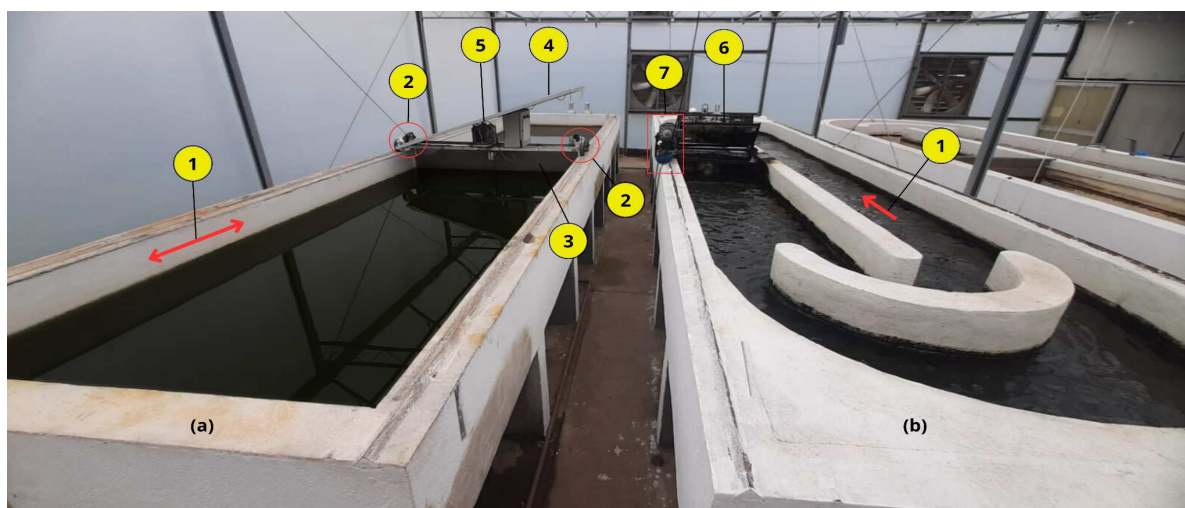
3.1. Condições de cultivo

Um consórcio com cianobactérias composto pelas linhagens de *Dendronalium* sp. e *Leptolyngbya* sp. foi utilizado nos cultivos. O meio de cultura foi preparado com água da rede de abastecimento e fertilizantes inorgânicos nas seguintes concentrações: 66,7 mg L⁻¹ superfosfato simples (Heringer, Brasil); 31,0 mg L⁻¹ cloreto de potássio (Heringer, Brasil); 47,4 mg L⁻¹ sulfato de magnésio heptahidratado (Multitécnica, Brasil); e 4,2 mg L⁻¹ sulfato de ferro monohidratado (Pigminas, Brasil).

O pH dos cultivos foi medido diariamente em cada tanque, utilizando um medidor de pH de bancada da fabricante *Hanna Instruments*, modelo HI 2221. Uma medição era realizada às 14:00 e, posteriormente, o valor de pH era corrigido adicionando uma solução com ácido clorídrico 37%, visando mantê-lo na faixa entre 8,5 a 11,5. Às 16:00, o nível do líquido do cultivo era medido, realizava-se a segunda medição de pH e, então, adicionou-se bicarbonato de sódio como fonte de carbono em uma concentração de 100 mg L⁻¹.

Na Figura 1 é apresentada as características construtivas dos tanques utilizados nos cultivos.

Figura 1 – Tanques utilizados nos cultivos: (a) *mixing-board* e (b) *raceway*. (1) Sentido do fluxo de água; (2) Motores de corrente contínua (CC); (3) Placa metálica de agitação; (4) Módulo FV; (5) Bateria; (6) Roda de pás; (7) Motor de indução trifásico e sistema de redução de velocidade



Fonte: Autoria própria

O tanque de modelo *mixing-board* (Figura 1.a), construído em alvenaria, apresenta formato retangular e possui comprimento de 10 m, largura de 2 m e profundidade nominal de 0,45 m. Esse modelo conta com um sistema de agitação autônomo, composto por uma placa metálica plana retangular de 1,95 m de comprimento e 0,45 m de largura, com espessura de 3 mm, controlador de carga, bateria de tensão nominal de 12 V e capacidade em regime de descarga durante 20 horas (C20) de 100 Ah e módulo fotovoltaico (FV) modelo BYD330PHK-36, de potência nominal de 330 W nas condições padrões de teste (STC), que corresponde a irradiação de 1000 W/m², temperatura do módulo FV de 25 °C, massa de ar (AM) de 1,5. O agitador foi acionado por dois motores de corrente contínua da fabricante *Bosch*, modelo F006.B20.312 e tensão nominal de 12 V. A definição do valor de velocidade foi realizada associando as informações de encoders rotativos e *Real Time Clock* (RTC), permitindo a retroalimentação para que o movimento fosse controlado por um sistema composto por um microcontrolador ESP 32 e duas pontes H. Esse sistema foi acionado diariamente às 6:00 e desligado às 18:00, com uma pausa de 5 minutos ao completar um ciclo de agitação do cultivo (ida e volta).

O tanque de modelo *raceway* (Figura 1.b), também construído em alvenaria, possui comprimento de 9 m, largura do canal de 0,9 m e profundidade de 0,45 m.

Esse modelo conta com duas placas defletoras de 0,18 m de espessura em cada borda do tanque e um agitador do tipo *paddle wheel* de 6 pás, com diâmetro de 0,9 m, confeccionado em acrílico resistente de 4 mm. O agitador foi acionado por um motor de corrente alternada (CA) já existente na casa de vegetação. Esse era um motor de indução trifásico com potência nominal de 2 c.v., que foi conectado à rede de distribuição de energia elétrica, acoplado a um sistema mecânico de redução de velocidade, proporcionando uma velocidade de giro das pás de 8,5 rpm. Esse sistema funcionou diariamente no período de 6:00 às 18:00.

3.2. Determinação do consumo de energia elétrica

A aquisição de dados para determinar a demanda energética do motor de indução trifásico do agitador do tanque *raceway* foi realizada com um medidor universal de grandezas elétricas (MUG) da fabricante ELO Sistemas Eletrônicos S.A., modelo 2160, utilizou-se intervalo de 10 segundos para registro dos valores de tensão de fase da fonte (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}), correntes de linha (I_A, I_B, I_C) e o fator de potência trifásico do motor. Tratava-se de uma ligação Y- Δ a 4 fios, em que os enrolamentos do motor estavam conectados em delta (Δ).

De posse das informações e considerando o motor como uma carga em triângulo equilibrada, foi possível calcular a potência ativa trifásica, uma vez que esta é dada pelo produto entre as tensões aplicadas nos enrolamentos do motor ($\sqrt{3}V_{AN}, \sqrt{3}V_{BN}, \sqrt{3}V_{CN}$), corrente de fase ($I_A/\sqrt{3}, I_B/\sqrt{3}, I_C/\sqrt{3}$) e fator de potência. De forma simplificada, a potência trifásica foi calculada utilizando a Equação 1 para todas as amostragens.

$$P_{3\phi} = (V_{AN} I_A + V_{BN} I_B + V_{CN} I_C) fp \quad (1)$$

Em que:

$P_{3\phi}$, potência ativa trifásica, W;

V_{AN} , tensão entre a fase A e o condutor neutro da fonte, V;

V_{BN} , tensão entre a fase B e o condutor neutro da fonte, V;

V_{CN} , tensão entre a fase C e o condutor neutro da fonte, V;

I_A , corrente de linha na fase A, A;

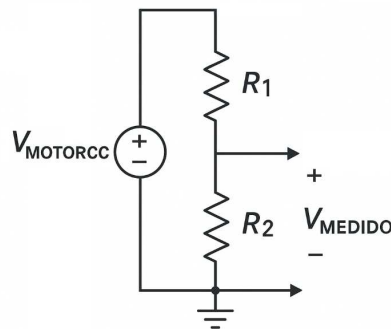
I_B , corrente de linha na fase B, A;

I_C , corrente de linha na fase C, A; e

fp , fator de potência do motor, adimensional .

A aquisição dos dados dos motores CC do tanque *mixing-board* foi realizada por meio de um sistema de aquisição de dados desenvolvido utilizando o microcontrolador Arduino Mega 2560. Duas portas analógicas foram utilizadas para a medição de tensão e corrente do sistema de agitação desse tanque. Para a tensão, um circuito divisor de tensão foi dimensionado (Figura 2).

Figura 2 – Circuito auxiliar para medição da tensão aplicada nos motores do agitador do *mixing-board*



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, aplicou-se a tensão do sistema de agitação na entrada do circuito, obtendo uma saída proporcional e inferior a 5 V na saída do circuito, possibilitando a leitura na porta analógica do Arduino (Equação 2).

$$V_{MOTORcc} = V_{MEDIDA} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \left(\frac{5}{1023} \right) \quad (2)$$

Em que:

R_1 , resistor de 10 k Ω ;

R_2 , resistor de 4,7 k Ω ;

$V_{MOTORcc}$, tensão aplicada nos motores CC, V; e

V_{MEDIDA} , valor de tensão medida no Arduino, V.

A corrente foi medida utilizando o sensor de corrente ACS 712 de 5 A (Allegro MicroSystems). Esse sensor tem como saída um sinal de tensão proporcional a corrente medida, com uma sensibilidade de 185 mV/A e um erro de $\pm 1,5\%$ a 25 °C (Allegro MicroSystems, 2013). O produto entre tensão e corrente indica a potência elétrica instantânea demandada para o sistema de agitação.

A energia elétrica consumida (Wh) para os dois sistemas de agitação foi calculada com a Equação 3, que considera a potência instantânea de duas amostras subsequentes para determinar a energia consumida desse intervalo de tempo.

$$Energia Consumida = \sum_2^n \frac{(P_n + P_{n-1})(t_n - t_{n-1}) \cdot 3600}{2} \quad (3)$$

Em que:

n, número da amostragem, adimensional;

P, potência instantânea de cada amostragem, W; e

t, momento da amostragem, segundos.

3.3. Avaliação da produtividade dos cultivos

A curva de crescimento da cultura foi monitorada diariamente pela densidade óptica a um comprimento de onda de 680 e 750 nm, medida em espectrofotômetro (Thermo Scientific, Multiskan GO, Alemanha). Para a coleta de dados (Figura 3), amostras de 10 mL foram retiradas de forma aleatória em cada tanque e distribuídas em três béqueres de 30 mL, minimizando erros amostrais devido a dispersão das cianobactérias nos tanques. As amostras foram homogêneas. Mensurou-se o branco da microplaca e posteriormente com auxílio de uma micropipeta, 5 amostras de 200 μ L foram coletadas de cada béquer e inseridas na microplaca para análise, com a finalidade de representar o conteúdo de cada béquer e minimizar os erros devido ao processo de pipetagem.

Figura 3 – Procedimentos para avaliação da produtividade: (a) Coleta da amostra nos tanques; (b) Amostras de 30 mL de cada tanque; (c) Medição de pH; (d) Amostras homogeneizadas e preenchimento da microplaca; (e) Microplaca pronta para análise; e (f) Leitura no espectrofotômetro



(a)



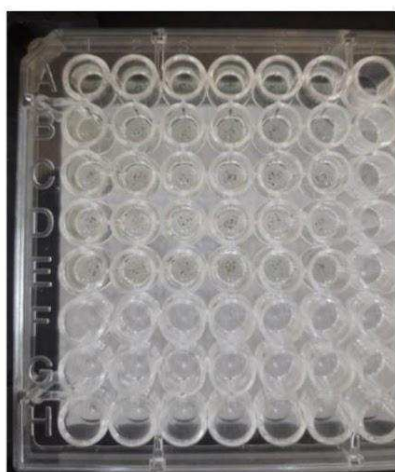
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autoria própria

As amostras de 30 mL também foram utilizadas para determinar a concentração inicial e final de biomassa (g.L^{-1}) dos cultivos, por meio do método gravimétrico. Dessa forma, 20 mL do conteúdo dos béqueres foram filtrados em membranas com porosidade de $0,22 \mu\text{m}$, as quais foram previamente secas em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante. As membranas foram então retiradas e, imediatamente, colocadas em dessecador para resfriar. Após o resfriamento, as membranas foram pesadas, e a massa seca foi determinada, subtraindo-se o valor da massa da membrana.

A biomassa foi coletada no dia final dos cultivos, sendo concentrada e em seguida filtrada por gravidade com membrana de $100 \mu\text{m}$.

O teor de cinzas foi determinado seguindo a metodologia proposta por APHA (2017). A composição bioquímica da biomassa foi caracterizada por lipídios, proteínas e carboidratos. Os teores de lipídios totais foram mensurados pelo método gravimétrico proposto por Schmid-Bondzynski-Ratzlaff (INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION, 1987). As proteínas solúveis foram determinadas após multiplicar o teor de nitrogênio pelo fator 5. O teor de nitrogênio foi determinado conforme metodologia proposta por APHA (2017). Os carboidratos foram quantificados como a porcentagem restante da base seca.

3.4. Avaliação da irradiação solar, temperatura e umidade

Dois piranômetros CMP3 da *Kipp & Zonen* foram utilizados para medição da irradiação solar global interna e externa à casa de vegetação, que é revestida com material semitransparente. Esses piranômetros possuem um elemento sensor de termopilha de 64 junções, que gera um sinal de tensão proporcional à irradiação com sensibilidade de $12,15 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ e $12,09 \mu\text{V/W.m}^{-2}$ (Kipp & Zonen, 2016).

Devido a essa sensibilidade, o módulo de aquisição de dados M-7018Z da ICP DAS foi empregado, uma vez que possui uma resolução de amostragem de 16 bits. Dois canais foram utilizados para leitura dos piranômetros, configurados para leitura na faixa de -15 a 15 mV . Além disso, utilizou-se o módulo LR-7520, que é um conversor bidirecional RS-232 para RS-485. Os dados foram lidos e armazenados

por meio de comunicação serial implementada em um programa em Python, a cada 10 segundos.

Por meio da média dos dados de irradiação global horizontal coletados, foi possível estimar a média da radiação total incidente em um plano com ângulo de inclinação igual a latitude (Equação 3).

$$\overline{G}_{\beta} = \overline{R} \cdot \overline{G} \quad (3)$$

Em que:

\overline{G}_{β} , média mensal da irradiação total em uma superfície inclinada, W.m^{-2} ;

\overline{R} , relação de proporcionalidade entre as médias das irradiações, adimensional; e

\overline{G} , média mensal da irradiação global no plano horizontal, W.m^{-2} .

A razão entre essas irradiações pode ser estimada considerando a componente direta, difusa e refletida, de acordo com o modelo isotrópico de Liu e Jordan (1963) estendido por Klein (1977). Considerando os dados disponibilizados pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB), em conjunto com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), foi possível estimar o valor de \overline{R} para o mês de abril em uma superfície inclinada com ângulo igual a latitude na cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil (aproximadamente 21°) (CRESESB, 2025).

Dessa forma, o valor de irradiação foi corrigido para cada amostragem e, por meio da Equação 4, foi possível calcular as horas de sol pleno (HSP), que representam por equivalência a quantidade de horas diárias que a irradiação permaneceria em 1000 W.m^{-2} , de forma a atingir a mesma energia medida por metro quadrado.

$$HSP = \sum_2^n \frac{(G_n + G_{n-1})(t_n - t_{n-1})}{2 \cdot 1000} \quad (4)$$

Em que:

n, número da amostragem, adimensional;

G , irradiação instantânea total na superfície inclinada (21°) para cada amostragem, $W.m^{-2}$; e
 t , momento da amostragem, segundos.

A temperatura e umidade relativa do ar (UR) foram medidas utilizando sensores DHT22/AM2302 (AOSONG, 2025). Esse é um sensor que apresenta saída digital, operando na faixa de -40 a 80 °C com precisão de $\pm 0,5$ °C para medição de temperatura e de 0 a 100% com precisão de $\pm 2,0\%$ para medições de umidade. Os resultados foram obtidos para área externa e interna à casa de vegetação. Em cada área foram instalados dois sensores, abrigados da exposição direta à luz solar, e considerou-se a média dos valores obtidos a cada 10 segundos.

3.5. Dimensionamento dos módulos fotovoltaicos

Os dados de consumo de energia elétrica coletados para os tanques foram confrontados com a curva de irradiação solar nos períodos de cultivo. Adaptando o método de mês crítico apresentado por Pinho e Galdino (2014), foi possível dimensionar os geradores FV otimizados de forma a suprir a demanda energética para manter o sistema de agitação de cada tanque. A energia elétrica consumida diariamente foi calculada conforme a Equação 5, considerando a eficiência global da bateria igual a 85% e a eficiência do inversor igual a 97% .

$$E = \frac{E_{CC}}{\eta_{bat}} + \frac{E_{CA}}{\eta_{bat}\eta_{inv}} \quad (5)$$

Em que:

E_{CC} , energia consumida diariamente em CC, $Wh.dia^{-1}$;

E_{CA} , energia consumida diariamente em CA, $Wh.dia^{-1}$;

η_{bat} , eficiência global da bateria, %; e

η_{inv} , eficiência do inversor, %.

Dessa forma, sabendo a quantidade de horas de sol pleno, foi possível determinar a potência de módulos FV para cada dia do cultivo (Equação 6). Os

valores padrões para os fatores de redução foram aplicados visando caracterizar a redução de potência dos módulos FV (F_{R1}) nos demais componentes do gerador (F_{R2}), sendo o F_{R1} igual a 85% e o F_{R2} igual a 90% (Pinho; Galdino, 2014).

$$P_i = \sum_{i=1}^9 \left(\frac{E_i}{HSP_i \cdot F_{R1} \cdot F_{R2}} \right) \quad (6)$$

Em que:

P_i , potência de pico do módulo FV para o dia i , W;

E_i , energia consumida no dia i , Wh.dia⁻¹;

HSP_i , quantidade de horas de sol pleno no dia i , h.dia⁻¹;

F_{R1} , fator de redução da potência dos módulos FV, ocasionado por acúmulo de sujeira, degradação física ao longo do tempo e tolerância decorrente do processo de fabricação, %; e

F_{R2} , fator de redução da potência devido a perdas nos demais componentes do sistema, %.

Outra variável considerada foi a temperatura do módulo FV nas condições do cultivo. Uma vez que a temperatura ambiente foi monitorada, pode-se determinar o valor de potência corrigido devido às perdas por temperatura. Por meio da Equação 7, o coeficiente térmico do módulo FV (K_t) foi calculado, uma vez que, o valor da temperatura nominal das células do módulo FV (NOCT) é fornecida pelos fabricantes para as condições de irradiação de 800 W.m⁻², temperatura ambiente de 20 °C, AM de 1,5 e vento de 1 m/s (Pinho; Galdino, 2014).

$$K_t = \frac{NOCT-20}{800} \quad (7)$$

Em que:

K_t , coeficiente térmico do módulo FV, °C/W.m⁻²;

$NOCT$, temperatura nominal das células do módulo FV, °C;

20, temperatura ambiente nominal de operação da célula na condição de teste NOCT, °C; e

800, irradiação considerada na condição de teste NOCT, W.m⁻².

Assim, utilizando a Equação 8, foi possível determinar a temperatura do módulo FV (Pinho; Galdino, 2014), para as condições medidas durante o cultivo.

$$T_{Módulo_i} = T_{ambiente_i} + K_t \cdot \overline{G}_i \quad (8)$$

Em que:

$T_{Módulo_i}$, temperatura média do módulo FV no dia i, °C;

$T_{ambiente_i}$, temperatura ambiente média no dia i, °C;

\overline{G}_i , irradiação média no dia i, W.m⁻²; e

K_t , coeficiente térmico do módulo FV, °C/W.m⁻².

Assim, o valor da potência de pico de módulo FV corrigida considerando a temperatura durante o cultivo pode ser calculada de acordo com Equação 9 (Pinho; Galdino, 2014).

$$P_c = \max_{i=1}^9 \left\{ P_i \left[1 - \gamma \left(T_{Módulo_i} - 25 \right) \right] \right\} \quad (9)$$

Em que:

P_c , potência de pico de módulo FV necessária para um cultivo corrigida devido ao efeito da temperatura, W;

P_i , potência de pico do módulo FV na STC, W;

γ é o coeficiente de temperatura relativo à potência, %/°C; e

$T_{Módulo_i}$, temperatura do módulo FV no dia i, °C.

Analisando a folha de dados dos módulos JKM610N-78HL4-BDV (Jinko Solar, 2022), CS7N-670MB-AG (Canadian Solar, 2024), JAM72S42 645/LR (JA Solar,

2025) e SS-620-66MDH-G11(T) (Sunova Solar, 2024), observou-se que o valor médio para a NOCT foi de 44 °C e γ foi de -0,31 %/°C, sendo esses valores adotados nesta pesquisa.

Pinho e Galdino (2014) também propuseram uma metodologia de dimensionamento do banco de baterias. Nessa metodologia, a energia consumida (E_i) foi determinada considerando o maior valor (valor crítico) obtido durante os cultivos. Nessa pesquisa, considerou-se a tensão do banco de baterias de 12 V, uma autonomia de 2 dias (no Brasil geralmente considera-se o valor no intervalo de 2 a 4 dias) e profundidade de descarga de 30% durante o período de autonomia. Dessa forma, com a Equação 10 é possível calcular a capacidade do banco de baterias para o regime de descarga em 20 horas.

$$CBB_{C20} = \frac{\max_{i=1}^9 (E_i) \cdot N}{P_d \cdot V_{BB}} \quad (10)$$

Em que:

CBB_{C20} , capacidade do banco de baterias em regime de descarga em 20 horas, Ah;

E_i , energia consumida no dia i, Wh.dia⁻¹;

N, tempo de autonomia do sistema, dia;

P_d , máxima profundidade de descarga da bateria, %; e

V_{BB} , tensão do banco de baterias, V.

O número de baterias em série e em paralelo pode ser determinado com as Equações 11 e 12 (Pinho; Galdino, 2014), respectivamente. Nesse estudo, considerou-se uma bateria de 12 V e 220 Ah em regime C20, o que possibilitou o cálculo do número de baterias totais do banco de baterias, por meio do produto entre o número de baterias em série e o número de baterias em paralelo.

$$NBS = \frac{V_{BB}}{V_{Bateria}} \quad (11)$$

$$NBP = \frac{CBB_{C20}}{CBateria_{C20}} \quad (12)$$

Em que:

NBS, número de baterias em série, adimensional;

V_{BB} , tensão do banco de baterias, V;

$V_{Bateria}$, tensão da bateria utilizada, V;

NBP, número de baterias em paralelo, adimensional;

$CBateria_{c20}$, capacidade da bateria em regime de descarga em 20 horas, Ah; e

CBB_{c20} , capacidade do banco de baterias em regime de descarga em 20 horas, Ah.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Consumo de energia elétrica nos cultivos

A energia elétrica consumida durante os cultivos por cada tanque é apresentada na Tabela 1. Observa-se que o consumo total no *mixing-board* representou 5% do consumo total no *raceway*.

Tabela 1 – Consumo de energia para a agitação dos tanques durante os cultivos

	<i>Mixing-board</i>		<i>Raceway</i>	
	Energia Total (kWh)	Energia Média (Wh/dia)	Energia Total (kWh)	Energia Média (Wh/dia)
Cultivo 1	1,10	121,9 ± 4,32	19,25	2.138,83 ± 38,99
Cultivo 2	1,02	113,63 ± 3,67	20,50	2.277,91 ± 34,73
Cultivo 3	1,09	121,59 ± 3,60	20,31	2.256,73 ± 25,58
Média (kWh)	1,07 ± 0,03		20,02 ± 0,55	

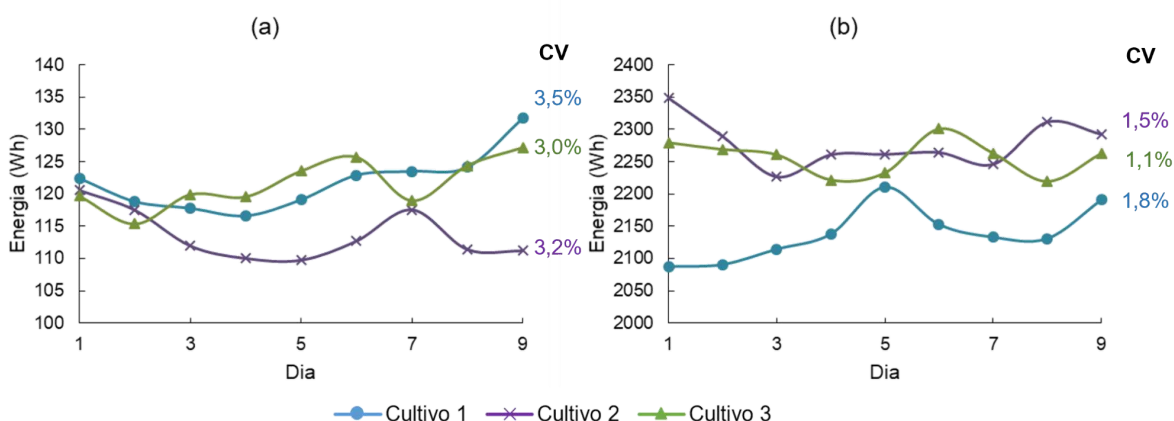
Fonte: Autoria própria

Ao analisar os valores diários, o tanque *mixing-board* teve um consumo de 0,12 kWh/dia, enquanto o *raceway* 2,22 kWh/dia. Yadav, Debey e Sen (2020), utilizaram um tanque *raceway* para cultivo de *Chlorella vulgaris* e observaram um consumo de 4,25 kWh/dia, o que mostra que os valores de demanda energética são influenciados significativamente pelas características geométricas dos tanques e dos agitadores. Campos *et al.* (2025) investigaram os efeitos de diferentes velocidades de rotação, número de pás e ângulo de distribuição geométrica no consumo de energia e desempenho hidrodinâmico em um protótipo do tanque *raceway* (46,10 litros) e observaram que quanto maior a quantidade de pás e velocidade, maior a potência instantânea. Dessa forma, outro aspecto a ser analisado é a razão entre a energia total consumida e o volume, que para o *mixing-board* foi de 0,27 Wh.L⁻¹,

enquanto para o *raceway* foi de 6,46 Wh.L⁻¹. Isso indica que considerando a capacidade volumétrica dos tanques, o consumo de energia elétrica por litro do *mixing-board* foi 96% menor do que no *raceway*.

Os consumos de energia elétrica diários (Figura 4) foram analisados, com a finalidade de verificar a existência de diferença estatística entre os cultivos. Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variância foram verificados, por meio do teste de *Shapiro-Wilk* e *Levene*, respectivamente. A análise de variância (ANOVA) indicou, para os dois tanques, que pelo menos um cultivo apresentou diferença significativa em relação aos demais (p-valor < 0,05). Aplicando o teste de *Tukey* constatou-se que o consumo de energia no cultivo 2 foi estatisticamente diferente dos demais para o *mixing-board*, enquanto para o *raceway* isso aconteceu para o cultivo 1.

Figura 4 – Consumo de energia diário durante os cultivos para (a) *mixing-board* e (b) *raceway*



Fonte: Autoria própria

Nota: Coeficiente de Variação (CV).

As flutuações nos valores diários podem ser explicadas por variações nos valores de tensão, uma vez que a tensão do *mixing-board* está relacionada à saída do controlador de carga e, no *raceway*, às condições da rede de energia. Além disso, no *mixing-board*, o número de deslocamentos diários não foi igual todos os dias, visto que esse deslocamento depende da dinâmica de todo o sistema, bem como da posição inicial do agitador às 6:00. Cada ciclo desse agitador corresponde a um consumo de aproximadamente 2,2 Wh. No Apêndice A é possível visualizar as

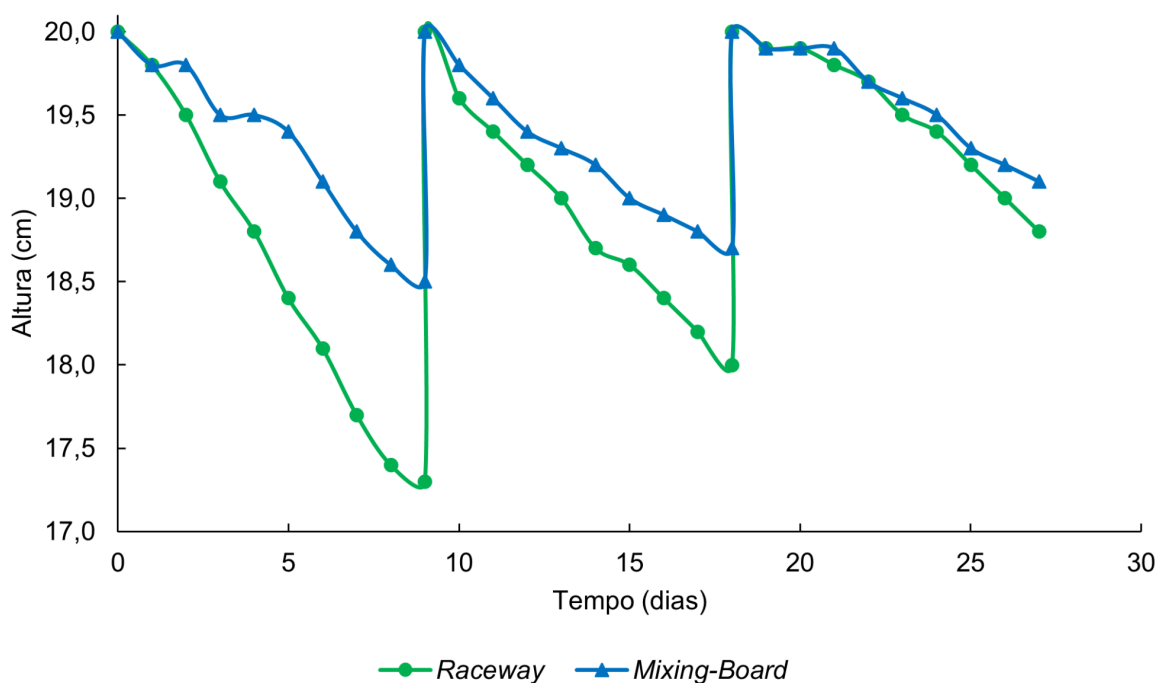
curvas de potência e tensão elétrica do agitador do *mixing-board* no dia 05/04/2025 e do *raceway* no dia 14/04/2025.

Outra observação ao analisar os dados do motor de indução trifásico é o baixo fator de potência. Durante os cultivos, o fator de potência médio foi de $14,52 \pm 0,55$ %, indicando que grande parte da potência solicitada da rede não estava sendo convertida em trabalho. Isso indica que esse motor utilizado na planta piloto do laboratório encontra-se superdimensionado, possibilitando melhorias futuras no agitador.

A potência elétrica demandada para o agitador do tanque *raceway* por volume foi de 60 W.m^{-3} e para o *mixing-board* foi de $2,48 \text{ W.m}^{-3}$. Inostroza *et al.* (2021), ao analisarem diferentes velocidades de rotação de um agitador com 10 pás e profundidade do cultivo de 0,2 metros, observaram um consumo de energia por volume de 10 W.m^{-3} a 14 rpm e 40 W.m^{-3} a 20 rpm. Mendoza *et al.* (2013) também estudaram o cultivo com profundidade de 0,2 metros e observaram um valor que dependia da velocidade e ficava na faixa entre 1,5 e $8,4 \text{ W.m}^{-3}$. Dessa forma, fica evidente a ampla possibilidade de melhorias no agitador *raceway* utilizado e o baixo consumo por volume alcançado por meio do método de agitação do *mixing-board*.

As alturas dos cultivos foram monitoradas diariamente e as curvas podem ser observadas na Figura 5. Conforme esperado, nota-se que a altura vai reduzindo durante o cultivo devido a evaporação natural nos tanques, uma vez que não houve reposição da água nos meios de cultura.

Figura 5 – Nível do líquido dos tanques durante os cultivos



Fonte: Autoria própria

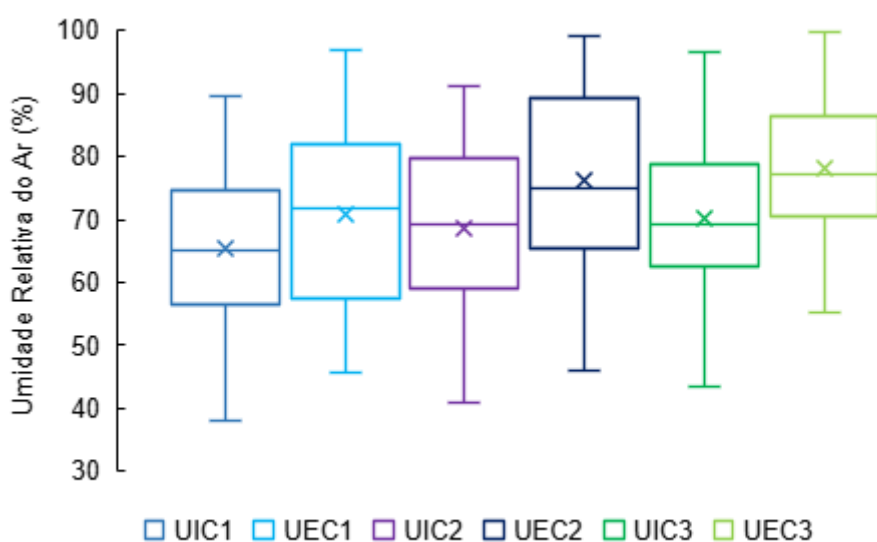
Uma análise entre o consumo de energia diário (Figura 4) e do nível dos tanques (Figura 5) não possibilitou a observação de correlação entre essas grandezas (*raceway*: 0,22 e *mixing-board*: -0,08). Isso indica que diferentes níveis induzem diferentes comportamentos hidrodinâmicos nos tanques. Mendoza *et al.* (2013) também constataram esse comportamento, onde profundidades de 10, 15 e 30 cm resultaram em um consumo de energia específico superior do que com uma profundidade de 20 cm. Alavianghavanini, Moheimani e Bahri (2024) verificaram que, otimizando a profundidade do meio de cultivo com base nas condições climáticas de cada época do ano, torna-se possível uma redução de 16% no custo de produção de microalgas.

Analisando o volume de água durante os cultivos é possível confirmar que a evaporação natural no tanque *raceway* foi maior que no *mixing-board*. A quantidade em litros de água evaporada no *raceway* foi 39,5% maior no cultivo 1, 19,2% no cultivo 2 e 3,3% no cultivo 3 em relação ao outro tanque. Isso era esperado pelo aumento da área da superfície do tanque e turbulência causada pela rodá de pás, que amplifica os efeitos da evaporação (Quiroz *et al.*, 2021).

4.2. Dados climáticos durante os cultivos

Os dados de distribuição da UR são apresentados na Figura 6. A UR interna no cultivo 1 teve o menor valor médio $65,4 \pm 11,8 \%$, enquanto o maior valor ($70,1 \pm 10,5 \%$) ocorreu no cultivo 3. Além disso, o valor de UR no interior da casa de vegetação é, em média, 10% menor do que na área externa.

Figura 6 – Distribuição de umidade relativa do ar interna e externa à casa de vegetação durante os períodos de cultivo

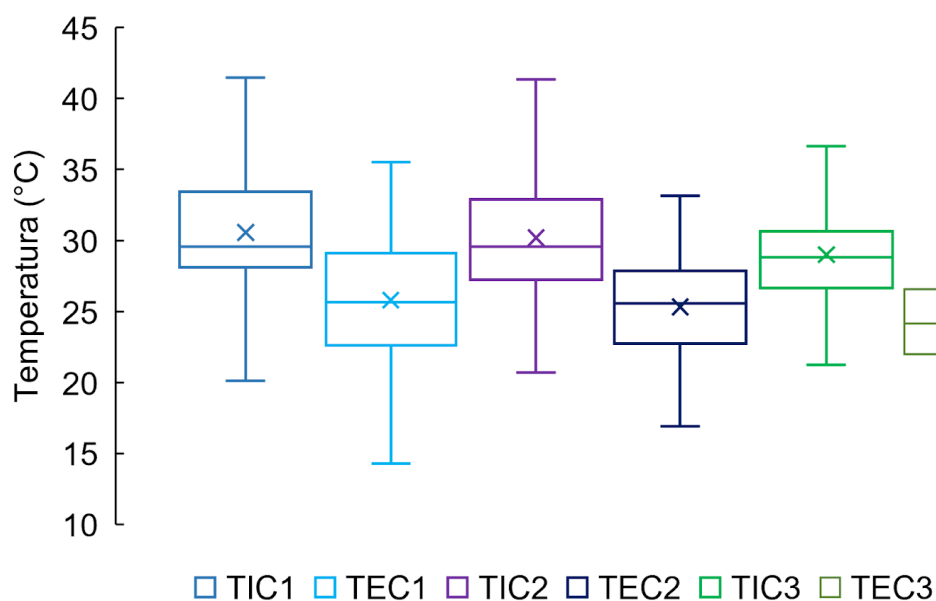


Fonte: Autoria própria

Nota: UIC1 - UR interna cultivo 1; UEC1 - UR externa cultivo 1; UIC2 - UR interna cultivo 2; UEC2 - UR externa cultivo 2; UIC3 - UR interna cultivo 3; e UEC3 - UR externa cultivo 3.

A distribuição de temperatura durante os cultivos é apresentada na Figura 7. Analisando os dados, verifica-se que a temperatura dentro da casa de vegetação foi 18% superior à temperatura externa. Não se observaram diferenças significativas entre a razão temperatura interna por temperatura externa, o que mostra que, independente da distribuição dos dados ou amplitude térmica, essa proporção é pouco afetada. Também é possível verificar que a menor amplitude térmica ocorreu no cultivo 3, enquanto a maior dispersão dos dados ocorreu no cultivo 1.

Figura 7 – Distribuição de temperatura interna e externa à casa de vegetação durante os períodos de cultivo



Fonte: Autoria própria

Nota: TIC1 - Temperatura interna cultivo 1; TEC1 - Temperatura externa cultivo 1; TIC2 - Temperatura interna cultivo 2; TEC2 - Temperatura externa cultivo 2; TIC3 - Temperatura interna cultivo 3; e TEC3 - Temperatura externa cultivo 3.

Analisando as Figura 5, 6 e 7, é possível notar que os cultivos que tiveram maiores temperaturas e menores índices de UR foram os que a evaporação dos tanques foi mais acentuada. A relação entre essas grandezas já é conhecida, no entanto analisar a evaporação também depende de fatores como temperatura da superfície da água, velocidade do vento e pressão de vapor (Alavianghavanini; Moheimani; Bahri, 2024; Quiroz, *et al.*, 2021). Dessa forma, estudos mais detalhados com essas variáveis podem ser realizados, uma vez que a reposição da quantidade de água evaporada pode ser necessária, podendo impactar na disponibilidade de recursos hídricos em cultivos de grande escala.

No Apêndice B é possível observar informações complementares sobre a temperatura e UR durante todos os dias de cultivo. De forma geral, ainda que considerando dados diários, não houve diferença significativa entre os valores dessas grandezas durante os cultivos.

Outro aspecto a ser observado é a quantidade de horas de sol pleno na área externa para cada cultivo (Tabela 2), que indica a disponibilidade do recurso energético proveniente do Sol. Durante o cultivo 1 e 2, o valor acumulado de HSP foi superior a 40 horas. Esse valor foi 43% maior do que no cultivo 3, devido às condições climáticas do período.

Tabela 2 – Horas de sol pleno para a área externa à casa de vegetação durante os cultivos

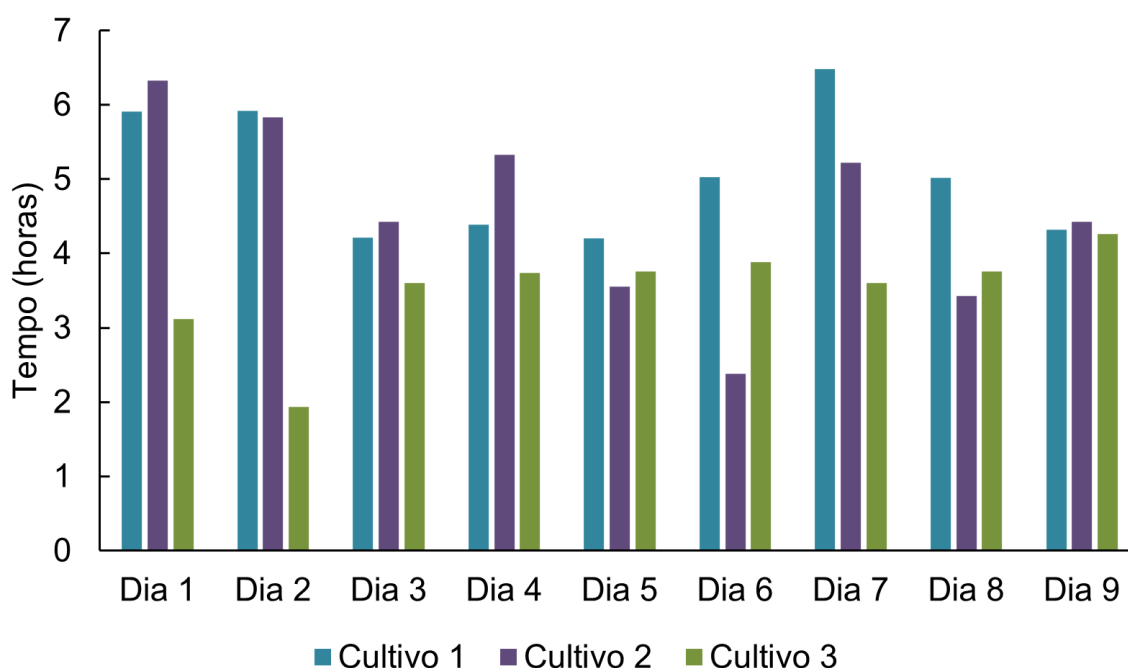
	HSP Total	HSP Médio	HSP Mínimo	HSP Máximo
Cultivo 1	45,49	5,05 ± 0,81	4,20	6,48
Cultivo 2	40,91	4,55 ± 1,19	2,38	6,32
Cultivo 3	31,64	3,52 ± 0,63	1,93	4,26

Fonte: Autoria própria

De acordo com os dados mais recentes do Cresesb (2025), o valor médio para HSP no mês de abril (1999 a 2015) para a cidade de Viçosa é de 4,83 horas (plano com inclinação igual a latitude). Os dados medidos indicam o valor médio de 4,37 horas, indicando uma diferença inferior a 10% em comparação com os dados históricos da região.

Embora tenha acumulado um valor de HSP total alto, o cultivo 2 teve as maiores variações entre os dias do cultivo. Dessa forma, ao analisar a Figura 8, fica claro que houve dias em que o HSP diário no cultivo 2 foram superiores ao cultivo 1, bem como em outros foram inferiores ao cultivo 3. Isso pode ser explicado novamente pelas condições do tempo, que possibilitou dias ensolarados e chuvosos durante esse período.

Figura 8 – Horas de sol pleno na área externa em todos os dias de cultivo



Fonte: Autoria própria

A irradiação global incidente dentro da casa de vegetação também foi mensurada, com os respectivos cálculos de HSP (Apêndice C). Devido a cobertura com material semitransparente a HSP total é em média 39% menor do que na área externa. Dessa forma, as condições climáticas dos cultivos de cianobactérias têm temperaturas mais elevadas e menor incidência de radiação solar, se comparado às condições externas utilizadas para o dimensionamento dos módulos FV. Bennett, Turn e Chan (2014) propuseram uma metodologia para avaliar a produção de algas em lagoas abertas e adotam o valor irradiação de $4,65 \text{ kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (4,65 horas) como referência para que seja possível a manutenção de altas taxas de crescimento. De fato, a luz é essencial para a fotossíntese e fixação do carbono em biomassa, sendo um fator limitante tanto em baixas incidência quanto em altas, ocorrendo a fotoinibição (Bhola *et al.*, 2014).

4.3. Módulos FV e banco de baterias

Considerando o cenário mais crítico, associando as HSP, temperatura, irradiação média e consumo de energia elétrica diário, houve coincidência com os dias que tiveram as menores HSP (para o cultivo 1, 2 e 3 foram os dias 5, 6 e 2 respectivamente). Isso aconteceu principalmente devido aos valores de consumo diários e em menor proporção devido à correção por temperatura.

Os valores encontrados de potência de pico máxima para cada cultivo são apresentados na Tabela 3. Um sistema FV para manutenção da agitação do cultivo no tanque *raceway* utilizado precisa de 19 vezes mais potência de pico do que para manter no tanque *mixing-board*.

Tabela 3 – Potência de pico de módulos FV necessária para cada cultivo

	Potência de Pico (W_p)		
	Cultivo 1	Cultivo 2	Cultivo 3
<i>Mixing-board</i>	54,83	47,81	52,62
<i>Raceway</i>	966,26	990,39	982,22

Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de encontrar a área equivalente desse sistema FV, o valor comercial de $60 W_p$ foi utilizado para o *mixing-board* (1 módulo FV) e o de $1000 W_p$ para o *raceway* (2 módulos FV). A fabricante ZTROON possui uma linha de módulos FV de baixa potência. O modelo ZTP-060M possui potência nominal de $60 W$ e ocupa uma área de $0,34 m^2$ (ZTROON, 2024). Já a fabricante Canadian Solar, possui o modelo CS3Y-500MS, com potência nominal de $500 W$, ocupando uma área de $2,36 m^2$ (Canadian Solar, 2021). Assim, o sistema FV para o tanque *raceway*, utilizado neste estudo, ocuparia uma área 14 vezes maior do que o sistema FV empregado no *mixing-board*. Além disso, para o tanque *raceway* seria necessária uma área equivalente a 31,5% da área total, enquanto no *mixing-board* seria inferior a 2%. Hamedani *et al.* (2024) observaram que integrar a energia solar fotovoltaica sobre um tanque *raceway* em pequena escala proporcionou melhor

eficiência no uso do solo, minimizando a evaporação, reduzindo a temperatura do cultivo e auxiliando na manutenção do pH.

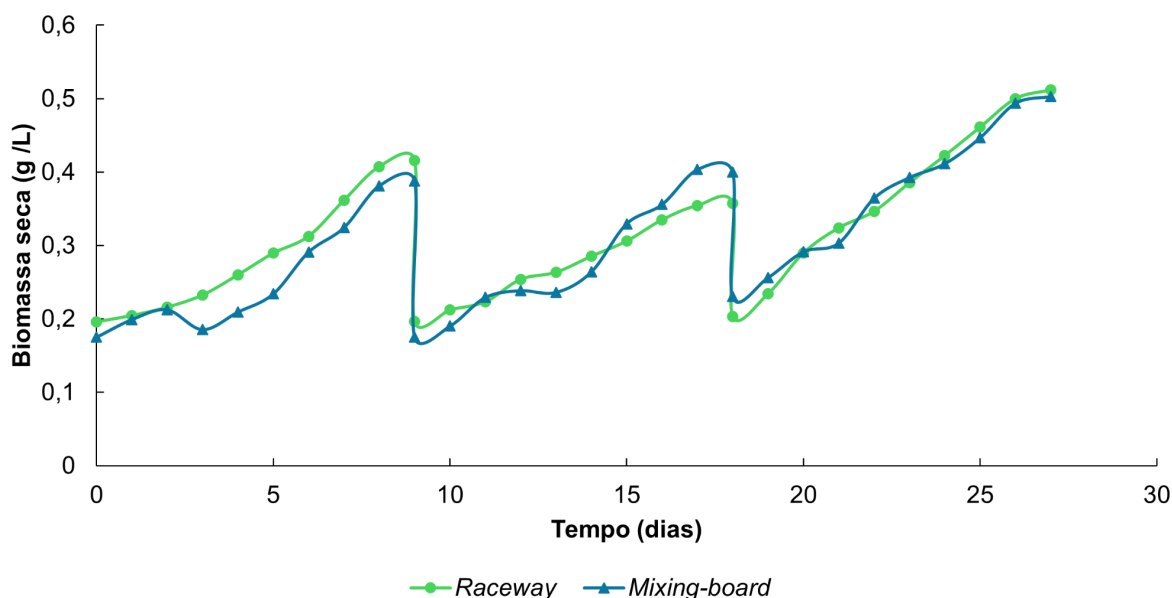
Constatou-se que o tanque *mixing-board* pode ter sua agitação mantida apenas com a instalação de uma bateria, enquanto para o tanque *raceway* são necessárias 7 vezes mais, conectando todas em paralelo.

4.4. Produção de biomassa

A avaliação do desempenho dos sistemas de cultivo *raceway* e *mixing-board* também foi realizada analisando o crescimento e à eficiência dos cultivos de cianobactérias para a produção de biomassa. Foram avaliadas a concentração final de biomassa, a produtividade, a taxa específica de crescimento e o consumo específico de energia elétrica.

De acordo com as curvas obtidas por meio das leituras diárias no espectrofotômetro e a biomassa seca inicial e final, foi possível estimar a biomassa seca durante os dias de cultivo (Figura 9).

Figura 9 – Estimativa de biomassa seca durante os cultivos

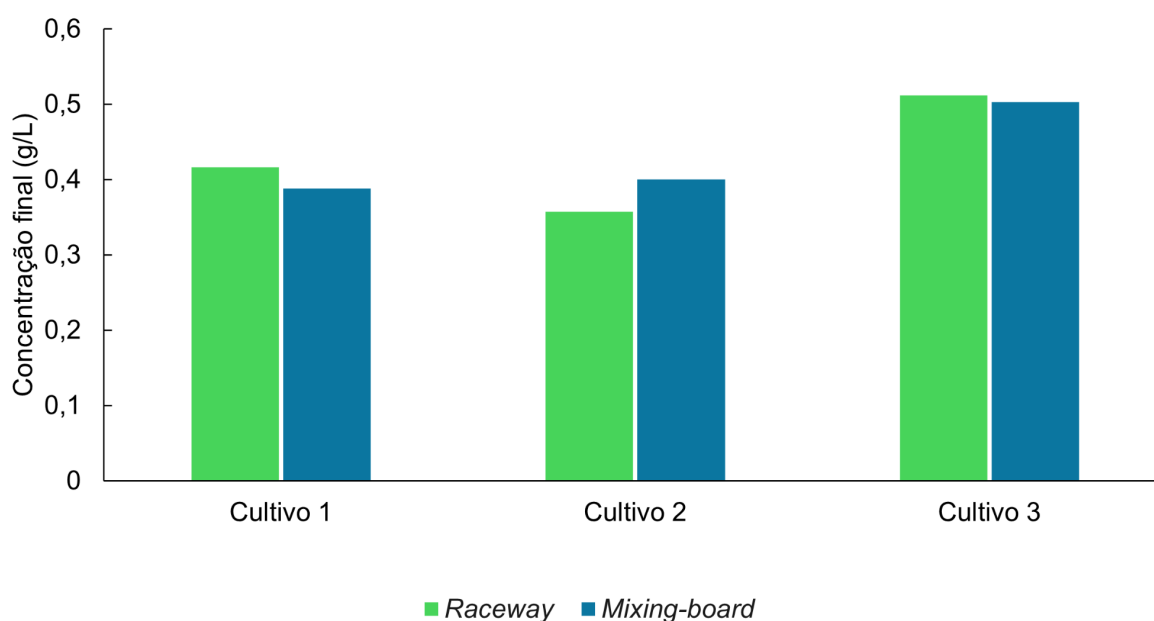


Fonte: Autoria própria

A ANOVA indicou que não houve diferença significativa no crescimento da biomassa no tanque *raceway* para os três cultivos (p -valor = 0,0536), valor ligeiramente superior ao nível de significância de 5%. Para o *mixing-board*, há uma diferença significativa no crescimento médio de biomassa (p -valor = 0,0224) e o teste de Tukey indicou que essa diferença ocorreu, pois o crescimento no cultivo 3 foi significativamente maior que no cultivo 1. Embora tenha ocorrido essa diferença, ao utilizar o Teste t para comparar o crescimento de biomassa dos tanques, observou-se que não houve diferença significativa (p -valor > 0,05) entre o *raceway* e o *mixing-board*.

A concentração final de biomassa (Figura 10) teve uma diferença média não significativa entre os sistemas. O *raceway* apresentou uma média de $0,428 \pm 0,078$ g/L, enquanto o *mixing-board* alcançou $0,430 \pm 0,063$ g/L. As concentrações de biomassa normalmente são pequenas, geralmente na faixa 0,5 a 1 g/L (Kumar *et al.*, 2015; Pawar, 2016; Skifa *et al.*, 2025). Observa-se ainda uma similaridade nos valores de concentração final entre os tanques. Isso sugere que ambos os sistemas de cultivo foram igualmente eficazes na produção de biomassa ao final dos cultivos, apesar das diferenças nas suas configurações hidrodinâmicas.

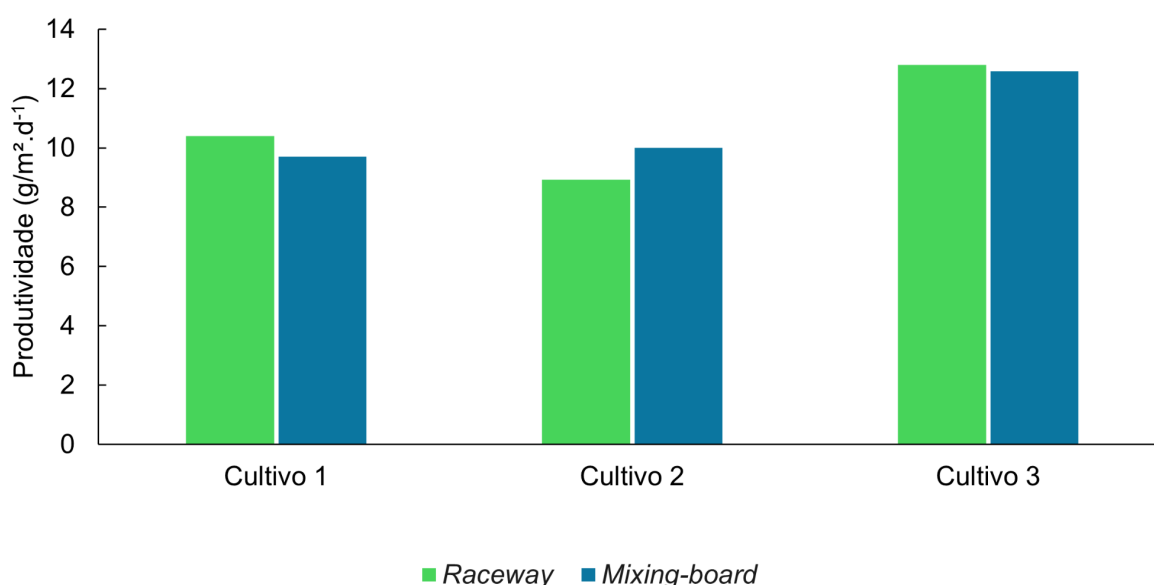
Figura 10 – Concentração final de biomassa nos tanques para todos os cultivos



Fonte: Autoria própria

O tanque *raceway* apresentou média de produtividade diária de $10,71 \pm 1,96$ g m⁻² dia⁻¹, enquanto o *mixing-board* $10,76 \pm 1,59$ g m⁻² dia⁻¹, o que equivale a um valor superior a 39 t ha⁻¹ ano⁻¹ para ambos os tanques (Figura 11). A produtividade dos dois sistemas foram praticamente idênticas, com variação dentro da margem de erro experimental. Isso reforça a ideia de que, apesar das diferenças no modo de agitação, os dois sistemas têm potencial similar para produção diária de biomassa por metro quadrado empregado para o sistema de cultivo.

Figura 11 – Produtividade diária de biomassa nos tanques para todos os cultivos

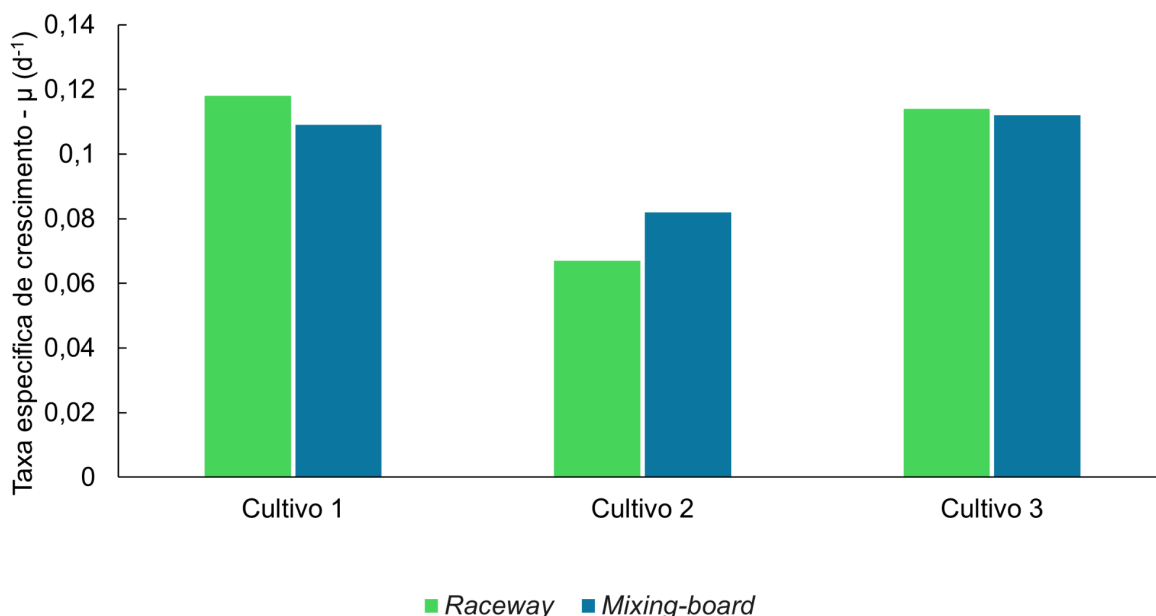


Fonte: Autoria própria

No cultivo 3 observa-se os maiores valores de concentração final e produtividade em ambos os sistemas, sugerindo condições mais favoráveis ao crescimento, possivelmente relacionadas às condições mais adequadas ao metabolismo das cianobactérias. No entanto, aumentar a produtividade é um desafio para cultivos em tanques abertos. Kumar *et al.* (2015) verificaram que os valores relatados na literatura, em geral, o valor fica na faixa entre 20 a 110 t ha⁻¹ ano⁻¹

Na Figura 12 é possível observar a taxa específica de crescimento, que foi em média de $0,100 \pm 0,028$ d⁻¹ no *raceway* e $0,101 \pm 0,017$ d⁻¹ no *mixing-board*. Embora o *mixing-board* tenha apresentado menor desvio padrão, o que indica uma taxa de crescimento mais semelhante entre os cultivos, a média geral foi praticamente igual entre os dois sistemas.

Figura 12 – Taxa específica de crescimento nos tanques para todos os cultivos



Fonte: Autoria própria

No cultivo 2, os menores valores de taxa específica de crescimento foram observados, em ambos os sistemas, com destaque para o valor de $0,067 d^{-1}$ do tanque *raceway*, o menor valor registrado. Tal redução pode ser atribuída a fatores ambientais adversos, como maior variação na intensidade de radiação solar ou variações térmicas durante esse período, que são determinantes para a atividade fotossintética e, conseqüentemente, para a taxa de crescimento de cianobactérias.

A concentração final de biomassa, produtividade e taxa de crescimento específico seguiram um padrão semelhante durante os cultivos. No estudo realizado por Vadiveloo e Moheimani (2018), que analisou o efeito da mistura contínua e diurna com diferentes profundidades em cultivos de *Nannochloropsis sp.*, isso também foi observado para concentração final de biomassa e a taxa de crescimento específico. No entanto, a produtividade apresentou comportamento diferente uma vez que compararam diferentes alturas de cultivo.

A composição da biomassa do cultivo 2 é apresentada na Tabela 4. Em média, o teor de cinzas e proteínas foram maiores em 10,8% e 11,2% respectivamente no tanque *raceway*, enquanto o percentual de lipídeos e carboidratos foram maiores no tanque *mixing-board* (15,3% e 3,3%

respectivamente). Entretanto, os valores ficaram dentro da margem de erro experimental, indicando não haver diferenças significativas, exceto para o teor de cinzas.

Tabela 4 – Composição da biomassa do cultivo 2

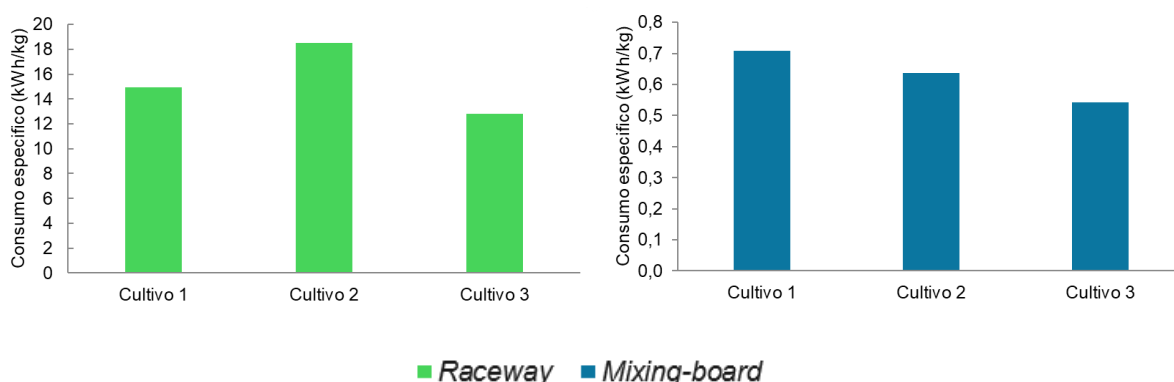
	<i>Raceway</i>	<i>Mixing-board</i>
Cinzas (% , base seca)	8,89 ± 0,08	8,02 ± 0,24
Lipídios (% , base seca)	9,08 ± 0,66	10,47 ± 0,84
Proteínas (% , base seca)	24,14 ± 2,85	21,70 ± 0,27
Carboidratos (diferença) (% , base seca)	57,89	59,81

Fonte: Autoria própria

A maior diferença entre os sistemas foi observada no consumo específico de energia (Figura 13). O *raceway* teve um consumo específico médio de $15,42 \pm 2,90$ kWh/kg, enquanto o *mixing-board* ficou em apenas $0,63 \pm 0,08$ kWh/kg. Dessa forma, observou-se que o *raceway* utilizado consumiu, em média, 24 vezes mais energia elétrica por kg de biomassa produzida. Esse resultado destaca a elevada demanda energética da roda de pás em sistemas tradicionais de *raceway*, especialmente quando operados de forma contínua. Por outro lado, o *mixing-board*, com sua movimentação intermitente e de baixa potência, demonstrou baixo consumo de energia em relação ao *raceway*.

Deprá *et al.* (2020) avaliaram o impacto ambiental de produtos comerciais à base de microalgas e cianobactérias por meio da avaliação do ciclo de vida. Para a produção de 1 kg de biomassa seca em tanque *raceway* para espécie *Chlorella vulgaris*, observaram um consumo específico de 2,7 kWh/kg, enquanto para espécie *Arthrospira platensis* esse valor é de 1,68 kWh/kg. Esses resultados reforçam a ideia de baixo consumo específico no tanque *mixing-board* e a necessidade de otimização no sistema de agitação do tanque *raceway* empregado.

Figura 13 – Consumo específico de energia elétrica para produção de biomassa



Fonte: Autoria própria

Alguns autores propuseram a implementação de sistemas de controle como alternativa para melhorar o consumo específico de energia. Zhu et al. (2022) apresentaram uma estratégia para diminuir o consumo de energia em cultivos em tanques abertos, controlando a velocidade das pás de acordo com a intensidade luminosa e temperatura, chegando a uma economia de 30% de energia sem perda de produtividade de biomassa. Entretanto, muitos fatores afetam a eficiência energética do sistema de cultivo e estudos considerando mais variáveis climáticas associadas à taxa de desenvolvimento do cultivo podem contribuir para que a racionalização do uso de energia em cultivos de microalgas seja cada vez mais eficiente.

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que, em termos de consumo de energia elétrica, o tanque *mixing-board* se destacou significativamente em comparação ao *raceway*. O consumo total de energia elétrica no *mixing-board* representou apenas 5% do consumo total do *raceway*, resultando em um consumo específico por volume 96% menor. Esses resultados refletem na necessidade de 19 vezes menos potência fotovoltaica, uma área ocupada de módulos fotovoltaicos 14 vezes menor e necessidade de 7 vezes menos baterias para manutenção da agitação autônoma no tanque *mixing-board* em relação ao tanque *raceway*. Embora as limitações deste estudo tenham acentuado essas diferenças nos valores, destaca-se o desempenho do modelo *mixing-board*, em termos de demanda energética para a agitação, uma vez que os valores são próximos aos observados na literatura para topologias de tanques abertos como o *raceway - paddle wheels*, sendo também uma alternativa sustentável para a produção de biomassa de microalgas e cianobactérias, especialmente associada ao uso de energia solar fotovoltaica dada a baixa necessidade de potência instalada e possibilidade de uso múltiplo da terra devido a pequena área ocupada.

Apesar das notáveis diferenças no consumo de energia elétrica e nas configurações hidrodinâmicas, ambos os sistemas de cultivo apresentaram resultados de crescimento e produtividade de biomassa similares. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na concentração final de biomassa ou na produtividade diária por metro quadrado entre os tanques. A taxa específica de crescimento também se manteve praticamente igual entre os dois sistemas. Essas observações sugerem que, independentemente do tipo de agitação e do consumo de energia elétrica associado, à capacidade geral de produção de biomassa é comparável entre os modelos.

Uma vez que houve diferenças significativas no consumo de energia elétrica e a capacidade de produção de biomassa foi similar entre os tanques, o valor do consumo específico de energia elétrica para a produção de um quilograma de biomassa foi 24 vezes menor no sistema *mixing-board* em comparação ao *raceway*.

Embora as condições climáticas tenham influenciado no crescimento da biomassa dos cultivos e taxa de evaporação durante os cultivos, não foi possível

verificar correlação entre os níveis dos tanques e os valores de consumo de energia elétrica diária para manutenção da agitação dos cultivos. Além disso, constatou-se que a taxa de evaporação no tanque *raceway* foi superior do que no *mixing-board*, indicando maior necessidade de água em casos em que se deseja manter o nível do cultivo constante.

Portanto, neste estudo, a principal distinção entre os tanques foi observada no consumo de energia elétrica e isso foi intensificado pelo superdimensionamento do motor de um dos agitadores. Contudo, não se observou um desempenho superior de crescimento ou produtividade de biomassa na comparação dos tanques, indicando que ambos os sistemas podem ser igualmente eficazes na produção geral de biomassa e a necessidade de melhorias para uma comparação equânime do consumo de energia elétrica para agitação dos tanques.

Estudos futuros podem ser executados para avaliar o desempenho de cada tipo de tanque em diferentes estações do ano, analisando o impacto da sazonalidade das condições de irradiação solar, temperatura, umidade relativa no crescimento da biomassa. Além disso, uma análise mais aprofundada pode ser feita sobre a intermitência de agitação nos tanques, permitindo uma otimização do consumo de energia por biomassa produzida em cultivos realizados em tanque *raceway* e *mixing-board*.

REFERÊNCIAS

- ABBASZADEH, M.; MALDONADO, S.; DE ALMEIDA, G. Changes in velocity distribution produced by paddle wheels in algae raceway ponds. **Algal Research**, p. 103454, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103454>. Acesso em: 10 maio 2024.
- ALAVIANGHAVANINI, A.; MOHEIMANI, N. R.; BAHRI, P. A. Process design and economic analysis for the production of microalgae from anaerobic digestates in open raceway ponds. **Science of The Total Environment**, v. 923, 171554, 1 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171554>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- ALLEGRO MICROSYSTEMS. **ACS712 : Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. 2013. [Datasheet - ACS 712]. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/205336/ALLEGRO/ACS712.html>. Acesso em: 24 mai. 2024.
- AOSONG. Temperature and humidity module AM2302 Product Manual. 2025. [Datasheet - DHT 22/AM2302]. Disponível em: https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-Temperature_and_Humidity_Sensor_Pro/res/AM2302-EN.pdf. Acesso em: 01 mai. 2024
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23th. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- BARBOZA-RODRÍGUEZ, R.; RODRÍGUEZ- JASSO, R. M.; ROSERO-CHASOY, G.; AGUADO, M. L. R.; RUIZ, H. A. Photobioreactor configurations in cultivating microalgae biomass for biorefinery. **Bioresource Technology**, v. 394, p. 130208, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130208>. Acesso em: 18 jun. 2024.
- BENNETT, M. C.; TURN, S. Q.; CHAN, W. Y. A methodology to assess open pond, phototrophic, algae production potential: A Hawaii case study. **Biomass and Bioenergy**, v. 66, p. 168-175, jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.016>. Acesso em: 1 jul. 2025.
- BHOLA, V.; SWALAHA, F.; KUMAR, R. R.; SINGH, M.; BUX, F. Overview of the potential of microalgae for CO2 sequestration. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 7, p. 2103-2118, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0487-6>. Acesso em: 8 mai. 2024.
- CAMPOS, G. M.; RENATO, N. S.; OLIVEIRA, V. H. L.; RODRIGUES, P. H. M.; MARTINS, M. A. Influence of paddle wheel geometry on hydrodynamic performance and energy consumption in microalgae cultivations in open raceway ponds. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-025-03168-8>. Acesso em: 4 de jun. 2025.

- CANADIAN SOLAR. **BiHiKu7 BIFACIAL MONO PERC 630 W ~ 670 W**. 2024. [Datasheet: CS7N-670MB-AG]. Disponível em: https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/12130516/CS-Datasheet-BiHiKu7_CS7N-MB-AG_v1.6C1_AU.pdf. Acesso em : 12 mai. 2025.
- CANADIAN SOLAR. **HiKu5 Mono PERC 475 W ~ 500 W**. 2021. [Datasheet: CS3Y-500MS]. Disponível em: https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2020/06/18133454/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu5_CS3Y-MS_EN.pdf. Acesso em : 12 mai. 2025.
- CHENG, H. Future Earth and Sustainable Developments. **The Innovation**, v. 1, n. 3, p. 100055, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100055>. Acesso em: 8 mai. 2024.
- CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. CRESESB, 2025. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 27 mai. 2025.
- DIAO, Y.; GONZ, X.; XU, D.; DUAN, P.; WANG, S.; GUO, Y. From culture, harvest to pretreatment of microalgae and its high-value utilization. **Algal Research**, v. 78, p. 103405, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103405>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- DEPRÁ, M. C.; SEVERO, I. A.; SANTOS, A. M. dos; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E. Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. **Algal Research**, v. 51, 102056, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102056>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- HACHICHA, R.; ELLEUCH, F.; BEN HLIMA, H.; DUBESSAY, P.; DE BAYNAST, H.; DELATTRE, C.; PIERRE, G.; HACHICHA, R.; ABDELKAFI, S.; MICHAUD, P.; FENDRI, I. Biomolecules from Microalgae and Cyanobacteria: Applications and Market Survey. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, 1924, 12 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12041924>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- HAMEDANI, H.; GORJIAN, S.; GHOBADIAN, B.; MOKHTARZADEH, H. Development and experimental performance evaluation of a small-scale aquavoltaic system for microalgae production. **Results in Engineering**, v. 24, 102919, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102919>. Acesso em: 2 jul. 2025.
- HUESEMANN, M. H.; KNOSHAUG, E. P.; LAURENS L. M. L.; DALE, T.; LANE, T. W.; MCGOWEN, J. Development of integrated screening, cultivar optimization, and verification research (DISCOVER): A coordinated research-driven approach to improve microalgal productivity, composition, and culture stability for commercially viable biofuels production. **Algal Research**, p. 102961, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102961>. Acesso em: 10 mai. 2024.
- IGHALO, J. O.; DULTA, K.; KURNIAWAN, S. B.; OMOARUKHE, F. O.; EWUZIE, U.; ESHIEMOGIE, S. O.; OJO, A. U.; ABDULLAH, S. R. S. Progress in Microalgae Application for CO2 Sequestration. **Cleaner Chemical Engineering**, p. 100044,

2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100044>. Acesso em: 8 mai. 2024.

INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION. **Cheese and processed cheese products: determination of fat content - gravimetric method - reference method**. p. 7, 1987.

INOSTROZA, C.; SOLIMENO, A.; GARCÍA, J.; FERNÁNDEZ-SEVILHA, J. M.; ACIEN, F. G. Improvement of real-scale raceway bioreactors for microalgae production using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Algal Research**, v. 54, p. 102207, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102207>. Acesso em: 21 jun. 2025.

JA SOLAR. **JAM72S42 LR Módulos N-Type Half-cell**. 2025. [Datasheet: JAM72S42 645/LR]. Disponível em: <https://jasolarbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/08/JAM72S42-620-645-LR.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

JINKO SOLAR. **Tiger Neo N-Type 78HL4-BDV 590-610 Watt**. 2022. [Datasheet: JKM610N-78HL4-BDV]. Disponível em: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM590-610N-78HL4-BDV-F2-PT.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

KIPP & ZONEN. **Pyranometer CMP3**. 2016. [Datasheet: CMP3]. Disponível em: <https://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer>. Acesso em: 10 dez. 2024.

KIRNEV, P. C. S.; VANDENBERGHE, I. P. S.; SOCCOL, C. R.; DE CARVALHO, J. C. Mixing and agitation in photobioreactors. **Innovations in Fermentation and Phytopharmaceutical Technologies**. [S. l.]: Elsevier, 2022. p. 13-35. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821877-8.00005-1>. Acesso em: 18 jun. 2024.

KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 19, n. 4, p. 325-329, 1977. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90001-9). Acesso em: 7 jun. 2025.

KUMAR, K.; MISHRA, S. K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M. S.; YANG, J. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 875-885, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.033>. Acesso em: 1 jul. 2025.

LI, Y.; ZHANG, Q.; WU, X.; CONG, W. Evaluation of power consumption of paddle wheel in an open raceway pond. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 37, n. 7, p. 1325-1336, 18 dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1103-3>. Acesso em: 21 jun. 2024.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. A rational procedure for predicting The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: With design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. **Solar Energy**, v. 7, n. 2, p. 53-74,

abr./jun. 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(63\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(63)90006-9). Acesso em: 7 jun. 2025.

MENDOZA, J. L.; GRANADOS, S. R.; DE GODOS, I.; ACIÉN, F. G.; MOLINA, E.; BANCOS, C.; CÉU, S. Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. **Biomass and Bioenergy**, v. 54, p. 267-275, jul. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.017> . Acesso em: 2 jul. 2025.

PALINSKA, K. A.; SUROSZ, W. Taxonomy of cyanobacteria: A contribution to consensus approach. **Hydrobiologia**, v. 740, n. 1, p. 1-11, nov. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1971-9>. Acesso em: 4 jul. 2025.

PAWAR, S. Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 640-653, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.074>. Acesso em: 5 mai. 2025.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

QUIROZ, D.; GREENE, J. M.; MCGOWEN, J.; QUINN, J. C. Geographical assessment of open pond algal productivity and evaporation losses across the United States. **Algal Research**, v. 60, 102483, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102483>. Acesso em: 3 jul. 2025.

RAME, R.; PURWANTO, P.; SUDARNO, S. Sustainable energy harnessing: Microalgae as a potential biofuel source and carbon sequestration solution. **Renewable Energy Focus**, v. 47, p. 100498, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100498>. Acesso em: 10 mai. 2024.

SAWANT, S. S.; GOSAVI, S. N.; KHADAMKAR, H. P.; MATHPATI, C. S.; PANDIT, R.; LALI, A. M. Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, v. 133, p. 528–537, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.016>. Acesso em: 20 jun. 2024

SINGH, U. B.; AHLUWALIA, A. S. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 18, n. 1, p. 73-95, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9393-3>. Acesso em: 8 mai. 2024.

SKIFA, I.; CHAUCHAT, N.; COCQUET, P.; GUER, Y. L. Microalgae cultivation in raceway ponds: Advances, challenges, and hydrodynamic considerations. **Revista de Bioeconomia EFB**, v. 5, 100073, nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2024.100073>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SUNOVA SOLAR. **Tangra L Pro HD 600-620W**. 2024. [Datasheet: SS-620-66MDH-G11(T)]. Disponível em: [https://www.sunova-solar.com/attached/file/pt/datasheet/L-Series/Tangra%20L%20Pro%20HD%20\(600-620\)-66MDH-G11_PT_V20241227.pdf](https://www.sunova-solar.com/attached/file/pt/datasheet/L-Series/Tangra%20L%20Pro%20HD%20(600-620)-66MDH-G11_PT_V20241227.pdf). Acesso em: 12 mai. 2025.

THORÉ, E. S. J.; MUYLEAERT, K.; BERTRAM, M. G.; BRODIN, T. Microalgae. **Current Biology**, v. 33, n. 3, p. R91-R95, 6 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.12.032>. Acesso em: 4 jul. 2025.

VADIVELLOO, A.; MOHEIMANI, N. Effect of continuous and daytime mixing on Nannochloropsis growth in raceway ponds. **Algal Research**, v. 33, p. 190-196, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.05.018>. Acesso em: 30 jun. 2025.

VALE, M.I A.; FERREIRA, A.; PIRES, J. C. M.; GONÇALVES, A. L. CO2 capture using microalgae. In: **Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 381-405. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00017-7>. Acesso em: 7 jul. 2025.

YADAV, G.; DUBEY, B. K.; SEN, R. A comparative life cycle assessment of microalgae production by CO2 sequestration from flue gas in outdoor raceway ponds under batch and semi-continuous regime. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 120703, 10 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120703>. Acesso em: 30 jun. 2025.

WANG, F.; FERREIRA, A.; PIRES, J. C. M.; GONÇALVES, A. L. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. **The Innovation**, v. 2, n. 4, p. 100180, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>. Acesso em: 8 mai. 2024.

WANG, R.; WANG, X.; ZHU, T. Research progress and application of carbon sequestration in industrial flue gas by microalgae: A review. **Journal of Environmental Sciences**, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.04.018>. Acesso em: 8 mai. 2024.

XU, X.; GU, X.; WANG, Z. Y.; SHATNER, W.; WANG, Z. Progress, challenges and solutions of research on photosynthetic carbon sequestration efficiency of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 65-82, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.050>. Acesso em: 8 mai. 2024.

ZAHRA, Z.; CHOO, D. H.; LEE, H.; PARVEEN, A.. Cyanobacteria: Review of Current Potentials and Applications. **Environments**, v. 7, n. 2, 13, 12 fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments7020013>. Acesso em: 4 jul. 2025.

ZHU, C.; JI, X.; DU, X.; KONG, F.; CHI, Z.; ZHAO, Y. A smart and precise mixing strategy for efficient and cost-effective microalgae production in open ponds. **Science of The Total Environment**, v. 852, p. 158515, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158515>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ZTROON. **Painéis solares fotovoltaicos - Série ZTP**. [Datasheet: ZTP-060M]. 2024. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/amfile/file/download/file/273/product/35422/>. Acesso em: 12 mai. 2025.

APÊNDICE A - CURVAS DE POTÊNCIA E TENSÃO ELÉTRICA PARA REVOLVIMENTO DOS TANQUES

Figura 14 – Curva da potência e tensão elétrica para agitação do tanque *mixing-board* no dia 05/04/2025

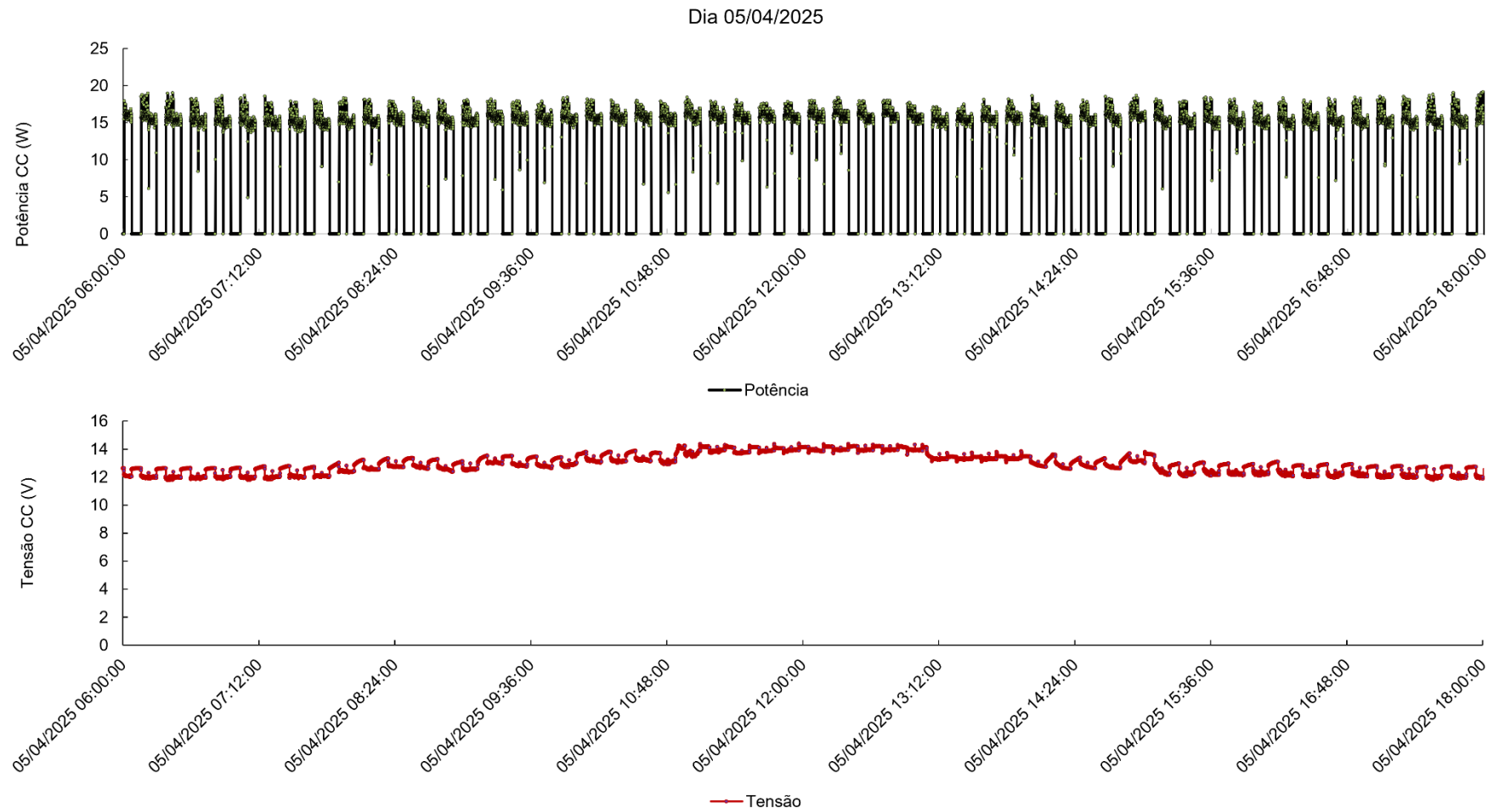
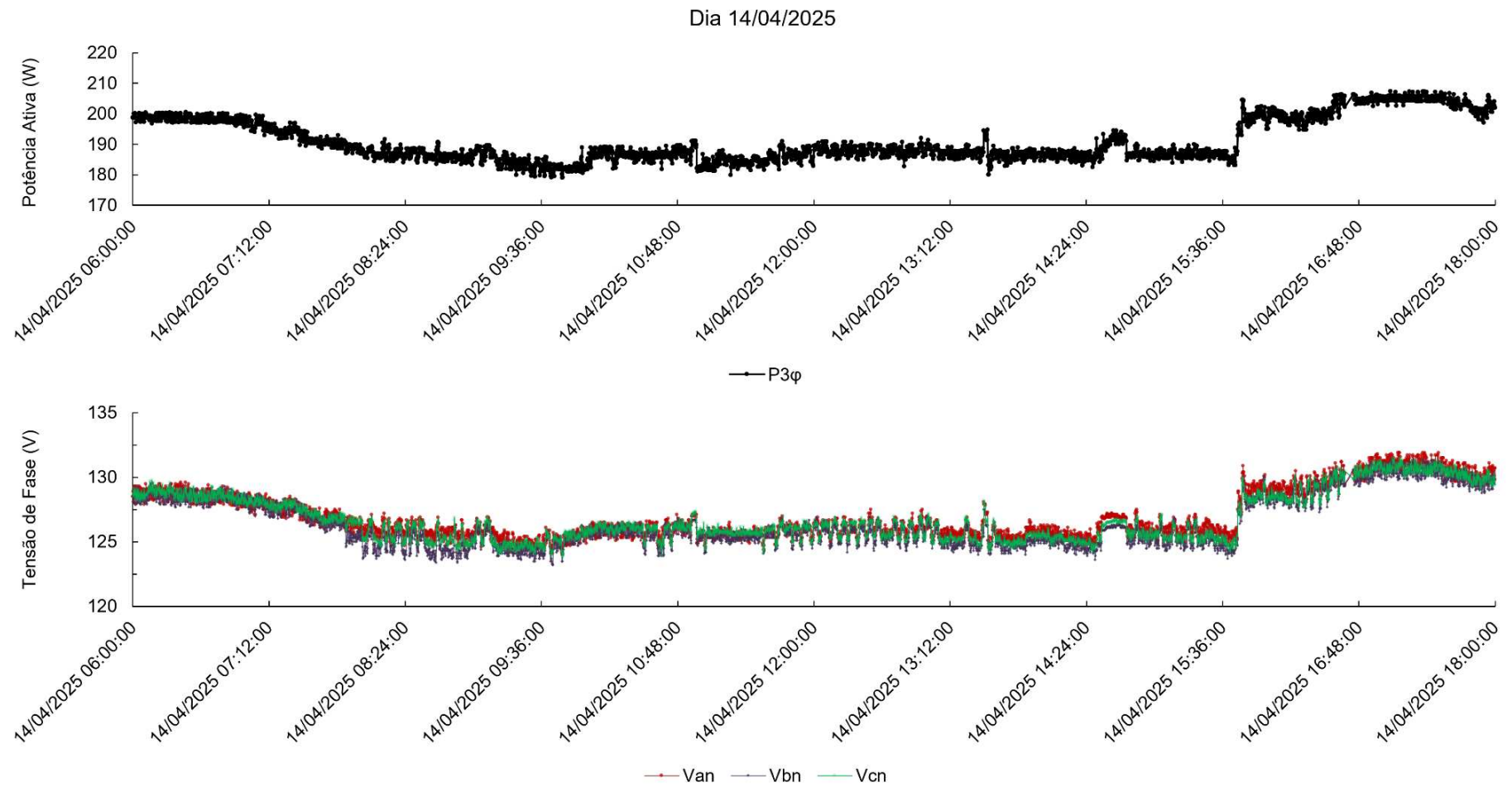


Figura 15 – Curva da potência e tensão elétrica para agitação do tanque *raceway* no dia 14/04/2025

APÊNDICE B - TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA DURANTE OS CULTIVOS

Figura 16 – Temperatura média e desvio padrão na área externa

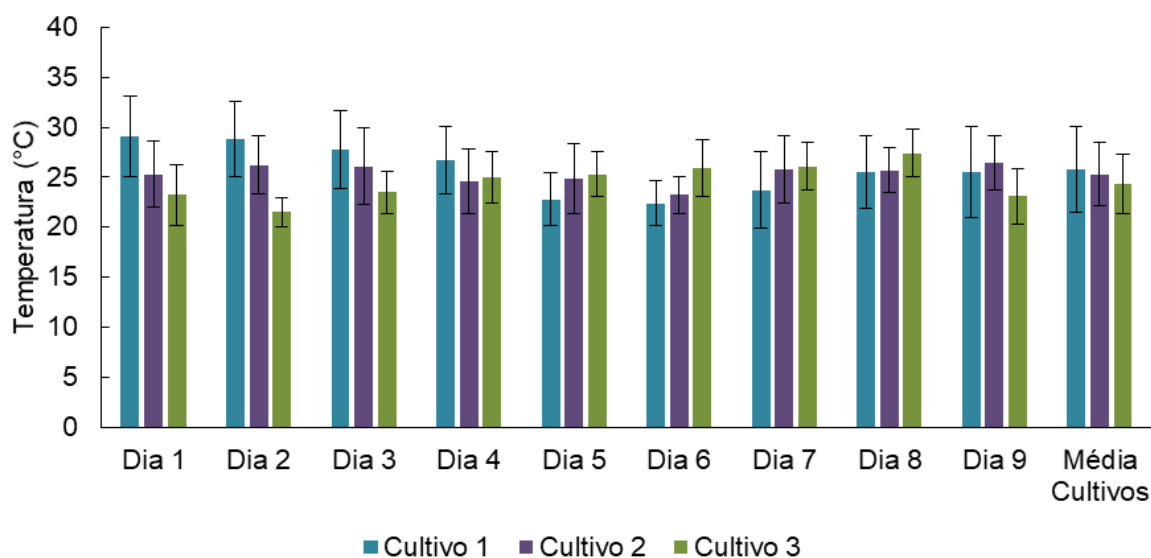


Figura 17 – Temperatura média e desvio padrão no interior da casa de vegetação

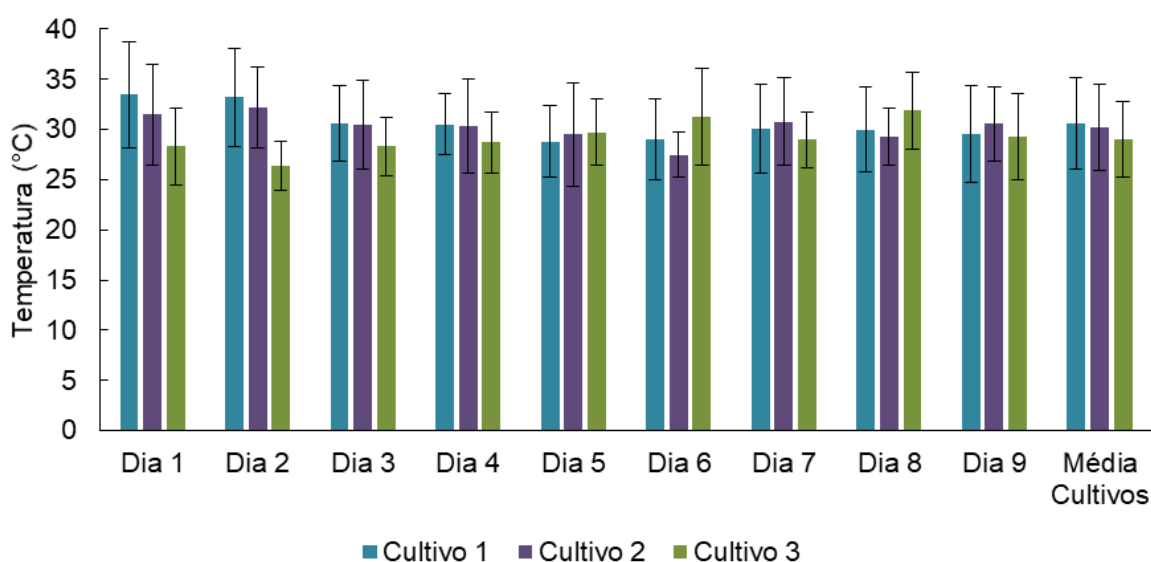


Figura 18 – Umidade relativa do ar média e desvio padrão na área externa

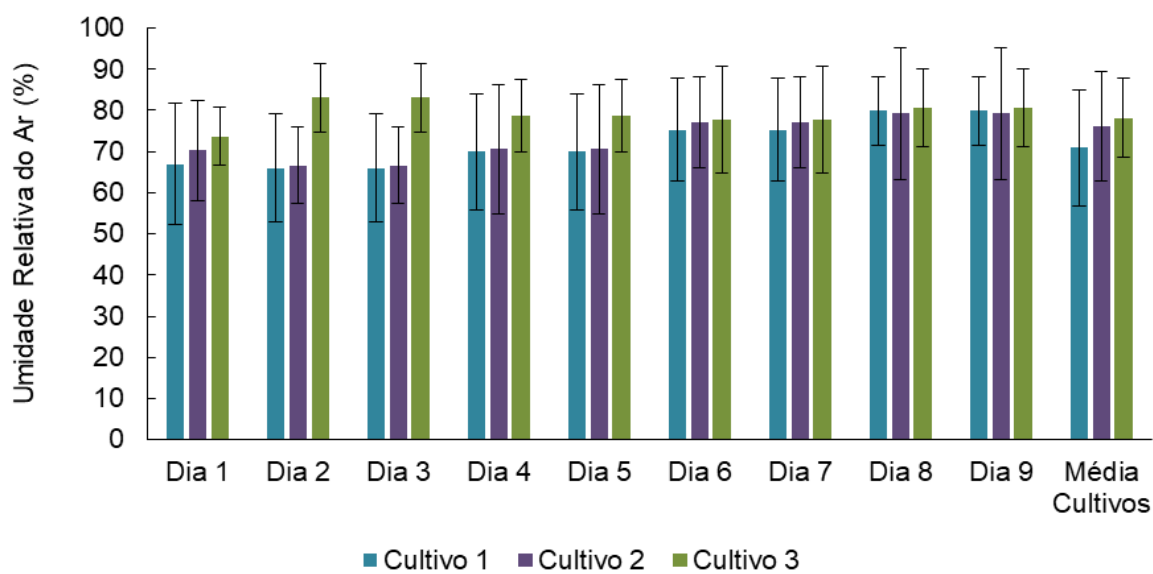
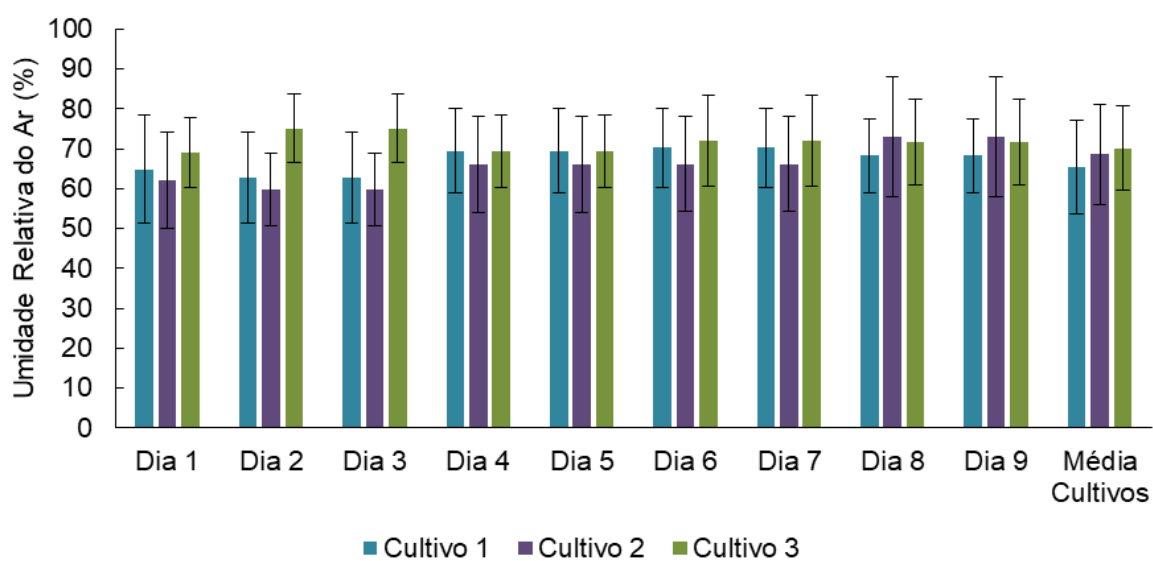


Figura 19 – Umidade relativa do ar média e desvio padrão no interior da casa de vegetação



APÊNDICE C - HORAS DE SOL PLENO NO INTERIOR DA CASA DE VEGETAÇÃO DURANTE OS CULTIVOS

Figura 20 – Horas de sol pleno no interior da casa de vegetação

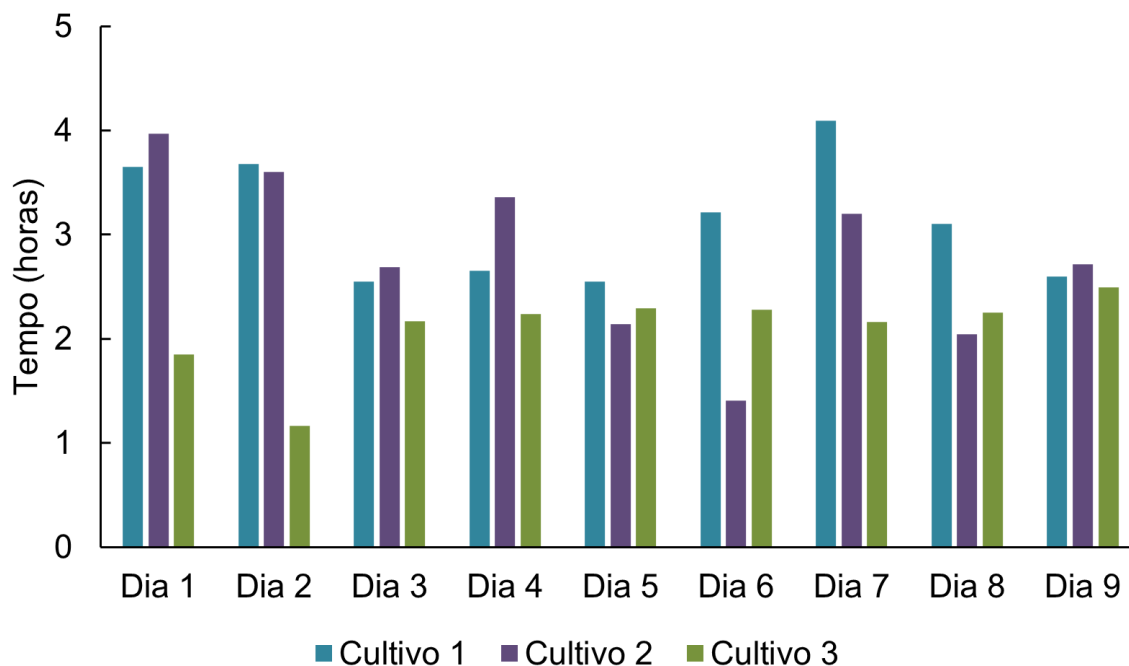


Tabela 5 – Horas de sol pleno para o interior da casa de vegetação

	HSP Total	HSP Médio	HSP Mínimo	HSP Máximo
Cultivo 1	28,09	3,12 ± 0,55	2,55	4,09
Cultivo 2	25,12	2,79 ± 0,78	1,40	3,97
Cultivo 3	18,90	2,10 ± 0,37	1,16	2,49