

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS LUNA DA SILVA

A INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE CONTROLE *ON/OFF* DE PH PARA CULTURA
DE MICROALGAS

VIÇOSA
2023

LUCAS LUNA DA SILVA

A INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE CONTROLE *ON/OFF* DE PH PARA CULTURA
DE MICROALGAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. João Victor Pereira Oliveira
(DEA – UFV)

Coorientador: Prof. Marcio Arêdes Martins
(DEA – UFV)

Coorientador: DSc. Dilson Novais Rocha
(DEA – UFV).

VIÇOSA

2023

LUCAS LUNA DA SILVA

A INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE CONTROLE *ON/OFF* DE PH PARA CULTURA
DE MICROALGAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

APROVADA: 08 de dezembro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. DSc. João Victor Pereira Oliveira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

DSc. Dilson Novais Rocha - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa

Me. Lucas Jonys Ribeiro Silva - Membro
Universidade de São Paulo

“A tarefa é não tanto para ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém ainda
pensou sobre o que todo mundo vê”
(Arthur Schopenhauer)

A Deus, a família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela saúde e pela oportunidade de vivenciar este momento em minha jornada acadêmica.

À minha querida família, em especial à minha mãe e aos meus irmãos, pelo apoio incondicional e pelo incentivo durante todo este período. Suas palavras de encorajamento foram fundamentais para alcançar este objetivo.

Expresso minha gratidão ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), representado pelos amigos Prof. João Victor, Prof. Arêdes, Dilson, Elder e Mauricio, pelo acolhimento e apoio técnico imprescindível no desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação e conhecimento foram pilares fundamentais para o progresso deste estudo.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEL), ao qual tenho a honra de fazer parte, por proporcionar a formação que contribuiu significativamente para a minha trajetória acadêmica.

Aos meus amigos e à minha namorada, que foram meu aconchego e refúgio durante os desafios da rotina deste trabalho. Seu apoio e compreensão foram fundamentais para manter meu equilíbrio emocional e motivacional.

RESUMO

O crescente interesse na utilização de fontes renováveis de energia destaca a importância da biomassa como alternativa viável. No entanto, apesar de seu potencial, desafios significativos persistem na produção comercial de biocombustíveis a partir de microalgas. Este estudo investigou a aplicação de um controlador *on/off* para regular o pH em sistemas fechados de cultivo de *Scenedesmus obliquus* BR003. A falta de informações sobre sistemas automáticos de controle para cultivo de microalgas e a capacidade desses sistemas em reduzir os custos de produção motivaram esta análise, centrada na compreensão do comportamento das microalgas em relação ao pH. Os resultados revelaram que o uso do controlador foi responsável por um aumento de 81% na biomassa seca livre de cinzas, por uma produção duas vezes maior de lipídios, três vezes maior de carboidratos e duas vezes maior de proteínas em relação ao cultivo de controle. Além disso, o controlador foi responsável por uma redução de 98,05% na despesa com CO₂ fornecido ao cultivo. O cultivo com injeção controlada de CO₂ produziu 0,96 g L⁻¹ de biomassa seca, o cultivo com injeção não controlada produziu 0,31 g L⁻¹ de biomassa seca e o sistema sem a injeção de CO₂ produziu 0,53 g L⁻¹ de biomassa seca. Em relação ao consumo de CO₂, o cultivo em que o controlador foi usado consumiu 0,03 kg de CO₂, enquanto o sistema onde não foi utilizado o controlador consumiu 0,5 kg de CO₂. O aumento da biomassa produzida evidencia a capacidade do controlador em otimizar a produção, e a redução no consumo de CO₂ no sistema controlado destaca a eficácia do controlador *on/off* em otimizar o uso de recursos. Esses resultados oferecem perspectivas promissoras para futuras pesquisas, explorando outras variáveis e estruturas de controladores para aprimorar ainda mais a produção de microalgas.

Palavras-chave: Microalgas, Controle *on/off*, pH.

ABSTRACT

The growing interest in using renewable energy sources underscores the importance of biomass as a viable alternative. However, despite its potential, significant challenges persist in the commercial production of biofuels from microalgae. This study investigated the application of an on/off controller to regulate pH in closed systems for cultivating *Scenedesmus obliquus* BR003. The lack of information on automatic control systems for algae cultivation and their potential to reduce production costs motivated this analysis, focusing on understanding microalgae behavior concerning pH. The results revealed that the controller's use led to an 81% increase in ash-free dry biomass, doubled lipid production, tripled carbohydrate yield, and doubled protein production compared to the control cultivation. Furthermore, the controller accounted for a 98.05% reduction in CO₂ expenses supplied to the cultivation. Cultivation with controlled CO₂ injection produced 0.96 g L⁻¹ of dry biomass, while cultivation without controlled injection produced 0.31 g L⁻¹, and the system without CO₂ injection produced 0.53 g L⁻¹ of dry biomass. Regarding CO₂ consumption, the cultivation using the controller consumed 0.03 kg of CO₂, whereas the system without the controller consumed 0.5 kg of CO₂. The increase in biomass production highlights the controller's capability to optimize production, and the reduced CO₂ consumption in the controlled system emphasizes the on/off controller's effectiveness in optimizing resource utilization. These results offer promising perspectives for future research, exploring other variables and controller structures to further enhance microalgae production.

Keywords: Microalgae, On/off control, pH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do controle realimentado.....	16
Figura 2 - Diagrama representando a arquitetura do experimento	18
Figura 3 – Diagrama de blocos do controlador on/off utilizado.....	19
Figura 4 - Diagrama representando a lógica de controle utilizada.....	20
Figura 5 - Comportamento do sensor durante a transição de pH.....	21
Figura 6 - Médias calculadas para as medições do sensor em diferentes valores de pH.....	22
Figura 7 - Comportamento da variável pH em cada tratamento.....	23
Figura 8 - Comportamento da variável pH em cada tratamento durante os 9 dias de experimento.....	25
Figura 9 - Análise de absorvância dos cultivos para o comprimento de onda de 750 nm durante os dez dias de experimento.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da composição da biomassa entre os cultivos.	28
Tabela 2 - Consumo total de CO ₂ por modalidade de cultivo.	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
3.1 Microalgas	14
3.2 Fotossíntese nas microalgas.....	14
3.3 Controle realimentado de sistemas	15
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1 Inóculo e meio de cultura	17
4.2 Condições experimentais.....	17
4.3 Arquitetura do controle <i>on/off</i>	19
4.4 Calibração de sensores.....	20
4.5 Análises	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1 Controle de pH	23
5.2 Crescimento das microalgas	26
5.3 Crescimento das microalgas	27
6 CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
APÊNDICE A – Cotação do valor de CO₂.....	34

1 INTRODUÇÃO

A energia é um elemento central no desenvolvimento humano, sendo fundamental para sustentar infraestruturas vitais, como hospitais, escolas e indústrias, e para garantir serviços essenciais, como iluminação e funcionamento de tecnologias, impulsionando a comunicação e o progresso científico. Além disso, está diretamente relacionada ao crescimento econômico, influenciando a produção e a eficiência de processos industriais. Nesse cenário, um planejamento energético bem estruturado compõe o objetivo dos países que buscam alto grau de crescimento. Além da área econômica, a energia tem papel fundamental no contexto ambiental. A utilização de fontes não renováveis, como, por exemplo, combustíveis fósseis, contribuem para aumentar a concentração de gases de efeito estufa (REIS, 2011).

Tendo em vista os problemas causados pela geração de energia a partir de fontes não renováveis, a utilização de fontes renováveis de energia cresce em ritmo acelerado. Em 2021 houve um crescimento de mais de 300 gigawatts de capacidade instalada de energia renovável no mundo, quando comparado ao ano anterior (REN21, 2022).

Tem-se entre as fontes de energia renovável a radiação solar, eólica, hidráulica e a biomassa. Com participação significativa na matriz energética dos países, em especial, dos países subdesenvolvidos, a biomassa caracteriza-se pelo aproveitamento de recursos orgânicos de origem animal ou vegetal, tais como etanol, carvão, óleo vegetal e gorduras animais (REIS, 2011; MEDIPALLY et al., 2015). Embora essas fontes de biomassa apresentem vantagens como a alta disponibilidade, principalmente em países tropicais, também apresentam fatores limitantes, como a necessidade de grande área de cultivo e, conseqüentemente, competição com o setor de alimentos (MEDIPALLY et al., 2015).

Diante desse cenário, a biomassa proveniente do cultivo de microalgas tem o potencial para superar essas limitações, uma vez que seu cultivo não compete por terras aráveis e pode ser realizado em águas salobras e impróprias para a agricultura (MEDIPALLY et al., 2015; BARBOSA, 2019; MOODY et al., 2014; MATA et al., 2010).

Atualmente a produção de biocombustíveis a partir das microalgas ainda não é executada em escala comercial devido aos elevados custos de produção de biomassa e seu refino (MILLEDGE, 2011). Visando reduzir os custos de produção, a adoção de sistemas de controle que busquem otimizar as condições de cultivo é uma alternativa (BARBOSA, 2019; MOODY et al., 2014; MATA et al., 2010; MILLEDGE, 2011; MEIRELES et al., 2002).

O crescimento das microalgas é influenciado, dentre outros parâmetros, pela temperatura, carga de nutrientes, quantidade e qualidade da luz e pelo pH do meio (BARBOSA, 2019). Além disso, para a crescimento das microalgas é fundamental garantir a disponibilidade

de carbono no meio, necessário para a realização da fotossíntese. Sendo assim, fontes de carbono adicionais, em especial o CO₂ são utilizadas para garantir a disponibilidade desse nutriente (ZHU, 2015). Dessa forma, embora seja um processo complexo, identificar a dinâmica das variáveis de um cultivo é peça fundamental para a elaboração de um sistema de controle desses fatores (BERNARD et al., 2016).

Alguns autores desenvolveram a modelagem matemática para ambientes de cultivo externo. Em Benemann e Tillett (1987), desenvolveram um modelo para as variáveis de temperatura, pH, oxigênio dissolvido e intensidade da luz em uma lagoa de cultivo. Em Sukenik et al. (1987), os autores propõem o uso de um modelo dinâmico para calcular a produção de algas em uma lagoa em função da atenuação de luz, e em Bernard et al. (2016) é feita uma revisão dos modelos de sistemas de cultivo existentes e das suas aplicações. Em Rodríguez-Torres et al. (2021) é analisado a influência de diferentes estruturas de controladores para regular o pH em fotobioreatores.

Visando estudar a aplicação de sistemas automáticos de controle para cultivo de microalgas, esse trabalho analisa a influência da utilização de um controlador *on/off* para controle de pH em sistema de cultivo fechado de microalgas do gênero *Scenedesmus*.

A análise do cenário de produção de microalgas permite concluir que a literatura carece de informações a respeito da criação de sistemas automáticos de controle para esse fim. Sendo assim, a análise da aplicação do controlador *on/off* em um cultivo permitirá um melhor entendimento do comportamento da planta em relação ao pH. Portanto, este estudo estabelecerá uma base sólida para futuros trabalhos que abordem outras variáveis relevantes no processo de produção de microalgas. Além disso, esse trabalho servirá como estímulo e motivação para a investigação e análise de outras arquiteturas de controle, ampliando assim as possibilidades de aprimoramento nos sistemas de cultivo de microalgas e, por consequência, impulsionando avanços significativos nessa área de pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a influência de um controlador *on/off* para controle de pH em um sistema de cultivo de microalgas.

2.2 Objetivos específicos

- Monitorar o pH durante o cultivo;
- Controlar o pH em torno de 7;
- Avaliar o crescimento dos cultivos em função do sistema de injeção e controle de CO₂
- Quantificar a composição da biomassa produzida pelos cultivos;
- Avaliar o retorno econômico da aplicação do controlador no cultivo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Microalgas

As microalgas, unicelulares ou pluricelulares, são organismos fotossintéticos, podendo ser autotróficos e/ou heterotróficos, encontrados em ambientes aquáticos. Com mais de 40.000 espécies distintas catalogadas, esses microrganismos têm a capacidade de utilizar dióxido de carbono (CO₂), água e luz na acumulação de biomassa por meio do processo fotossintético. Adicionalmente à fotossíntese, a disponibilidade de nitrogênio e fósforo também pode influenciar o crescimento das microalgas (ZHU, 2015).

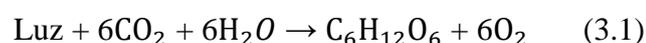
Para o cultivo das microalgas, é fundamental considerar fatores como nutrição, pH, difusão de gases, intensidade e qualidade da luz, os quais desempenham um papel crucial no acúmulo de biomassa desses organismos. O controle do pH na cultura pode ser modificado através da concentração de nutrientes e da concentração de CO₂, visando proporcionar as melhores condições de cultivo. É importante ressaltar que cada espécie de microalga possui uma faixa de pH ótima para o crescimento; por exemplo, nos organismos do gênero *Scenedesmus*, essa faixa varia entre 6 e 8 (BARBOSA, 2019).

O crescimento das microalgas é influenciado pela disponibilidade e concentração de CO₂ sendo este um dos principais elementos para o processo fotossintético. O CO₂ é consumido pelas microalgas para realizar a fotossíntese e a taxa de absorção está diretamente relacionada à taxa fotossintética, que depende da concentração de biomassa, disponibilidade de luz e condições específicas de cultivo, como pH, temperatura, oxigênio dissolvido e disponibilidade de nutrientes. A introdução de CO₂ extra é crucial, uma vez que a concentração desse gás na atmosfera é consideravelmente baixa. (ZHU, 2015).

Estudos indicam que o teor lipídico das microalgas varia entre 20% e 50% da biomassa total desses organismos, tornando o biocombustível derivado das microalgas uma alternativa aos combustíveis fósseis (CHISTI, 2007). Além disso, o potencial desses microrganismos estende-se à produção de uma variedade de produtos de alto valor agregado (MILLEDGE, 2011).

3.2 Fotossíntese nas microalgas

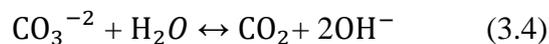
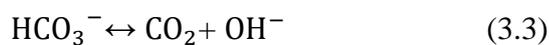
A fotossíntese é o principal processo observado na natureza em relação à fixação de CO₂. A equação tradicional da fotossíntese é representada por:



Importante destacar, que a fotossíntese não é um evento único, mas sim um conjunto de reações divididas em duas etapas. A primeira, conhecida como fotoquímica ou fase clara, requer

energia luminosa para acontecer, já a segunda etapa, conhecida como química ou fase escura, não requer energia luminosa para que aconteça (VONSHAK, 1997).

No sistema de cultivo de microalgas, elas utilizam o CO_2 em uma de suas formas hidratadas para a síntese de compostos orgânicos. Nesses sistemas, o CO_2 encontra-se dissolvido em meio aquoso, em três espécies químicas: $\text{CO}_2(\text{aq})$, HCO_3^- e CO_3^{-2} , sendo que cada espécie de alga possui sua capacidade particular de utilizar essas fontes de carbono Richmond (1990). O sistema de equilíbrio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ fornece CO_2 para fotossíntese através das reações a seguir:



Ou seja, tanto na conversão de bicarbonato quanto de carbonato em CO_2 , ocorre produção de OH^- , o que aumenta o pH do meio. Por este motivo, é necessária uma correção do pH para que não seja inibido o crescimento das microalgas (RICHMOND, 1990).

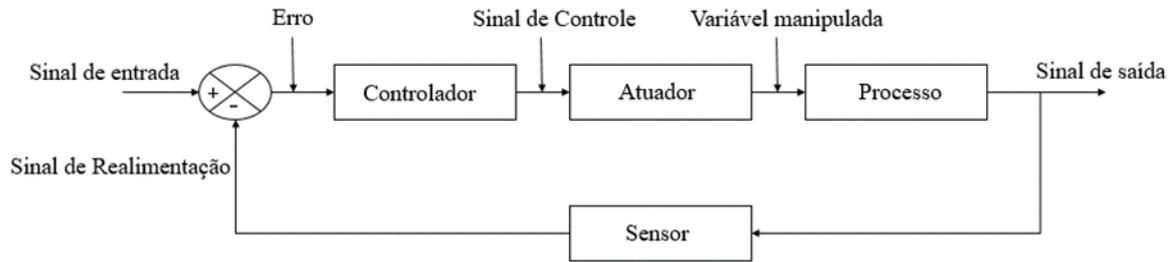
3.3 Controle realimentado de sistemas

O controle realimentado em sistemas dinâmicos, ou controle em malha fechada, é um conceito que tem como premissa central a capacidade de medir a saída de um sistema e retransmiti-la a um controlador, permitindo a regulação e influência sobre a variável controlada (FRANKLIN, 2013; NISE 2011).

Para garantir a eficácia do controle, são estabelecidos quatro requisitos fundamentais: estabilidade contínua do sistema, rastreamento preciso do sinal de entrada pela saída, imunidade da saída a perturbações externas e a capacidade de atender a esses requisitos mesmo quando o modelo ou a dinâmica do sistema variam (FRANKLIN, 2013).

A estrutura essencial de um sistema realimentado é mostrada na Figura 1, que representa o diagrama de blocos identificando os componentes principais e as direções do fluxo de informação entre eles. O processo, controlado pela saída, é o centro desse sistema, e o atuador desempenha o papel de influenciar a variável controlada com precisão e velocidade adequadas (FRANKLIN, 2013).

Figura 1 – Diagrama de blocos do controle realimentado



Fonte: autor

O controlador é o componente responsável pelo cálculo do sinal de controle necessário. Utilizando sinais elétricos, o controlador opera com base nas informações do sensor. O sensor converte a variável física em um sinal elétrico interpretável pelo controlador, estabelecendo assim a base para a comparação entre o sinal de referência e a saída do sensor, fornecendo ao controlador a medida do erro do sistema (OGATA, 2010).

Existem diversas estruturas de controladores na literatura, em especial, destaca-se a estrutura do controlador *on/off* por apresentar maior simplicidade de operação. Seu modo de operação consiste em comparar a variável de controle a valores de limites superior e inferior de referência. Quando a variável de controle supera os valores de referência, o controlador age ativando ou desativando o atuador (NISE, 2011; DUARTE 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Inóculo e meio de cultura

A linhagem *Scenedesmus obliquus* BR003 foi obtida da coleção de microalgas do Laboratório de Biocombustíveis, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Antes dos ensaios, o inóculo foi aclimatado nas mesmas condições ambientais do experimento (meio de cultura, luz, temperatura e agitação).

O meio de cultura utilizado foi formulado conforme Rocha et al. (2019), com água da rede de abastecimento e fertilizantes agrícolas nas seguintes concentrações: 171,12 mg L⁻¹ de ureia (Fertilizantes Heringer, Brasil), 44,36 mg L⁻¹ de monofosfato de amônio (Yara Brasil Fertilizantes, Brasil), 176,33 mg L⁻¹ de cloreto de potássio (Fertilizantes Heringer, Brasil), 45,96 mg L⁻¹ de sulfato de magnésio hepta-hidratado (Multitécnica, Brasil) e 14,65 mg L⁻¹ de sulfato de ferro monohidratado (Pigminas, Brasil). Reagentes de grau analítico foram utilizados para fornecimento dos micronutrientes conforme solução A5 proposto por Rippka (1979), com concentração final no meio de cultura de 2,86 mg L⁻¹ H₃BO₃, 1,81 mg L⁻¹ MnCl₂·4H₂O, 0,22 mg L⁻¹ ZnSO₄·7H₂O, 0,08 mg L⁻¹ CuSO₄·5H₂O, 0,02 mg L⁻¹ NaMoO₄·2H₂O e 0,05 mg L⁻¹ Co(NO₃)₂·6H₂O. Os meios de cultura foram esterilizados em autoclave a 1 atm e 121 °C por 20 minutos conforme Andersen (2005).

4.2 Condições experimentais

O experimento foi realizado nas instalações do Laboratório de Biocombustíveis, pertencente a Área de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

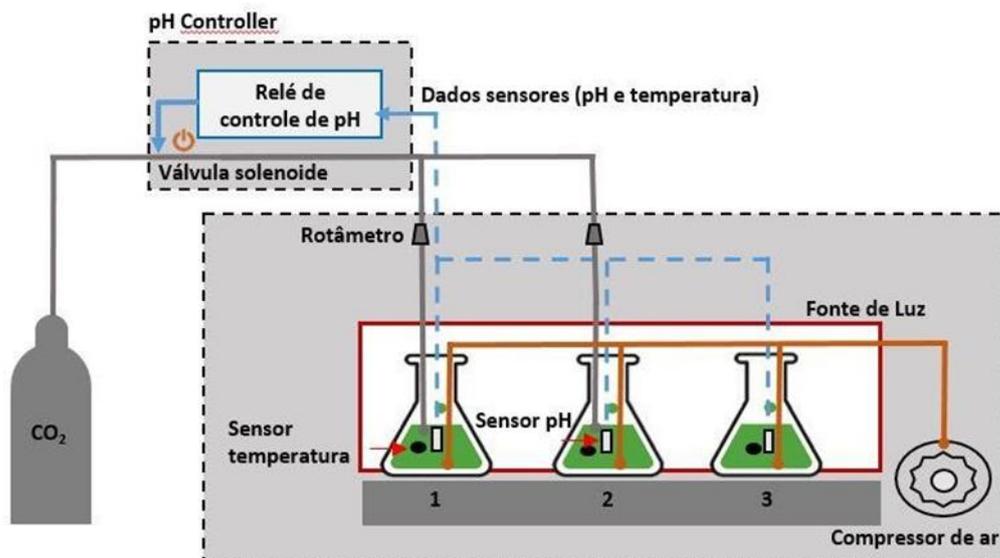
O experimento foi montado sobre uma bancada, utilizando três frascos *Erlenmeyer* de 2 L, com 1,2 L de volume útil contendo 1 L de meio de cultura e 0,2 L de inóculo, conforme descrito 2.1. O isolamento do sistema foi mantido através de tampões de algodão a fim de evitar contaminação no cultivo. Durante um ciclo de cultivo em modo batelada, com duração de 9 dias, a temperatura externa foi mantida em 25 ± 2°C e os sistemas foram irradiados com 852 μmols m² s⁻¹, com fotoperíodo da 12h:12h (luz: escuro), por uma fonte luminosa constituída de lâmpadas LED para crescimento de plantas. O crescimento das microalgas foi monitorado utilizando um espectrofotômetro (Multiskan GO, Thermo Scientific, Alemanha) para a leitura diária da absorbância nos comprimentos de onda de 680 e 750 nm, as microalgas foram mantidas em suspensão, por meio de injeção de ar.

Para estudo do impacto do fornecimento de CO₂ no cultivo, foram adotadas estratégias diferentes para cada um dos sistemas. No tratamento 1 (ICCO₂ – Injeção controlada de CO₂)

foi utilizada a injeção controlada, durante um período de 10 horas diárias, de dióxido de carbono através do sistema de controle de pH pela injeção de CO_2 , que será descrito na seção 2.3. No tratamento 2 IN CO_2 – Injeção não controlada de CO_2), houve a adição de dióxido de carbono por um período ininterrupto de dez horas diárias. Por fim, no tratamento 3 (SICO $_2$ – Sem injeção de CO_2) não houve qualquer adição de CO_2 durante o tempo de cultivo. A vazão de dióxido de carbono adicionado aos tratamentos 1 e 2 foi medida através de um rotâmetro e mantida em 2,8 L/h. Para condução de CO_2 até os galões de cultivos, o sistema utilizado era composto por um cilindro tipo T, contendo CO_2 na concentração de 99,95 % (White Martins, Brasil), uma válvula solenoide, o rotâmetro e os frascos Erlenmeyers, interligados através de mangueiras de silicone.

Para monitoramento das variáveis experimentais, foi adicionado um eletrodo de pH (HI1131, Hanna instrumentos, EUA), previamente calibrado conforme será descrito na seção 2.4, um sensor de temperatura do tipo sonda ds18b20, a cada um dos sistemas. Para armazenamento dos dados, foi utilizado um sistema de aquisição de dados baseado no microcontrolador Arduino Mega 2560 (ARDUINO, Italy). A representação da arquitetura do projeto é representada na Figura 1.

Figura 2 - Diagrama representando a arquitetura do experimento



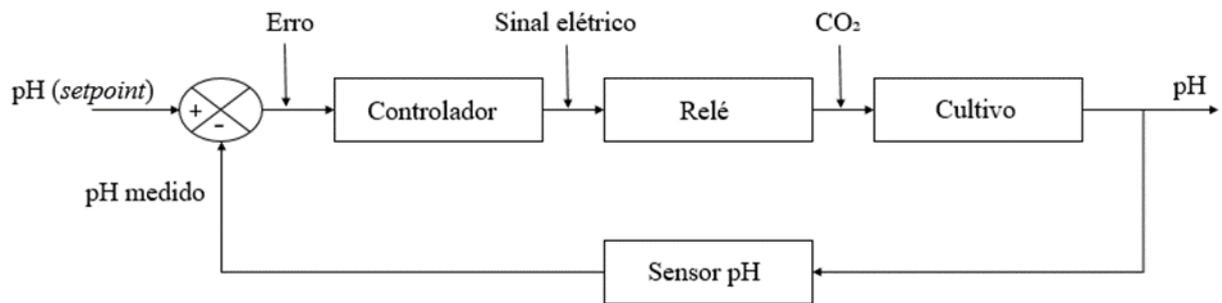
Fonte: Autor

4.3 Arquitetura do controle *on/off*

Para manutenção do pH da solução, foi utilizado um sistema de controle com esquema *on/off* utilizando uma válvula solenoide ligada a um cilindro de CO₂ como atuador (A). Como parâmetro de controle da lógica desenvolvida (VP), foi utilizado a medição do pH do interior da solução. Foi desenvolvido um firmware que, a partir da integração com um computador via conexão USB, possibilita o ajuste do *setpoint* (SP) e ajuste na calibração (K) dos sensores.

Na figura 3, é mostrado o diagrama de blocos do controlador *on/off* utilizado para manter o pH do cultivo próximo ao *setpoint* de 7. A realimentação é feita por meio de um sensor de pH no tanque, que monitora o valor do pH. Este valor medido é comparado ao *setpoint* e o sinal de erro é transmitido ao controlador. O controlador é responsável por ativar o relé de acionamento da válvula solenoide que controla o fluxo de CO₂, regulando o pH no tanque através da sua acidificação.

Figura 3 – Diagrama de blocos do controlador *on/off* utilizado

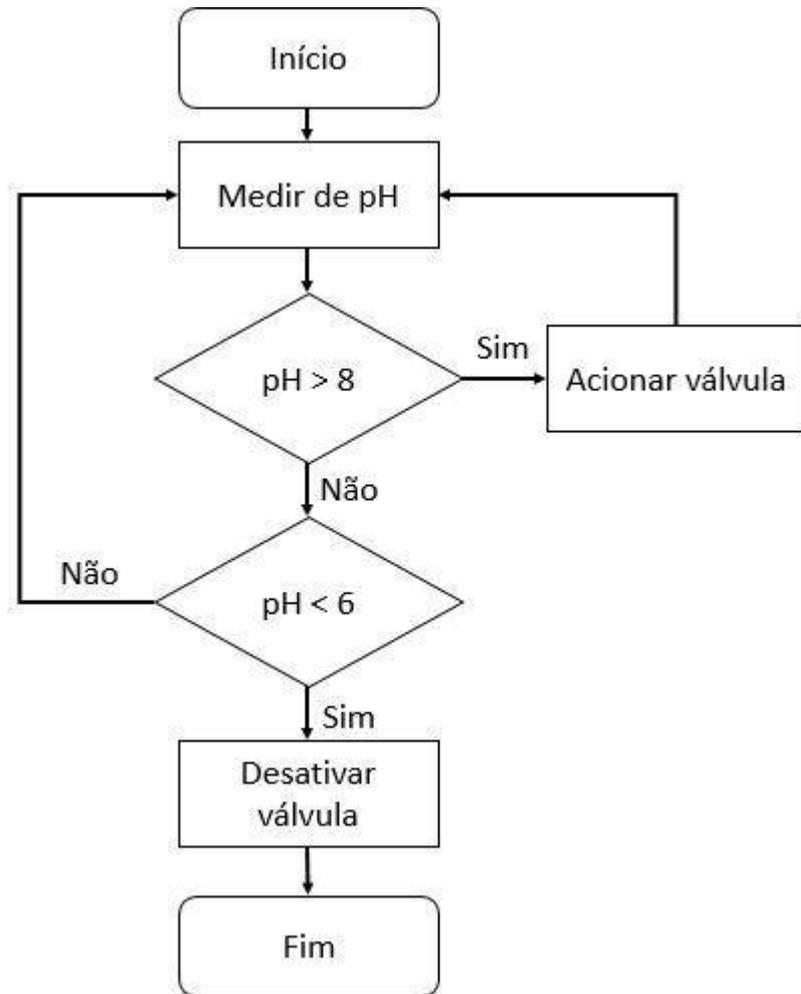


Fonte: Autor

O valor utilizado como extremo superior para a variável de controle (pH) foi 7,5, e o extremo inferior foi definido como 6,5, sendo assim, o valor de histerese, ou seja, o valor entre os extremos definidos pela variável de controle é 1. O *setpoint* foi definido como 7, dessa forma, foram obtidos dois modos de operação para o atuador. Quando a variável de controle (pH) um atingiu o valor do *setpoint* somado ao valor de histerese, 8, o atuador foi acionado, injetando CO₂ na solução. Por outro lado, quando a variável de controle atingiu o valor do *setpoint* subtraído do valor de histerese, 6, o atuador foi desativado, interrompendo a injeção de CO₂ no cultivo. A Equação 4.1 é a equação que representa os dois modos de operação do controlador, além disso, no diagrama da Figura 4 é mostrado a lógica de controle utilizada.

$$\left\{ \begin{array}{l} A = on, \text{ Se } VP > SP + H \\ A = off, \text{ Se } VP < SP - H \end{array} \right\} (4.1)$$

Figura 4 - Diagrama representando a lógica de controle utilizada



Fonte: Autor

4.4 Calibração de sensores

A calibração dos sensores de pH foi realizada utilizando o método de calibração de dois pontos descrito na documentação do sensor e adaptado para o sistema em questão. Inicialmente, foram utilizadas soluções com pH pré-definido nos valores de 4 e 7. Por meio do monitor serial do arduino, as saídas elétricas do sensor foram analisadas para essas soluções de referência. Posteriormente, os valores obtidos foram aplicados às equações de calibração do sensor, para definição das variáveis slope, intercept e pH, conforme descrito na documentação e apresentado a seguir:

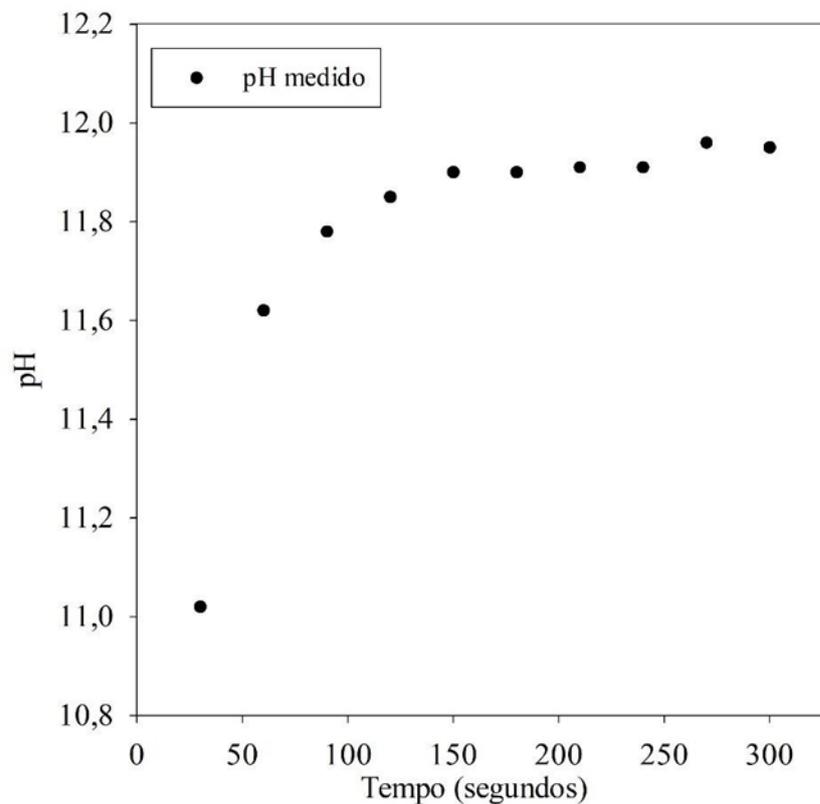
$$\text{slope} = \frac{(7.0-4.0)*3}{(pH7 \text{ voltage}-2624.0)-(pH4 \text{ voltage}-2624.0)} \quad (4.2)$$

$$\text{intercept} = 7.0 - \text{slope} * \frac{pH7 \text{ voltage}-2624.0}{3} \quad (4.3)$$

$$\text{pH} = \text{slope} * \frac{(\text{pH voltage} - 2624.0)}{3} + \text{intercept} \quad (4.4)$$

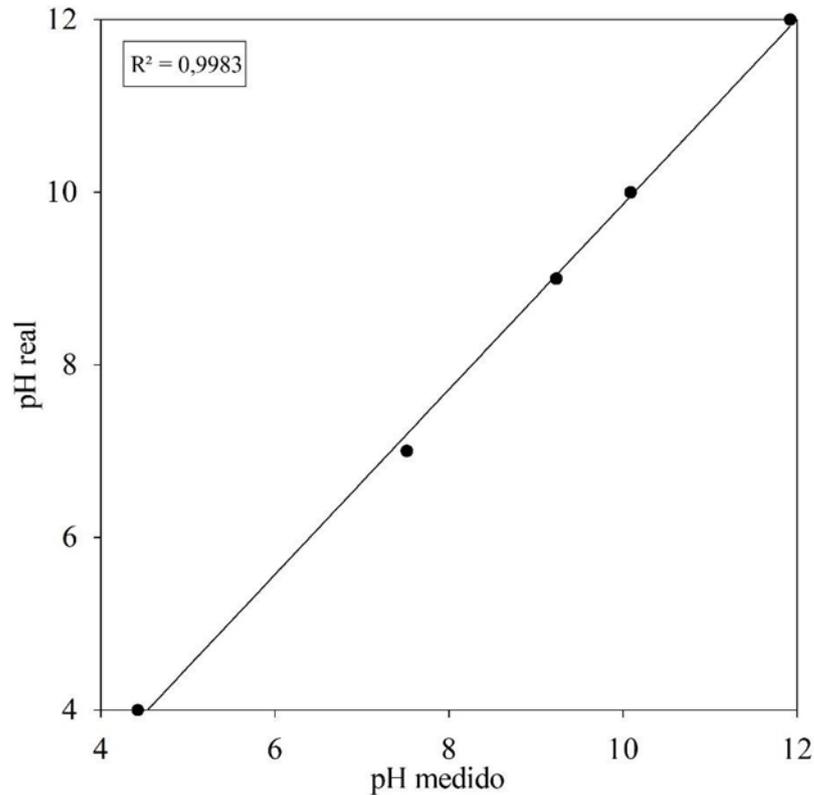
Em seguida, cada sensor foi submetido a ensaios utilizando diversas soluções com valores de pH previamente determinados, sendo os resultados registrados pelo sistema de aquisição de dados descrito na seção 4.2. A Figura 5 retrata o comportamento dos sensores de pH durante a leitura durante a transição de uma solução padrão com pH 10 para uma solução com pH 12. A medição do pH ocorreu a cada intervalo de 30 segundos. Com base nos dados obtidos, foi estabelecido um tempo de estabilização para o sensor, correspondente a cinco medições consecutivas durante um período de 2,5 minutos. Em seguida, calculou-se a média das cinco leituras subsequentes. Os resultados das medições do sensor em soluções com diferentes valores de pH, após o período de estabilização, são apresentados na Figura 6. Adicionalmente, a validade dos dados foi avaliada por meio do coeficiente de determinação R^2 , também evidenciado na Figura 6.

Figura 5 - Comportamento do sensor durante a transição de pH.



Fonte: Autor

Figura 6 - Médias calculadas para as medições do sensor em diferentes valores de pH.



Fonte: Autor

4.5 Análises

Para determinar a massa seca (g L^{-1}), foi utilizado o método gravimétrico, em que 20 mL do cultivo foi filtrado, em membranas com porosidade de $0,22 \mu\text{m}$ previamente secas em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$. As membranas permaneceram na estufa, a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, até atingirem massa constante. Em seguida, foram retiradas e, imediatamente, colocadas em dessecador para esfriar. Após esse período, as membranas foram pesadas e a massa seca determinada, descontando-se o valor da massa da membrana.

O teor de lipídios totais ao final do cultivo foi determinado pelo método Schmid-Bondzynski-Ratzlaff (INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION, 1986), modificado pelo grupo de pesquisa em microalgas do Laboratório de Biocombustíveis (DEA/UFV), realizado em Rocha (2018).

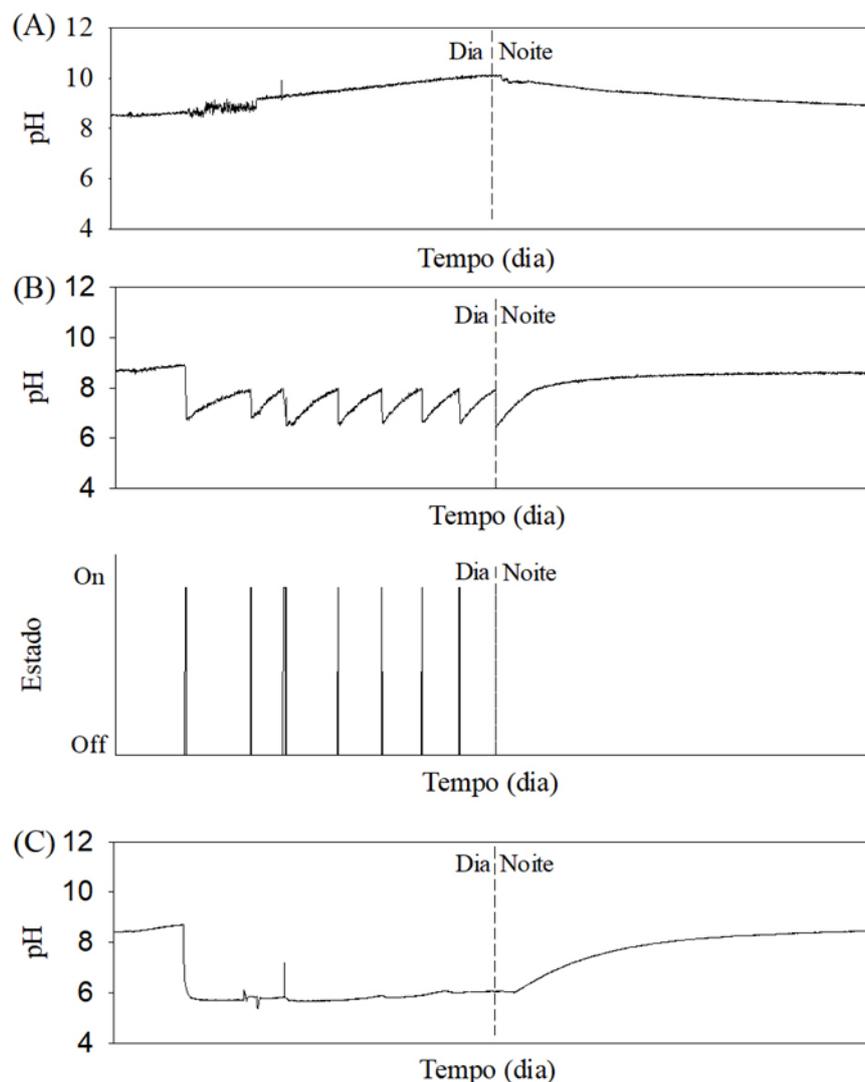
O teor de carboidratos neutros totais (g L^{-1}) foi medido utilizando o método fenol-ácido sulfúrico de Dubois et al. (1956) adaptado para microplacas por Masuko et al., (2005) e realizado em Rocha (2018). A absorbância da amostra foi medida em 490 nm (espectrofotômetro multiskan GO, Thermo scientific, Alemanha). Para a quantificação, uma curva-padrão foi preparada utilizando diferentes concentrações de glicose (D-(+)-Glicose Anidra, Sigma-Aldrich, EUA).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Controle de pH

A Figura 5 apresenta o comportamento do pH em todos os tratamentos durante um dia de monitoramento. Na imagem, é indicado como dia o período em que a radiação artificial foi utilizada (06 – 18h) e indicado como noite o período em que a radiação artificial não foi utilizada (18 – 06h). Na Figura A, é exibida a evolução do pH no tratamento de controle SICO₂. Na Figura B, é apresentada a evolução do tratamento INCO₂. Por último, na Figura C, é mostrada a evolução do tratamento ICCO₂, evidenciando o sinal de controle da válvula solenoide.

Figura 7 - Comportamento da variável pH em cada tratamento.



A) pH no tratamento SICO₂. B) pH no tratamento ICCO₂ e sinal de controle da válvula solenoide. C) pH no tratamento INCO₂.

Fonte: Autor

Ao analisar o gráfico A) presente na Figura 7, é possível observar um padrão no qual o pH do cultivo aumenta durante o dia e diminui durante a noite. Essa variação ocorre em decorrência das alterações no balanço de CO_2 no meio de cultura. Durante a fotossíntese, que ocorre durante o dia, as microalgas fixam o CO_2 disponível no meio, ocasionando um aumento do pH. Já durante a respiração, as microalgas liberam CO_2 para o meio, resultando em uma redução do pH. Essa dinâmica entre fotossíntese e respiração contribui para a oscilação diária do pH no cultivo.

Em Rodríguez-Torres et al. (2021) e previamente em Pawlowisk et al. (2015) é previsto um modelo linear que relaciona o valor de pH do meio de cultura com a injeção de CO_2 , considerado os distúrbios provocados pela irradiação solar. No entanto, o presente trabalho avança ao monitorar a variação de pH durante o cultivo, mantendo um valor definido de irradiação sobre os cultivos. Isso permitiu isolar a variável de estudo, possibilitando uma análise mais precisa de seu comportamento, que, por sua vez, servirá como base para futuras modelagens que alimentarão as arquiteturas de controle mais avançadas.

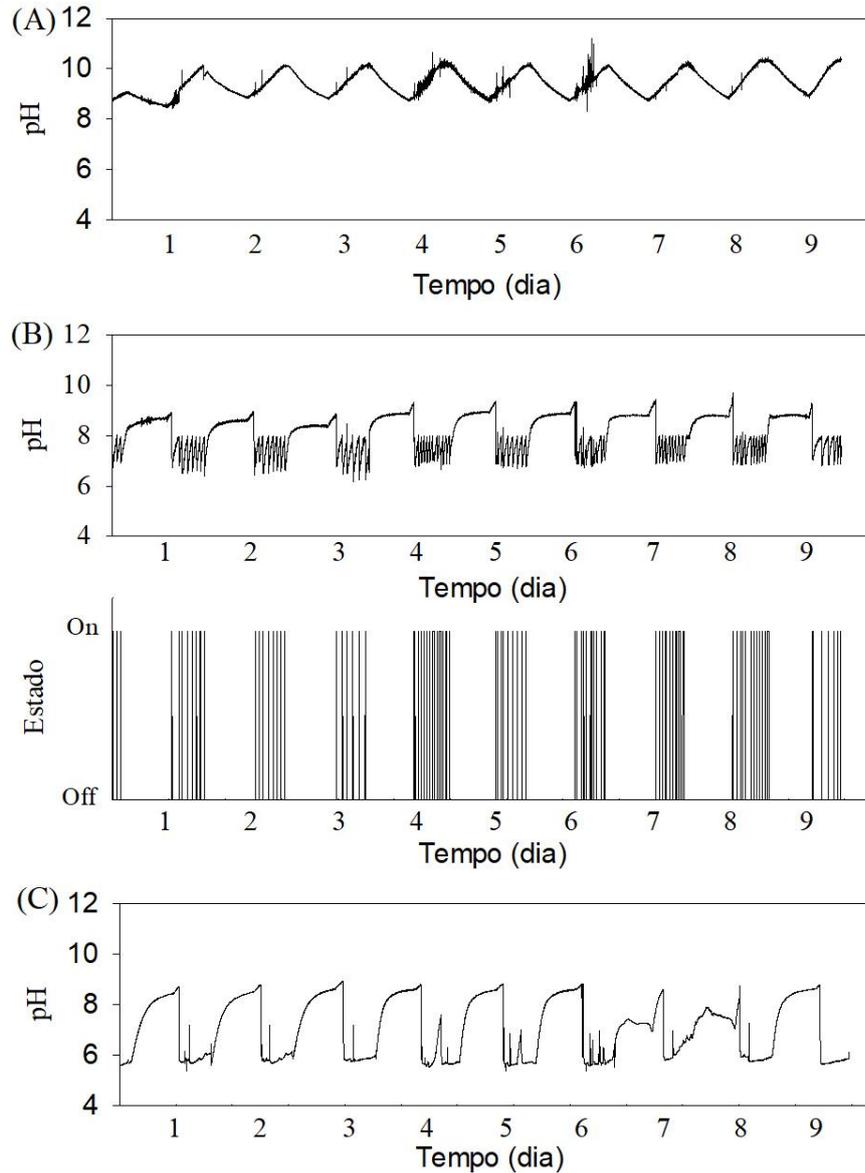
Em Sutherland (2015) foi conduzido um estudo investigando os efeitos da adição de CO_2 ao longo de um gradiente de pH no desempenho de microalgas em águas residuais. O desempenho foi avaliado com base em diversos parâmetros, sendo a produção de biomassa um dos principais indicadores. Os resultados dessa pesquisa indicaram que a adição de CO_2 pode ter um impacto positivo na produção de biomassa de microalga, especialmente quando o pH do cultivo foi reduzido para valores de pH 8 e 6,5. No entanto, como evidenciado no gráfico C, a injeção contínua e ininterrupta de CO_2 provocou a acidificação do meio, o que, como discutiremos a seguir, pode levar à redução na produção de biomassa.

Diante disso, torna-se evidente a importância de otimizar as condições de pH e CO_2 para maximizar o desempenho na produção de biomassa de microalgas. É importante encontrar um equilíbrio entre o fornecimento adequado de CO_2 para estimular o crescimento das microalgas e a manutenção do pH adequado para garantir a saúde e a viabilidade do cultivo. Essa otimização das condições é fundamental para o sucesso de aplicações práticas que visam a produção eficiente de microalgas e destaca a relevância dos resultados deste estudo na compreensão desses princípios e no desenvolvimento de estratégias de cultivo mais eficazes.

Por fim, na figura 6, é apresentado o comportamento do pH em todos os cultivos durante os 9 dias do experimento. A análise dos dados demonstra a eficácia na condução dos experimentos e a estabilidade do sistema construído. A Figura 6 revela padrões claros de variação do pH ao longo do dia e da noite, associados às mudanças de comportamento das

microalgas nos dois períodos. Dessa forma, é possível realizar a análise precisa do pH, fornecendo a base necessária para o desenvolvimento de modelos avançados de controle e otimização, por meio dos transientes de acionamento da válvula.

Figura 8 - Comportamento da variável pH em cada tratamento durante os 9 dias de experimento.



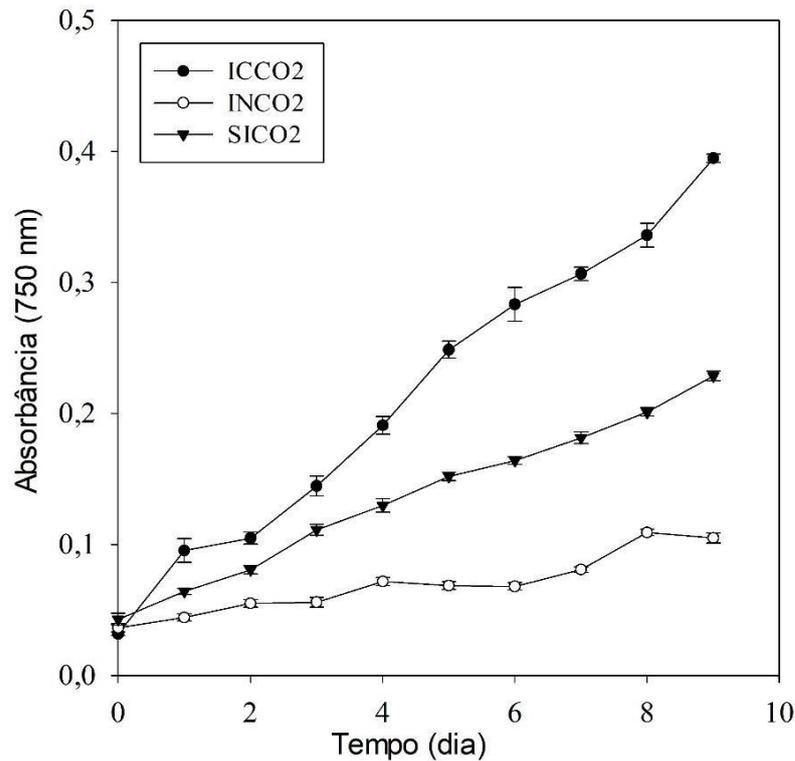
A) pH no tratamento SICO₂. B) pH no tratamento ICCO₂ e sinal de controle da válvula solenoide. C) pH no tratamento INCO₂.

Fonte: Autor

5.2 Crescimento das microalgas

Na Figura 9 são apresentados os resultados das análises de absorvância realizadas em um comprimento de onda de 750 nm para cada modalidade de cultivo ao longo dos 9 dias de experimento.

Figura 9 - Análise de absorvância dos cultivos para o comprimento de onda de 750 nm durante os dez dias de experimento.



Fonte: Autor

A partir do gráfico, é perceptível que o tratamento ICCO₂ demonstrou valores mais elevados de absorvância ao longo do experimento, o que indica maior densidade celular de *Scenedesmus obliquus* BR003, tendo em vista que a análise espectrofotométrica é uma abordagem utilizada para determinar a concentração de biomassa de microalgas no meio de cultivo (JIA, 2015). Em contrapartida, o tratamento INCO₂ apresentou os menores valores de absorvância, indicando uma baixa concentração de células no volume de cultivo. Esses resultados estão diretamente relacionados ao comportamento do pH, discutido anteriormente. No caso do cultivo INCO₂, mesmo com uma alta disponibilidade de CO₂, a acidificação do meio inibiu o crescimento das microalgas, resultando em um crescimento abaixo do modelo de controle SICO₂. Por outro lado, o cultivo ICCO₂, que se manteve próximo ao pH ótimo de crescimento das microalgas e com uma oferta abundante de CO₂, apresentou um crescimento superior ao modelo de controle.

É importante destacar que em Pires (2012), o autor concorda que baixos valores de pH é um fator limitante para o crescimento das microalgas, observação que também é apoiada por outros estudos, revisados pelo autor, que investigam a tolerância de diferentes espécies de microalgas a valores baixos de pH. No contexto de utilização de microalgas para a remoção de CO₂ dos gases de exaustão de usinas termelétricas a carvão, Maeda et al. (1995) empregou a utilização de CaCO₃ para ajustar o pH e, assim, prevenir a mortalidade das microalgas. Tripathi et al. (2015) explorou o potencial da *Scenedesmus* sp. para o sequestro de carbono e a produção de biodiesel, testando a influência de diferentes valores de pH (7, 8, 9 e 10), concentrações de CO₂ e bicarbonato de sódio, insumos que afetam diretamente o pH do meio. Novamente, concorda-se que valores de pH fora da neutralidade têm um impacto negativo no crescimento do cultivo.

O presente estudo avança nesse contexto, demonstrando que um controlador bem projetado é capaz de realizar o ajuste de pH de maneira eficaz, sem a necessidade da adição de qualquer outro insumo, além do CO₂ utilizado para a suplementação de carbono do cultivo. Além disso, os resultados indicam que essa abordagem pode ser aplicada com sucesso a diferentes espécies de microalgas, pois é possível ajustar o pH para o ponto ótimo de cultivo para cada espécie. Esse efeito pode ser aprimorado ainda mais por meio de estratégias de controle mais avançadas, que garantem a eficiência do cultivo e economizam recursos. A capacidade de otimizar as condições de cultivo de microalgas sem a necessidade de adicionar insumos adicionais representa um avanço significativo no campo e tem implicações importantes tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Isso reforça a contribuição original dessa pesquisa para o desenvolvimento de práticas sustentáveis na produção de microalgas.

5.3 Crescimento das microalgas

Na tabela 1, são apresentados os resultados da comparação entre os cultivos ICCO₂, INCO₂ e SICO₂, em relação a quantidade de biomassa seca livre de cinzas produzida e sua composição, caracterizada por lipídios, carboidratos neutros, proteínas e pigmentos.

Tabela 1 - Comparação da composição da biomassa entre os cultivos.

Cultivo	ICCO₂	INCO₂	SICO₂
Biomassa seca livre de cinzas (g L ⁻¹)	0,96 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,53 ± 0,01
Lipídios totais (% , base seca)	22,15 ± 0,68	23,78 ± 1,36	23,30 ± 1,25
Carboidratos neutros (% , base seca)	18,75 ± 0,15	12,23 ± 0,26	11,52 ± 0,81
Proteínas totais (% , base seca)	51,95 ± 1,23	48,25 ± 2,35	49,48 ± 1,15
Pigmentos totais (mg/g)	15,09 ± 1,25	13,53 ± 1,05	11,78 ± 1,13

Fonte: Autor

Observa-se que o sistema ICCO₂ apresentou o maior valor de biomassa seca livre de cinzas, com uma média de 0,96 g L⁻¹. Em contraste, o sistema INCO₂ apresentou um valor consideravelmente menor, com uma média de 0,31 g L⁻¹. Utilizando o sistema SICO₂ como controle, observa-se que o cultivo ICCO₂ apresentou um valor 81% maior. Por outro lado, é possível perceber que o sistema com injeção de CO₂ sem o controlador (INCO₂) apresentou uma produção de biomassa seca 42% menor em relação ao cultivo de controle. Isso sugere que manter o pH próximo ao valor ótimo de operação, além de aumentar o número total de células, também contribui para o aumento da biomassa seca total. Por outro lado, a acidificação do meio, ilustrada no cultivo INCO₂, provoca uma redução da produção de biomassa seca.

Analisando a Tabela 1 é possível observar diferenças nos teores de lipídios, carboidratos neutros e proteínas entre os cultivos ICCO₂, INCO₂ e SICO₂. No cultivo ICCO₂, observou-se um teor de lipídios totais de 0,21 g L⁻¹, em contraste com 0,07 g L⁻¹ e 0,12 g L⁻¹ nos cultivos INCO₂ e SICO₂, respectivamente. Quanto aos carboidratos neutros, o cultivo ICCO₂ apresentou um valor de 0,18 g L⁻¹, enquanto os cultivos INCO₂ e SICO₂ registraram valores 0,04 g L⁻¹ e 0,06 g L⁻¹, respectivamente. Adicionalmente, a análise das proteínas totais mostrou um teor de 0,50 g L⁻¹ no cultivo ICCO₂, em comparação com 0,15 g L⁻¹ e 0,26 g L⁻¹ nos cultivos INCO₂ e SICO₂, respectivamente. Difusa et al. (2015) explorou os efeitos da intensidade da luz e do pH no crescimento, biomassa e conteúdo de lipídios de microalgas do gênero *Scenedesmus*. Os resultados destacaram a influência significativa da intensidade da luz no crescimento das microalgas, observando um crescimento mais rápido em condições de alta intensidade luminosa. Além disso, o pH do meio de cultivo também teve um impacto considerável no crescimento das microalgas, sendo mais favorável em condições de pH neutro (7,5). Os níveis de lipídios nas microalgas também foram afetados pela intensidade da luz e pelo pH, com teores mais elevados de lipídios ocorrendo em condições de alta intensidade luminosa e pH neutro. Assim, ao manter o pH do cultivo próximo à neutralidade, o controlador

on/off foi responsável por gerar aproximadamente duas vezes mais lipídios, três vezes mais carboidratos e duas vezes mais proteínas em relação ao cultivo de controle SICO₂. Esses resultados evidenciam o impacto significativo do controlador na maximização da produção de biomassa e seus componentes.

Na tabela 2 são apresentados os resultados da comparação entre o cultivo ICCO₂, em que foi aplicado o controlador *on/off*, e o cultivo INCO₂, em que não houve a aplicação do controlador. Foram analisados o tempo que a válvula solenoide permaneceu ligada e o consumo de CO₂ em cada sistema durante os 9 dias de cultivo.

Tabela 2 - Consumo total de CO₂ por modalidade de cultivo.

Cultivo	Tempo total (Horas)	Consumo CO ₂ (Kg)
INCO ₂	90,5	0,50
ICCO ₂	4,8	0,03

Fonte: Autor

No cultivo INCO₂, o tempo em que a válvula permaneceu aberta foi de 90,5 horas. Em contraste, o cultivo ICCO₂ apresentou um tempo de abertura de válvula significativamente menor, totalizando 4,8 horas. Essa redução demonstra a eficácia do controlador *on/off* em otimizar o tempo de operação do sistema, o que impacta diretamente no consumo de CO₂ de cada cultivo, tendo em vista que, no sistema não controlado, o consumo de CO₂ foi de 0,50 kg, enquanto no sistema controlado, esse consumo caiu para 0,03 kg. Por fim, pode-se converter a redução do consumo de CO₂ para uma perspectiva monetária, considerando o valor de R\$ 19,50 para cada kg de CO₂ (apêndice A), o cultivo INCO₂ apresentou um gasto aproximado com CO₂ de R\$ 26,21 para cada grama de biomassa seca produzida. O cultivo ICCO₂ apresentou um gasto aproximado de CO₂ de R\$ 0,51 para cada grama de biomassa produzida, o que representa uma redução de 98,05% nos gastos com CO₂, redução causada pela aplicação do controlador *on/off*. É importante salientar que neste trabalho não foi avaliado a eficiência da injeção do CO₂, e os custos apresentados podem ser reduzidos em trabalhos futuros que objetiva a otimização do sistema de injeção.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou investigar os efeitos da aplicação do controlador *on/off* no cultivo de microalgas, com foco na análise da densidade celular, biomassa e composição química. Através dos resultados obtidos, tornou-se evidente que o uso do controlador exerceu influências significativas sobre os parâmetros do cultivo, apresentando implicações promissoras para a otimização da produção de microalgas em um contexto mais amplo.

A análise da densidade celular ao longo dos 9 dias de experimento revelou que o tratamento ICCO₂, onde o controlador foi aplicado, resultou em valores mais elevados de absorvância em comparação com o tratamento INCO₂. Esse aumento na densidade celular, indicado pela absorvância, reflete a capacidade do controlador *on/off* de promover um ambiente de pH mais propício ao crescimento das microalgas. O cultivo ICCO₂, manteve-se próximo ao pH ótimo de crescimento, o que resultou em um crescimento superior ao modelo de controle SICO₂.

A avaliação da quantidade de biomassa seca livre de cinzas, bem como a composição da biomassa, trouxe à tona aspectos importantes da influência do controlador *on/off*. O sistema ICCO₂, demonstrou um aumento de 81% na biomassa seca livre de cinzas em comparação com o sistema SICO₂, reforçando a capacidade do controlador de otimizar a produção total de biomassa. Além disso, a análise permitiu entender a relação entre pH, oferta de CO₂ e a composição da biomassa, com o sistema ICCO₂ produzindo duas vezes mais lipídios, três vezes mais carboidratos e duas vezes mais proteínas em relação ao cultivo de controle SICO₂.

A análise comparativa entre o cultivo ICCO₂ e INCO₂ em termos gasto de CO₂ (em R\$) para produção de 1 g de biomassa seca demonstrou mais uma vez a eficácia do controlador *on/off*. O sistema controlado ICCO₂ apresentou uma redução de aproximadamente 98,05% no gasto com CO₂ em relação ao sistema não controlado INCO₂.

À luz desses resultados, este estudo abre caminho para futuras investigações que podem explorar outras variáveis além do pH, bem como diferentes estruturas de controladores, a fim de aprimorar ainda mais a produção de microalgas. A capacidade do controlador *on/off* de influenciar positivamente o crescimento e a biomassa das microalgas têm implicações significativas tanto para a indústria quanto para a pesquisa de biocompostos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, Robert A. (Ed.). **Algal Culturing Techniques**. USA: Elsevier Academic Press, 2005. 589 p.
- BARBOSA, RÚBEN CHRISTIAN. **Real-time monitoring and automatic control of outdoor cultivation of *Scenedesmus obliquus* BR003 in open tanks**. 2019. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Junho, 2019.
- BENEMANN JR, TILLET DM (1987). **Effects of fluctuating environments on the selection of high yielding microalgae**. Technical report, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- BERNARD, O.; MAIRET, F.; CHACHUAT B. **Modelling of Microalgae Culture Systems with Applications to Control and Optimization**, in: C. Posten, S. Feng Chen (Eds.), **Microalgae Biotechnol.**, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 59–87. doi:10.1007/10_2014_287.
- CHISTI Y. **Biodiesel from microalgae**. **Biotechnol Adv** 2007;25:294–306. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- DIFUSA, Amrita et al. **Efeito da intensidade da luz e condição de pH no crescimento, biomassa e conteúdo lipídico de microalgas Espécies de *Scenedesmus***. **Biocombustíveis**, 2015. DOI: 10.1080/17597269.2015.1045274.
- DUARTE, B. P. **Controle de temperatura de um processo fotocatalítico com uso da plataforma arduino**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- F. JIA, M. KACIRA, K. OGDEN, **Multi-Wavelength Based Optical Density Sensor for Autonomous Monitoring of Microalgae, Sensors**. 15 (2015) 22234–22248. doi:10.3390/s150922234
- FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Tradução de Fernando de Oliveira Souza. Revisão técnica de Antonio Pertence Júnior. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- MAEDA K, OWADA M, KIMURA N, OMATA K, KARUBE I. **Fixação de CO₂ do gás de combustão em usina termelétrica a carvão por microalgas**. **Energy Convers Manage** 1995;36:717–20.
- MATA, T.M.; MARTINS, A.A. M; CAETANO, N.S. **Microalgae for biodiesel production and other applications: A review**, **Renew. Sustain. Energy Rev.** 14 (2010) 217–232. doi:10.1016/j.rser.2009.07.020.
- MEDIPALLY, S. R.; YUSOFF, F. M.; BANERJEE, S.; SHARIFF, M. (2015). **Microalgae as Sustainable Renewable Energy Feedstock for Biofuel Production**. **BioMed Research International**, 2015, 1-13.
- MEIRELES, L.A.; AZEVEDO, J.L.; CUNHA, J.P.; MALCATA, F.X. **On-Line Determination of Biomass in a Microalga Bioreactor Using a Novel Computerized Flow Injection Analysis System**, **Biotechnol. Prog.** 18 (2002) 1387–1391. doi:10.1021/bp020283u.
- MILLEDGE, J.J. **Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review**, **Rev. Environ. Sci. Bio/Technology.** 10 (2011) 31–41. doi:10.1007/s11157-010-9214-7.

- MOODY, J.W.; MCGINTY, C.M.; QUINN J.C. **Global evaluation of biofuel potential from microalgae**, Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 111 (2014) 8691–8696. doi:10.1073/pnas.1321652111.
- NISE, N. S. **Control system engineering**, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2011.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução: Maya, Paulo Alvaro. [S.l.]: São Paulo: Prentice-Hall, 2005.
- PAWLOWSKI, A.; MENDOZA, J.L.; GUZMÁN, J.L.; BERENGUEL, M.; ACIÉN, F.G.; DORMIDO, S. **Selective pH and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an eventbased approach**. Control Eng. Pract. 2015, 44, 209–218
- REIS, LINEU BELICO DOS. **Geração de energia elétrica**. 2 ed.rev. e atual. Barueri-SP: Manole, 2011.
- REN21 SECRETARIAT. **Renewables 2022 Global Status Report**, Paris, 2022. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2022/>. Acesso em: [06.08.2023].
- RICHMOND A. **Handbook of algal mass culture**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 566 p., 1990.
- RIPPKA, Rosmarie et al. **Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria**. Microbiology, v. 111, n. 1, p. 1-61, 1979.
- ROCHA, Dilson Novais. **Associação de fatores de estresse e modos de cultivo para aumento da produtividade de lipídeos em Scenedesmus spp.**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.
- ROCHA, D.N., MARTINS, M.A., SOARES, J., VAZ, M.G.M.V., DE OLIVEIRA LEITE, M., COVELL, L., MENDES, L.B.B., 2019. **Combination of trace elements and salt stress in different cultivation modes improves the lipid productivity of Scenedesmus spp.** Bioresour. Technol. 289, 121644. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121644>
- RODRÍGUEZ-TORRES, MJ; MORILLAS-ESPAÑA, A.; GUZMÁN, JL; ACIÉN, FG **Modelagem e Controle de pH em Pista e Camada Fina Fotobiorreatores para águas residuais Tratamento**. Energias 2021, 14, 1099. <https://doi.org/10.3390/en14041099>
- SANTOS, Raquel Barreira dos et al. **Comparative study of different lipid extraction methods from wet microalgal biomass using co-solvent and pressurized liquid extraction**. Bioresource Technology, v. 175, p. 333-338, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.059.
- SUKENIK A, FALKOWSK PG, BENNETT J. **Potential enhancement of photosynthetic energy conversion in algal mass culture**. Biotechnol Bioeng 1987;30:970–7. doi:10.1002/bit.260300808.
- SUTHERLAND, Donna L. et al. **The effects of CO₂ addition along a pH gradient on wastewater microalgae photo-physiology, biomass production and nutrient removal**. Water research, v. 70, p. 9- 26, 2015.).
- TRIPATHI, Ritu & SINGH, Jyoti & THAKUR, Indu. (2015). **Characterization of microalga Scenedesmus sp. ISTGA1 for potential CO₂ sequestration and biodiesel production**. Renewable Energy. 74. 774-781. 10.1016/j.renene.2014.09.005.
- VONSHAK, A. – **Spirulina platensis (Arthrospira)**. London: Taylor and Francis Ltd., ISBN 0-7484-0674-3, 1997

ZHU L. **Microalgal culture strategies for biofuel production: A review.** *Biofuels, Bioprod Biorefining* 2015;9:801–14. doi:10.1002/bbb.1576.

APÊNDICE A – Cotação do valor de CO₂

Serra/ES, 20 de Novembro de 2023

a Lucas Luna da Silva

Segue proposta para fornecimento de gases:

Produtos	UN	Valor unit.	QTD	Valor total
Gás Dióxido de Carbono Comprimido Cil. 15L (10,0kg)	KG	R\$ 19,50	10,00	R\$ 195,00
			Total	* R\$ 195,00

* Preço final, incluídos os impostos.

Atendimento/suprimento:

- atendimento imediato
- frete CIF região da Grande Vitória/ES
- condição de pagamento prazo 21 dias