

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ALESSANDRO HIROYUKI IWAI DA CONCEIÇÃO

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CONTROLADOR *FUZZY* DE
TEMPERATURA PARA CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATOR
PARA BIODIESEL

SÃO CARLOS - SP
2025

ALESSANDRO HIROYUKI IWAI DA CONCEIÇÃO

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CONTROLADOR *FUZZY* DE
TEMPERATURA PARA CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATOR
PARA BIODIESEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos
Luperni Horta

SÃO CARLOS - SP

2025

ALESSANDRO HIROYUKI IWAI DA CONCEIÇÃO

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CONTROLADOR *FUZZY* DE
TEMPERATURA PARA CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATOR
PARA BODIESEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Química.

Trabalho de Graduação apresentado no dia 8 de dezembro de 2025 perante a banca
examinadora:

Antonio Carlos Luperni Horta – Doutor (UFSCar)

Fábio Bentes Freire – Doutor (UFSCar)

Fabiane Modenese Garbim – Mestre (IME)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Carlos Luperni Horta pela paciência acima de tudo e por me orientar no trabalho de iniciação científica e no trabalho de graduação, além do Prof. Dr. José Mansur Assaf e da Prof. Dra. Laura Lorena da Silva pela coordenação do Programa de Recursos Humanos da ANP (PRH/ANP).

Agradeço o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e da FAPESP por meio do PRH/ANP para o Setor de Biocombustíveis.

Agradeço também à minha família por todo suporte material e emocional durante este período.

“Triunfam aqueles que sabem quando lutar e quando esperar”

Sun Tzu

RESUMO

Este projeto modelou e otimizou um protótipo de controlador *fuzzy* de temperatura para utilização em cultivo de microalgas em fotobiorreator e Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) para sintonia do controlador e otimização das equações *fuzzy* de defuzzificação. Para isto, o protótipo consistiu em um banho térmico com dois sensores de temperatura, uma dorna com aquecimento elétrico, uma dorna com água de resfriamento, bomba d'água, válvula solenóide, utilização de plataforma de prototipagem livre em linguagem C++ (Arduino), LabVIEW para supervisão do controle térmico e MATLAB para modelagem e otimização do sistema desenvolvido. O controlador *fuzzy* foi desenvolvido utilizando as funções de pertinência de temperatura: Muito Baixa, Baixa, Ótima, Alta e Muito Alta. Estes parâmetros foram incorporados à manipulação da potência elétrica de aquecimento, associados a constantes ajustáveis, para que o otimizador sintonize o controlador para manter a temperatura do fotobiorreator o mais próximo possível do desejável. Para o resfriamento, as funções de pertinência também foram incorporadas à manipulação da válvula de abertura de água fria, junto a outras constantes. Com o propósito de otimizar as constantes utilizadas na lógica *fuzzy*, modelou-se no MATLAB, utilizando balanço de energia e o método de otimização *Simulated Annealing*, o sistema desenvolvido experimentalmente. Com isso, foi possível encontrar os melhores parâmetros para as equações de defuzzificação deste sistema para utilização no protótipo de controlador de temperatura.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Simulador de Processo; Bioprocesso;

ABSTRACT

This project modeled and optimized a prototype of a fuzzy temperature controller for use in microalgae cultivation in a photobioreactor, employing Simulated Annealing for controller tuning and optimization of the fuzzy defuzzification equations. The prototype consisted of a thermal bath with two temperature sensors, a vessel with electric heating, a cooling water vessel, a water pump, a solenoid valve, and the use of an open-source prototyping platform in C++ (Arduino), LabVIEW for thermal control supervision, and MATLAB for system modeling and optimization. The fuzzy controller was developed using temperature membership functions: Very Low, Low, Optimal, High, and Very High. These parameters were incorporated into the manipulation of electrical heating power, associated with adjustable constants, so that the optimizer could tune the controller to maintain the photobioreactor temperature as close as possible to the desired value. For cooling, the membership functions were also incorporated into the manipulation of the cold-water valve opening, along with other constants. To optimize the constants used in the fuzzy logic, the system developed experimentally was modeled in MATLAB using an energy balance and the Simulated Annealing optimization method. As a result, it was possible to determine the best parameters for the defuzzification equations of this system for application in the temperature controller prototype.

Keywords: Fuzzy Logic; Process Simulation; Bioprocess;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Reação de transesterificação para produção de biodiesel.	16
Figura 2. Produção anual de Biodiesel no Brasil.	17
Figura 3. Balanço de energia para um volume de controle.	27
Figura 4. Fluxograma esquemático do sistema real.	32
Figura 5. Fluxograma esquemático do balanço de energia.	32
Figura 6. Dorna de aquecimento.	33
Figura 7. Banho termostático NESLAB.	34
Figura 8. Válvula solenóide acoplada à dorna de aquecimento.	34
Figura 9. Arduino UNO e Dimmer.	35
Figura 10. Pseudocódigo utilizado no Arduino/Genuino.	36
Figura 11. Funções de pertinência de temperatura.	37
Figura 12. SuperSys_Photo.	40
Figura 13. Controle de Luz.	40
Figura 14. Biorreator airlift no início do cultivo.	42
Figura 15. Comparação - Lógica fuzzy/PID.	48
Figura 16. Resultados do controle de temperatura.	49
Figura 17. Densidade óptica x Tempo.	49
Figura 18. Sensores de luz ao longo do tempo.	50
Figura 19. Perfis de temperatura do experimento.	50
Figura 20. LEDs Verdes; LEDs Vermelhas e LEDs Azuis.	50
Figura 21. Perfis de temperatura da simulação.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Deltas experimentais	36
Tabela 2. Componentes e concentrações da solução BG-Modificado.	41
Tabela 3. Parâmetros do modelo.	43
Tabela 4. Limites dos Deltas do modelo	46
Tabela 5. Deltas simulados	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Dióxido de carbono
E30	Gasolina com 30% de etanol, volume/volume
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
CBIO	Crédito de Descarbonização
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
B15	Diesel com 15% de biodiesel, volume/volume
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
PID	Proporcional, integral, derivativo
pH	Potencial hidrogeniônico
COVID-19	<i>Coronavirus Disease 2019</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> (Vermelho, Verde, Azul)
NUT	Número de unidades de transferência
PAT	<i>Process Analytical Technology</i> (Tecnologia Analítica de Processos)
VLP	<i>Virus Like Particles</i> (Partículas Semelhantes a Vírus)
HEK	<i>Human Embryonic Kidney</i> (Rim embrionário humano)
QbD	<i>Quality by Design</i> (Qualidade baseada no Projeto)
TMB	Temperatura Muito Baixa
TB	Temperatura Baixa
TO	Temperatura Ótima
TA	Temperatura Alta
TMA	Temperatura Muito Alta
TDB	Temperatura da Dorna Baixa
TDO	Temperatura da Dorna Ótima
TDB	Temperatura da Dorna Baixa
SP	<i>Setpoint</i> (Ponto de ajuste)
W	<i>White</i> (Branco)
SA	<i>Simulated Annealing</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
U	Energia interna
W	<i>Watts</i>
J	<i>Joule</i>
kg	Quilograma
e_p	Energia potencial, J/kg
e_c	Energia cinética, J/kg
h_i	Entalpia, J/kg
\dot{m}	Fluxo mássico, kg/s
\dot{Q}	Taxa de calor, W
\dot{W}	Taxa de trabalho, W
K	<i>Kelvin</i>
c_p	Calor específico, J/kg/K
T	Temperatura, $^{\circ}\text{C}$
m	Massa, kg
m^3	Metro cúbico
q	Taxa de calor, W
A	Área, m^2
k	condutividade térmica, W/m/K
R_{cond}	Resistência condutiva, K/W
R_{conv}	Resistência convectiva, K/W
L	Comprimento, m
h	Coeficiente de transferência por convecção, W/K/m ²
R_{total}	Resistência total, K/W
U	Coeficiente global de transferência de calor
ϵ	Efetividade
V	<i>Volts</i>
Hz	<i>Hertz</i>
A	Ampére

L

min

μ

Litros

Minutos

Micro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1. Biocombustíveis.....	14
2.2. Biodiesel.....	16
2.3. Controle de Temperatura.....	18
2.3.1. Lógica Fuzzy.....	19
2.3.2. Arduino.....	21
2.3.3. LabVIEW.....	23
2.3.4. Banho Termostático.....	24
2.4. Gêmeos Digitais.....	25
2.5. Balanço Energético.....	26
2.6. Simulated Annealing.....	30
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Banho Térmico.....	33
3.2. Arduino.....	35
3.3. LabVIEW.....	39
3.4. Cultivo de Microalgas.....	40
3.5. Balanço Energético.....	42
3.6. Simulação do Processo.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1. Cultivo de Microalgas.....	48
4.2. Simulação do Processo.....	52
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis tem se intensificado diante das crescentes preocupações globais com as mudanças climáticas e a necessidade de diversificação das fontes de energia. Nesse contexto, os biocombustíveis destacam-se como uma solução promissora, oferecendo não apenas uma redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também benefícios socioeconômicos e ambientais (Duarte *et al.*, 2022).

Entre os biocombustíveis, o biodiesel tem atraído significativa atenção devido à sua versatilidade e eficiência. Sua produção, baseada na reação de transesterificação, pode utilizar uma ampla gama de matérias-primas, como óleos de fritura reciclados e resíduos agroindustriais, contribuindo para a economia circular e o desenvolvimento rural (Cardoso *et al.*, 2020; Saltarin *et al.*, 2023). Além disso, a utilização de microalgas como matéria-prima para o biodiesel surge como uma solução inovadora, dado seu elevado potencial de produtividade e baixo impacto no uso de terras agrícolas (Hoang *et al.*, 2023). No entanto, a produção de biodiesel a partir de microalgas enfrenta desafios técnicos e econômicos, especialmente relacionados ao controle de condições ambientais como temperatura, que influencia diretamente a produtividade e a qualidade dos lipídios extraídos (Barten *et al.*, 2021).

Neste cenário, desenvolveu-se um sistema de controle de temperatura por lógica *fuzzy*, abordagem adequada para lidar com incertezas e imprecisões de processos complexos, como o cultivo de microalgas para produção de biodiesel (Zadeh, 1965; Akisue, 2022). E para otimizar os parâmetros do controlador, o sistema foi modelado em MATLAB com base em balanço de energia e utilizando o método de otimização *Simulated Annealing* (SA), permitindo identificar configurações ótimas das equações de defuzzificação.

Com isso, o objetivo principal deste trabalho foi implementar um controlador *fuzzy* capaz de reduzir o consumo de energia e estabilizar a temperatura de forma eficiente, assegurando condições térmicas ideais e maximizando a eficiência do processo produtivo. A pesquisa busca contribuir para a viabilidade econômica e ambiental da produção de biodiesel, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade energética. Ao enfrentar os desafios do controle térmico com uma solução tecnológica inovadora, o estudo avança o conhecimento científico e tecnológico na área e promove práticas mais sustentáveis para a produção de biocombustíveis.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Biocombustíveis

Os biocombustíveis emergem como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, respondendo à crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de diversificação das fontes de energia. Produzidos a partir de biomassa, como plantas e resíduos orgânicos, os biocombustíveis têm o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diminuir a dependência de fontes não renováveis (Duarte *et al.*, 2022).

Além de suas vantagens ambientais, os biocombustíveis oferecem benefícios socioeconômicos significativos. Eles podem estimular a criação de empregos e promover o desenvolvimento rural, contribuindo para a segurança energética e a independência econômica das regiões produtoras. Estudos indicam que a adoção de tecnologias relacionadas à produção de biocombustíveis pode impulsionar a economia local, ao mesmo tempo em que atende às demandas energéticas (Guedes *et al.*, 2020).

A evolução tecnológica do setor costuma ser apresentada em quatro gerações, como descrito por Cavelius *et al.* (2023) e Padder *et al.* (2024). A primeira geração envolve rotas consolidadas que utilizam matérias-primas alimentares: como por exemplo, açúcares e amidos fermentados para produzir etanol e óleos vegetais convertidos a biodiesel via transesterificação. São cadeias maduras, com infraestrutura estabelecida e ampla difusão, mas que enfrentam críticas por competição alimento-energia e pela sensibilidade a impactos de uso da terra, o que tem motivado ganhos de eficiência agrícola e industrial ao longo do tempo.

A segunda geração busca superar essas limitações ao priorizar biomassa não alimentar, como resíduos agrícolas e florestais, subprodutos industriais ou óleos e gorduras residuais. Ao valorizar correntes residuais, reduz a pressão sobre terras aráveis e agrega benefícios ambientais, em sintonia com as vantagens socioeconômicas. Em contrapartida, a conversão de materiais lignocelulósicos exige pré-tratamento e controle de inibidores, além de rotas termoquímicas e bioquímicas mais complexas, como gaseificação e fermentação de gás de síntese, o que eleva o desafio tecnológico.

A terceira geração concentra-se em microalgas e cianobactérias como plataformas fotossintéticas de alta produtividade para lipídios. Esses microrganismos podem ser cultivados sem competir com terra agrícola e até em águas salobras ou

residuais, ao mesmo tempo em que fixam CO₂ — alinhando produção energética à mitigação climática e abrindo espaço para integrações com tratamento de efluentes e uso de emissões industriais como insumo de carbono. Persistem, porém, barreiras de custo em cultivo, colheita/ruptura celular e extração, que tem sido foco de pesquisa aplicada e inovação de processo.

Por fim, a quarta geração incorpora bioengenharia e biologia sintética para ampliar o uso de açúcares, potencializar a lipogênese e aumentar a fixação de carbono em cepas microbianas e organismos fotossintéticos, além de explorar eletrobiofueis que acoplam eletricidade renovável e CO₂ a rotas metabólicas projetadas. Essa geração enfatiza o desenho racional de microrganismos e a integração com captura e utilização de carbono, visando maior produtividade e menor pegada ambiental ao longo da cadeia de valor.

No Brasil, a política de biocombustíveis combina histórico, metas climáticas e instrumentos econômicos. O Proálcool inaugurou nos anos 1970, uma trajetória de substituição parcial de derivados fósseis por combustíveis de base renovável, com impactos econômicos e ambientais documentados em balanços oficiais, e permanece como referência histórica da transição energética nacional (MME, 2024). De forma mais recente, o país elevou a participação de etanol anidro na gasolina de 27% para 30% (E30), decisão técnica e regulatória coordenada no âmbito do Conselho Nacional de Política Energética e operacionalizada pela ANP, com ajustes de especificação para garantir qualidade e suprimento a partir de 1º de agosto de 2025 (Planalto, 2025; ANP, 2025). Em paralelo, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) — instituída pela Lei nº 13.576/2017 — estabelece metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, lastreadas pelo CBIO (crédito de descarbonização) (ANP, 2025). Já no plano social, o governo federal mantém instrumentos de inclusão produtiva vinculados à cadeia de biocombustíveis, por meio de selos de caráter social e incentivos tributários, definidos originalmente no Decreto nº 5.297/2004 e atualizados pelo Decreto nº 10.527/2020, que estabelecem critérios de habilitação, manutenção e fruição dos benefícios (Planalto, 2020).

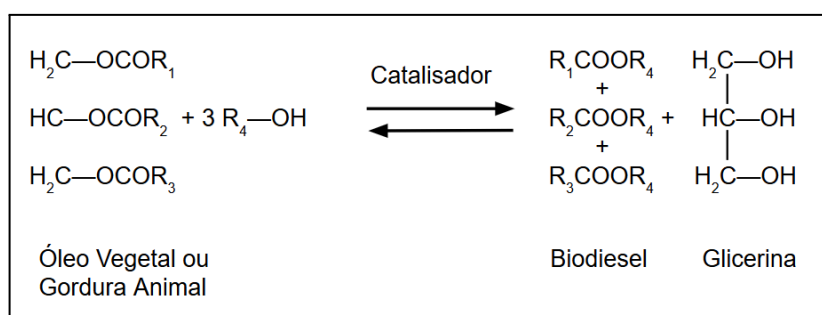
Vista de forma contínua, a transição entre gerações não substitui, mas complementa soluções: rotas de primeira e segunda geração seguem relevantes na segurança de suprimentos e no desenvolvimento regional, enquanto a terceira e a quarta geração ampliam o horizonte tecnológico para um portfólio mais diverso,

eficiente e aderente às metas de descarbonização. No Brasil, essa trajetória é viabilizada por um arranjo de políticas e instrumentos que combinam legado histórico (Proálcool), ajustes regulatórios recentes (E30) e sinais econômicos de descarbonização (RenovaBio e CBIO), além de mecanismos de inclusão produtiva (Cavelius *et al.*, 2023; Padder *et al.* 2024; Duarte *et al.*, 2022; Guedes *et al.*, 2020; Planalto, 2025).

2.2. Biodiesel

O biodiesel é um combustível renovável que vem se destacando como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Produzido a partir de óleos vegetais e gorduras animais, o biodiesel não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também contribui para a diversificação da matriz energética (Babadi *et al.*, 2022). Sua utilização pode resultar em uma diminuição significativa da poluição atmosférica em comparação aos combustíveis convencionais (Mathew *et al.*, 2021). O biodiesel é produzido, principalmente, pela reação de transesterificação de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Reação de transesterificação para produção de biodiesel.



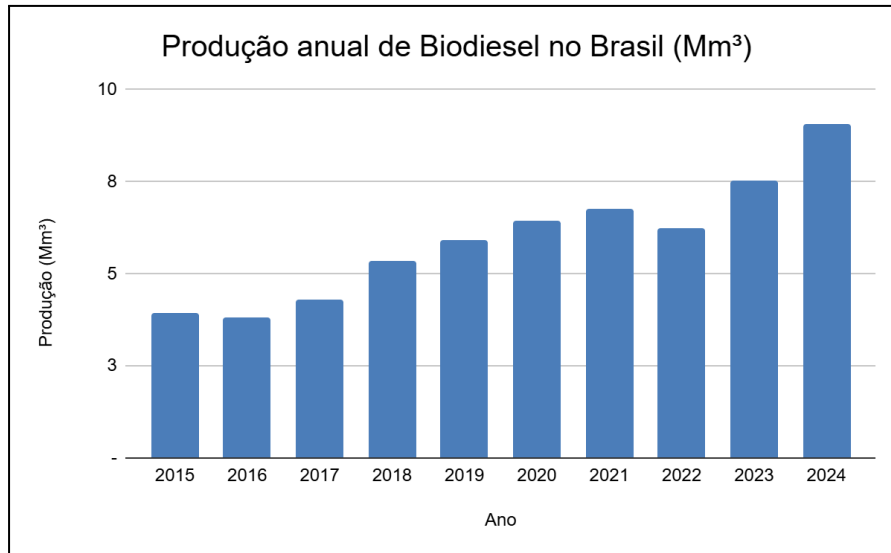
Fonte: Adaptado de Antunes (2011).

A versatilidade na escolha das matérias-primas para a produção de biodiesel é um dos seus principais atrativos, permitindo o uso de resíduos agroindustriais e óleos descartados, como o de fritura (Cardoso *et al.*, 2020). Essa prática não só promove a valorização de resíduos, mas também favorece o desenvolvimento econômico em áreas rurais, ao gerar emprego e renda para os agricultores (Saltarin *et al.*, 2023).

Segundo dados do Anuário Estatístico Brasileiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2025, a produção de Biodiesel no Brasil

vem crescendo ano a ano, indicando a necessidade de estudos que otimizem a produção do mesmo, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Produção anual de Biodiesel no Brasil.



Fonte: Adaptado de Anuário Estatístico da ANP (2025).

Além das vantagens ambientais e socioeconômicas, a pesquisa e a inovação tecnológica no setor de biodiesel têm avançado, visando aprimorar a eficiência dos processos de produção e a qualidade do produto final (Aghbashlo *et al.*, 2021). No Brasil, a inserção do biodiesel foi estruturada pelo PNPB (Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel), lançado em 2004 com foco duplo: formação de mercado e inclusão produtiva da agricultura familiar por meio do selo de caráter social e de regras para aquisição de matéria-prima. A diretriz central tem sido elevar gradualmente o teor de mistura de biodiesel ao diesel para estimular a oferta, dar previsibilidade aos investimentos e capturar ganhos ambientais e regionais. Esse caminho levou o país de patamares iniciais de porcentagem de biodiesel no diesel, B2, a níveis de dois dígitos, chegando ao B15 definido pelo CNPE para entrada em vigor em 1º de agosto de 2025, com implementação e orientação operacional coordenadas pela ANP (MME, 2025; Planalto, 2020; CNPE, 2025).

O biodiesel, por tanto, é considerado peça estratégica da transição energética, unindo redução de emissões, valorização de resíduos e renda no campo. No Brasil, o PNPB e a evolução até B15 dão previsibilidade e impulsionam eficiência e a otimização de processos para garantia da qualidade.

As microalgas têm emergido como uma promissora fonte de matéria-prima para a produção de biodiesel, devido à sua alta produtividade e à capacidade de crescer em ambientes diversos, incluindo águas salinas e residuais. Esses organismos fotossintetizantes apresentam vantagens significativas em relação às fontes tradicionais de biodiesel, como óleos vegetais e gorduras animais, uma vez que não competem diretamente por terras agrícolas e possuem uma taxa de crescimento superior (Hoang *et al.*, 2023). Além disso, as microalgas são capazes de absorver grandes quantidades de dióxido de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Dolganyuk *et al.*, 2020).

O processo de extração de lipídios das microalgas é uma área de intenso estudo, uma vez que a eficiência na conversão desses lipídios em biodiesel pode impactar diretamente a viabilidade econômica do produto final. Pesquisas têm se concentrado em métodos de extração e conversão que maximizam o rendimento e minimizam custos (Thoré *et al.*, 2023). A utilização de microalgas também possibilita a produção de co-produtos, como ração animal e biopesticidas, aumentando a sustentabilidade do processo (Razzak *et al.*, 2024).

Estudos mostram, ainda, que integrar cultivos de microalgas a sistemas de tratamento de efluentes pode gerar um ciclo produtivo que purifica a água ao mesmo tempo em que fornece biomassa para biocombustíveis, favorecendo a integração em biorrefinarias (Mendonça *et al.*, 2021). Nessa integração com o saneamento, as microalgas têm se mostrado eficazes para remover nitrogênio e fósforo e, simultaneamente, capturar CO₂ de correntes gasosas. Em lagoas de alta taxa e fotobiorreatores, elas assimilam amônio/nitrato e ortofosfato para crescimento, reduzindo substancialmente a carga de nutrientes do efluente (Salgado *et al.*, 2023; Markou e Georgakakis, 2011).

2.3. Controle de Temperatura

O controle de temperatura é um fator crítico na produção de microalgas, uma vez que influencia diretamente a taxa de crescimento, a produtividade e a composição dos lipídios desses organismos. As microalgas são altamente sensíveis às variações de temperatura, que podem afetar tanto a fotossíntese quanto a eficiência do metabolismo. A temperatura ideal para o cultivo de microalgas varia entre as espécies, mas em geral, temperaturas entre 20 °C e 30 °C são

consideradas favoráveis para a maioria delas, promovendo um crescimento otimizado e a maximização da produção de biomassa (Barten *et al.*, 2021).

Estudos têm demonstrado que o desvio das condições térmicas ideais pode resultar em estresse celular, levando à redução da taxa de crescimento e à alteração na produção de metabólitos, incluindo lipídios, que são cruciais para a produção de biodiesel. Além disso, a implementação de sistemas de controle térmico em cultivos de microalgas pode aumentar a eficiência do processo produtivo e garantir uma qualidade superior da biomassa (Ahmad *et al.*, 2021).

Diferentes estratégias de controle térmico são empregadas em bioprocessos. Em fotobiorreatores de bancada, é comum acionar a resistência elétrica e válvula de água fria em um sistema *on/off*, onde dada uma temperatura de referência, *setpoint*, e uma faixa de erro são acionados o sistema de aquecimento ou resfriamento. A abordagem é considerada simples e robusta, adequada a sistemas didáticos e exploratórios, mas tende a gerar oscilações ao redor do *setpoint* com acionamentos muito frequentes, causando desgaste mecânico e picos de consumo (Benner *et al.*, 2025). Em reatores encamisados com recirculação de fluido térmico, pode ser utilizado o Controle PID (proporcional, integral, derivativo). Neste caso, são manipuladas as potências baseadas em um modelo matemático aplicando leis físicas. Aplicações em fermentadores mostram controle eficaz, porém em sistemas complexos podem gerar atrasos, não-linearidades e perturbações rápidas (Kumar *et al.*, 2025).

Como alternativa, controladores por lógica *fuzzy* têm se mostrado vantajosos em bioprocessos sujeitos a não linearidades e incertezas, nas quais variações de intensidade luminosa, crescimento celular, oxigenação e pH são relevantes (Luca *et al.*, 2018). Ademais, a integração de sensores e sistemas de automação para monitoramento e controle em tempo real tem se mostrado eficaz na manutenção de condições ambientais ideais, permitindo ajustes rápidos para otimizar o cultivo (Rehman *et al.*, 2022). Assim, o avanço em estratégias de controle de temperatura não apenas eleva a produtividade das microalgas, como também fortalece a viabilidade econômica do biodiesel e de outros bioprodutos de biorrefinaria.

2.3.1. Lógica *Fuzzy*

Desenvolvida por Lotfi Zadeh na década de 1960, a lógica *fuzzy* se baseia na ideia de que a verdade não é simplesmente binária (verdadeira ou falsa), mas pode

assumir valores intermediários, refletindo melhor a complexidade das situações cotidianas (Zadeh, 1965). A lógica *fuzzy* é amplamente utilizada em diversas áreas, incluindo controle de processos, inteligência artificial e sistemas de tomada de decisão.

Uma das principais vantagens da lógica *fuzzy* é sua capacidade de modelar e representar conhecimento qualitativo, o que a torna especialmente útil em sistemas onde as informações são vagas ou incertas. Por exemplo, em sistemas de controle de temperatura, a lógica *fuzzy* pode ser empregada para ajustar a operação de um aquecedor com base em regras que consideram a percepção humana de conforto, em vez de depender exclusivamente de valores numéricos (Berni *et al.*, 2020).

Um conjunto nebuloso teria diversos graus de pertinência em que a cada elemento seria permitido um grau variando de 0 a 1, sendo 0 completamente excluído ao conjunto e 1 completamente pertinente ao conjunto. Estas funções de pertinência são definidas como o grau de pertinência de cada elemento de um conjunto. Se assemelha às funções de probabilidade, mas não têm características estatísticas por natureza. Podem ter formas quadradas, retangulares e trapezoidais, por exemplo (Akisue, 2022).

A lógica nebulosa utiliza-se de variáveis linguísticas, como temperatura, pressão e vazão, ao contrário da matemática clássica que utiliza-se de variáveis numéricas, pela facilidade da utilização destes termos para expressão e processamento no formato de regras. Podem ser descritas por expressões como “rápido”, “devagar”, “alto” ou “baixo” e consideradas como uma forma de compressão de dados, tendo como vantagens maior generalização, maior semelhança com o pensamento humano e a transição de um valor linguístico para outro é mais suave e gradual, resultando em maior robustez (Akisue, 2022).

Diferentemente da abordagem clássica, que busca desenvolver métodos de controle baseados na modelagem matemática do processo, o controlador *fuzzy* desenvolve métodos de controle baseados no conhecimento do especialista, convertendo estratégias de controle qualitativas em automáticas. Os componentes básicos do controlador nebuloso incluem a interface de fuzzyficação, que converte números reais em valores linguísticos; a interface de defuzzyficação, que converte valores linguísticos em números reais; a base de conhecimento, que reúne as regras que caracterizam as estratégias e metas de controle, bem como informações sobre o processo; e o procedimento de inferência, responsável por processar os dados de

entrada fuzzyficados em conjunto com as regras de controle para inferir as ações de controle. Os parâmetros fornecidos pelos especialistas podem ser fixos, como as variáveis de saída e entrada, ou variáveis, como os parâmetros das funções de pertinência (Akisue, 2022).

Além destes conceitos, existem dois sistemas de inferência muito utilizados, o Mandani e Sugeno. Os sistemas Mamdani são intuitivos, bem adaptados para entrada humana, possuem uma base de regras mais interpretável e são amplamente aceitos em aplicações como diagnósticos médicos. Nesse tipo de sistema, a saída de cada regra é uma função de pertinência *fuzzy*, que é combinada e defuzzificada para gerar um valor *crisp*. Já os sistemas Sugeno são mais eficientes computacionalmente, trabalham bem com técnicas lineares e de otimização, garantem continuidade na superfície de saída e são ideais para análise matemática e modelagem de sistemas dinâmicos não lineares. As saídas das regras são *singletons* (constantes ou lineares em relação às entradas), e a defuzzificação é realizada por média ponderada, tornando o processo mais simples (Mandani, 1975; Sugeno, 1985).

Conseqüentemente, a lógica *fuzzy* é implementada em diversas situações, em diferentes áreas, demonstrando sua versatilidade e eficácia, como no estudo de Artur *et. al.* (2020), que aplicou a lógica *fuzzy* para análise da pandemia (COVID-19) em relação as questões do isolamento social. Enquanto que no estudo de Africa *et al.* (2020), usou da lógica *fuzzy* para previsão de demanda, diagnóstico médico e avaliação de riscos. Estudos recentes têm explorado a integração da lógica *fuzzy* com outras abordagens, como redes neurais e algoritmos genéticos, ampliando ainda mais seu potencial em resolver problemas complexos (Phan *et al.*, 2024). Assim, a lógica *fuzzy* se consolida como uma ferramenta valiosa para a modelagem de sistemas complexos e para a tomada de decisão em ambientes incertos.

2.3.2. Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que tem se tornado amplamente utilizada por entusiastas, educadores e profissionais em diversas áreas, incluindo automação, robótica e Internet das Coisas (IoT). Desenvolvida em 2005, a plataforma permite a criação de projetos interativos por meio de uma combinação de *hardware* e *software* acessíveis (Banzi; Shiloh, 2014).

O uso do Arduino democratizou a eletrônica, possibilitando que indivíduos sem formação técnica possam desenvolver e implementar soluções inovadoras.

Uma das principais características do Arduino é sua facilidade de uso, que se deve à linguagem de programação simplificada e à vasta comunidade de usuários que compartilham recursos, tutoriais e bibliotecas de código (Kondaveeti *et al.*, 2021). Essa acessibilidade tem contribuído para a inclusão de projetos de tecnologia nas escolas e universidades, promovendo o ensino de conceitos de programação e eletrônica de maneira prática e envolvente (García-Tudela; Marín-Marín, 2023).

Além de sua aplicação educacional, o Arduino também é amplamente utilizado em projetos de pesquisa e desenvolvimento. Sua versatilidade permite a integração com uma variedade de sensores, atuadores e módulos de comunicação, tornando-o uma ferramenta poderosa para a criação de protótipos rápidos e a exploração de novas ideias. Com o avanço da tecnologia, o Arduino continua a se adaptar, incorporando novos recursos que expandem suas capacidades, como conectividade sem fio e suporte para plataformas de computação em nuvem (Ismailov; Jo'yarev, 2022).

No âmbito de estudos biotecnológicos, Agrinier *et al.* (2024) desenvolveram um biorreator de baixo custo e fácil utilização, composto por um béquer encamisado com portas para amostragem e inserção de sondas. O controle e o monitoramento de pH, oxigênio dissolvido e temperatura foram realizados por meio de Arduino, garantindo condições estáveis e reproduzindo, em um modelo representativo da microbiota intestinal, as respostas humanas a um prebiótico. Já Wishkerman (2017), apresentou um sistema de iluminação por LEDs controlado por Arduino, projetado para o cultivo de microalgas com ênfase em baixo custo e reprodutibilidade. O arranjo permite programar fotoperíodo, intensidade via PWM (*Pulse Width Modulation*) e composição espectral RGB (*Red, Green, Blue*), com código e diretrizes disponibilizados para rápida adaptação a diferentes espécies e fotobiorreatores, viabilizando experimentos padronizados e comparáveis em bancada.

A linguagem de programação C++ foi desenvolvida por Bjarne Stroustrup na década de 1980, visando incorporar conceitos de programação orientada a objetos à linguagem C, que já era amplamente utilizada. O C++ se destaca pela sua eficiência, flexibilidade e suporte a paradigmas de programação tanto procedimentais quanto orientados a objetos (Montironi *et al.*, 2017).

Desde sua criação, o C++ passou por diversas atualizações e padronizações, sendo a versão mais recente o C++23 (ISO/IEC 14882:2024), que fez ajustes na linguagem e expansão na biblioteca com novos *ranges* e utilitários, elevando ergonomia e desempenho (ISO, 2024).

A versatilidade do C++ permite seu uso em uma variedade de áreas, incluindo sistemas operacionais, desenvolvimento de jogos, *software* embarcado e aplicações de alta performance, como em computação científica e financeira. Além disso, a linguagem é amplamente utilizada em ambientes acadêmicos e industriais devido ao seu desempenho e controle sobre recursos do sistema, características essenciais em aplicações que requerem alta eficiência (Montironi *et al.*, 2017).

Diante desse cenário, a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que explorem as capacidades do C++ continuam a ser um campo de estudo relevante e em crescimento, refletindo a importância desta linguagem no ecossistema de desenvolvimento de *software* contemporâneo.

2.3.3. LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma plataforma de desenvolvimento gráfico criada pela *National Instruments*, amplamente utilizada para a aquisição de dados, controle de instrumentação e automação de testes em diversas áreas da engenharia e ciência. Desde seu lançamento em 1986, LabVIEW se destacou por permitir que os usuários desenvolvam aplicações complexas de forma intuitiva, utilizando uma interface gráfica de programação (Elliott *et al.*, 2007). Essa abordagem visual facilita a construção de sistemas que exigem interação com *hardware*, como sensores e atuadores, promovendo um ambiente de prototipagem rápida e experimentação (Kirkman; Buksh, 1992).

Uma das principais características do LabVIEW é seu modelo de programação orientado a eventos, que permite a criação de fluxos de dados entre os diferentes componentes do sistema. Essa estrutura é particularmente eficaz para aplicações em tempo real e sistemas embarcados, onde a eficiência e a resposta rápida são cruciais. Além disso, LabVIEW oferece suporte a uma ampla gama de dispositivos e protocolos de comunicação, tornando-o uma ferramenta versátil para pesquisadores e engenheiros em áreas como automação industrial, telecomunicações e análise de dados (Bishop, 1999).

No contexto de plataformas para automação, Burdge e Libourel (2014) apresentaram um *software* de código aberto, distribuído gratuitamente (*open-source*), desenvolvido em LabVIEW e também distribuído como instalador autônomo para controle de biorreatores. O sistema oferece controle por *setpoint* e a operação de múltiplos reatores a partir de uma única interface, ampliando a flexibilidade e a habilitação de variados experimentos. Já River *et al.* (2009), propuseram um sistema inteligente em LabVIEW para monitoramento em tempo real da fermentação alcoólica, combinando medições online de pH, turbidez, vazão de CO₂ e temperatura com um sensor virtual (*soft sensor*), baseado em rede neural para inferir biomassa, substrato e etanol. O arranjo mostrou boas predições, destacando o potencial de arquiteturas gráficas com modelos de inteligência artificial para fortalecer a monitoração e a decisão em bioprocessos.

Em um contexto acadêmico e industrial, o uso de LabVIEW tem se expandido, impulsionado pela crescente demanda por soluções integradas que combinam *hardware* e *software*. A formação de profissionais capacitados na utilização dessa ferramenta é, portanto, um aspecto importante a ser considerado para a inovação tecnológica e o desenvolvimento de novas soluções em engenharia (Panceri *et al.*, 2013).

2.3.4. Banho Termostático

O banho termostático é um equipamento amplamente utilizado em laboratórios e indústrias para o controle preciso de temperatura em processos que requerem condições térmicas estáveis e homogêneas. Esses dispositivos operam por meio de um sistema de aquecimento ou resfriamento, mantendo a temperatura do fluido no *setpoint* desejado, o que é fundamental em diversas aplicações científicas, incluindo análises químicas, biológicas e físico-químicas (Quintella *et al.*, 2003).

A importância dos banhos termostáticos reside na capacidade de garantir resultados reprodutíveis em experimentos que dependem de temperatura controlada, como em reações químicas e bioquímicas que são sensíveis a variações térmicas. Além disso, esses equipamentos são utilizados para a preparação de amostras, teste de materiais e validação de equipamentos, sendo essenciais em laboratórios de pesquisa, controle de qualidade e desenvolvimento de produtos (Pimenta, 2019).

Os banhos termostáticos podem ser classificados em diferentes tipos, como banhos de água e banhos de óleo, cada um adequado a determinadas faixas de temperatura e aplicações específicas. O controle da temperatura é frequentemente realizado através de termostatos que garantem a estabilidade necessária para diversas aplicações. O avanço tecnológico também tem contribuído para a evolução desses dispositivos, incorporando recursos como conectividade e automação, o que facilita a integração com sistemas de monitoramento e controle remoto (Santos; Braga Junior, 2021).

No contexto da utilização de banhos termostatizados em bioprocessos para valorização de resíduos, Artifon *et al.* (2020) investigaram a hidrólise enzimática do bagaço de malte comparando banho termostatizado e banho ultrassônico, utilizando celulase, α -amilase e amiloglicosidase e um plano de experimentos de metodologia de superfície de resposta para avaliar razões sólido/líquido e concentração enzimática. O estudo mostrou maiores rendimentos de açúcares redutores no banho termostatizado, evidenciando uma rota de baixo custo para disponibilização de açúcares fermentescíveis a partir desse coproduto cervejeiro.

2.4. Gêmeos Digitais

Os gêmeos digitais (*digital twins*) descrevem uma representação virtual dinâmica de um sistema físico — equipamentos, processos ou produtos — conectada por fluxos bidirecionais de dados e atualizada continuamente por medições online. Em bioprocessos, essa integração tem sido viabilizada pela convergência de sensores, infraestrutura digital e modelos híbridos, como destaca a revisão pragmática “*Bioprocessing 4.0*” ao enquadrar gêmeos digitais como núcleo da manufatura biofarmacêutica inteligente (Isoko *et al.*, 2024).

A arquitetura e o escopo destes sistemas costumam seguir três camadas (gêmeo de operação unitária, gêmeo de processo, gêmeo de planta), perpassando desde a operação mais simples até a integração de um processo completo. A fidelidade do modelo e o grau de sincronização com o chão de fábrica (*digital thread*) são determinados pela qualidade dos dados e pela malha PAT (*Process Analytical Technology*), podendo ser conectados via padrões industriais (*Open Platform Communications, Historian*) e arquitetados via *Edge-to-Cloud*. Revisões recentes enfatizam que a combinação de modelos fenomenológicos com aprendizado de

máquina mitiga vieses e amplia o domínio de validade do gêmeo digital (Isoko *et al.*, 2024; O'Connor *et al.*, 2024).

Do ponto de vista metodológico, gêmeos digitais em bioprocessos empregam: modelos mecanísticos; modelos orientados a dados; arquiteturas híbridas, acopladas a estimadores de estado e controle preditivo (*Model Predictive Control*). Esses elementos suportam casos de uso como otimização de alimentação, temperatura, pH e diagnóstico antecipado de desvios. Estudos mostram a aceleração de *tech transfer* (laboratório, piloto, fábrica) e a redução de variação interlote quando o controle preditivo é orientado por gêmeos digitais treinados com dados PAT (Isoko *et al.*, 2024; Vega-Zambrano *et al.*, 2025).

Em artigos recentes como de Helgers *et al.* (2022), foi desenvolvido um gêmeo digital para a produção de partículas semelhantes a vírus (VLPs) em células HEK293 (linhagem celular derivada de rim embrionário humano), baseado em um modelo metabólico dinâmico validado segundo princípios de QbD (*Quality by Design*) e alimentado por dados experimentais. O trabalho diferencia modelos digitais de gêmeos preditivos conectados, demonstrando o uso do gêmeo para monitorar, prever e, em perspectiva, automatizar a operação, com verificação de que o modelo reproduz consumo de substrato, crescimento celular e formação de VLPs, além de realizar análises de sensibilidade. O escopo do trabalho inclui balanço de energia do biorreator encamisado e ao integrar esse núcleo fenomenológico a dados de processo e à lógica de controle avançado de processos, o artigo posiciona o gêmeo como base para controle preditivo em malha fechada e redução de variabilidade durante o desenvolvimento e *tech transfer*.

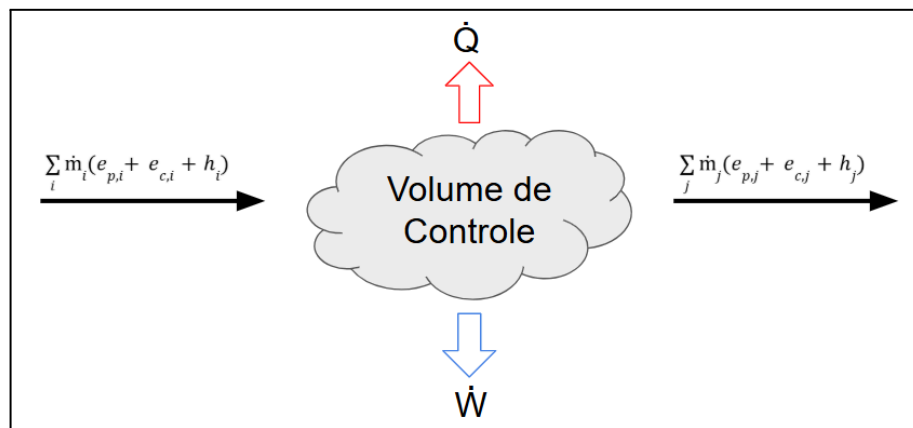
2.5. Balanço Energético

No contexto do gêmeo digital e de modelos fenomenológicos, a Primeira Lei da Termodinâmica, descrita pela Equação 1, é a expressão que descreve a conservação de energia para sistemas termodinâmicos, estabelecendo que a variação da energia interna de um sistema, $\frac{dU}{dt}$ em W, é igual ao calor trocado com o meio e ao trabalho realizado pelo sistema, sendo a energia nem criada nem destruída, mas transformada.

Para um volume de controle definido, ilustrado pela Figura 3, as correntes que entram e saem, denominadas por i e j , respectivamente, carregam consigo energia,

em J/kg, potencial, e_p , cinética, e_c , e entalpia h , todas contribuindo para a variação da energia do sistema. O transporte líquido de energia, a partir de um fluxo mássico, \dot{m} em kg/s, para dentro do volume de controle corresponde à diferença entre a energia que entra e a que sai, e a taxa de acúmulo de energia no interior do volume é obtida somando-se a esse transporte líquido a taxa de calor, \dot{Q} em W, e a taxa de trabalho realizado, \dot{W} em W (Smith, Van Ness, Abbott, 2007; Çengel, Boles, 2012).

Figura 3 - Balanço de energia para um volume de controle.



Fonte: Autoria própria.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \dot{m}_i (e_{p,i} + e_{c,i} + h_i) - \sum_j \dot{m}_j (e_{p,j} + e_{c,j} + h_j) + \dot{Q} - \dot{W} \quad (1)$$

Para um volume de controle bem misturado com propriedades constantes, variações de energia potencial, cinética e trabalho de eixo desprezíveis, podemos realizar simplificações como mostra a Equação 2:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \dot{m}_i h_i - \sum_j \dot{m}_j h_j + \dot{Q} \quad (2)$$

Para líquidos incompressíveis a volumes constantes, temos que a variação de entalpia é aproximadamente igual ao produto entre o calor específico, c_p , em J/kg/K, a variação de temperatura, T , em °C, e que a variação da energia interna é aproximadamente igual ao produto entre a massa, m , o calor específico e a variação

de temperatura (Smith, Van Ness, Abbott, 2007; Çengel, Boles, 2012). Com isso, a Equação 3 é obtida:

$$m c_p \frac{dT}{dt} = \sum_i \dot{m}_i c_{p,i} T_i - \sum_j \dot{m}_j c_{p,j} T_j + \dot{Q} \quad (3)$$

A Lei de Fourier estabelece que a condução de calor em um meio sólido ocorre devido à diferença de temperatura entre duas regiões. Sua formulação matemática é dada pela Equação 4, onde a taxa de calor, q , em W, é igual ao gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dx}$, em K/m, multiplicado pela área de transferência, A , em m^2 , multiplicado pela condutividade térmica do material, k , em W/m/K. O sinal negativo indica que o calor flui sempre no sentido de temperaturas mais altas para mais baixas, obedecendo ao princípio da irreversibilidade dos processos naturais (Çengel, Boles, 2012).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Porém, nos sistemas reais de troca de calor, a condução não é o único mecanismo envolvido. Também ocorre a convecção, que se dá em meios fluidos em razão do movimento macroscópico do próprio fluido. Nesse processo, o escoamento gerado pela velocidade do fluido faz com que as partículas transportem consigo a energia térmica que possuem, promovendo a transferência de calor de forma conjunta entre condução microscópica e movimento de massa (Araújo, 2011). Estes dois fenômenos podem ser representados por meio de resistências como mostram as Equações 5 e 6.

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (6)$$

Onde R_{cond} , em K/W, e R_{conv} , em K/W, são as resistências condutivas e convectivas, L , o comprimento, em m, em que ocorre a condução e h , em m^2K/W , o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Somando estas resistências, atribuindo duas temperaturas conhecidas, T_i e T_j e substituindo na Equação 4, temos a taxa de transferência global, descrita pela Equação 7.

$$q = \frac{(T_i - T_j)}{R_{total}} \quad (7)$$

Definindo o coeficiente global de transferência de calor pela Equação 8 e substituindo-a na Equação 7, chegamos à Equação 9:

$$U = \frac{1}{R_{total}A} \quad (8)$$

$$q = UA(T_i - T_j) \quad (9)$$

MATLAB (*Matrix Laboratory*) é uma plataforma de computação numérica e linguagem de programação voltada a engenharia e ciências, notabilizada por sua sintaxe matricial e pela integração com ampla biblioteca de funções e aplicativos interativos. Originado nos trabalhos de Cleve Moler e consolidado comercialmente pela *MathWorks* em 1984, MATLAB evoluiu de uma calculadora matricial interativa para um ambiente técnico completo, utilizado por milhões de profissionais para análise de dados, modelagem e desenvolvimento de algoritmos (Mathworks, 2025).

Entre suas características centrais destacam-se a orientação a vetorização, gráficos integrados e um ecossistema de *toolboxes* especializados (sinais, controle, otimização, visão computacional, aprendizado de máquina, entre outros). A integração nativa com o *Simulink* oferece um editor gráfico de diagramas em blocos e solucionadores para simulação de sistemas dinâmicos e projetos baseados em modelos, com suporte a geração automática de código para aplicações embarcadas (*MATLAB Coder* e *Embedded Coder*). O ambiente também provê ferramentas para criação de interfaces gráficas (*App Designer*) e interoperabilidade com *Python* —

tanto chamando bibliotecas *Python* a partir do MATLAB quanto acionando o motor do MATLAB a partir de *scripts Python* (Mathworks, 2025).

No contexto de automação e bioprocessos, MATLAB/*Simulink* tem sido empregado em supervisão e controle de biorreatores, integração com sistemas industriais e desenvolvimento de *soft sensors* para estimativa online de variáveis difíceis de medir. Casos reportados incluem plataformas de controle e desenvolvimento de algoritmos para biorreatores em ambiente MATLAB, estudos de controle de fermentação implementados no *Simulink* e revisões recentes que consolidam métodos de modelagem de *soft sensors* baseados em redes neurais e aprendizado de máquina para processos fermentativos. Esses trabalhos ilustram a adequação do ecossistema MATLAB para prototipagem rápida, simulação e implantação de soluções inteligentes em tempo real (Marginean *et al.*, 2012; Mathworks, 2025; Zhu *et al.*, 2020).

Em ambientes acadêmicos e industriais, a adoção do MATLAB é impulsionada pela combinação de linguagem de alto nível, recursos didáticos e bibliografia consolidada que abrange desde introduções práticas até guias abrangentes do ambiente, por exemplo, *Numerical Computing with MATLAB* e *MATLAB Guide*. Essa base, aliada ao suporte oficial e à comunidade, sustenta a formação de profissionais capazes de integrar *hardware* e *software*, analisar dados complexos e acelerar o ciclo de desenvolvimento de soluções tecnológicas (Higham *et al.*, 2017; Mathworks, 2025).

2.6. Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* (SA) é um método de otimização global meta-heurística probabilística inspirada no processo físico de recozimento de metais, em que um material é aquecido e resfriado lentamente para alcançar uma estrutura de energia mínima. O método foi introduzido por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), com base no algoritmo de Metropolis *et al.* (1953), e rapidamente se consolidou como uma das abordagens mais eficazes para resolver problemas de otimização combinatória complexos.

Do ponto de vista algorítmico, o SA executa sucessivas perturbações em uma solução corrente, aceitando sempre soluções melhores e, com uma probabilidade de aceitação de soluções piores, descrita pela Equação 10, onde ΔE representa o erro entre as soluções e, T , a temperatura de recozimento. Esta lógica permite que o

algoritmo escape de mínimos locais e faça exploração mais ampla do espaço de busca, onde o parâmetro T é gradualmente reduzido de acordo com uma agenda de resfriamento, sendo esse controle fundamental para o equilíbrio entre exploração e intensificação (Aarts, Korst, 1989; Bertsimas, Tsitsiklis, 1993).

$$\text{Probabilidade de aceitação} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) \quad (10)$$

Do ponto de vista teórico, Geman (1984) demonstrou que o SA converge para o ótimo global sob um esquema de resfriamento logarítmico infinitamente lento. Hajek (1988) complementou esse resultado ao caracterizar condições matemáticas para garantir a convergência assintótica e os limites de temperatura. Embora tais condições sejam impraticáveis em aplicações reais, oferecem uma base teórica sólida que sustenta o método.

Com o avanço da computação, surgiram diversas variações do SA, como o *Adaptive Simulated Annealing*, proposto por Ingber (2000), que ajusta automaticamente as distribuições de perturbação e as taxas de resfriamento, otimizando o desempenho para diferentes tipos de problemas.

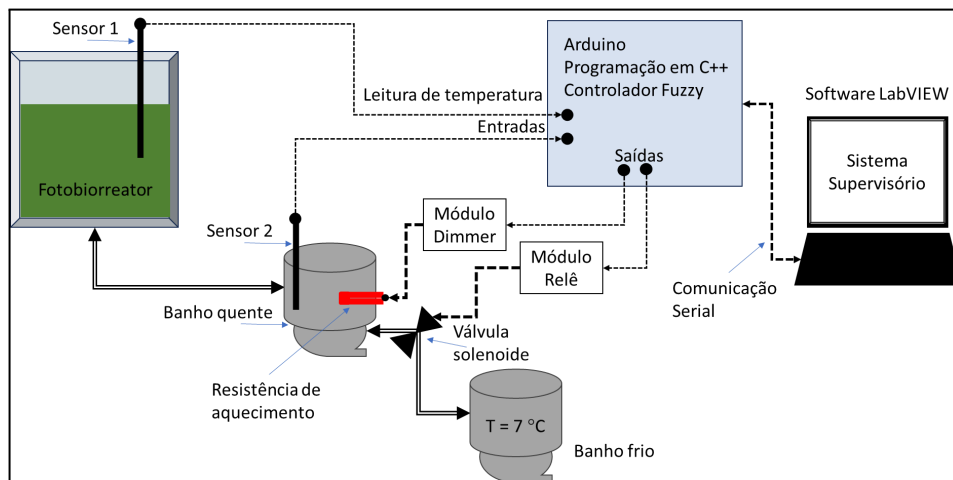
Em estudos recentes, o SA tem mostrado grande potencial em biotecnologia, especialmente em aplicações voltadas à otimização de bioprocessos e modelagem de sistemas biológicos. Dhagat e Jujjavarapu (2021) utilizaram SA em um conjunto com redes neurais artificiais para otimizar a produção simultânea de bioemulsificantes pelo microrganismo *Brevibacillus borstelensis*, identificando as melhores concentrações de substratos e nutrientes em condições termofílicas. Em outro estudo, Adhikari *et al.* (2020) aplicaram SA em um contexto de biologia sintética, utilizando uma abordagem multiobjetivo para estimar parâmetros em modelos celulares resultando em conjuntos consistentes com dados experimentais capazes de representar de forma robusta mecanismos celulares.

3. METODOLOGIA

A partir do referencial teórico apresentado, o cerne deste trabalho foi desenvolver um sistema de controle de temperatura para bioprocessos utilizando o supervisor LabVIEW, como mostra a Figura 4, sendo o controlador *fuzzy* implementado para balancear os desafios de manter a variável controlada estável. Com isso, realizou-se um experimento de 9 dias para avaliação da robustez do controle de temperatura frente a mudanças de intensidades de luzes.

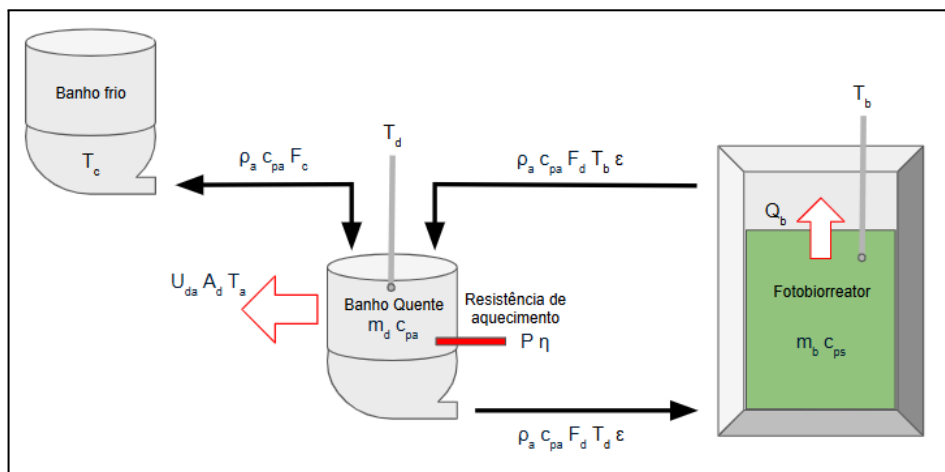
Posteriormente, simulou-se em MATLAB, a partir de balanço de energia, como mostra a Figura 5, o sistema real para otimização das pertinências *fuzzy*, a partir do método de otimização *Simulated Annealing*.

Figura 4 - Fluxograma esquemático do sistema real.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Fluxograma esquemático do balanço de energia.

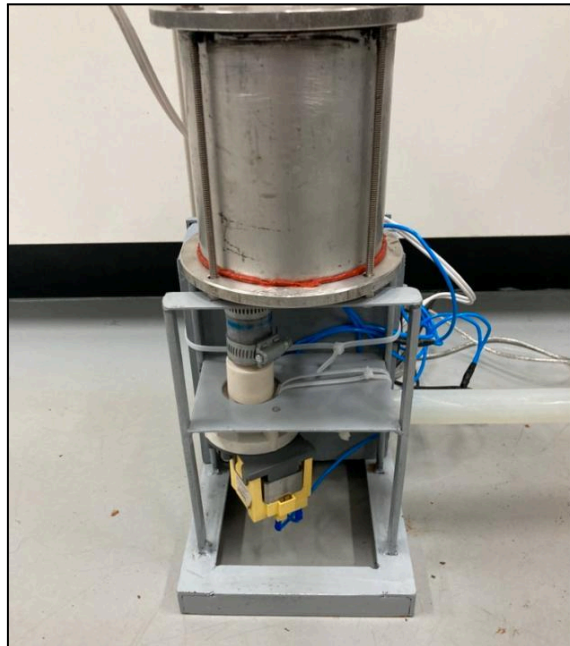


Fonte: Autoria própria.

3.1. Banho Térmico

Para o aquecimento do sistema, foi desenvolvido um banho a partir da utilização de uma eletrobomba da marca EMICOL de 127V, para circulação de água. Esta eletrobomba foi acoplada a uma dorna como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Dorna de aquecimento.



Fonte: Autoria própria.

A este banho de aquecimento foi acoplado um outro banho termostático da marca NESLAB, modelo RTE-111 de 115V, 60Hz e 12A, a partir de uma válvula solenóide da marca EMICOL de 127V e 60Hz, como mostram as Figuras 7 e 8 a seguir.

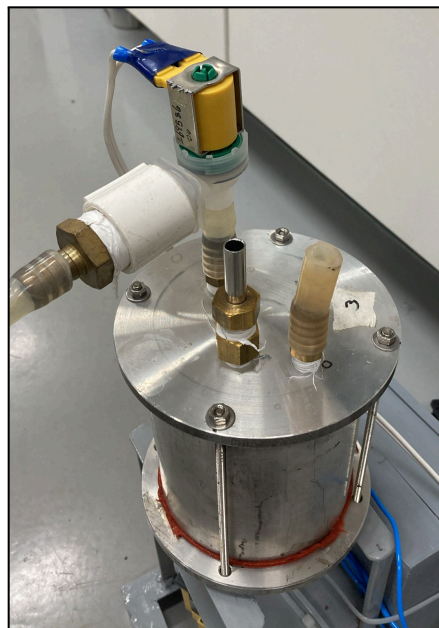
Para a medição da temperatura foram utilizados dois sensores, um para monitorar a temperatura do biorreator e outro para monitorar a temperatura do banho de aquecimento.

Figura 7 - Banho termostático NESLAB.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 - Válvula solenóide acoplada à dorna de aquecimento.



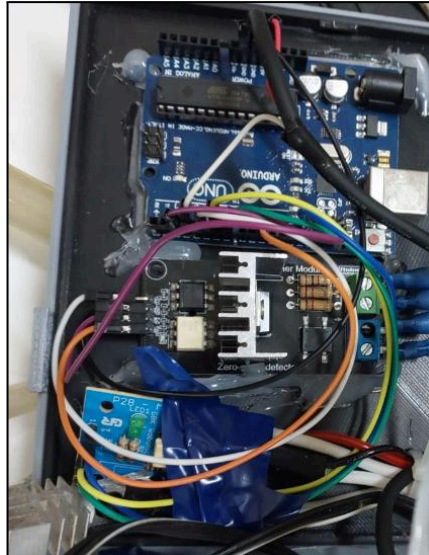
Fonte: Autoria própria.

A temperatura do banho termostático NESLAB foi ajustada para operar a 7°C e o banho quente, assim como a válvula solenóide, foram controladas pelo Arduino.

3.2. Arduino

Para a manipulação da potência de aquecimento e resfriamento do banho foi utilizado um Arduino UNO e um Dimmer como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Arduino UNO e Dimmer.



Fonte: Autoria própria.

O código em linguagem C++ desenvolvida no *software* Arduino 1.8.9 seguiu o pseudocódigo mostrado na Figura 10. Neste, inicia-se o algoritmo lendo as temperaturas do banho e do biorreator e, com isso, calcula-se a tendência do banho de acordo com a Equação 11.

$$Tend\ência = \frac{T_{atual} - T_{anterior}}{Tempo} \quad (11)$$

Onde *T_{atual}* é a temperatura de leitura atual, *T_{anterior}* a temperatura de leitura 20 segundos antes e *Tempo* igual a 20 segundos. Após, há o cálculo das funções de pertinência Temperatura Muito Baixa (TMB), Temperatura Baixa (TB), Temperatura Ótima (TO), Temperatura Alta (TA) e Temperatura Muito Alta (TMA); Temperatura da Dorna Baixa (TDB), Temperatura da Dorna Ótima (TDO) e Temperatura da Dorna Alta (TDA).

Para o *setpoint* do banho, utilizou-se uma lógica para que este fosse móvel, sendo que se TDB fosse maior que 0.2 e Tendência menor que 0.01, o *setpoint* teria

seu valor acrescentado em 0.1 e se TDA fosse maior que 0.2 e Tendência maior que 0.01 o *setpoint* teria seu valor descontado em 0.1.

Para o cálculo das potências, PW (Potência de aquecimento) e PWFrio (Potência de resfriamento) utilizou-se as pertinências TMB, TB, TO, TA, TMA e Tendência sendo que ao acionar-se a potência de resfriamento zerava-se a potência de aquecimento. Para PW, o valor máximo em escala digital foi de 128 e para PWFrio, o período de acionamento máximo da válvula fria foi de 5000 ms. Para finalizar, os valores das variáveis e constantes eram enviadas para a porta Serial.

Figura 10 - Pseudocódigo utilizado no Arduino/Genuino.

```

Início
Leitura de Temperatura Banho
Leitura de Temperatura Biorreator
Cálculo da Tendência do Banho = (Temperatura Atual - Temperatura Anterior) / Tempo
Cálculo das Funções de Pertinências da Temperatura do Biorreator:
TMB=Muito Baixo; TB=Baixo; TO=Ótimo, TA=Alto; TMA=Muito Alto
Cálculo das Funções de Pertinência do Banho:
TDB=Baixo; TDO=Ótimo; TDA=Alto
Se TDB>0.2 e Tendência≤0.01 então (SetPoint+=0.1)
Se TDA>0.2 e Tendência≥0.01 então (SetPoint-=0.1)
Cálculo das Potências:
PW=PW+(TMBxDelta1)+(TBxDelta2)-(TOxDelta3xTendência)-(TAXDelta4)-(TMAxDelta5)
PWFrio=-((TMBxDelta6)-(TBxDelta7)+(TOxDelta8xTendência)+(TAXDelta9)+(TMAxDelta10)
Se PWFrio>0 então PW=0
Senão PW=PW
Envio dos valores das variáveis e constantes para a porta Serial
Fim

```

Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que as funções de pertinência de temperatura TMB (Muito Baixo), TB (Baixo), TO (Ótimo), TA (Alto) e TMA (Muito Alto) foram inseridas nas equações de controle de potência do banho de aquecimento e do controle de vazão da válvula solenóide junto com Deltas que foram ajustados, inicialmente, experimentalmente por tentativa e erro. Estes valores são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Deltas experimentais

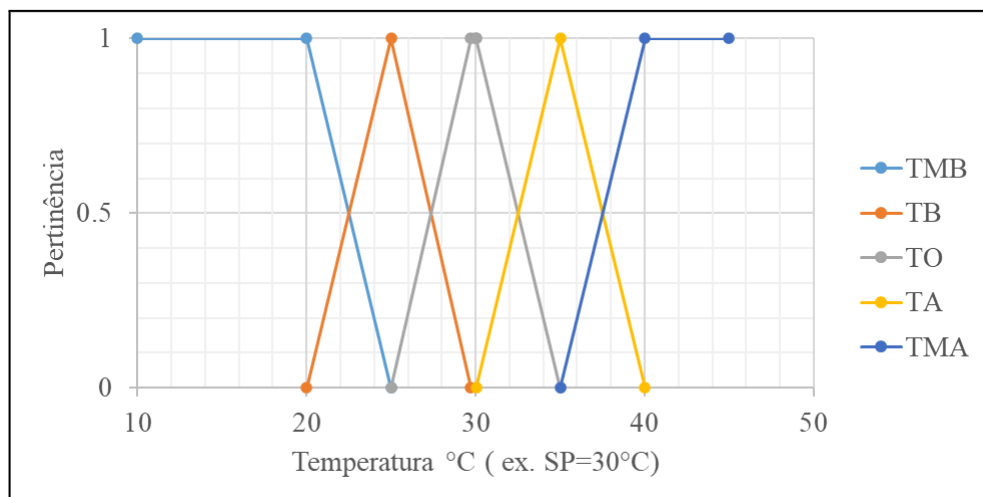
Delta	Valor
1	10
2	10

3	2
4	2
5	5
6	50
7	50
8	600
9	150
10	40

Fonte: Autoria própria

As funções de pertinência *fuzzy* para a temperatura do biorreator estão apresentadas na Figura 11 para um exemplo de *setpoint* de 30°C.

Figura 11 - Funções de pertinência de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Para explicar as equações vamos adotar o *setpoint* de 30°C como exemplo, mas as equações foram concebidas para se adaptarem a qualquer valor de *setpoint* desejado pelo usuário.

Assim, para temperaturas menores que 20°C foi considerada a pertinência TMB igual a 1. Entre 20°C e 25°C, a lógica *fuzzy* obedeceu às equações 12 e 13 para TMB e TB, respectivamente:

$$((SP \times 2/3 - T_{biorreator}) / (SP \times 5/6 - SP \times 2/3)) + 1 \quad (12)$$

$$(T_{biorreator} - SP \times 2/3) / (SP \times 5/6 - SP \times 2/3) \quad (13)$$

Sendo SP, o *setpoint* e $T_{biorreator}$, a temperatura do biorreator. Para temperaturas entre 25,00°C e 29,70°C, adotou-se para TB e TO, respectivamente, as Equações 14 e 15:

$$((SP \times 5/6 - T_{biorreator}) / (SP \times 0,99 - SP \times 5/6)) + 1 \quad (14)$$

$$(T_{biorreator} - SP \times 5/6) / (SP \times 0,99 - SP \times 5/6) \quad (15)$$

Entre 29,70°C e 30,03°C foi considerada como 1 a pertinência TO. Entre 30,03°C e 35,00°C utilizou-se as equações 16 e 17 para TO e TA, respectivamente:

$$((SP \times 1,001 - T_{biorreator}) / (SP \times 7/6 - SP \times 1,001)) + 1 \quad (16)$$

$$(T_{biorreator} - SP \times 1,001) / (SP \times 7/6 - SP \times 1,001) \quad (17)$$

Entre 35,00°C e 40,00°C as equações 18 e 19 foram utilizadas para TA e TMA, respectivamente:

$$((SP \times 7/6 - T_{biorreator}) / (SP \times 4/3 - SP \times 7/6)) + 1 \quad (18)$$

$$(T_{biorreator} - SP \times 7/6) / (SP \times 4/3 - SP \times 7/6) \quad (19)$$

E para temperaturas maiores que 40,00°C foi considerada como pertinência 1 à TMA.

Já para as funções de pertinência do banho, foram adotadas as seguintes lógicas. Para temperaturas menores que 25°C foi considerada a pertinência TDB igual a 1. Entre 25°C e 29,7°C, a lógica *fuzzy* obedeceu às equações 20 e 21 para TDB e TDO, respectivamente.

$$((SP \times 5/6 - T_{\text{banho}})/(SP \times 0,99 - SP \times 5/6)) + 1 \quad (20)$$

$$(T_{\text{banho}} - SP \times 5/6)/(SP \times 0,99 - SP \times 5/6) \quad (21)$$

Entre 29,7°C e 30,03°C, foi considerada como 1 a pertinência TDO. Entre 30,03°C e 35°C, a lógica *fuzzy* obedeceu às equações 22 e 23 para TDO e TDA, respectivamente.

$$((SP \times 1,001 - T_{\text{banho}})/(SP \times 7/6 - SP \times 1,001)) + 1 \quad (22)$$

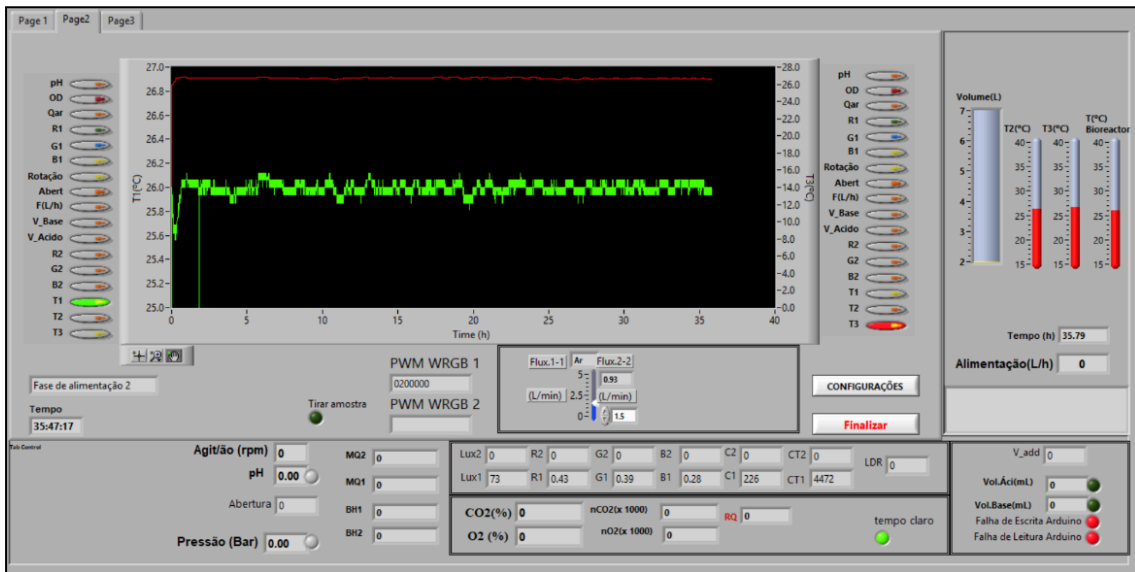
$$(T_{\text{banho}} - SP \times 1,001)/(SP \times 7/6 - SP \times 1,001) \quad (23)$$

E para temperaturas maiores que 35°C foi considerada como pertinência 1 para TDA.

3.3. LabVIEW

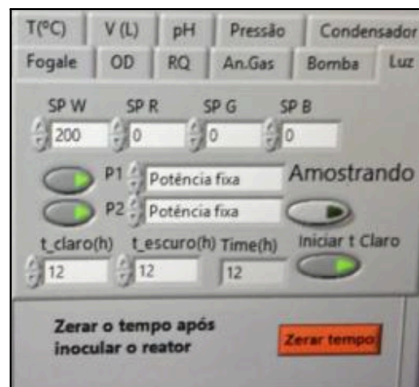
Para a configuração e supervisão do sistema de controle do biorreator durante o experimento foi utilizado o LabVIEW. Nele foram definidas as condições de operação desejadas, sendo a vazão de ar de 1,5 L/min durante os 9 dias de cultivo. Em relação às cores de luzes utilizadas no experimento, nos primeiros dois dias utilizou-se a cor branca (W), nos dias 3 e 4 a cor verde (G), nos dias 5 e 6 a cor vermelha (R) e nos dias 7, 8 e 9 a cor azul (B). Todas estas foram configuradas para emitir $200 \mu\text{mol} \times \text{fóton} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$. Além disso, o LabVIEW foi programado para a cada 12 horas ligar e desligar a luz utilizada, sendo possível cultivar a microalga no tempo claro e escuro. Ademais, para o experimento em questão, a temperatura foi configurada para permanecer em 26°C, de acordo com Guedes (2021). A tela de configuração e de monitoramento são mostradas nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 - SuperSys_Photo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Controle de Luz.



Fonte: Autoria própria.

3.4. Cultivo de Microalgas

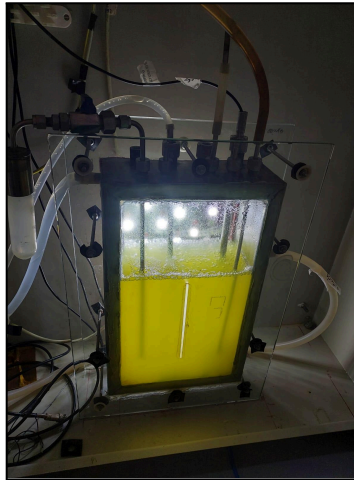
O cultivo foi realizado em um fotobiorreator *airlift* com capacidade máxima de 6 Litros, ilustrado pela Figura 14. Neste biorreator foram alimentados 5 Litros de solução BG-Modificado, conforme composição mostrada na Tabela 2, de acordo com Rippka, *et al.* (1979). Foi adicionado a esta solução microalgas da linhagem *Scenedesmus obliquus*.

Tabela 2 - Componentes e concentrações da solução BG-Modificado.

Componente	Concentração (mol/L)
$C_6H_8O_7$	3,12E-05
$(NH_4)_5[Fe(C_6H_4O_7)_2]$	3,00E-05
$NaNO_3$	1,76E-02
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	1,75E-04
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	3,04E-04
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	2,45E-04
Na_2CO_3	1,89E-04
$MgNaEDTA \cdot H_2O$	2,79E-06
H_3BO_3	4,63E-05
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	9,15E-06
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	7,65E-07
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	3,16E-07
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	1,16E-06
$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	1,70E-07

Fonte: Rippka *et al.*, 1979

Figura 14 - Biorreator *airlift* no início do cultivo.



Fonte: Autoria própria.

Durante o experimento, a cada 12 horas, foram coletadas amostras do cultivo sendo medidas suas absorvâncias pelo espectrofotômetro BIOSPECTRO SP-22 em triplicata. O comprimento de onda utilizado para obtenção da densidade óptica da amostra foi de 684 nm (Guedes, 2021).

3.5. Balanço Energético

Para o fluxograma esquemático do balanço de energia, mostrado pela Figura 5, foram considerados dois volumes de controle. No primeiro, correspondente à Dorna de Aquecimento, *d*, o acúmulo de energia foi dado pela variação de entalpia do fluido que circula no sistema, sendo $F_c(t)$ a vazão de água fria que circula no instante *t*, somada à taxa de calor fornecida pela resistência elétrica, $Q_p(t)$, em W, a taxa de calor trocada com o ambiente externo, $Q_{amb}(t)$, em W, e a taxa de calor trocada com o biorreator através do encamisamento, $Q_{enc}(t)$, em W. No segundo, relativo ao Fotobiorreator, *b*, o acúmulo de energia se deu pelo calor trocado com o encamisamento, $Q_{enc}(t)$, em W, e pela taxa de calor liberada pelo sistema de LEDs, $Q_{LED}(t)$, em W, onde foi chamado de Q_b na Figura 5. Foram desconsideradas as trocas de calor decorrentes do ambiente já que havia uma caixa (Figura 14) para o sistema de luzes que isolava a temperatura interior ao ambiente, e também o metabolismo celular em relação ao calor liberado pelo sistema de LEDs (Acién-Fernández *et al.*, 2013).

Os parâmetros adotados, assim como o balanço de energia são mostrados pela Tabela 3 e pelas Equações 24 a 30. É importante ressaltar que a densidade e o

calor específico da solução foi considerada como, aproximadamente, igual a da água pela microalga *Scenedesmus obliquus* estar bem diluída na solução. Já os coeficientes globais de trocas térmicas e a eficiência de conversão elétrica foram aproximados a valores bem aceitos pela literatura (Carpenter, 2011; U.S.Department of Energy, 2025; Dincer, 2018).

Ademais, o calor gerado pelo LED foi obtido, a partir do trabalho de Guedes (2021) e os demais parâmetros como temperatura do ambiente, temperatura do banho de resfriamento, volume da dorna, volume do biorreator, potência máxima de aquecimento, vazão de água do banho frio e área de troca térmica, obtidos experimentalmente.

Tabela 3 - Parâmetros do modelo.

Temperatura do ambiente (T_a)	20 °C
Temperatura do banho de resfriamento (T_c)	7 °C
Densidade da água (ρ_a)	$1,0 \times 10^3$ kg/m^3
Densidade da solução (ρ_s)	$1,0 \times 10^3$ kg/m^3
Calor específico da água (c_{pa})	4180 J/kg/K
Calor específico da solução (c_{ps})	4180 J/kg/K
Volume da dorna (V_d)	$1,19 \times 10^{-3} m^3$
Volume do biorreator (V_b)	$5 \times 10^{-3} m^3$
Massa de água na dorna (m_d)	1,19 kg
Massa de solução no biorreator (m_b)	5 kg

Vazão de água do banho frio para a dorna (F_c)	$2,53 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
Coefficiente global de troca térmica (dorna-ambiente) (U_{da})	400 W/K/m^2
Área de troca térmica (dorna-ambiente) (A_d)	$4,32 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
Coefficiente global de troca térmica (biorreator-encamisamento) (U_{be})	350 W/K/m^2
Área de troca térmica (biorreator-encamisamento) (A_b)	$1,06 \times 10^{-1} \text{ m}^2$
Potência máxima de aquecimento (P)	500 W
Eficiência de conversão elétrica (η)	95%
Calor gerado pelo LED (W)	10 W

Fonte: Autoria própria.

$$\frac{dU_d}{dt} = \rho_a c_{pa} F_c (T_c - T_d(t)) + Q_{enc}(t) + Q_P(t) + Q_{amb}(t) \quad (24)$$

$$\frac{dU_b}{dt} = Q_{LED}(t) - Q_{enc}(t) \quad (25)$$

$$\frac{dU_d}{dt} = m_d c_{pa} \frac{dT_d}{dt} \quad (26)$$

$$\frac{dU_b}{dt} = m_b c_{ps} \frac{dT_b}{dt} \quad (27)$$

$$Q_{amb}(t) = U_{da} A_d (T_a - T_d(t)) \quad (28)$$

$$Q_{enc}(t) = U_{be} A_b (T_b(t) - T_d(t)) \quad (29)$$

$$Q_p(t) = \eta P(t) \quad (30)$$

3.6. Simulação do Processo

A partir do protótipo feito, do código desenvolvido em Arduino e do balanço de energia para o sistema em questão, realizou-se uma simulação do processo via MATLAB. Para isto, separou-se em arquivos toda a lógica, cada um representando uma parte do algoritmo global. São elas:

1. membershipsBanho.m;
2. membershipsBiorreator.m;
3. CalculoTendencia.m;
4. Fuzzy.m;
5. Equacoes.m;
6. Simulador.m;
7. SA_Neighbor.m;
8. FuncOB.m.

O Arquivo 1 calcula as funções de pertinência da temperatura do banho como mostrado no Pseudocódigo da Figura 10 e pelas Equações 12 a 19. Já o Arquivo 2, calcula as funções de pertinência da temperatura do biorreator descritas pelas Equações 20 a 23.

Tendo as funções de pertinência calculadas, partiu-se para o cálculo da tendência (Arquivo 3), obtendo-se o *setpoint* do banho variável de forma análoga ao descrito pela lógica da Figura 10.

Já no Arquivo 4 implementou-se a lógica de controle das potências quentes e frias de acordo com a Figura 10 e utilizando os valores da Tabela 2 para a vazão máxima de corrente fria e potência máxima da resistência de aquecimento. Para isto, utilizou-se a Equação 31, onde “Power(t)” é a potência, em W, aplicada no instante t, “Potência máxima” o valor máximo de aquecimento proporcionado pela resistência elétrica, “PW (t)” o valor de PW calculado a partir das pertinências *fuzzy* no instante t e “PW máxima”, o valor máximo de PW na escala digital.

$$Power(t) = Potência\ máxima \times \frac{PW(t)}{PW\ máxima} \quad (31)$$

No Arquivo 5, define-se o sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) a serem integradas descritas pelas Equações 24 a 30.

Definidos todos os cálculos necessários para a obtenção dos parâmetros *fuzzy*, inicializou-se o simulador, chamando o otimizador SA para a obtenção dos parâmetros otimizados para um *setpoint* de 26°C, integrando as equações a partir da ODE45 e plotando e salvando os resultados obtidos (Arquivo 6).

Em relação aos limites inferiores dos Deltas optou-se por diminuir em 50% o valor inicial, já que valores iguais a zero não fariam sentido físico, visto que a simulação inicia-se com potência zero e um valor de Delta 1 e Delta 2 igual a zero faria com que a potência não aumentasse sob nenhuma hipótese. Com isso, os limites utilizados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Limites dos Deltas do modelo

Delta	Limite inferior	Limite superior
1	5	1000
2	5	1000
3	2.5	1000
4	1	1000
5	5	1000
6	25	3000
7	25	3000
8	20	3000
9	75	3000
10	300	3000

Fonte: Autoria própria

No Arquivo 7, implementou-se a lógica de otimização do SA com uma temperatura inicial e final de 10 e 0.1, respectivamente, e uma lógica de decaimento exponencial, com um fator de resfriamento de 0.999, descrito pela Equação 32.

$$T_k = T_0 \times D^k \quad (32)$$

Onde T_k é a temperatura na k-ésima etapa do algoritmo, T_0 a temperatura inicial, D o fator de resfriamento e k o número de passos de resfriamentos.

Com isso, aplicou-se no Arquivo 8 a função objetivo a ser utilizada no SA, descrita pela Equação 33.

$$\text{Função objetivo} = SP_{\text{biorreator}} - T_{\text{biorreator}}(t) \quad (33)$$

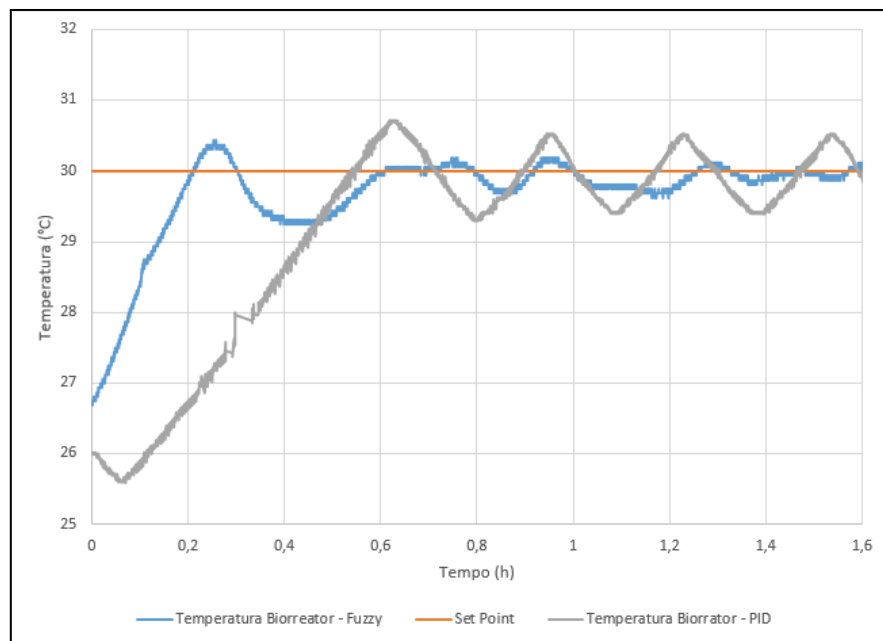
Sendo $SP_{\text{biorreator}}$ o *setpoint* do biorreator e $T_{\text{biorreator}}(t)$ a temperatura do biorreator no instante t.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cultivo de Microalgas

Para validação inicial do protótipo de controlador de temperatura foi realizado um teste comparativo do banho térmico desenvolvido neste trabalho com um banho PID clássico. Os resultados mostraram que, para o *setpoint* desejado, 30°C, a lacuna de temperatura do banho térmico utilizando lógica *fuzzy* foi menor que a do banho utilizando PID clássico, como podemos observar pela Figura 15.

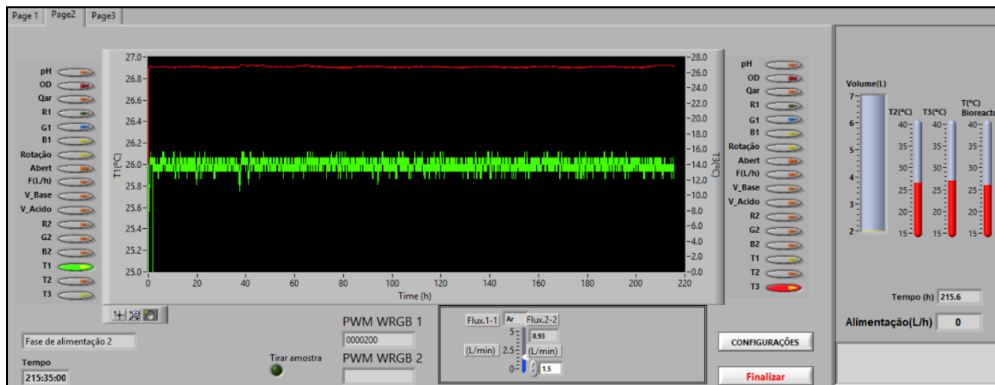
Figura 15. Comparação - Lógica *fuzzy*/PID.



Fonte: Autoria própria

Partindo para o cultivo de 9 dias da microalga *Scenedesmus obliquus*, os resultados em relação ao controle de temperatura mostraram-se satisfatórios variando 0,2°C acima e abaixo do *setpoint* como mostra a Figura 16 a seguir.

Figura 16 - Resultados do controle de temperatura.

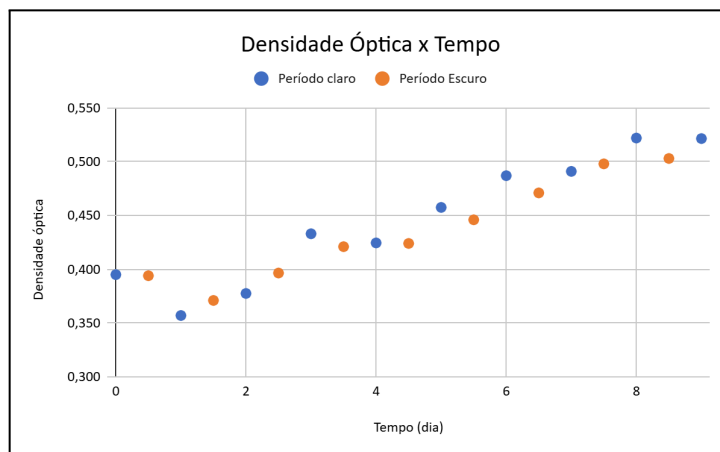


Fonte: Autoria própria

As densidades ópticas obtidas durante o período claro e escuro são mostradas na Figura 17. A Figura 18 apresenta os dados do sensor de luz. Com isso, podemos observar que durante a utilização da cor branca há uma distribuição de todas as luzes e que durante a utilização das cores vermelha, verde e azul há um predomínio de cada cor no seu respectivo dia.

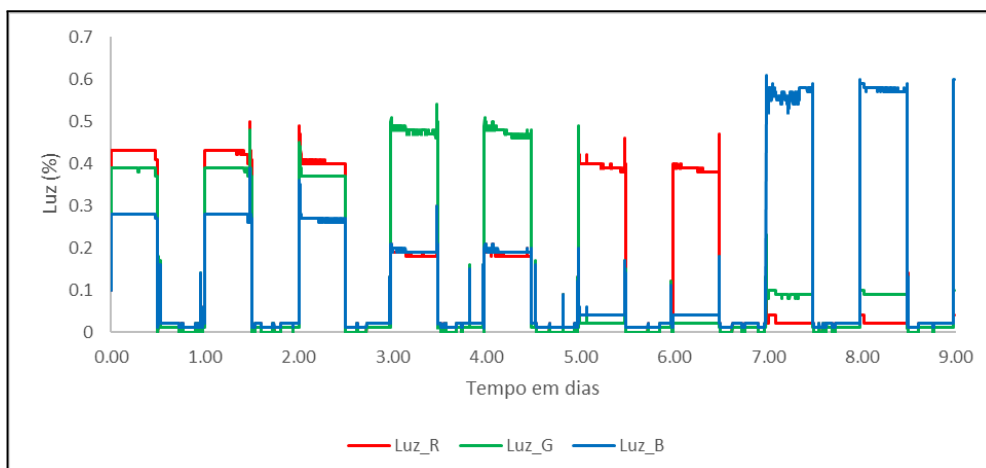
Já na Figura 19, há um gráfico do perfil de temperatura do banho, do biorreator e do *setpoint* do banho. Podemos observar que, apesar da temperatura do biorreator permanecer próximo do desejado, a temperatura da dorna permanece sempre abaixo do seu *setpoint*, possivelmente por uma falta de ajuste na função de aquecimento e resfriamento da dorna, onde uma função de pertinência trapezoidal maior no ponto de *setpoint* tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento, faria com que a temperatura do banho permanecesse mais próximo ao seu *setpoint*.

Figura 17 - Densidade óptica x Tempo.



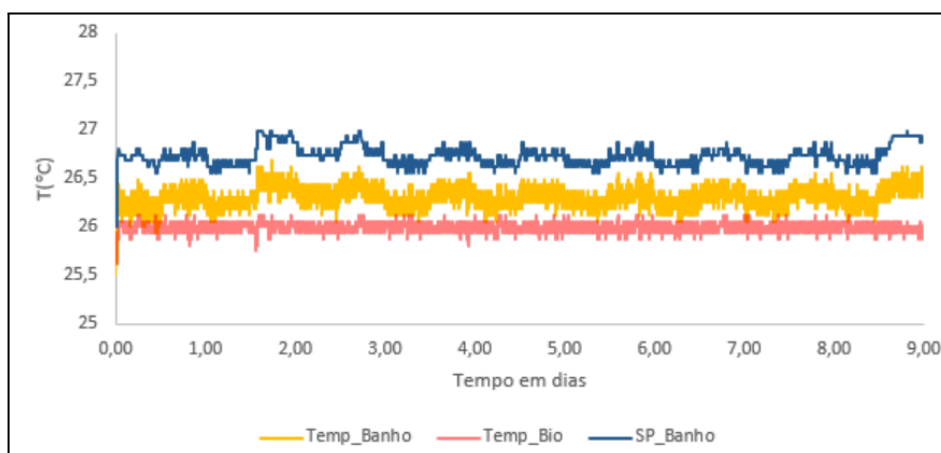
Fonte: Autoria própria

Figura 18 - Sensores de luz ao longo do tempo.



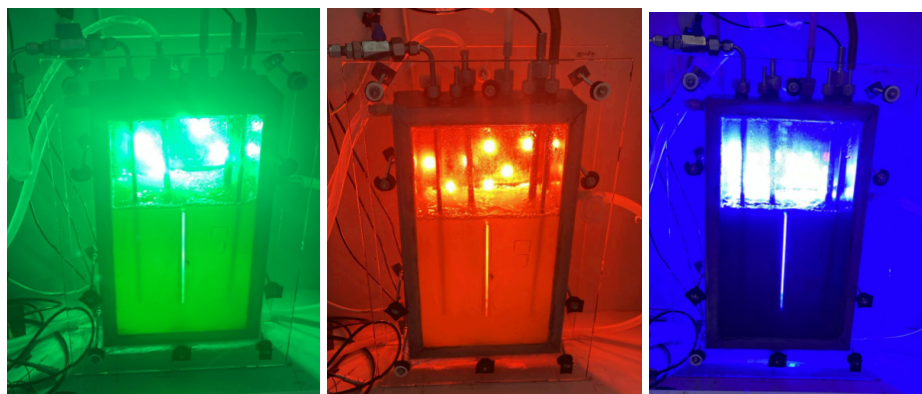
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Perfis de temperatura do experimento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - LEDs Verdes; LEDs Vermelhas e LEDs Azuis.



Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 20 são apresentados os fotobiorreatores no período claro durante a utilização das cores verdes, vermelhas e azuis.

Os resultados tanto no tempo claro quanto no tempo escuro mostram que do início do cultivo até o primeiro dia houve uma queda na concentração celular de microalgas. Esta queda pode ser explicada pela adequação destas ao novo meio com temperatura e intensidade luminosa diferentes do inóculo.

No tempo claro, durante o terceiro e quarto dia, e oitavo e nono dia houve uma queda na densidade óptica e durante o sexto e sétimo dia uma estabilização da mesma. Esta queda ou estabilização pode ser explicada pelo estresse fotossintético sob diferentes espectros de luz, onde de acordo com Guerra *et al.* (2024), ocorre quando a intensidade luminosa excede a capacidade de uso bioquímico, levando à formação de espécies reativas de oxigênio e redução da eficiência fotossintética. Ademais, em fotobiorreatores, esse estresse é amplificado por gradientes de luz, sombreamento e limitações de transferência de massa, afetando crescimento e produtividade (Legrand *et al.*, 2021).

Já no período escuro a variação da densidade óptica mostrou-se constante durante todo o período de cultivo, em exceção aos dias 3 e 7. A variação constante é explicada pela não utilização de luz durante este período e a estabilização nos dias 3 e 7 pode ser explicada pelos resquícios da queda de concentração celular durante o período claro. As mudanças metabólicas forçadas pelas mudanças no perfil luminoso serviram para testar a robustez do sistema de controle de temperatura.

Em relação à variação da densidade óptica podemos notar que para o período claro a inclinação da reta de densidade óptica pelo tempo foi diminuindo, o que indica que há uma alteração na velocidade de crescimento da microalga pela alteração da cor utilizada e do efeito de sombreamento. Podemos observar, portanto, que a taxa de crescimento na presença de luz branca é maior do que na presença de outras luzes, o que está de acordo com o resultado apresentado por Guedes (2021).

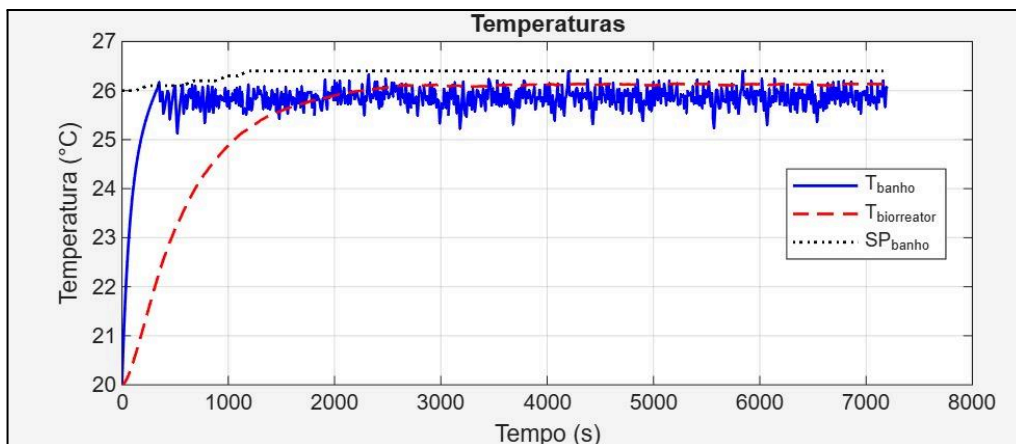
Comparando os resultados da densidade óptica pelo tempo obtidos neste trabalho com o de Salomão (2023), podemos observar que, apesar de somente ter sido utilizado a cor branca no trabalho anterior, a taxa de crescimento nos períodos claro e escuro depois da adequação das microalgas nas diferentes cores foram similares.

4.2. Simulação do Processo

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos para a simulação em MATLAB para os perfis de temperatura do banho do biorreator e do *setpoint* do banho. A partir desta podemos realizar algumas observações a respeito da simulação.

Em relação à Figura 19 que mostra o perfil de temperatura real, podemos observar que a simulação apresenta um comportamento similar, onde a temperatura do biorreator estabiliza próximo ao *setpoint* de 26°C. A temperatura do banho nos dois casos permanece abaixo do *setpoint* indicando, novamente, uma falta de ajuste na função de aquecimento e resfriamento do banho. Ademais, é visto que no início da simulação, onde TDB é maior que 0.2 e Tendência menor que 0.01, o *setpoint* do banho aumenta sua temperatura fazendo com que a temperatura do biorreator alcance o seu *setpoint* de maneira mais eficiente.

Figura 21 - Perfis de temperatura da simulação.



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Deltas simulados

Delta	Valor
1	7
2	660
3	6
4	52

5	9
6	320
7	2470
8	41
9	440
10	549

Fonte: Autoria própria

Analisando os deltas ótimos mostrados na Tabela 5, temos que em relação aos valores iniciais, é notado que para a potência de aquecimento o Delta 2 e o Delta 4, relativos à TB e TA, respectivamente, tiveram seus valores aumentados consideravelmente, indicando que para este sistema é necessário uma atuação maior destas pertinências nesta faixa de temperatura. Já para a potência de resfriamento é possível concluir que o valor de Delta 7 aumentou consideravelmente, indicando, também, que para este sistema é necessário uma atuação de TB; ademais, o valor de Delta 8 ficou abaixo dos outros Deltas mostrando um efeito menor no cálculo da potência de resfriamento.

Além do mais, é válido observar que, pelos perfis experimentais e simulados estarem próximos, o balanço de energia mostrou-se adequado, mesmo com as hipóteses adotadas e os valores dos coeficientes globais de troca térmica e eficiência de conversão elétrica aproximados. Com isso, é possível adotar o algoritmo de otimização em MATLAB com seu balanço de energia para futuros trabalhos, mesmo que haja alterações na lógica *fuzzy*.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Os resultados demonstraram que o controle *fuzzy* implementado com o sistema de banho termostático, com dois sensores de temperatura são capazes de controlar a temperatura do fotobiorreator numa lacuna oscilatória de 0,2°C do *setpoint* definido, promovendo um sistema com uma estabilidade interessante, provando que em situações de alta complexidade ou sistemas não lineares o uso de controladores modernos, como o *fuzzy*, pode ser uma alternativa aos controladores clássicos.

Em relação à variação da densidade óptica pode-se notar que houve crescimento durante todo o cultivo, apresentando estabilizações e quedas durante certos períodos explicados pela adequação das microalgas a novas cores de luz. Ademais, pode-se observar que o crescimento manteve-se constante no período escuro e no período claro houve um decréscimo explicado pela utilização de cores diferentes. Mesmo com tantas variações de potência de luz e metabólicas a temperatura do sistema se manteve estável.

Já a simulação, mesmo tendo um comportamento similar ao experimental validando o balanço de energia e a otimização via *Simulated Annealing*, confirmou a hipótese de que sejam necessários ajustes na função de aquecimento e resfriamento do banho, visto que há uma lacuna durante todo o processo entre o *setpoint* e a temperatura do banho.

Ademais, podemos concluir que este trabalho apresenta, a partir da modelagem e otimização do protótipo de controlador de temperatura, uma base tecnológica para implementação de um gêmeo digital via LabVIEW com otimização em tempo real, avançando o conhecimento científico na área de biotecnologia promovendo práticas mais sustentáveis para a produção de biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

AARTS, E.; KORST, J. *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing*. Chichester: John Wiley & Sons, 1989.

ACIÉN-FERNÁNDEZ, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; MOLINA-GRIMA, E. *Photobioreactors for the production of microalgae*. *Engineering in Life Sciences*, v. 13, n. 6, p. 602-610, 2013.

ADHIKARI, A. et al. *Effective biophysical modeling of cell-free transcription and translation processes*. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 8, 2020.

AFRICA, A. D. M.; DIVINO, A. M. J. L.; HARTIGAN-GO, K. A. *Fuzzy logic temperature control: a feedback control system implemented by fuzzy logic*. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, v. 8, n. 5, 2020.

AGHBASHLO, M.; PENG, W.; TABATABAEI, M.; KALOGIROU, S. A.; SOLTANIAN, S.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; MAHIAN, O.; LAM, S. S. *Machine learning technology in biodiesel research: a review*. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 85, p. 100904, jul. 2021.

AGRINIER, A. L.; PILON, G.; MARETTE, A. *A low-cost, easy-to-use prototype bioreactor model for the investigation of human gut microbiota: validation using a prebiotic treatment*. *Frontiers in Microbiology*, v. 15, 1250366, 2024.

AHMAD, I.; ABDULLAH, N.; IWAMOTO, K.; YUZIR, A.; MUHAMMAD, S. E. *Evolution of photobioreactors: a review based on microalgal perspective*, 2021.

AKISUE, Rafael Akira. *Implementação de sistema nebuloso (“fuzzy”) para controle de oxigênio dissolvido no cultivo de Escherichia coli para expressão de proteínas recombinantes*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, São Carlos, 2022.

ANTUNES, A. F. F. *Condições de pré-tratamento do glicerol proveniente da produção de biodiesel utilizando planejamento experimental*. Plackett Burman. 2011.

ARAÚJO, E. C. C. *Trocadores de calor*. São Carlos: EdUFSCar, Série Apontamentos, 2002.

ARTIFON, W. et al. *Enzymatic hydrolysis behavior on malt bagasse for fermentative sugar disposal in thermostatic and ultrasonic bath*. Environmental Quality Management, 2020.

ARTUR, A. P. S.; ABREU, B. M. P. N.; OLIVEIRA, L. J. P. L.; NUCCI, E. R. *Application of fuzzy logic for the analysis of the pandemic (COVID-19), if there was no social isolation*. Revista Saúde (Santa Maria), Santa Maria, v. 46, n. 2, 2020.

BABADI, A. A.; RAHMATI, S.; FAKHLAEI, R.; BARATI, B.; WANG, S.; DOHERTY, W.; OSTRIKOV, K. (Ken). *Emerging technologies for biodiesel production: processes, challenges, and opportunities*, 2022.

BANZI, M.; SHILOH, M. *Getting Started with Arduino*. 3. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014.

BARTEN, R.; DJOHAN, Y.; EVERS, W.; WIJFFELS, R.; BARBOSA, M. *Towards industrial production of microalgae without temperature control: the effect of diel temperature fluctuations on microalgal physiology*. Journal of Biotechnology, v. 336, p. 56-63, 2021.

BENNER, Philipp; MEIER, Lisa; PFEFFER, Annika; KRÜGER, Konstantin; OROPEZA VARGAS, José Enrique; WEUSTER-BOTZ, Dirk. *Lab-scale photobioreactor systems: principles, applications, and scalability*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 45, n. 5, p. 791–813, 2022. DOI: 10.1007/s00449-022-02711-1.

BERNI JUNIOR, M. A.; SOARES, V. A.; GONÇALVES, G. J. C.; MUNHOZ, M. R.; DIAS, L. G.; BARBARA, G. V.; BREGANON, R. *Implementação de um controlador fuzzy para controle de temperatura*. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 6, p. 38231-38245, 2020.

BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. *Simulated Annealing*. Statistical Science, v. 8, n. 1, p. 10–15, 1993.

BISHOP, R. H. *Learning with LabVIEW*. 1999. Pearson (Addison-Wesley).

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *ANP ajusta especificações da gasolina para garantir qualidade com aumento da mistura de etanol (E30)*. Rio de Janeiro, 25 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *RenovaBio: distribuidores têm até o dia 31/12 para aposentar CBIOs para cumprimento das metas de 2024*. Rio de Janeiro, 10 dez. 2024.

BRASIL. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2025. *Dados de desempenho da indústria de petróleo, gás natural e biocombustíveis e do sistema de abastecimento nacionais no período 2015-2024*. Publicado em 11 ago. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). *Reunião do CNPE – 25 de junho de 2025: Apresentação (fixação do teor obrigatório de biodiesel – B15; entrada em vigor em 01/08/2025)*. Brasília, 25 jun. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)*. Brasília, [s.d.].

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Programa Nacional do Álcool completa 49 anos com impactos positivos na economia e no meio ambiente*. 14 nov. 2024.

BRASIL. Presidência da República. *Decreto nº 10.527, de 22 de outubro de 2020. Institui o Selo Biocombustível Social e dispõe sobre coeficientes de redução de alíquotas da Contribuição para o PIS/Pasep e da Cofins*. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Presidência da República. *Governo aprova aumento de etanol na gasolina de 27% para 30% e de 14% para 15% no biodiesel*. Brasília, 25 jun. 2025.

BURDGE, D. A.; LIBOUREL, I. G. L. *Open Source Software to Control Bioflo Bioreactors*. PLOS ONE, v. 9, n. 3, e92108, 2014.

CARDOSO, T. S.; SANTOS, R. A.; COSTA, R. T. T.; AVIZ, E. O.; ARAÚJO, J. F.; SILVA, A. P.; FREITAS, M. C. C.; CORREIA, L. M. *Uma revisão da utilização de*

catalisadores heterogêneos para a produção de biodiesel. Braz. Ap. Sci. Rev., Curitiba, v. 4, n. 1, p. 240-276, 2020.

CARPENTER, K. J. *Agitated vessel heat transfer*. Thermopedia, 02 fev. 2011. Disponível em: <https://www.thermopedia.com/content/547/?tid=110&sn=5>. Acesso em: 29 out. 2025.

CAVELIUS, P.; STRAUB, S. E.; MEHLMER, N.; LERCHER, J.; AWAD, D.; BRUCK, T. *The potential of biofuels from first to fourth generation*. PLOS Biology, v. 21, n. 3, e3002063, 2023. DOI: 10.1371/journal.pbio.3002063.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica: abordagem prática*. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2019.

DHAGAT, S.; JUJJAVARAPU, S. E. *Simulated annealing and artificial neural network as optimization tools to enhance yields of bioemulsifier and exopolysaccharides by thermophilic Brevibacillus borstelensis*. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, 105499, 2021.

DINCER, Ibrahim. Energy and Exergy Efficiencies. In: DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. (Ed.). *Comprehensive Energy Systems*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. Cap. 1.7, p. 221-243.

DUARTE, V. H.; VALENTINI, M. H.; SANTOS, G. B.; NADELETTI, W.; VIEIRA, B. *Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel*. Meio Ambiente (Brasil), v. 4, n. 2, p. 50-68, 2022.

DOLGANYUK, V.; BELOVA, D.; BABICH, O.; PROSEKOV, A.; IVANOVA, S.; KATSEROV, D.; PATYUKOV, N.; SUKHIKH, S. *Microalgae: a promising source of valuable bioproducts*. Biomolecules, 2020.

ELLIOTT, C.; VIJAYAKUMAR, V.; ZINK, W.; HANSEN, R. *National Instruments LabVIEW: a programming environment for laboratory automation and measurement*. San Francisco: Cytokinetics, Inc., 2007.

GARCÍA-TUDELA, P. A.; MARÍN-MARÍN, J. A. *Use of Arduino in primary education: a systematic review*. Education Sciences, 2023, v. 13, p. 134.

GEMAN, S.; GEMAN, D. *Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 6, n. 6, p. 721–741, 1984.

GUEDES, J. M.; SANTOS, A. G. D.; SANTOS, H. S. *Uso da biomassa como fonte energética para produção de biocombustíveis*. Universidade Estadual do Ceará, 2020.

GUEDES, V. C. *Controle policromático de luz aplicado à produção de microalgas*. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2021.

GUERRA, W. D.; OLIVEIRA, F. C.; CHIESA, J. E. G.; ALBUQUERQUE, K. G.; MARTINS, A. M.; DA ROCHA, L. M.; BATISTA, A. C. F. *Revisão sistemática sobre o emprego e cultivo da microalga Scenedesmus sp. na produção de biodiesel*. Revista Sociedade Científica, vol.7, n.1, p.942-979, 2024.

HAJEK, B. *Cooling schedules for optimal annealing*. Mathematics of Operations Research, v. 13, n. 2, p. 311–329, 1988.

HELGERS, H.; HENGELBROCK, A.; ROSENGARTEN, J. F.; STITZ, J.; SCHMIDT, A.; STRUBE, J. *Towards Autonomous Process Control—Digital Twin for HIV-Gag VLP Production in HEK293 Cells Using a Dynamic Metabolic Model*. Processes, v. 10, n. 10, art. 2015, 2022.

HIGHAM, Desmond J.; HIGHAM, Nicholas J. *MATLAB guide*. 3. ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2017.

HOANG, A. T.; SIROHI, R.; PANDEY, A. et al. *Biofuel production from microalgae: challenges and chances*. Phytochem. Rev., v. 22, p. 1089-1126, 2023.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INGBER, L. *ASA: Adaptive simulated annealing*. Mathematical and Computer Modelling, v. 23, n. 6, p. 101–113, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ISO/IEC 14882:2024 — Programming languages — C++. Geneva: ISO, 2024.

ISMAILOV, A. S.; JO'RAYEV, Z. B. *Study of Arduino microcontroller board*. Science and Education, 2022, v. 3, n. 3.

ISOKO, Kesler; CORDINER, Joan L.; KIS, Zoltan; MOGHADAM, Peyman Z. *Bioprocessing 4.0: a pragmatic review and future perspectives*. Digital Discovery, v. 3, p. 1662–1681, 2024.

JOHNSON, M. HEGGS, P. MAHMUD, T. *Assessment of overall heat transfer coefficient models to predict the performance of jacketed agitated vessels*. Leeds: University of Leeds, 2016.

KIRKMAN, I. W.; BUKSH, P. A. *Data acquisition and control using National Instruments' "LabVIEW" software*. Sci. Instrum., 1992.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. *Optimization by simulated annealing*. Science, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.

KONDAVEETI, H. K.; KUMARAVELU, N. K.; VANAMBATHINA, S. D.; MATHE, S. E.; VAPPANGI, S. *A systematic literature review on prototyping with Arduino: applications, challenges, advantages, and limitations*. Computer Science Review, v. 40, p. 100364, 2021.

KUMAR, Munna; PRASAD, Durga; GIRI, Balendu Shekher; SINGH, Ram Sharan. *Temperature control of fermentation bioreactor for ethanol production using IMC-PID controller*. Biotechnology Reports, v. 22, e00319, 2019. DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00319.

LEGRAND, Jack; ARTU, Arnaud; PRUVOST, Jérémy. *A review on photobioreactor design and modelling for microalgae production*. Reaction Chemistry & Engineering, v. 6, n. 7, p. 1154–1171, 2021.

LUCA, Laurențiu; BARBU, Marian; IFRIM, George; CEANGA, Emil; MIRON, Mihaela; CARAMAN, Sergiu. *Fuzzy Control of a Microalgae Growth Process in*

Photobioreactors. In: 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC 2018), 2018, Sinaia, Romênia.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7, n. 1, p. 1–13, jan. 1975.

MARGINEAN, Ana Maria; TRIFA, Viorel; MARGINEAN, Calin. *Simulation of fermentation bioreactor control for ethanol production*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS (DAS), 11., 2012, Suceava: [s.n.], 2012. p. 17–20.

MARKOU, G.; GEORGAKAKIS, D. *Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: a review*. Applied Energy, v. 88, n. 10, p. 3389–3401, 2011.

MATHEW, G. M.; RAINA, D.; NARISSETTY, V.; KUMAR, V.; SARAN, S.; PUGAZHENDI, A.; SINDHU, R.; PANDEY, A.; BINOD, P. *Recent advances in biodiesel production: challenges and solutions*. Science of The Total Environment, v. 794, 2021.

MATHWORKS. *Simulink documentation*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *Model-Based Design (overview)*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/solutions/model-based-design.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *App Designer (product page)*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *Call MATLAB from Python (MATLAB Engine API for Python)*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab-engine-for-python.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *Embedded Coder documentation*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/ecoder/index.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *MATLAB Coder documentation*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/coder/index.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MATHWORKS. *Industrial Communication Toolbox documentation (OPC UA, MQTT, Modbus, PI)*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/icomm/index.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

MENDONÇA, H. V. de; ASSEMAN, P.; ABREU, M.; COUTO, E.; MACIEL, A. M.; DUARTE, R. L.; SANTOS, M. G. B. dos; REIS, A. *Microalgae in a global world: new solutions for old problems?* Renewable Energy, v. 165, p. 842-862, 2021.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, H. *Equation of state calculations by fast computing machines*. The Journal of Chemical Physics, v. 21, n. 6, p. 1087–1092, 1953.

MONTIRONI, M. A.; QIAN, B.; CHENG, H. H. *Development and application of the ChArduino toolkit for teaching how to program Arduino boards through the C/C++ interpreter*. Ch. Wiley, 2017.

O'CONNOR, Thomas F.; CHATTERJEE, Sharmista; LAM, Johnny; PÉREZ DE LA OSSA, Dolores Hernán; MARTINEZ-PEYRAT, Leticia; HOEFNAGEL, Marcel H. N.; FISHER, Adam C. *An examination of process models and model risk frameworks for pharmaceutical manufacturing*. International Journal of Pharmaceutics: X, v. 8, 2024.

PADDER, S. A.; KHAN, R.; RATHER, R. A. *Biofuel generations: New insights into challenges and opportunities in their microbe-derived industrial production*. Biomass & Bioenergy, v. 185, 107220, 2024.

PANCERI, J. A. C.; MAIA, G.; AMARAL, R. P. P.; CUADROS, M. A. de S. L. *Controle fuzzy aplicado à estabilização de um eixo de um quadricóptero com a utilização do LabVIEW*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2013.

PHAN, V. D.; NGUYEN, X. H.; DINH, V. N.; DANG, T. S.; LE, V. C.; HO, S. P.; TA, H. C.; DUONG, D. T.; MAI, T. A. *Development of an adaptive fuzzy-neural controller for temperature control in a brick tunnel kiln*. Electronics, 2024, v. 13, p. 342.

PIMENTA, C. A. *Desenvolvimento de um banho termostático para controle de temperatura de amostras utilizadas em ensaios não destrutivos por ultrassom*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) - Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.

QUINTELLA, C. M.; GONÇALVES, C. C.; LIMA, Â. M. V.; GUIMARÃES, A. K.; SANTOS, J. C. dos; PEPE, I. M. *Um banho termostático de baixo custo (temperatura ambiente até 0 °C)*. Química Nova, v. 26, n. 1, p. 130-132, 2003.

RAZZAK, S. A.; BAHAR, K.; ISLAM, K. M. O.; HANIFFA, A. K.; FARUQUE, M. O.; HOSSAIN, S. M. Z.; HOSSAIN, M. M. *Cultivation of microalgae in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future*. Green Chemical Engineering, v. 5, n. 4, p. 418-439, 2024.

REHMAN, M.; KESHARVANI, S.; DWIVEDI, G.; GIDWANI SUNEJA, K. *Impact of cultivation conditions on microalgae biomass productivity and lipid content*. Materials Today: Proceedings, v. 56, p. 282-290, 2022.

RIPPKA, R. *Isolation and purification of Cyanobacteria*. In: PACHER, L.; GLAZER, A. N. (Eds.). Cyanobacteria Methods in Enzymology. Blackwell, v. 167, p. 3-27, 1979.

RIVERA, E. C. et al. *A LabVIEW-based intelligent system for monitoring of bioprocesses*. In: ESCAPE-19 — 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Computer Aided Chemical Engineering, v. 27.

SALGADO, E. M.; ESTEVES, A. F.; GONÇALVES, A. L.; PIRES, J. C. M. *Microalgal cultures for the remediation of wastewaters with different nitrogen to phosphorus ratios: process modelling using artificial neural networks*. Environmental Research, v. 231, p. 116076, 2023.

SALTARIN, M. J.; SILVA, M. S.; MARTINS, L. O. S.; ROCHA, A. M.; FERNANDES, F. M.; HOCEVAR, L. S.; FREIRES, F. G. M.; TORRES, E. A. *A logística inversa dos*

óleos de gorduras residuais na produção de um biodiesel sustentável: uma revisão. *Revista GeSec*, São Paulo, SP, Brasil, v. 14, n. 1, p. 1170-1183, 2023.

SALOMÃO, A. C. *Efeito da luz na produtividade de biodiesel de microalgas*. 2023. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

SANTOS, M. G. P.; BRAGA JUNIOR, G. F. *Desenvolvimento de um banho termostático laboratorial com Arduino Uno e ambiente de desenvolvimento Simulink*. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 13, n. 4, p. 46, dez. 2021.

ARTUR, P. S. A. ABREU, B. M. P. N. OLIVEIRA, L. J. P. L. NUCCI, E. R. *Application of fuzzy logic for the analysis of the pandemic (COVID-19), if there was no social isolation*. *Saúde (Santa Maria)*, v. 46, n. 2, 11 dez. 2020.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SUGENO, Michio (ed.). *Industrial applications of fuzzy control*. Amsterdam; New York: North-Holland; New York: Elsevier Science Pub. Co., 1985.

THORÉ, E. S. J.; MUYLEAERT, K.; BERTRAM, M. G.; BRODIN, T. *Microalgae*. *Current Biology*, v. 33, n. 3, p. R91-R95, 2023.

U.S. Department of Energy. *Electric resistance heating*. Energy Saver. Disponível em: https://www.energy.gov/energysaver/electric-resistance-heating?utm_source. Acesso em: 29 out. 2025.

VEGA-ZAMBRANO, Consuelo; DIANGELAKIS, Nikolaos A.; CHARITPOULOS, Vassilis M. *Data-driven model predictive control for continuous pharmaceutical manufacturing*. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 672, 2025. Art. 125322.

WISHKERMAN, A.; WISHKERMAN, E. *Application note: A novel low-cost open-source LED system for microalgae cultivation*. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 132, p. 56-62, 2017.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZHU, Xianglin; REHMAN, Khalil Ur; WANG, Bo; SHAHZAD, Muhammad. *Modern soft-sensing modeling methods for fermentation processes*. Sensors, v. 20, n. 6, p. 1771, 2020.