

Concórdia, SC / Maio, 2025

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Viabilidade técnica e econômica da produção de microalgas em sistema semiaberto para uso agropecuário



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Suínos e Aves
Ministério da Agricultura e Pecuária**

e-ISSN 2965-8047

Documentos 258

Maio, 2025

Viabilidade técnica e econômica da
produção de microalgas em sistema
semiaberto para uso agropecuário

*Alexandre Matthiensen
Juan Diego Ramirez Camelo
Gustavo Lopes Colpani
William Michelon
Josiane Maria Muneron de Mello*

Embrapa Suínos e Aves
Concórdia, SC
2025

Embrapa Suínos e Aves
Rodovia BR 153 - KM 110
89.715-899, Concórdia, SC
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Franco Muller Martins

Secretário-executivo

Tânia Maria Biavatti Celant

Membros

Clarissa Silveira Luiz Vaz

Catia Silene Klein

Gerson Neudi Scheuermann

Jane de Oliveira Peixoto

Joel Antonio Boff

Revisão de texto

Jean Carlos Porto Vilas Boas Souza

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Vivian Fracasso

Foto da capa

Alexandre Matthiensen

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Suínos e Aves

Viabilidade técnica e econômica da produção de microalgas em sistema semiaberto para uso agropecuário / Alexandre Matthiensen [et al.] – Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2025.

PDF (22 p.) : il. color. – (Documentos / Embrapa Suínos e Aves, e-ISSN 2965-8047; 258)

1. Cultivo de microalgas. 2. biomassa. 3. Boas práticas. 4. Agricultura sustentável. 5. Produção de alimentos. I. Matthiensen, Alexandre. II. Camelo, Juan Diego Ramirez. III. Colpani, Gustavo Lopes. IV. Michelon, William. V. Mello, Josiane Maria Muneron de. VI. Título. VII. Série.

CDD (21. ed.) 579.8

Claudia Antunez Arrieche (CRB-14/880)

© 2025 Embrapa

Autores

Alexandre Matthiensen

Oceanólogo, doutor em Ciências Biológicas, pesquisador da Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, SC

Gustavo Lopes Colpani

Engenheiro Químico, doutor em Engenharia Química, professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação - Unochapecó, Chapecó, SC

Josiane Maria Muneron de Mello

Engenheira Química, doutor em Engenharia Química, professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação - Unochapecó, Chapecó, SC

Juan Diego Ramirez Camelo

Administrador, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação - Unochapecó, Chapecó, SC

William Michelin

Engenheiro Sanitário e Ambiental, doutor em Engenharia Química, professor da Universidade do Contestado Concórdia, SC

Apresentação

A presente publicação é resultado de vários anos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de produção de biomassa de microalgas em sistemas controlados para uso agropecuário. Este resultado faz parte das ações do projeto da Embrapa “Desenvolvimento de sistemas de produção de microalgas para viabilização do uso da biomassa algal em biorrefinarias de produção de fertilizantes agrícolas, ração para peixes e biogás - AlgaTec” (20.18.03.032.00.00), desenvolvido entre os anos de 2018 e 2024.

A biomassa de microalgas possui potencial de ser um recurso-chave na economia circular, servindo de matéria-prima para diversos produtos e atendendo as demandas de várias indústrias, com

destaque para insumos alimentares ricos em proteínas, carboidratos, lipídeos e outros compostos de interesse agropecuário, como fertilizantes. Assim, os resultados apresentados contribuem para a melhoria dos indicadores da Meta 2.4 do ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável). Essa meta busca, até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção. Além disso, visa preservar os ecossistemas, fortalecer a adaptação às mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, ao mesmo tempo em que melhora progressivamente a qualidade da terra e do solo.

Alexandre Matthiensen

Pesquisador da Embrapa Suínos e Aves

Sumário

Introdução	9
Cultivo de microalgas	10
Meio de cultivo	10
Inóculo inicial	11
Luminosidade	11
Circulação	11
Temperatura	12
Evaporação do meio de cultivo durante a produção	13
Colheita e processamento da biomassa	14
Produtividade	14
Processos operacionais	15
Avaliação de viabilidade técnica e econômica	16
Prospecção econômica	18
Considerações finais sobre o sistema	20
Referências	21

Introdução

Microalgas são organismos unicelulares fotossintetizantes com grande diversidade biológica e encontrados em uma grande variedade de ambientes aquáticos (Čmiková *et al.*, 2024). Possuem dimensões microscópicas, portanto são invisíveis a olho nu quando em baixa concentração em um meio líquido, mas tornam-se visíveis na forma de “colorações na água” quando atingem alta densidade (Zheng *et al.*, 2024). Esses microrganismos produzem carboidratos por meio da fotossíntese, removendo dióxido de carbono (CO₂) do ambiente. Além disso, possuem necessidades nutricionais simples, crescimento rápido e elevado rendimento por unidade de área (Verni *et al.*, 2023; Zeng *et al.*, 2015). Comumente, formam consórcios com outras espécies e exigem apenas uma quantidade reduzida de macronutrientes, como carbono, nitrogênio e fósforo, e micronutrientes, como potássio, magnésio e ferro (Michelon *et al.*, 2021).

Quando o crescimento microalgal atinge uma densidade considerável, a biomassa resultante pode ser utilizada como insumos em diversas aplicações agroindustriais, incluindo fertilizantes, aditivos alimentares, adjuvantes na codigestão anaeróbia em biodigestores, biocombustíveis ou compostos bioativos para a indústria farmacêutica (Chojnacka; Michalak, 2016; Michalak; Chojnacka, 2018; Qin *et al.*, 2023; Nag *et al.*, 2024).

Na área de aditivos alimentares, sua incorporação na dieta animal pode trazer vários benefícios. Ricas em proteínas, aminoácidos essenciais, ácidos graxos, vitaminas e minerais (Richmond, 2004), as microalgas contêm compostos bioativos, como ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs) e carotenoides, que podem melhorar a saúde animal e a qualidade do produto (Yadavalli *et al.*, 2024). Ainda, elas podem contribuir para o tratamento de efluentes e redução de contaminantes aquáticos, agindo como fitorremediadores ambientais. Nesse caso, os próprios efluentes de processos agroindustriais, como o digestato suíno (Dinnebier *et al.*, 2021; Matthiensen *et al.*, 2024) ou a vinhaça da indústria sucroalcooleira (Santana *et al.*, 2017), podem ser usados como meio de cultivo. Porém, dependendo da finalidade

de uso da biomassa, as microalgas podem ser produzidas de forma totalmente controlada em sistemas de produção relativamente simples, com a utilização de meios de cultura sintéticos.

A produção de microalgas vem ganhando relevância no cenário mundial, que busca novas fontes renováveis e sustentáveis de insumos como base para a bioeconomia. Sua capacidade de utilizar luz solar como fonte de energia para transformar água e CO₂ em biomassa rica em compostos de alto valor agregado as torna um recurso inestimável para diversas aplicações. Ainda, as microalgas contribuem para a mitigação das mudanças climáticas ao sequestrarem CO₂ atmosférico, podem ser cultivadas em áreas não agrícolas e utilizar água não potável, reduzindo a pressão sobre recursos naturais. Assim, a produção controlada de microalgas se alinha perfeitamente no conceito de economia circular, pois permite a valorização de resíduos, como efluentes industriais e agrícolas, e a geração de produtos com alto valor agregado.

Os sistemas controlados para produção de microalgas são baseados em estruturas denominadas fotobiorreatores (FBRs), que têm a função de manter as condições favoráveis que influenciam seu desenvolvimento, como a concentração de nutrientes no meio de cultivo, intensidade luminosa, temperatura, agitação, etc.

Os FBRs podem ser divididos em sistemas fechados e abertos (Rocha, 2016). Nos sistemas fechados, o meio de cultivo é isolado do ar externo, o que garante maior eficiência no uso de CO₂, reduz a evaporação e minimiza riscos de contaminação por espécies competidoras ou predadores, como herbívoros primários (Pulz, 1992; Richmond, 2004). Além disso, proporcionam melhor controle térmico e hidráulico, resultando em maior eficiência produtiva em comparação aos sistemas abertos, embora tenham custos mais elevados de estrutura, manutenção e operação (Huang *et al.*, 2015).

Por outro lado, os sistemas de produção abertos são amplamente utilizados devido ao seu menor custo de implementação e podem apresentar várias configurações de tanques ou lagoas de cultivo em diferentes escalas. No entanto, oferecem menos controle sobre as condições ambientais, especialmente em relação aos fatores climáticos e à contaminação.

Os sistemas abertos mais comuns possuem formato semicircular e movimentação mecânica do meio de cultivo, conhecidos como *raceway tanks* (Benemann, 1996; Richmond, 2004).

Cada tipo de sistema de produção oferece vantagens e desafios específicos. Desenvolver um modelo que combine os benefícios dos sistemas abertos e fechados pode aumentar a viabilidade técnica e econômica do cultivo de microalgas. Os resultados da avaliação técnica e econômica do sistema controlado de produção de microalgas, descritos neste trabalho, referem-se a um arranjo estrutural que buscou combinar as vantagens e mitigar as desvantagens dos sistemas de produção aberto e fechado. Esse sistema híbrido foi denominado de sistema semiaberto de produção de microalgas e opera, essencialmente, como um sistema aberto, com menor custo estrutural e maior facilidade de manejo da produção, mas em um ambiente fechado, que minimiza as variações e intempéries climáticas, além de reduzir o risco de contaminação, proporcionando um equilíbrio entre custo, eficiência e qualidade da produção. Os detalhes construtivos e operacionais desse sistema podem ser obtidos em Matthiensen e Michelon (2022) (<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1151835/producao-de-microalgas-em-sistema-semiaberto-estrutura-e-funcionamento-de-tanques-semicirculares-raceway-tanks>).

Cultivo de microalgas

Chlorella sp. é uma microalga amplamente estudada, com protocolos bem estabelecidos para seu cultivo em diferentes condições, o que minimiza os riscos e facilita sua adaptação aos sistemas de produção (Abreu *et al.*, 2023). Para validar a produção de microalgas em sistema semiaberto, foi utilizada a cepa de *Chlorella sorokiniana* LBA#39 (cadastro SISGEN nº A65B5E5; acesso no GenBank KM061456.1) da Coleção de Microalgas Aplicadas à Produção de Biocombustíveis e Bioprodutos, da Embrapa Agroenergia, Brasília – DF. Essa cepa é proveniente de uma linhagem tropical isolada do Bioma Cerrado, identificada por Hadi *et al.* (2016) e preservada segundo protocolo descrito por Fernandes *et al.* (2019). É um organismo robusto, capaz de suportar tanto a escalabilidade quanto os testes de validação em condições reais, além de possuir grande interesse econômico devido às características nutricionais de sua biomassa (Ribeiro *et al.*, 2020).

Foi realizado um experimento em escala TRL6 (*Technology Readiness Level* - Nível de Maturidade Tecnológica), durante um período de 20 dias, em sistema semiaberto de produção de microalgas nas instalações da Embrapa Suínos e Aves, em Concórdia (SC). Essa região apresenta clima subtropical úmido mesotérmico sem estação de seca definida (Cfa na classificação climática de Köppen-Geiger; Alvares, 2013). A escala TRL é uma ferramenta utilizada para avaliar o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia, desde a sua concepção até a sua aplicação comercial. Dividida em nove níveis, cada um deles representa um avanço no processo de desenvolvimento tecnológico. No nível TRL6, a tecnologia já ultrapassou a fase conceitual e se encontra em um estágio de desenvolvimento como um protótipo funcional, em um ambiente que simula as condições reais de uso, onde é apresentado um modelo completo e operacional da tecnologia, o que permite avaliar seu desempenho e identificar pontos de melhoria, visando sua futura aplicação comercial.

Durante o período experimental deste trabalho, algumas condições de cultivo das microalgas foram controladas e/ou monitoradas, incluindo a composição do meio de cultura, o percentual de inóculo, a agitação e circulação dos tanques e a temperatura, conforme detalhadas a seguir, com algumas considerações.

Meio de cultivo

O meio de manutenção dos inóculos das microalgas cultivadas na Embrapa Suínos e Aves é o BG11 (Stanier *et al.*, 1971). Este meio, formulado com reagentes de grau P.A. (Para Análise), apresenta um custo elevado, o que o torna impraticável para cultivos em grandes volumes. Assim, à medida em que se amplia a escala de produção, o meio BG11 é substituído por uma alternativa mais econômica, formulado a partir de insumos comerciais adquiridos em estabelecimentos agropecuários, mantendo bom desempenho para o crescimento das microalgas.

Para a realização dos experimentos em ambiente relevante (TRL6), foi definido um meio de cultivo alternativo de baixo custo, cuja formulação e desempenho não serão abordados nessa publicação, pois farão parte de uma publicação própria contendo os comparativos de diferentes meios de cultivos sintéticos e a caracterização físico-química e toxicológica da biomassa produzida. Porém, para fins de avaliação econômica de todo o sistema, esse documento apresenta uma estimativa de custo geral do meio

sintético alternativo. Ele possui um custo total de R\$ 16,54 por m³, o que equivale a R\$ 0,017/L. Com base nas características do cultivo descritas a seguir (a saber, utilizou-se 6,10 m³ de meio de cultivo no tanque de produção), o valor total do meio de cultivo necessário para um ciclo de produção (ou seja, uma batelada) foi de R\$ 100,90.

A mistura dos componentes do meio de cultivo alternativo foi preparada no próprio tanque semicircular de produção (*raceway tank*). Inicialmente, o tanque foi preenchido com cerca de 6.000 L de água da rede pública, deixando-se o sistema de circulação em funcionamento por dois dias para evaporar concentrações residuais de cloro livre. Em seguida, os componentes do meio de cultivo foram proporcionalmente adicionados, com o sistema de mistura ligado para garantir a completa dissolução e homogeneização do meio.

Inóculo inicial

A produção dos inóculos foi realizada em sala de cultivo com ambiente controlado, sob iluminação LED de 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, fotoperíodo de 12 h/12 h, temperatura de 24 ± 1 °C e aeração contínua de aproximadamente 3 PSI, fornecida por um compressor conectado as mangueiras instaladas no fundo dos frascos. A própria aeração proporciona relativa agitação no meio de cultura, porém, eventualmente, era realizada a agitação manual para a ressuspensão do material celular sedimentado.

O inóculo inicial foi cultivado em três frascos de cerca de 20 L cada, utilizando o mesmo meio de cultivo presente no tanque de produção até atingir uma densidade considerada satisfatória, com coloração verde escura intensa (Figura 1). O percentual de inóculo inicial foi de, aproximadamente, 1% do volume total de meio de cultura presente no tanque de produção. O volume de inóculo inicial é uma das variáveis possíveis de ser alterada para diminuir o tempo do ciclo de produção (desde a inoculação até a colheita). Com um volume de inóculo maior, o tempo necessário para que as microalgas atinjam uma densidade populacional ideal é reduzido, o que acelera o ciclo de produção e permite colher biomassa mais rapidamente, melhorando a produtividade geral do sistema. Idealmente, recomenda-se que o volume do inóculo inicial seja em torno de 5% do total do volume do tanque.



Foto: Alexandre Matthiensen

Figura 1. Inoculação das microalgas diretamente no tanque de produção (*raceway tank*).

Luminosidade

Durante o experimento na casa de vegetação, em um tanque semicircular, foi utilizado apenas o ciclo de fotoperíodo natural, sem iluminação artificial. Em se tratando de uma microalga adaptada ao crescimento constante, uma iluminação contínua (24h/dia) possibilita acelerar o processo de produção e, assim, melhorar a produtividade (Kamolrat, 2023). No entanto, a opção por utilizar apenas o fotoperíodo natural neste experimento visou reduzir custos energéticos associados à iluminação. Além disso, não foi utilizado o sistema de sombreamento por mantas de sombrite, como descrito em Matthiensen e Michelon (2022).

Circulação

A agitação mecânica no tanque foi mantida de modo constante pelo sistema de pás rotacionais (*paddle wheels*), conforme descrito em Matthiensen e Michelon (2022). A velocidade de rotação das pás foi definida em 70% no inversor de frequência (WEG CFW500, 2CV) para ajuste de velocidades variáveis e programação de rotinas de trabalho/repouso, que corresponde a, aproximadamente, 15 rpm. Essa agitação é fundamental para maximizar a absorção de nutrientes e a exposição à luz, aumentando a taxa de fotossíntese e promovendo um crescimento mais rápido e homogêneo (Devadiga *et al.*, 2023).

De modo visual (empírico), é possível estabelecer uma velocidade de rotação das pás e, consequentemente, da circulação do meio de cultivo, de modo que o movimento das pás rotacionais não

cause muita turbulência quando entra em contato com o meio líquido, diminuindo ao máximo possível as áreas de criação de vórtices hidráulicos (pequenas zonas de circulação com padrões espirais) nas extremidades das laterais das pás rotacionais. Em um sistema hidráulico que não seja perfeitamente retilíneo, essas áreas de vórtices são bastante comuns e podem resultar em “zonas mortas” de fluxo direcional, com consequente aumento de sedimentação local, diminuindo a produtividade e rendimento do sistema (Rocha, 2016).

Temperatura

O experimento utilizou um sistema de resfriamento composto por três exaustores em uma parede da casa de vegetação, com um painel evaporativo Celdek™ na parede oposta, alimentado por uma bomba (Famac™) e caixa d'água de 1.000 L (Matthiensen; Michelon, 2022). O sistema de controle de temperatura foi configurado para acionar os exaustores e o painel de arrefecimento quando a temperatura interna atingisse 38 °C. Foi instalado um Data Logger de temperatura (Testo® 175T3) no interior da casa de vegetação para medições constantes da temperatura interna do ar e do meio de cultivo.

A temperatura média na casa de vegetação durante o experimento foi de $24,7 \pm 7,62$ °C, com temperaturas máxima e mínimas de 48,9 °C e 10,2 °C, respectivamente. A temperatura média do meio de cultivo foi de $24,8 \pm 3,67$ °C, com máxima de 34,6 °C e mínima de 15,2 °C. Essas temperaturas médias mantiveram o meio de cultivo dentro da faixa ideal para o crescimento de microalgas. A conservação da energia térmica do meio líquido diminuiu os

extremos de oscilações de temperatura, que poderiam afetar o metabolismo celular.

Ao mesmo tempo, medições de temperaturas externas e índices de pluviosidade foram adquiridas na Estação Agrometeorológica da Embrapa Suínos e Aves, distante cerca de 450 m da casa de vegetação. A temperatura média externa do ar, mensurada durante o período experimental, foi de $17,8 \pm 5,01$ °C, com temperaturas máximas e mínimas de 31,8 °C e 3,6 °C, respectivamente. A Figura 2 ilustra a variação das temperaturas externa, interna do ar e do meio de cultivo, bem como os volumes de precipitação durante um período de 32 dias (de 05/10 a 10/11). O período de produção das microalgas, propriamente dito, ocorreu durante os dias 18/10 (dia do inóculo) a 07/11 (dia da colheita), num período de 20 dias.

A partir da análise da Figura 2, observa-se que a variação de temperatura no meio de cultivo (linha azul) apresenta uma amplitude de oscilações menor em comparação às variações de temperatura do ar, tanto no interior da casa de vegetação (linha verde) quanto no ambiente externo (linha laranja). Em 24 de outubro, o sistema de resfriamento existente na casa de vegetação foi ajustado para acionar os exaustores e o painel de arrefecimento quando a temperatura interna chegasse a 38 °C. Ao observar o padrão das oscilações das máximas de temperatura interna do ar (linha laranja) a partir desta data, percebe-se de três a quatro acionamentos automáticos do sistema de resfriamento por dia (número de ocorrência dos pequenos picos durante o horário mais quente, normalmente entre 12:00h e 18:00h).

De modo geral, o acionamento desse sistema de resfriamento não diminuiu a amplitude das variações de temperatura do meio de cultivo, mas fez com que ela oscilasse em uma faixa mais estável. No entanto, por se tratar apenas de um sistema de

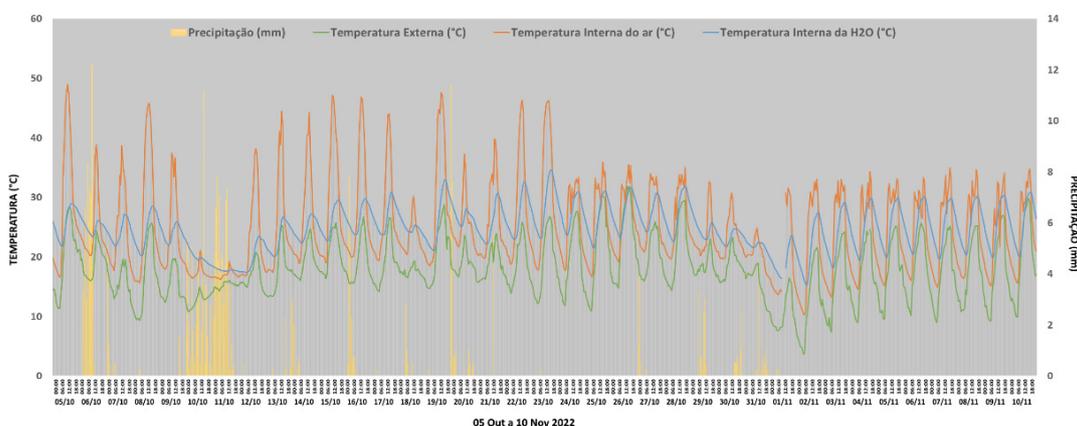


Figura 2. Variações de temperaturas externa, interna do ar e interna do meio de cultivo (°C) e precipitação (mm) durante o período de produção de microalgas em sistema semiaberto.

arrefecimento, a temperatura do meio de cultivo ainda se mostrou influenciável pela queda de temperatura externa, conforme pode ser observado durante a madrugada do dia 2 de novembro, quando a temperatura externa atingiu 3,6 °C (Figura 2). Ainda, a partir da análise conjunta dos volumes de precipitação (colunas amarelas; escala da direita do gráfico da Figura 2) durante o período avaliado, é possível perceber o efeito de uma chuva prolongada (ou seja, ausência de sol incidente) na temperatura externa, na temperatura interna do ar da casa de vegetação (dias 10 e 11 de outubro) e, conseqüentemente, na amplitude da variação das oscilações no meio de cultivo líquido.

Evaporação do meio de cultivo durante a produção

A perda de volume do meio de cultivo devido à evaporação durante o período de produção foi estimada durante o experimento. Os tanques de produção de microalgas utilizados na Embrapa Suínos e Aves possuem comprimento de 12 m, largura de 2,8 m e altura de 40 cm, perfazendo uma área de 30,5 m² e capacidade total de 12,76 m³ (Matthiensen; Michelon, 2022). Cada *raceway tank* possui dimensões que permitem trabalhar com uma profundidade máxima de 30 cm e volume útil máximo de 9,57 m³

de meio de cultivo. No presente experimento, foi utilizada uma profundidade média inicial de 20 cm, resultando em um volume útil inicial de 6,10 m³ de meio de cultivo. Após 20 dias, essa profundidade média reduziu para 15 cm, indicando uma perda de volume por evaporação de 1,525 m³, que corresponde a uma taxa de evaporação de 76,25 L/dia, nas condições do experimento.

A elevada evaporação observada durante o período de produção destaca a necessidade de definição precisa de duas variáveis importantes nesse processo: o tempo de cada ciclo de produção (batelada) e o volume (percentual) do inóculo inicial. Essas variáveis são interdependentes e devem ser configuradas para manter a relação nutricional no meio de cultivo próxima das condições ideais de crescimento da microalga até o fim do ciclo. Isso ajuda a evitar o surgimento de fatores que beneficiem o crescimento de microrganismos indesejados que possam competir com a espécie principal, comprometendo o crescimento das microalgas de interesse e a qualidade da biomassa final. Portanto, o ajuste do tempo de produção e do inóculo inicial otimiza o consumo de nutrientes e evita a flutuação na qualidade do meio, minimizando uma eventual competição e favorecendo a cultura principal. Um resumo das principais características do sistema e condições de cultivo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características e variáveis presentes no sistema de cultivo de microalgas e as condições nas quais foram usadas na produção do presente trabalho.

Variáveis	Condição usada no cultivo
Dimensionamento do tanque (<i>raceway</i>)	12 x 2,8 x 0,4 m
Volume do meio de cultivo inicial	6,10 m ³
Profundidade inicial da lâmina d'água	20 cm
Percentual (v/v) de inóculo usado	1%
Ciclo de produção (batelada)	20 dias
Luminosidade	Fotoperíodo natural
Temperatura média na estufa	24,7 °C ± 7,6
Temperatura média do meio de cultivo	24,8 °C ± 3,6
Resfriamento por painel evaporativo	Acionado quando temperatura atinge 38 °C
Agitação	15 rpm (contínua)
Taxa de evaporação média	76,25 L · dia ⁻¹

Colheita e processamento da biomassa

Após 20 dias de produção, contados a partir da inoculação no tanque semicircular, e quando a cultura apresentou coloração verde-escuro intensa, característica de elevada densidade celular da *Chlorella* sp., foi iniciado o processo de colheita. A colheita e concentração (deságue) da biomassa foi realizada por meio de uma centrífuga de fluxo contínuo (Evodos Dynamic Settlers®, Netherlands), com capacidade para processamento de até 750 L/h (Matthiensen; Michelon, 2022).

Devido ao elevado custo de aquisição e à especificidade desse equipamento, ele não é amplamente utilizado em locais de produção de microalgas. Apesar de oferecer uma grande vantagem no processo de colheita e concentração da biomassa, existem opções mais econômicas, como tanques cônicos de sedimentação ou de floculação (Figura 3). Esses tanques concentram a maior parte das microalgas em um estrato da camada líquida, facilitando sua remoção com menor volume de água possível para a etapa posterior de secagem do material (Rocha, 2016; Silva *et al.*, 2014).



Foto: Alexandre Matthiensen

Figura 3. Tanque cônico para decantação e concentração da biomassa microalgal.

A etapa de secagem (desidratação) desidratação) das microalgas foi realizada em liofilizador (Lyotech® LS 3000). Assim como a centrífuga de fluxo contínuo, o liofilizador também não é um equipamento comum em sistemas de produção de larga escala devido ao seu alto custo de aquisição e operação/manutenção. Opções variadas de metodologias de secagem da biomassa podem ser empregadas, como secagem ao sol (em estufa/casa de vegetação ou secagem ao ar-livre), secagem por nebulização e tambor de secagem (Lima *et al.*, 2014). Para isso, normalmente são utilizadas plataformas ou mesas de secagem, que basicamente consistem em uma superfície plana de material inerte (por exemplo, uma chapa inoxidável ou manta de PVC) onde a microalga, concentrada com pouca umidade após a etapa do deságue, é espalhada e deixada para secar pela ação do calor do sol (Lima *et al.*, 2014; Rocha, 2016), sem necessidade de *input* de energia elétrica no processo. Nos custos de investimento inicial (Tabela 2), o valor estimado para essas etapas não considerou o uso da centrífuga de fluxo contínuo nem do liofilizador, priorizando alternativas de menor custo. Esse é, também, o motivo pelo qual essas etapas (colheita e processamento) não estão computadas nos gastos de energia elétrica na seção de avaliação econômica do sistema.

Produtividade

Com base em referências bibliográficas, a produtividade teórica estimada para um sistema de produção da microalga *Chlorella* sp. é de aproximadamente 8 a 10 g de massa seca/m²·dia (Antunes; Silva, 2010). Considerando que a área do tanque semicircular é de 30,5 m², a expectativa seria uma produção diária de 244 a 305 g (massa seca). Assim, ao longo de 20 dias de produção, a biomassa total esperada (teórica), em massa seca, seria de 4,8 a 6,1 kg, utilizando um volume útil máximo de 9,57 m³ de meio de cultivo. Esse rendimento equivale a cerca de 25 a 30 mg/L·dia.

No presente experimento, após o processamento da biomassa microalgal, obteve-se uma massa seca total de 2,5 kg. Isso corresponde a 125 g de massa seca/dia, ou seja, cerca de 4,1 g de massa seca/m²·dia (produtividade real no final do experimento). Porém, é importante lembrar que o sistema não estava funcionando em volume útil total, mas sim com um volume útil inicial de 6,1 m³ (ou seja, apenas 63,7% de sua capacidade total).

Tabela 2. Estimativa do consumo de energia dos equipamentos para a manutenção das condições de cultivo. A estimativa do total parcial será o valor considerado nos custos de produção, pois diz respeito diretamente à produção das microalgas no sistema semiaberto (TRL6). Os demais custos são referentes às estruturas de manutenção do inóculo.

Itens considerados	CV	W	Horas de uso/dia	kWh/dia	kWh/batela-da (20 dias)	R\$ (por batelada)*	R\$ (dia)*
Motor WEG (paddle wheels)	2	1.500	24	36	720	424,80	28,32
Bomba do resfriador	1	750	1	0,75	15	8,85	0,59
Exaustores (100cm)	0,75	550	1	1,1	22	12,98	0,87
Exaustor (50cm)	0,25	180	1	0,18	3,6	2,12	0,14
Total (parcial)				38,03	760,6	448,75	29,92
Estufa tipo BOD	2	1.500	24	36	720	424,80	28,32
Compressor de ar (sala de cultivo)	2	1.500	24	36	720	424,80	28,32
Freezer horizontal	-	-	24	1,43	28,6	16,87	1,12
4 lâmpadas (sala cultivo)	-	5	12	0,24	4,8	2,83	0,19
Total				111,7	2.234	1.318,06	87,87

*Ao custo médio de R\$ 0,59 o kWh em SC.

Portanto, a comparação da produtividade real vs. teórica faz mais sentido em termos de volume de meio de cultivo (L) do que por área (m²) de tanque.

Dessa forma, com as condições atuais descritas nesta publicação, obteve-se uma produtividade de 20,5 mg/L.dia, ou seja, uma produtividade real de 68,3% a 82% da produtividade teórica esperada. Com isso, estima-se uma produtividade de cerca de 3,0 a 3,7 kg de biomassa por ciclo de produção para o volume útil máximo do tanque (9,57 m³). Levando-se em consideração que o meio de cultivo utilizado não é o mesmo que o meio relatado na bibliografia (foi utilizado um meio de cultivo alternativo de baixo custo, desenvolvido e adaptado para a cepa de *Chlorella sorokiniana* LBA#39), pode-se dizer que, em termos de produtividade, os resultados são altamente promissores.

O sistema de produção semiaberto de microalgas demonstrou uma capacidade de cultivo robusta, capaz de criar condições que sustentam o crescimento durante um ciclo e resultando em uma produtividade relevante, que ainda pode ser melhorada com as estruturas já instaladas no sistema e com potencial para chegar até os 6 kg por batelada. Para atingir esse máximo de produtividade, alterações nas variáveis do sistema, como o aumento na porcentagem do inóculo, alteração do fotoperíodo ou mesmo o uso de iluminação constante, podem ser decisivos, permitindo que o cultivo inicie sua produção num ponto maior da curva de desenvolvimento

ou fazendo com que as microalgas mantenham suas taxas metabólicas ativas por mais tempo.

Para o controle e manutenção das condições de cultivo ao longo do processo é necessário o uso de equipamentos como *paddle wheels*, resfriadores e exaustores. Embora esses equipamentos aumentem o consumo energético, eles contribuem significativamente para a eficiência e estabilidade do cultivo. Manter condições ambientais próximas do ideal do microrganismo cultivado maximiza a produtividade, compensando o investimento. Além disso, seu custo operacional é baixo, como pode ser observado na Tabela 2.

Processos operacionais

O cultivo de microalgas envolve uma série de etapas essenciais e processos operacionais que visam garantir condições ideais de crescimento, resultando em alta produtividade e qualidade da biomassa. Essas atividades devem ser executadas por pessoal treinado e qualificado para realizar as funções específicas que atendam às necessidades das microalgas e otimizem o processo produtivo. A seguir, são descritas as principais atividades desse cultivo, na fase final do escalonamento (TRL6).

A primeira etapa é a preparação do meio de cultivo, que inclui a escolha e dosagem ideal dos nutrientes. Esse meio de cultivo precisa conter os macro e micronutrientes essenciais para as exigências específicas da espécie de microalga que se deseja cultivar, bem como para o objetivo de uso da biomassa (produção de lipídios, proteínas, etc.). A preparação cuidadosa do meio é crucial, pois a concentração correta de nutrientes permitirá um ambiente favorável e equilibrado para o crescimento das microalgas durante o ciclo de produção.

Após a preparação do meio, ocorre a inoculação, etapa em que a cultura inicial de microalgas (inóculo) é introduzida no meio de cultivo já nos tanques de produção (Figura 1). É importante que a quantidade de inóculo seja cuidadosamente controlada para assegurar uma produção uniforme e constante, buscando a padronização da biomassa final. Essa etapa influencia diretamente a velocidade do ciclo de produção e o rendimento final. Por isso, ajustar o inóculo de maneira otimizada é essencial para um cultivo eficiente.

Durante o processo de cultivo, ações de monitoramento e ajustes devem ser contínuas para manter condições ideais. O controle das variáveis de cultivo, como iluminação, temperatura, aeração, pH e evaporação, é uma tarefa constante e essencial. Após atingir a maturidade e a densidade de cultivo adequada, realiza-se a colheita da biomassa, tarefa com maior requerimento de mão de obra, pois as diferentes atividades devem ser realizadas de forma intensiva. Nesta etapa as microalgas são separadas do meio de cultivo (colheita/deságue). Essa coleta pode ser feita por diversos métodos, conforme já descrito anteriormente, dependendo do tipo de sistema e da escala de produção. A escolha do método de colheita impacta diretamente na eficiência e no custo do processo, especialmente em cultivos de grande escala, onde é importante maximizar a quantidade de biomassa recuperada com o menor desperdício possível.

Finalmente, vem o tratamento pós-colheita, onde a biomassa é processada para adequá-la ao seu uso final. Dependendo do destino da biomassa, seja para alimentação, biocombustível ou outro produto, ela pode ser seca, liofilizada, purificada ou processada para a extração de compostos específicos, como proteínas, carotenoides ou lipídios. Esse tratamento pós-colheita é essencial para transformar a biomassa em um produto com valor agregado e pronto para aplicações industriais ou comerciais e deve ser especializado para cada uma destas funções.

A necessidade de mão de obra especializada é fundamental em algumas etapas do processo, como na manutenção do inóculo, acompanhamento do crescimento e avaliação da qualidade do produto. Uma pessoa qualificada que conheça a biologia e ecologia das microalgas, seus requisitos nutricionais e demais necessidades abióticas do ambiente de produção (luz, temperatura, pH, agitação, etc.) é de extrema importância para o andamento dos trabalhos. Como qualquer outro sistema produtivo que utilize organismos vivos, decisões precisam, às vezes, ser tomadas em curto espaço de tempo, e o produtor deve estar bem embasado e seguro para tais decisões. As demais etapas pontuais (colheita, deságue e secagem do material), onde se requer mão de obra mais intensa, porém, de curto prazo, são consideradas de rotina e não representam problema para uma equipe bem treinada. Essas atividades, quando realizadas de maneira integrada e controlada, formam o processo completo de cultivo de microalgas, promovendo um ciclo de produção eficiente que maximiza tanto a quantidade quanto a qualidade da biomassa produzida.

Essas recomendações visam não apenas viabilizar o projeto, mas também garantir flexibilidade e otimização de recursos, permitindo que o cultivo de microalgas se desenvolva com segurança e economia desde as etapas iniciais até a produção em maior escala.

Avaliação de viabilidade técnica e econômica

A viabilidade técnica e econômica de um sistema busca analisar a possibilidade de implementação de um projeto, produto ou serviço, considerando aspectos técnicos, operacionais e financeiros. O objetivo é avaliar se o projeto pode ser considerado factível. Assim, de posse das informações referentes ao experimento de produção de biomassa microalgal em sistema semiaberto, executado em ambiente relevante (TRL 6), ou seja, a partir de um protótipo funcional, pode-se tirar conclusões sobre a eficácia e eficiência do projeto, bem como da qualidade e segurança do produto. As considerações descritas aqui dizem respeito ao sistema de produção propriamente dito, seus requisitos (como infraestrutura, recursos humanos e possibilidades de impacto) e a observação da maturidade da tecnologia. Essa publicação não aborda o produto *per se* (biomassa

microalgal), que será assunto de uma publicação à parte. Ainda, espera-se que a avaliação da viabilidade técnica e econômica auxilie na identificação de oportunidades de melhorias no processo, bem como na redução de custos e riscos associados.

O presente sistema envolve infraestrutura considerável, sendo possível identificar suas partes essenciais. O sistema de produção de microalgas pode ser dividido em três tipos de estruturas: casa de vegetação, tanques de produção (*raceways*) e estruturas de apoio. O presente sistema semiaberto para produção de microalgas se beneficia do controle de algumas variáveis ambientais importantes de modo mais preciso, aumentando assim sua viabilidade técnica e competitividade no mercado. No entanto, a escolha criteriosa de cada elemento neste sistema alterará a produtividade, a qualidade do produto e o custo do projeto.

Seguindo as indicações técnicas descritas, e considerando que o modelo desenvolvido de produção de microalgas em sistema semiaberto na Embrapa Suínos e Aves visa a produção de biomassa de alta qualidade em região caracterizada pela presença de quatro estações climáticas claramente marcadas, com eventuais mudanças de temperatura drásticas, alta umidade e fortes precipitações, foi priorizado o controle dos fatores externos. Essa escolha resultou no aumento de custos, especialmente no que diz respeito à casa de vegetação, pois

esta conta com painéis automáticos de resfriamento e controle da radiação solar.

A Tabela 3 apresenta a estrutura de custos do projeto de cultivo de microalgas no sistema semiaberto usado na Embrapa, considerando os investimentos iniciais e associados a cada componente do sistema, incluindo dois tanques *raceways*, casa de vegetação e estruturas de apoio e manutenção. A Figura 4 resume percentualmente a distribuição dos custos de investimento. Essa divisão facilita a análise do impacto econômico de cada categoria em relação às demais.

O diagrama destaca que a estufa agrícola representa o maior custo, correspondendo a 74% do investimento total, com um valor estimado de R\$ 350.000,00. Embora essa estrutura seja crítica para o controle ambiental, há alternativas mais econômicas, que podem manter a eficiência sem elevar os custos. Por exemplo, o painel evaporativo, fundamental para o controle térmico, poderia ser substituído por sistemas de ventilação e sombreamento mais acessíveis, como exaustores ou ventiladores. Em climas mais favoráveis, o painel evaporativo poderia até ser eliminado, adaptando-se à necessidade térmica real do cultivo.

O investimento nos dois tanques de produção (reatores biológicos de fibra de vidro, com sistema de pás rotacionais) é de aproximadamente

Tabela 3. Descrição e custo estimado de estruturas e equipamentos para o projeto de cultivo de microalgas no sistema semiaberto usado na Embrapa.

Estruturas	Descrição	Valor estimado (R\$)
Estufa/casa de vegetação	Estufa agrícola de estrutura metálica e revestimento de policarbonato 8,0 m x 18,3 m, com mantas de sombrite e sistema de resfriamento por painel evaporativo	350.000,00
Tanque <i>raceway</i>	2 tanques <i>raceway</i> FBR em fibra de vidro 12m x 2,8m x 0,4m	60.000,00
Sistema de pás rotacionais (<i>paddle wheels</i>)	2 sistemas de pás giratórias em aço inox, acopladas a um eixo rotacional movido por um motor elétrico e motorreductor	36.000,00
Biorreatores para sala de escalonamento	5 frascos de escalonamento entre 20 e 500 L	800,00
Estufa tipo BOD	Estufa tipo BOD de 342 L, com controle de temperatura entre -10/60 °C e sistema de fotoperíodo	15.000,00
Sistema de colheita	Tanque cônico para decantação/flotação 1.000 L	5.000,00
Sistema de secagem	Secador em estufa solar	3.500,00
Freezer para armazenamento da biomassa	Freezer Horizontal 2 portas 534L	3.500,00
Total		473.800,00

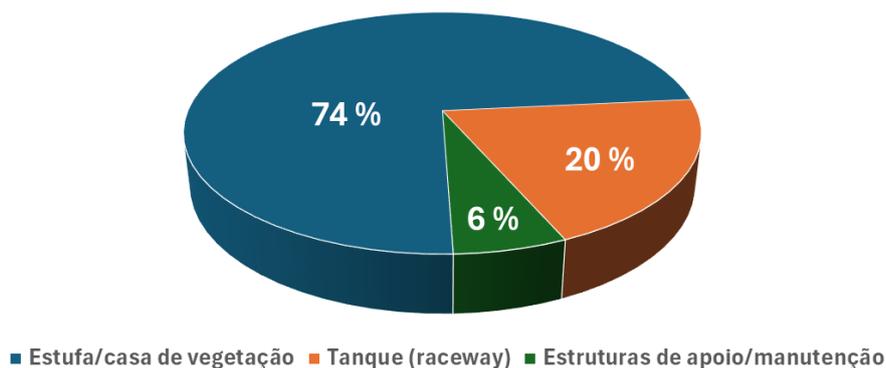


Figura 4. Distribuição dos custos de investimento.

R\$ 96.000,00. Esse valor elevado se deve à escassez de fornecedores especializados, o que sugere que os custos poderão ser reduzidos à medida que a demanda por esses tipos de tanques aumente e novos fornecedores entrem no mercado. Neste contexto, é importante preservar o design do tipo *raceway*, pois ele permite que as condições cinéticas do sistema sejam ideais. Já outras opções, como materiais ou dimensões alternativas, podem ser adaptadas. Vários autores relatam experiências interessantes com tanques de alvenaria ou tanques escavados com lona PVC ou poliuretano (Rocha, 2016), o que poderia reduzir custos sem comprometer a produtividade e o controle das condições externas.

As estruturas de apoio, que representam 6% do investimento (aproximadamente R\$ 27.800), são compostas por diversos itens essenciais para a segurança e qualidade do cultivo. Embora seu custo seja relativamente acessível, essas estruturas têm alta escalabilidade e podem ser reutilizadas, como no caso do sistema de coleta e separação, usado apenas pontualmente em um ciclo de produção, mas que poderia complementar outros sistemas de cultivo. É importante estimar estas estruturas de apoio de modo que facilitem a escalabilidade do projeto, o que pode refletir em sistemas mais eficientes.

Ao analisar apenas os principais custos operacionais, que compreendem os custos da elaboração do meio de cultura alternativo e os custos energia elétrica (Tabela 2), fica claro que o consumo de energia representa a maior parte dos gastos, alcançando 81,6% desse total, enquanto o meio de cultivo alternativo corresponde a apenas 18,4%. Diante dessa realidade, surge a possibilidade de implementar sistemas de eficiência energética, que podem reduzir substancialmente esses custos associados à energia. Além disso, a integração de fontes de energia renovável nesses sistemas apresenta-se como uma

estratégia promissora. A adoção de soluções renováveis e eficientes não só diminui os gastos energéticos como também é coerente para estabelecer uma produção mais sustentável, o que aumenta a competitividade e a viabilidade econômica do projeto, tornando-o mais atrativo no longo prazo. Por fim, vale destacar que os custos operacionais de mão de obra não estão incluídos no cálculo final.

Prospecção econômica

A viabilidade econômica da produção de microalgas em sistema semiaberto depende, em grande parte, da demanda por biomassa e dos potenciais compradores. No contexto atual, o mercado de microalgas está dividido principalmente entre os segmentos de nutrição animal, biofertilizantes, cosméticos, suplementos alimentares e biocombustíveis. Em cada um desses mercados, as microalgas oferecem vantagens específicas, atribuídas à sua composição nutricional, rica em proteínas, ácidos graxos e carotenoides.

No segmento de nutrição animal, a biomassa de microalgas, embora ofereça um perfil proteico de qualidade, tem a concorrência de fontes proteicas tradicionais estabelecidas no mercado, como soja, milho e farinha de peixe, além da limitação de sua produção em menor escala e, principalmente, da não existência de um sistema produtivo consolidado, o que dificulta sua aceitação pelas agroindústrias (Becker, 2007; Madeira *et al.*, 2017).

Apesar dessas limitações, as microalgas têm se destacado como aditivo de alto valor agregado na nutrição animal, particularmente em aves, especialmente quando incorporadas em pequenas quantidades (cerca de 1,25%) na dieta animal, contribuindo para a coloração da pele e dos ovos das aves, além de melhorar a qualidade nutricional (Tavernari *et al.*, 2018). Chaves *et al.* (2021) compilou diversas pesquisas, incluindo experimentos que comprovaram os benefícios da biomassa de microalgas na alimentação de frangos de corte e galinhas poedeiras, conforme demonstrado na Tabela 4.

As microalgas apresentam um grande potencial para competir com aditivos tradicionais e outros suplementos utilizados na avicultura. Ao fornecer, por

Tabela 4. Efeitos da incorporação de microalgas como aditivo em aves.

Ave	Efeitos identificados
Frangos de corte	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de ômega-3 na carne • Melhoria na taxa de crescimento, desempenho e peso corporal • Aumento da população de lactobacilos intestinais • Melhoria nas características imunológicas • Melhoria nos ácidos graxos na carne • Aumento do valor de metionina digestível • Alterações na cor do músculo (mais pigmentação)
Galinhas poedeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Ovos enriquecidos com DHA (Ácido docosa-hexaenoico) • Mudança na cor da gema (mais escura, laranja-avermelhada, intensa) • Redução dos níveis de colesterol na gema • Desempenho e qualidade dos ovos não afetados • Enriquecimento de ácidos graxos (n-3) nos ovos
Patos	<ul style="list-style-type: none"> • Melhoria no peso corporal • Nenhuma diferença no desempenho • Aumento de DHA na carne do peito

Adaptado de Chaves *et al.*, 2021.

exemplo, uma fonte alternativa de DHA (ácido docosa-hexaenoico) e outros nutrientes essenciais, elas podem atrair empresas que buscam ingredientes naturais, além de reduzir a dependência de fontes convencionais. Esse diferencial cria oportunidades para a indústria de microalgas, especialmente como aditivo que agrega valor nutricional à carne e aos ovos de forma sustentável.

Optar por produzir aditivos derivados de microalgas pode não apenas aumentar o valor dos produtos, como também atender à demanda da indústria. Se a biomassa de microalgas fosse destinada como base alimentar animal como insumo proteico, teria que competir com a soja, cujo preço, em novembro de 2024, estava próximo de R\$ 2,35 por kg (R\$ 141,03 a saca de 60 kg), ou seja, uma realidade inviável. Em contrapartida, corantes como a cantaxantina, pigmento produzido por algumas microalgas (incluindo algumas espécies de *Chlorella*), custam cerca de R\$ 2.000,00 por kg, destacando o potencial de nicho e valor agregado dos produtos à base de microalgas. Ainda, é possível considerar, como base de cálculo para um exercício matemático, o valor atual da *Chlorella* sp. comercial vendida com o suplemento alimentar para humanos, comumente encontrada no mercado por cerca de R\$ 500,00 a R\$ 1.000,00 por kg.

A produção alcançada no sistema semiaberto para produção de microalgas da Embrapa foi de 2,5 kg em 20 dias para um tanque de produção. Porém, esses valores foram obtidos em 6,1 m³ de volume útil. Para um volume útil máximo de produção de 9,57 m³, pode-se utilizar uma produção estimada de 3,5 kg em 20 dias. Assim, esses dados indicam

que podem ser produzidos 63 kg/ano (em 18 ciclos de produção) em apenas um tanque de produção. O sistema atual construído possui dois tanques de produção (Matthiensen; Michelon, 2022), portanto possui capacidade para produzir 126 kg por ano com os mesmos custos operacionais e de investimento. Considerando um valor comercial das produções com base no preço da *Chlorella* encontrada no mercado (R\$ 500,00 a R\$ 1.000,00/kg), o valor anual das produções pode ser de R\$ 63.000,00 a R\$ 126.000,00, com base na produtividade alcançada.

Fazendo-se a comparação com a produtividade máxima teórica (a saber, 6 kg por tanque por ciclo de produção), e destinando parte dos rendimentos para pagar os custos operacionais, que seriam praticamente os mesmos para ambas as produtividades, o custo chega a R\$ 650,55 por ciclo produtivo (R\$ 448,75 de energia elétrica + 2 vezes R\$ 100,90 para os meios de cultivo), ou R\$ 11.709,90 ao ano. A descrição destes valores é observada na Tabela 5.

Para avaliar a prospecção econômica da produção de microalgas foram considerados os custos associados ao cultivo e processamento da biomassa (investimento em estruturas e custos operacionais) e os rendimentos calculados considerando a estimativa da produção alcançada e a produção referencial teórica do sistema. Com essas informações, foi realizado o cálculo do *payback* através da Equação 1:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Ganho ao ano}} \quad \text{Equação 1}$$

Tabela 5. Fluxo de gastos e ingressos das diferentes produções de microalgas.

	Estimativa pela produção alcançada	Produção referencial (teórica)
Produção por ciclo	7 Kg (2 × 3,5 Kg)	12 Kg (2 × 6 Kg)
Valor da produção por ciclo	R\$ 3.500,00 a R\$ 7.000,00	R\$ 6.000,00 a R\$ 12.000,00
Custos operacionais por ciclo	R\$ 650,55	R\$ 650,55
Ganho por ciclo	R\$ 2.849,45 a R\$ 6.349,45	R\$ 5.349,45 a R\$ 11.349,45
Número de ciclos por ano	18	18
Ganho ao ano	R\$ 51.290,10 a R\$ 114.290,10	R\$ 96.290,10 a R\$ 204.290,10

Considerando que o valor do investimento inicial em estruturas foi de R\$ 473.800,00, o *payback* seria de 9,2 a 4,1 anos, considerando o valor mínimo e máximo da produção por ciclo, respectivamente. E com a estimativa da produtividade alcançada e de 4,9 a 2,3 anos na produtividade referencial teórica, no melhor cenário.

Considerações finais sobre o sistema

É importante contextualizar o potencial de interação do processo de produção de microalgas de interesse nas cadeias agropecuárias, como as de suinocultura e avicultura. Dentro da escala de inovação, a estrutura existente na Embrapa Suínos e Aves comprovou sua evolução para uma escala TRL 6. Dessa forma, o sistema semiaberto apresentado pode vir a desempenhar um papel importante na produção de microalgas em regiões com altas variações climáticas, pois oferecem a flexibilidade necessária para ajustar o ambiente de cultivo às condições externas. Ainda, permite viabilizar uma maior padronização da biomassa e reprodutibilidade de todo o processo, resultando em um novo insumo para se agregar valor à essas cadeias. É um sistema adaptável, e essa adaptabilidade permite configurar as estruturas e condições de cultivo conforme as exigências climáticas e as demandas específicas do contexto, otimizando a eficiência de todo o processo e sua produtividade.

Para que a produção de microalgas em sistemas semiabertos atinja plena viabilidade econômica é essencial direcionar os esforços a nichos de mercado, onde o alto valor agregado (preço final da biomassa) justifique os custos de produção, e

aproveitar ao máximo o potencial produtivo do sistema. Os dados observados indicam que a otimização das operações pode gerar benefícios substanciais em termos de retorno. Boas práticas, como o uso de um inóculo com maior concentração e a adoção de fotoperíodo maiores ou de 24 horas, podem reduzir o tempo de *payback*, sem impactos significativos nos custos operacionais nem nos custos de investimento, pois a implementação dessas práticas já está contemplada nesses custos.

Reduzir ou manter os custos das estruturas (como casa de vegetação, tanques de produção e demais estruturas de apoio) e operacionais (mão de obra, consumo energético e meio de cultivo) sem prejudicar a produtividade e a qualidade do produto final é essencial. A seleção criteriosa dos elementos dentro desses segmentos é indispensável e deve sempre levar em conta o contexto. Por exemplo, uma casa de vegetação pode dispensar sistemas de resfriamento em regiões com clima estável, enquanto o consumo energético para iluminação, agitação e controle térmico pode ser otimizado com fontes de energia mais sustentáveis e econômicas. É igualmente importante avaliar a escalabilidade da estrutura de produção para garantir o potencial de expansão do sistema. Dessa forma, a possibilidade de economias de escala torna o projeto mais competitivo no longo prazo.

Para uma projeção econômica eficaz da produção de microalgas em sistemas semiabertos é fundamental considerar fatores de mercado, técnicos, operacionais e de sustentabilidade. Com esses fatores claramente identificados é possível estabelecer um equilíbrio que reduza custos e aumente o valor agregado do produto final no mercado. Para atingir a viabilidade é imperativo manter um equilíbrio entre a redução de custos, alta produtividade e o atendimento das demandas de potenciais clientes enquanto se agrega valor à biomassa de microalgas.

A procura de alternativas econômicas que preservem a qualidade e a viabilidade técnica exige uma avaliação prévia que vise desenvolver um sistema de produção que atenda às exigências comerciais, ao mesmo tempo que promove uma eficiência nos recursos. Esse equilíbrio entre economia e produtividade é vital para fortalecer a competitividade dos produtos derivados de microalgas, permitindo à indústria explorar o seu potencial inovador e sustentável em mercados de alto valor. Por fim, maximizar a produtividade diante do uso de boas práticas e identificar os principais mercados de destino (como setores de alimentos, rações, cosméticos ou bioenergia) são fatores determinantes para a viabilidade e a rentabilidade do projeto, pois refletem diretamente no retorno econômico esperado.

Referências

- ABREU, A. P.; MARTINS, R.; NUNES, J. Emerging applications of *Chlorella* sp. and *Spirulina* (*Arthrospira*) sp. **Bioengineering**, v. 10, n. 8, p. 955, 2023.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAVOREK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ANTUNES, R.; SILVA, I. C. **Utilização de microalgas para a produção de biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Propriedade Industrial, 2010. 35 p.
- BECKER, W. Microalgae in human and animal nutrition. In: RICHMOND, A. (ed.), **Handbook of microalgal culture**. Oxford: Blackwell, 2007. p. 312-351.
- BENEMANN, J. R. Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass. In: US/JAPAN MEETING ON COAL ENERGY RESEARCH, 1996, Albuquerque, 1996. **4th Quarterly technical progress report**. Berkeley: California University, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2172/29423>.
- CHAVES, A. A. M.; MARTINS, C. F.; CARVALHO, D. F. P.; RIBEIRO, D. M.; LORDELO, M.; FREIRE, J. P. B.; ALMEIDA, A. M. de. A viewpoint on the use of microalgae as an alternative feedstuff in the context of pig and poultry feeding: a special emphasis on tropical regions. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, p. 1-8, 2021. DOI: 10.1007/s11250-021-02800-5.
- CHOJNACKA, K.; MICHALAK, I. **Innovative bio-products for agriculture: algal extracts in products for humans, animals & plants**. Nova York: Nova Sciences, 2016. 168 p.
- ČMIKOVÁ, N.; KOWALCZEWSKI, P. L.; KMIĘCIK, D.; TOMCZAK, A.; DROZDZYŃSKA, A.; SLACHCINSKI, M.; KRÓLAK, J.; KACÁNIOČÁ, M. Characterization of selected microalgae species as potential sources of nutrients and antioxidants. **Foods**, v. 13, n. 13, p. 2160, 2024. DOI: 10.3390/foods13132160.
- DEVADIGA, S.; TIWARI, R.; SONKAR, S.; MALLICK, N. Kinetic modelling for prediction of biomass concentration of *Chlorella minutissima* in open raceway pond cultivation: a pilot-scale study. **Biomass and Bioenergy**, v. 173, p. 106797, 2023. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106797.
- DINNEBIER, H. C. F.; MATTHIENSEN, A.; MICHELON, W.; TÁPPARO, D. C.; FONSECA, T. G.; FAVRETTO, R.; STEINMETZ, R. L. R.; TREICHEL, H.; ANTES, F. G.; KUNZ, A. Phycoremediation and biomass production from high strength swine wastewater for biogas generation improvement: An integrated bioprocess. **Bioresource Technology**, v. 332, p. 125111, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125111.
- FERNANDES, M. S.; CALSING, L. C. G.; NASCIMENTO, R. C.; SANTANA, H.; MORAIS, P. B.; CAPDEVILLE, G. de; BRASIL, B. S. A. F. Customized cryopreservation protocols for chlorophytes based on cell morphology. **Algal Research**, v. 38, p. 101402, 2019. DOI: 10.1016/j.algal.2018.101402.
- HADI, S. I. I. A.; SANTANA, H.; BRUNALE, P. P. M.; GOMES, T. G.; OLIVEIRA, M. D.; MATTHIENSEN, A.; OLIVEIRA, M. E. C.; SILVA, F. C. P.; BRASIL, B. S. A. F. DNA barcoding green microalgae isolated from neotropical inland waters. **PLoS One**, v. 11, p. 1-18, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0149284.
- HUANG, J.; QU, X.; WAN, M.; YING, J.; LI, Y.; ZHU, F.; WANG, J.; SHEN, G.; CHEN, J.; LI, W. Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CED simulations and experiments. **Algal Research**, v. 10, p. 64-71. 2015. DOI: 10.1016/J.ALGAL.2015.04.012.
- KAMOLRAT, N. The effect of optimum photoperiod from blue led light on growth of *Chlorella vulgaris* in photobioreactor tank. **Natural and Life Sciences Communications**, v. 22, n. 3, p. e2023038, 2023. DOI: 10.12982/NLSC.2023.038.
- LIMA, L. F.; MAROUBO, L. A.; VIEIRA, A. L. Vantagens e desafios da produção de biodiesel de microalgas. In: ANDRADE, D. S.; COLOZZI FILHO, A. (ed.). **Microalgas de águas continentais: produção de biomassa e coprodutos**. Londrina: IAPAR, 2014. p. 89-171.
- MADEIRA, M. S.; CARDOSO, C.; LOPES, P. A.; COELHO, D.; AFONSO, C.; BANDARRA, N. M.; PRATES, J. A. M. Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: A review. **Livestock science**, v. 205, p. 111-121, 2017. DOI: 10.1016/j.livsci.2017.09.020.

- MATTHIENSEN, A.; MICHELON, W. **Produção de microalgas em sistema semiaberto: estrutura e funcionamento de tanques semicirculares (raceway tanks)**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2022. 17 p. (Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 601).
- MATTHIENSEN, A.; ALVES, J. A.; MICHELON, W. Fitorremediação de efluentes na suinocultura. In: KUNZ, A. (ed.) **Gestão dos resíduos da produção animal: gestão e tratamento dos dejetos na suinocultura**. Brasília, DF: Embrapa: Concórdia: Sbera, 2024. 208 p. v. 3. p. 182-208.
- MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K. Introduction: toward algae-based products. In: CHOJNACKA, K.; WIECZOREK, P. P.; SCHROEDER, G.; MICHALAK, I. (ed.) **Algae biomass: characteristics and applications**. Berlin: Springer, 2018. (Developments in applied phycology, 8). p. 1-5.
- MICHELON, W.; VIANCELLI, A.; BREDA, M.; NONNENMACHER, J. L.; ROMAN, S. S.; MATTHIENSEN, A. Mouse bioassay acute and subchronic safety assessment of biomass from swine wastewater phycoremediation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 12, p. 6811-6822, 2021. DOI: 10.1007/s12649-021-01470-6.
- NAG, R.; MAKUT, B. B.; MAJHI, P.; SAMANTARAY, S. M. Microalgae: an opportunity for pharmaceutical and nutraceutical market. In: SAHU, N.; SRIDHAR, S. (ed.). **Algal biotechnology**. Boca Raton: CRC Press, 2024. p. 238-245.
- PULZ, O. Cultivation techniques for microalgae in open and closed ponds. In: EUROPEAN WORKSHOP ON MICROALGAL BIOTECHNOLOGY, 1992, Potsdam. **Proceedings**... Nuthetal: Institut für Getreideverarbeitung, 1992, p. 61.
- QIN, S.; WANG, K.; GAO, F.; GE, B.; CUI, H.; LI, W. Biotechnologies for bulk production of microalgal biomass: from mass cultivation to dried biomass acquisition. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 16, n. 1, p. 131, 2023. DOI: 10.1186/s13068-023-02382-4.
- RIBEIRO, D. M.; RONCARATTIB, L. F.; POSSAB, G. C.; GARCIA, L. C.; CANÇADO, L. J.; WILLIAMS, T. C. R.; BRASIL, B. S. A. F. A low-cost approach for *Chlorella sorokiniana* production through combined use of urea, ammonia and nitrate based fertilizers. **Bioresource Technology Reports**, v. 9, p. 100354, 2020. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100354.
- RICHMOND, A. **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Blackwell Science, 2004.
- ROCHA, C. A. L. **Cultivo de microalgas: dimensionamento de uma instalação tipo raceway** pond. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- SANTANA, H.; CEREIJO, C. R.; TELES, V. C.; NASCIMENTO, R. C.; FERNANDES, M. S.; BRUNALE, P.; CAMPANHA, R. C.; SOARES, I. P.; SILVA, F. C. P.; SABAINI, P. S.; SIQUEIRA, F. G.; BRASIL, B. S. A. F. Microalgae cultivation in sugarcane vinasse: selection, growth and biochemical characterization. **Bioresource Technology**, v. 228, p. 133-140, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.12.075.
- SILVA, H. R.; ANDRADE, D. S.; COLOZZI FILHO, A.; GUEDES, C. L. B. Colheita e conservação da biomassa de microalgas. In: ANDRADE, D. S.; COLOZZI FILHO, A. (ed.). **Microalgas de águas continentais: potencialidades e desafios do cultivo**. Londrina: IAPAR, 2014. p. 214-264.
- STANIER, R. Y.; KUNISAWA, R.; MANDEL, R.; COHEN-BAZIRE, G. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order Chroococcales). **Bacteriological Reviews**, v. 35, n. 2, p. 171-205, 1971. DOI: 10.1128/br.35.2.171-205.1971.
- TAVERNARI, F. de C.; ROZA, L. F.; SUREK, D.; SORDI, C.; SILVA, M. L. B. D.; ALBINO, L. F. T.; MIGLIORINI, D.; PAIANO, D.; BOIAGO, M. M. Apparent metabolisable energy and amino acid digestibility of microalgae *Spirulina platensis* as an ingredient in broiler chicken diets. **British Poultry Science**, v. 59, n. 5, p. 562-567, 2018. DOI: 10.1080/00071668.2018.1496401.
- VERNI, M.; DEMARINIS, C.; RIZZELLO, C. G.; PONTONIO, E. Bioprocessing to preserve and improve microalgae nutritional and functional potential: novel insight and perspectives. **Foods**, v. 12, n. 5, p. 983, 2023. DOI: 10.3390/foods12050983.
- YADAVALLI, R.; REDDY, C. N.; MISHRA, B.; KUPPAM, C.; VINEETHA, Y.; SHALINI, A. Potential applications of microalgae and its derivatives in various industries. In: N. SAHU; S. SRIDHAR. (ed.). **Algal biotechnology: applications for industrial development and human welfare**. Boca Raton: CRC Press, 2024. p. 223-237. DOI: 10.1201/9781003219194-18.
- ZENG, X.; GUO, X.; SU, G.; DANQUAH, M. K.; ZHANG, S.; LU, Y.; SUN, Y.; LIN, L. Bioprocess considerations for microalgal-based wastewater treatment and biomass production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1385-1392, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.033.
- ZHENG, J.; COLE, T.; ZHANG, Y.; BAYINQIAOGE; YUAN, D.; TANG, S.-Y. An automated and intelligent microfluidic platform for microalgae detection and monitoring. **Lab on a Chip**, v. 24, n. 2, p. 244-253, 2024. DOI: 10.1039/d3lc00851g.

