

Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba

Allan Johnny Tacone

TCC: Avaliação do uso de sistema de automação para cultivo de cogumelo *Psilocybe cubensis*

Sorocaba

2025

Allan Johnny Tacone

TCC: Avaliação do uso de sistema de automação para cultivo de cogumelo
Psilocybe cubensis

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharel em Ciências Biológicas para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas da Universidade Federal de São Carlos. Área de concentração:

Orientação: André Cordeiro Alves dos Santos

Sorocaba

2025

Tacone, Allan Johnny

Avaliação do uso de sistema de automação para cultivo de cogumelo *Psilocybe cubensis* / Allan Johnny Tacone -- 2026.
39f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): André Cordeiro Alves dos Santos

Banca Examinadora: Eliana Cardoso Leite, Valéria

Letícia Marques Barbosa

Bibliografia

1. Cultivo de cogumelos. 2. *Psilocybe cubensis*. 3. Agricultura 4.0. I. Tacone, Allan Johnny. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Allan Johnny Tacone

Avaliação do uso de sistema de automação para cultivo de cogumelo *Psilocybe cubensis* em comparação com crescimento natural.

Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso de Graduação em Bacharel em Ciências Biológicas para obtenção do grau de Bacharel Doutor(a) em Ciências Biológicas da Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, 08 de janeiro de 2026.

Orientador(a)

Dr. André Cordeiro Alves dos Santos

Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba

Examinador(a)

Dra. Eliana Cardoso Leite

Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba

Examinador(a)

Msc. Valéria Letícia Marques Barbosa

Universidade Federal de São Carlos - Campus São Carlos

Aos que iluminaram minha trajetória quando
tudo parecia escuro.
Aos que estenderam a mão quando o caminho
pesou.
Aos que acreditaram em mim antes mesmo
que eu acreditasse.
E ao Johnny do passado, que sonhou este
momento sem saber que seria capaz.
Este trabalho é nosso — fruto de força, afeto e
esperança.

AGRADECIMENTO

Ser estudante de uma Universidade Federal não é fácil. É como uma montanha russa em que subimos e descemos, vencemos e nos perdemos. Nos frustramos e superamos e todo esse processo seria impossível sem carregar comigo um grupo de heróis que nunca me deixaram desistir. Aqui agradeço alguns deles pois sem eles nada teria sido possível.

Primeiramente agradeço a Prof^a Dra. Mônica Jones Costa por todo o suporte, amizade e por cada vez que se dispôs a ouvir meu sofrimento e me oferecer café e calma. Agradeço também ao LAFISC por todo o apoio por muitos anos.

Agradeço também ao meu grande amigo, parceiro e, como dizem, braço direito, Affonso Eduardo S. Moreno, por ter me apresentado a resiliência e o mundo de uma maneira que eu não conhecia até então. Obrigado por cada momento, loucuras, viagem, noites acordados e por comprar minhas ideias malucas.

Não posso deixar de agradecer também o meu grande amigo e quase irmão Guilherme H. Vieira, por estar presente na minha vida há praticamente 16 anos e sempre me estendendo a mão quando eu preciso. Obrigado por me aguentar por tanto tempo.

Ao Mateus Henrique Lauriano, Te acompanho desde a sua graduação e sinto um orgulho imenso de ver sua trajetória. De discente para mestre e agora doutor!

Não menos importante, a Prof^a Dra. Eliana Cardoso Leite e a Valéria Letícia M. Barbosa, agradeço por todas as oportunidades que vocês me deram e por cada conversa e desabafo. Não posso deixar de agradecer a minha família por toda a compreensão e por ter estado presente em cada etapa da minha vida acadêmica.

Por fim, agradeço ao meu orientador Professor Dr. André Cordeiro por ter dado todo o suporte que eu precisei durante a graduação, cada conselho e especialmente por ter aceito embarcar nessa jornada de unir biologia com tecnologia sem nem pensar duas vezes.

Dra. Ariadne Maso Miranda por estar sempre comigo e muito mais pessoas que estão nesta lista, mas que sabem o quão especial vocês são para mim. Onde vocês estiverem, espero que sintam-se abraçados por mim!

Além disso, não posso deixar de agradecer a mim mesmo por nunca ter desistido e por finalmente ter entendido o propósito de tudo isso. Parabéns Johnny. Com certeza o Johnny do passado está orgulhoso de você agora. O mérito é todo seu!!!

Toda tecnologia suficientemente avançada é
indistinguível da magia.
Arthur C. Clarke

RESUMO

TACONE, Allan Johnny. TCC: Avaliação do uso de sistema de automação para cultivo de cogumelo *Psilocybe cubensis*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso: Bacharelado em Ciências Biológicas – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

O presente trabalho avaliou a eficácia de um sistema de automação de baixo custo aplicado ao cultivo de *Psilocybe cubensis*, comparando-o ao cultivo manual tradicional. Foram construídas seis estufas de cultivo, três automáticas e três controles, nas quais foram avaliados três parâmetros principais: peso seco, tamanho dos basidiocarpos e quantidade total de “indivíduos”. O sistema automatizado controlou a temperatura por histerese (27–29 °C) e realizou ciclos programados de exaustão de ar. Os resultados demonstraram que o sistema automatizado produziu cogumelos maiores (Controle: 170,64 cm e média: 56,88 cm; Automatizada: 223,45 cm e média: 74,48 cm), em maior quantidade (Controle: 15 un.; Automatizada: 20 un.); com maior peso seco (Controle: 13,085 g; Automatizada: 20,393 g). Embora o aumento de peso médio tenha sido discreto, o crescimento expressivo em altura e produtividade total indica que o controle de temperatura e exaustão auxiliou no desenvolvimento dos basidiocarpos. Conclui-se que sistemas automatizados acessíveis podem melhorar a eficiência e a padronização do cultivo de cogumelos, mesmo em condições simples, reforçando o potencial da Agricultura 4.0 na fungicultura. São sugeridas melhorias futuras, incluindo a automatização da umidade e a integração de sensores de CO₂.

Palavras-chave: automação; cultivo de cogumelos; *Psilocybe cubensis*; Arduino; agricultura 4.0.

Abstract

This study evaluated the effectiveness of a low-cost automation system applied to the cultivation of *Psilocybe cubensis*, comparing it with traditional manual cultivation. Six cultivation chambers were constructed, three automated and three control, in which three main parameters were evaluated: dry weight, basidiocarp size, and total number of fruiting bodies. The automated system controlled temperature through hysteresis (27–29 °C) and performed programmed air exhaust cycles. The results showed that the automated system produced larger mushrooms (Control: 170.64 cm total and 56.88 cm average; Automated: 223.45 cm total and 74.48 cm average), in greater quantity (Control: 15 units; Automated: 20 units), with higher dry weight (Control: 13.085 g; Automated: 20.393 g). Although the increase in average weight was modest, the expressive increase in height and total productivity indicates that temperature control and air exhaust contributed to basidiocarp development. It is concluded that accessible automated systems can improve the efficiency and standardization of mushroom cultivation, even under simple conditions, reinforcing the potential of Agriculture 4.0 in fungiculture. Future improvements are suggested, including humidity automation and the integration of CO₂ sensors.

Keywords: automation; mushroom cultivation; *Psilocybe cubensis*; Arduino; Agriculture 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo reprodutivo de um Basidiomiceto.....	16
Figura 2 – Fluxograma demonstrando as etapas do trabalho.....	19
Figura 3 – Modelo de ventilador umidificador utilizado.....	22
Figura 4 – Diagrama eletrônico da estufa utilizando Arduino Uno, sensores e relés.....	24
Figura 5 – Estufas de cultivo: controle à esquerda e automatizadas à direita.....	25
Figura 6 – Diagrama de montagem da estufa.....	26
Figura 7 – Termo-higrômetro exibindo a temperatura máxima do dia.....	27
Figura 8 – Estufa vista por dentro. Ao fundo o sistema de filtragem de ar; à esquerda o suporte feito com palitos de picolé prendendo o sensor AHT30; bolo de micélios com os cogumelos se desenvolvendo ao centro e lâmpada aquecedora no canto inferior direito da imagem.....	28
Figura 9 – Primeira coleta das estufas automatizada (esquerda) e controle (direita). Nota-se que o processo de automação acelerou a maturação e liberação dos cogumelos em relação às estufas controle, que ainda não entraram no estágio reprodutivo.....	29
Figura 10 – Peso médio dos cogumelos por tratamento com desvio padrão.....	30
Figura 11 – Tamanho médio dos cogumelos por tratamento com desvio padrão.....	32
Figura 12 – Quantidade de indivíduos por tratamento com desvio padrão.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso total, médio e desvio padrão dos basidiocarpos por tratamento.....	31
Tabela 2 – Tamanho total, médio e desvio padrão dos basidiocarpos por tratamento...	32
Tabela 3 – Quantidade de indivíduos (basidiocarpos) por tratamento.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1. O cultivo de cogumelos no contexto científico, nutricional e econômico.....	14
2.2. Dinâmica Morfofisiológica do <i>Psilocybe cubensis</i> , Psilocibina e compostos bioativos..	15
2.3. Agricultura 4.0: conceito, tecnologias e impactos.....	17
2.4. Integração entre fungicultura e Agricultura 4.0.....	18
2.5. Sustentabilidade, segurança alimentar e futuro das práticas de cultivo.....	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
1) Montagem do experimento inicial.....	20
2) Montagem da Estufa, do Sistema Eletrônico e Testes.....	23
3) Cultivo.....	28
4 RESULTADOS.....	30
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de cogumelos vem se consolidando como uma prática de crescente interesse tanto no âmbito científico quanto no econômico, devido à sua relevância nas áreas de biotecnologia, gastronomia, saúde e sustentabilidade (Müller et al., 2023; Chaudhary, 2025).

Dentre as diversas espécies de fungos cultiváveis, destaca-se o *Psilocybe cubensis*, um basidiomiceto pertencente à família Hymenogastraceae, notório por suas propriedades psicobióticas, que são investigadas por seus potenciais terapêuticos no tratamento de transtornos mentais, como depressão resistente, ansiedade e estresse pós-traumático (Carhart-Harris et al., 2016). Além disso, estudos recentes demonstram a eficácia da psilocibina no combate a doenças associadas ao envelhecimento (Kato et al., 2025).

O crescimento de fungos é intrinsecamente dependente de condições microclimáticas específicas, tais como a temperatura, umidade relativa, concentração de CO₂ e luminosidade, as quais impactam diretamente o desenvolvimento micelial e a frutificação (Carrasco et al., 2023).

Neste contexto, o controle preciso desses parâmetros é essencial para garantir a eficiência do cultivo e a obtenção de corpos frutíferos de qualidade superior. Segundo Chang e Miles (2004), pequenas variações nos fatores ambientais podem resultar em redução significativa na produtividade, má formação dos basidiomas ou, até mesmo, inviabilização completa do ciclo de frutificação.

A aplicação de tecnologias emergentes na agricultura, especialmente no contexto da Agricultura 4.0, que refere-se como a integração de inovações digitais para aumentar a eficiência e a produtividade na agricultura, tem se mostrado uma estratégia promissora para otimizar processos produtivos, aumentar a eficiência e reduzir desperdícios (Fragomeli et al., 2024; Wolfert et al., 2017).

A automação no cultivo de fungos ainda é um campo incipiente, porém com grande potencial de desenvolvimento, especialmente considerando-se a necessidade de precisão no monitoramento e controle dos parâmetros ambientais (Omar et al., 2023).

Sistemas de automação de cultivo de fungos vem se tornando um mecanismo frequente na otimização da produção para a venda de cogumelos, como Shiitake e champignon devido ao baixo custo e alta eficiência (Čapas et al., 2022).

Diante desse cenário, a presente pesquisa pretende responder se um sistema automático de baixo custo contribui para um melhor desenvolvimento (produção de corpos de frutificação e biomassa) do cogumelo *Psilocybe cubensis*. Para tanto, foi desenvolvido e

implementado um protótipo de automação capaz de controlar, de forma precisa, variáveis críticas como temperatura e circulação de ar. Este sistema foi aplicado experimentalmente no cultivo, visando avaliar se o controle automatizado proporciona melhorias significativas no desenvolvimento micelial e na frutificação, quando comparado aos métodos manuais tradicionais.

A relevância deste estudo reside na convergência entre biotecnologia, automação e sustentabilidade, alinhando-se às demandas contemporâneas por sistemas produtivos mais eficientes. Além disso, os resultados obtidos poderão contribuir tanto para a comunidade científica interessada na fisiologia fúngica quanto para empreendedores que visam inovar no setor de cultivo de cogumelos alimentícios, como o Shimeji, Shitake e o Paris, visto a alta capacidade de adaptação do sistema.

A escolha de *Psilocybe cubensis* como organismo modelo neste trabalho fundamenta-se em dois aspectos centrais: sua elevada sensibilidade às condições ambientais e sua relevância científica contemporânea. Trata-se de uma espécie fúngica cujo desenvolvimento depende de variáveis como temperatura e umidade, o que a torna especialmente adequada para avaliar a eficácia de sistemas automatizados de controle ambiental. Além disso, *P. cubensis* tem sido objeto de crescente interesse científico em pesquisas relacionadas à saúde humana, particularmente em estudos sobre processos neurobiológicos associados ao envelhecimento e a transtornos neuropsiquiátricos, o que amplia sua relevância acadêmica. Assim, a utilização dessa espécie neste trabalho não apenas potencializa a avaliação do sistema de automação proposto, como também insere o estudo em um contexto científico atual, no qual o controle preciso de condições biológicas se mostra cada vez mais essencial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O cultivo de cogumelos no contexto científico, nutricional e econômico

O cultivo de cogumelos tem se consolidado como uma prática de interesse crescente no meio científico devido à sua contribuição para a nutrição humana, segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e potencial econômico global. Cogumelos comestíveis desempenham papel importante na diversificação alimentar por serem ricos em proteínas,

fibras, vitaminas, minerais e compostos bioativos como β -glucanas, que possuem propriedades imunomoduladoras e antioxidantes (Mishra; Shankar, 2025).

Além de sua importância nutritiva, a produção de cogumelos apresenta grande potencial econômico, pois converte resíduos agroindustriais — como palha e serragem — em alimento de alto valor agregado, o que também reduz impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses resíduos (Mishra; Shankar, 2025).

Segundo Kumar Bhagarathi et al. (2023), a literatura aponta que as técnicas de cultivo tradicional e modernas plataformas de produção são amplamente comparadas para maximizar rendimento e explorar os benefícios terapêuticos desses organismos, demonstrando que a pesquisa científica nesse campo está em contínua expansão.

Além disso, a biotecnologia aplicada ao cultivo de fungos tem ampliado os horizontes das técnicas de produção, trazendo métodos como cultivo de micélio em biorreatores e tecnologias de estado sólido ou submerso para produção acelerada de biomassa fúngica (Berovic et al., 2022).

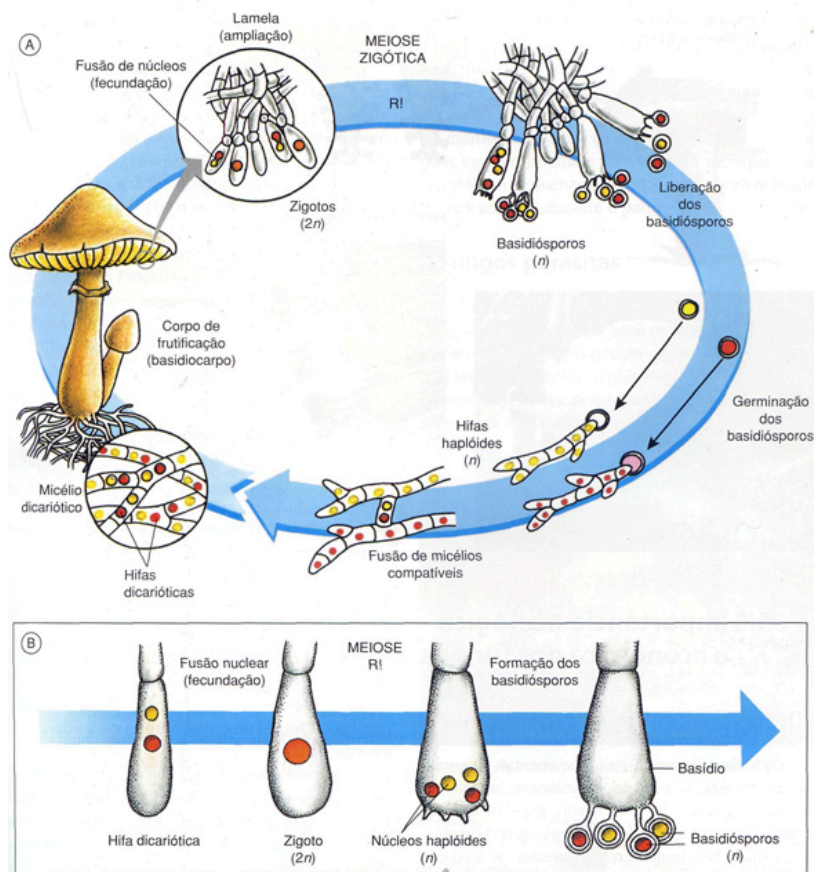
2.2. Dinâmica Morfofisiológica do *Psilocybe cubensis*, Psilocibina e compostos bioativos

O *Psilocybe cubensis* (Earle) Singer é um fungo basidiomiceto caracterizado pela produção de alcaloides triptamínicos como psilocibina e psilocina, compostos indólicos típicos desse gênero. Durante seu ciclo de vida, a espécie alterna entre a fase vegetativa de desenvolvimento do micélio, responsável pela absorção de nutrientes e colonização do substrato, e a fase reprodutiva de frutificação, quando se formam os corpos de frutificação que contêm os basidiósporos e acumulam maiores concentrações de compostos bioativos (Wieczorek et al., 2015; Gartz & Möller, 1989), como observado na figura 1.

- Fase Vegetativa: Inicia-se com a germinação de esporos haploides que formam hifas monotípicas; a subsequente somatogamia entre hifas compatíveis estabelece o micélio dicariótico. Nesta etapa, o metabolismo fúngico foca na secreção de enzimas exocelulares para a degradação da matriz orgânica do substrato.
- Fase Reprodutiva: A transição para a frutificação exige que o micélio atinja a competência fisiológica, sendo disparada por estressores ambientais. A formação dos primórdios (ou pinning) é o ponto crítico onde o controle ambiental automatizado

demonstra sua maior relevância, pois variações mínimas podem levar ao aborto dos corpos frutíferos.

Figura 1 – Ciclo reprodutivo de um Basidiomiceto



Fonte: estudandoabiologia.wordpress.com (2025).

Dentre os compostos bioativos produzidos por certos gêneros de fungos, a psilocibina tem atraído atenção científica por suas potenciais aplicações terapêuticas. Estudos experimentais recentes indicam que a psilocibina e seu metabólito psilocina podem influenciar mecanismos celulares relacionados ao envelhecimento, incluindo redução de marcadores de estresse oxidativo e prolongamento da sobrevivência em modelos animais, como camundongos, além de efeitos em culturas celulares humanas, sugerindo um potencial impacto em processos de senescência e longevidade celular (Kato et al., 2025).

2.3. Agricultura 4.0: conceito, tecnologias e impactos

O termo Agricultura 4.0 emerge a partir da analogia com a Indústria 4.0, representando a integração de tecnologias digitais avançadas no setor agrícola para aumentar a eficiência, sustentabilidade e tomada de decisão baseada em dados. Ele é definido como o uso de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial (IA), robótica e automação para coletar, integrar e analisar informações em tempo real, visando otimizar processos produtivos agrícolas e reduzir desperdícios (McCORMICK, 2021).

Agricultura 4.0 é frequentemente entendida como o próximo passo da agricultura digital e de precisão: além de apenas medir condições do solo ou clima, envolve sistemas autônomos e conectados que fornecem suporte à decisão, melhorando a sustentabilidade ambiental, a eficiência de recursos e a produtividade em toda a cadeia produtiva agrícola (Fasciolo; Panza; Lombardi, 2024).

Essa transformação tecnológica também inclui a coleta em tempo real de dados ambientais, comunicação interdisciplinar entre sensores, drones, plataformas de computação em nuvem, e sistemas de controle automatizado, permitindo monitoramento e ajuste dinâmico de práticas agrícolas, como irrigação, uso de insumos e resposta a pragas (McCORMICK, 2021).

No Brasil, a implementação de tecnologias da Agricultura 4.0 encontra desafios de infraestrutura, especialmente conectividade rural, mas também oportunidades de ampliar a competitividade do setor através da digitalização e automação do campo. (Zaparolli, 2020).

Embora o termo Agricultura 4.0 tenha origem na analogia com a Indústria 4.0 e seja comumente associado à agricultura tradicional, ele se refere, de forma mais ampla, à integração de tecnologias digitais, automação e sensoriamento para otimização de processos de produção, incluindo sistemas que operam em ambientes altamente controlados. Em trabalhos recentes, a Agricultura 4.0 tem sido entendida como um paradigma tecnológico que abrange não apenas a agricultura de campo, mas também sistemas de cultivo em ambiente protegido, produção vertical e outras formas de agricultura intensiva ou especializada, por meio do uso de sensores, IoT, inteligência artificial e automação para melhorar a eficiência, a sustentabilidade e o controle ambiental (Vlăduț & Ungureanu, 2024). Assim, aplicar os princípios da Agricultura 4.0 ao cultivo de fungos não contradiz o conceito, uma vez que o foco central é o uso de tecnologias digitais para monitorar e controlar variáveis ambientais, independentemente do sistema produtivo ser tradicional ou não.

2.4. Integração entre fungicultura e Agricultura 4.0

A aplicação de conceitos da Agricultura 4.0 ao cultivo de cogumelos representa um avanço inovador que une biotecnologia fúngica e automação digital. Estudos demonstram que sistemas baseados em IoT para produção de cogumelos podem melhorar o controle ambiental da cultura, resultando em maior rendimento e qualidade, além de promover sustentabilidade energética por meio de integrações com fontes renováveis, como energia solar (Rukhiran et al., 2023).

Esses sistemas inteligentes permitem o monitoramento contínuo de fatores críticos do ambiente de cultivo, como temperatura, umidade relativa do ar, CO₂ e luminosidade, fornecendo dados em tempo real que podem ser usados para ajustar automaticamente as condições de produção com base em algoritmos que otimizam a eficiência produtiva e reduzem custos operacionais (Rukhiran et al., 2023).

Além disso, a crescente adoção de IA, visão computacional e machine learning em processos agrícolas — inclusive em cultivos fúngicos — impulsiona soluções que podem identificar padrões de crescimento, classificar estados de saúde da cultura e apoiar decisões automatizadas para maximizar rendimento (Jacob et al., 2025).

2.5. Sustentabilidade, segurança alimentar e futuro das práticas de cultivo

A convergência entre biotecnologia, agricultura digital e práticas sustentáveis indica que o cultivo de cogumelos não é apenas uma alternativa alimentar, mas uma estratégia integrada a sistemas de produção alimentícia mais resilientes e eficientes. Ao aproveitar resíduos agrícolas, reduzir impactos ambientais e utilizar tecnologia para otimizar produção, o cultivo de cogumelos exemplifica o que pesquisadores apontam como necessidade de modernização dos sistemas agroalimentares globais para enfrentar os desafios do século XXI. (Mishra; Shankar, 2025). Além disso, a produção de cogumelos comestíveis no Brasil caracteriza-se, em grande parte, como uma atividade desenvolvida por pequenos produtores familiares, geralmente em áreas reduzidas e com baixo investimento tecnológico. Estudos regionais demonstram que a fungicultura apresenta-se como alternativa viável de geração de renda em pequena escala, sendo conduzida, majoritariamente, sem o uso de estruturas industriais complexas ou equipamentos de alto custo (Cabrera et al., 2024). Segundo esses autores, a produção ocorre em espaços compactos e enfrenta limitações relacionadas à

infraestrutura, assistência técnica e padronização dos processos, o que restringe a adoção de tecnologias mais avançadas. Nesse contexto, a proposta deste trabalho justifica-se ao buscar viabilizar o uso de tecnologias de baixo custo para pequenos produtores, permitindo a melhoria do controle ambiental e o aumento da eficiência produtiva por unidade de área, sem exigir investimentos incompatíveis com sua realidade econômica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para a execução do presente estudo foi dividida em quatro etapas consecutivas, que foram: 1) Montagem do experimento inicial; 2) Montagem da Estufa, do Sistema Eletrônico e testes; 3) Preparo dos micélios; 4) Cultivo. Um fluxograma demonstrando as etapas pode ser visto na figura XXXX

Figura 2 – Fluxograma demonstrando as etapas do trabalho.

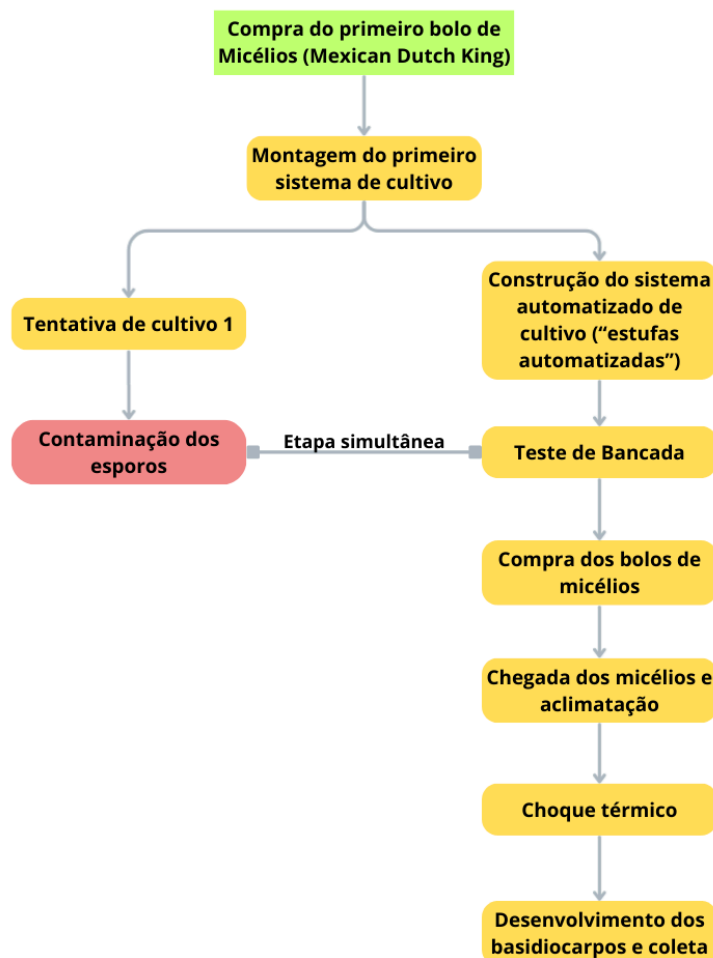


Imagem do autor (2025)

1) Montagem do experimento inicial

Durante o experimento, alguns problemas foram detectados, o que alterou um pouco o percurso da análise. Primeiramente, o objetivo era avaliar o desempenho de todo o processo, desde a compra do primeiro bolo de micélios, cultivo, extração dos esporos, transferência para um novo bolo produzido no laboratório e a análise que fora realizada neste trabalho, incluindo a variável umidade. Para o preparo dos micélios que seriam a matriz, um bolo de micélios foi comprado via internet (a variedade escolhida foi a Mexican Dutch King), devido a sua maior resistência. O conteúdo foi, então, transferido para uma caixa com um sistema pré-automatizado nas condições descritas a seguir:

Caixas plásticas do tipo “organizadora” com capacidade de 20 L dotadas de orifícios nas laterais e de tampas com furos, dentro das quais foram alocados um mini termohigrômetro digital (composto pelos seguintes sensores de umidade e temperatura: HR202L, erro: ± 5 % RH e NTC 10K, erro: ± 1 °C, respectivamente), um umidificador (marca Mondial) provido de um eletroduto PEAD adaptado da saída do aparelho até a caixa, podendo ser acionado manualmente, quando necessário.

O sistema também contava com uma garrafa de plástico com água e de um aquecedor de aquário Aquatank de 25 W com termostato que teve a temperatura ajustada a 30 °C. Esse sistema, denominado “Estufa teste”, foi forrado com argila expandida e uma solução de água destilada com algumas gotas de água sanitária para evitar possíveis contaminações. Após transferido para a estufa, o bolo permaneceu no sistema com o intuito de que os fungos produzissem micélios até que uma onda de ar frio chegou na região, causando um choque térmico não intencional, estimulando o crescimento dos cogumelos.

Após a abertura do píleo, (popularmente chamado de chapéu), o maior indivíduo foi cortado do bolo e teve sua estrutura superior (“chapéu”) cortada e colocada sobre uma folha de papel alumínio com a parte dos esporos viradas para baixo para a coleta dos esporos. Um copo foi colocado sobre ele para evitar contaminações, sujeiras e vento. Esses esporos foram selecionados para a realização do experimento, tanto na réplica do sistema automático quanto na réplica do sistema controle.

Os esporos foram então transferidos para um béquer com água destilada e passados para uma seringa e reservados. Para o preparo do substrato, 15 potes de vidro com tampa com 100 g de arroz integral triturado com vermiculita foram autoclavados e após o conteúdo

esfriar até atingir a temperatura ambiente, os potes que estavam em uma câmara de fluxo laminar receberam um pequeno furo na tampa, no qual os esporos foram injetados com uma seringa e agulha. os furos nas tampas então foram fechados com fita *micropore* e cada estufa recebeu 2 potes, e os três potes restantes foram transferidos para uma caixa de isopor com um jarro com água e um aquecedor de aquário Aquatank de 25 W ajustado em 30 °C, atuando como um *backup*. Nesse período, observou-se que a rede elétrica da universidade apresentava instabilidades e elevado nível de ruído, o que ocasionava travamentos intermitentes no sistema. Para mitigar esse problema, foi implementado um código adicional de *watchdog*. O *watchdog* é um mecanismo de segurança amplamente utilizado em microcontroladores, no qual o processador é monitorado continuamente a fim de detectar falhas de execução e reiniciar o sistema automaticamente quando necessário. Tal processo evitou que o Arduino ficasse travado, mas a interferência eletromagnética da rede também causava falhas no sistema de umidificação das estufas, que utilizava uma placa que recebia 3 pulsos de acionamento de um arduino, que fazia a leitura do estado da placa através de um resistor LDR e acionava os umidificadores, que eram individualmente controlados por relés individuais. A placa dos umidificadores era genérica, removida de um ventilador umidificador, conforme figura 2.

Figura 3 – Modelo de ventilador umidificador utilizado.



Fonte: TOYSHOW (2025).

Idealmente, filtros EMI poderiam ser empregados na alimentação, além de filtros de ferrite. Contudo, devido ao prazo para envio do experimento, optou-se então por excluir a variável umidade e avaliar apenas a temperatura e exaustão. Outra dificuldade encontrada foi a alta taxa de corrosão dos sensores dentro da estufa. Tal problema justifica-se pela grande quantidade de componentes falsificados vendidos no país como originais. Os sensores empregados, modelo DHT11 foram então substituídos por sensores melhores, modelo AHT30. Apesar de superiores, um deles deixou de funcionar ao final do experimento, também pela alta taxa de corrosão pelo hipoclorito de sódio. Alguns produtores de cogumelo alegam utilizar peróxido de hidrogênio como sanitizante, sendo um agente não corrosivo, porém essa informação não foi testada e nem considerada a tempo neste trabalho devido ao prazo.

Após cerca de 15 dias de acompanhamento, observou-se que todos os potes contaminaram. Algumas hipóteses foram que os micélios apresentavam pouco vigor para se desenvolver, permitindo que fungos contaminantes acabem competindo por recursos. Outra hipótese envolve alguma falha no fornecimento de nutrientes pelo substrato ou pH

inadequado. Esse fato fez com que o experimento fosse remodelado e o bolo de micélios fosse comprado pronto.

2) Montagem da Estufa, do Sistema Eletrônico e Testes

Para a montagem do sistema, foi utilizada uma placa genérica modelo Arduino Uno e uma tela OLED 0,98" (128x64 pixels). Além disso, foi utilizada uma ventoinha do tipo cooler para a circulação de ar dentro da estufa, uma lâmpada cerâmica 25 W para aquecimento, um módulo com 8 relés optoacoplados e duas fontes, uma para a alimentação dos Arduinos (três ao todo, um para cada estufa) e a outra para alimentar as ventoinhas. Foram também utilizados para a montagem do sistema diversos componentes eletrônicos, como fios, interruptores push button, protoboard, placa perfurada de fenolite e ferro de solda. Para a coleta dos dados de temperatura, foi escolhido o sensor modelo AHT30, devido não apenas ao seu baixo custo, mas também pela função de comunicação I²C e sua precisão relativamente boa ($\pm 0,5$ °C e ± 3 % RH) O diagrama elétrico pode ser visto na figura 3.

Figura 4 – Diagrama eletrônico da estufa utilizando Arduino Uno, sensores e relés.

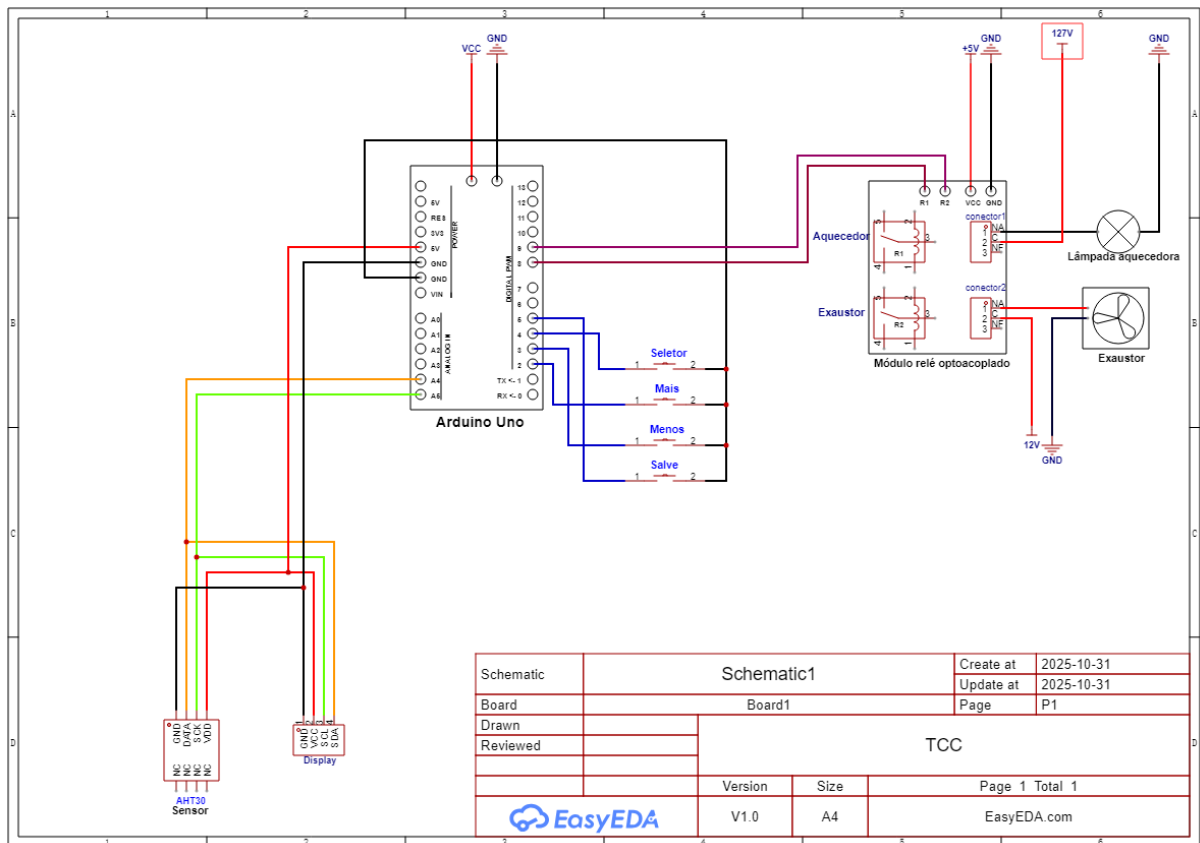


Imagem do autor (2025).

Para a programação, foi utilizado o software ARDUINO IDE, disponível para Windows e MAC. A temperatura foi definida para permanecer dentro de uma *histerese* entre 27,5 °C e 29,0 °C, de modo que a lâmpada aquecedora era automaticamente acionada sempre que a temperatura chegasse ao valor mínimo estabelecido e que permanecesse ligada até que a temperatura atingisse o valor mais elevado programado. Vale ressaltar que Histerese corresponde à diferença entre o ponto de ativação e o ponto de desativação de um sistema, evitando que flutuações nos valores próximos a um limite fiquem acionando os atuadores em demasiado. No presente estudo, a umidade foi garantida através de uma técnica muito utilizada para o cultivo desse cogumelo, e consiste em utilizar argila expandida cobrindo o fundo do recipiente de cultivo e água com algum sanitizante (informação oral, 2025). Para esse experimento, cada estufa recebeu 1 kg de argila expandida da marca Cinexpan, que foi previamente lavada e deixada de molho por 10 minutos em água da torneira com 100 mL/L de hipoclorito de sódio. Após isso, a água foi descartada e a argila foi transferida para as estufas com nova solução de 500 mL de água com 50 mL de água sanitária. Cada estufa foi feita com

uma caixa organizadora transparente de 20 L de plástico, dotada de furos nas laterais e a lâmpada de aquecimento rosqueada em um soquete E27 preso na lateral direita da caixa por um parafuso e uma porca.

Figura 5 – Estufas de cultivo: controle à esquerda e automatizadas à direita



Imagem do autor (2025)

Para a troca de gases, o ventilador do tipo *cooler* em modo exaustão era acionado a cada seis horas pelo período de um minuto seguido pelo seu desligamento, reiniciando-se então o ciclo. Logo após a montagem do sistema em laboratório, deu-se início a um período de teste de bancada, para calibrar o sistema, verificação de erros, *bugs* nos códigos e a eventual necessidade de adequações ou reparos. Aqui a estimativa de teste de bancada seria entre sete e quatorze dias, podendo se estender por mais dias, caso houvesse alguma falha em algum componente eletrônico que porventura requeresse sua substituição mediante compra pela internet.

Figura 6 – Diagrama de montagem da estufa

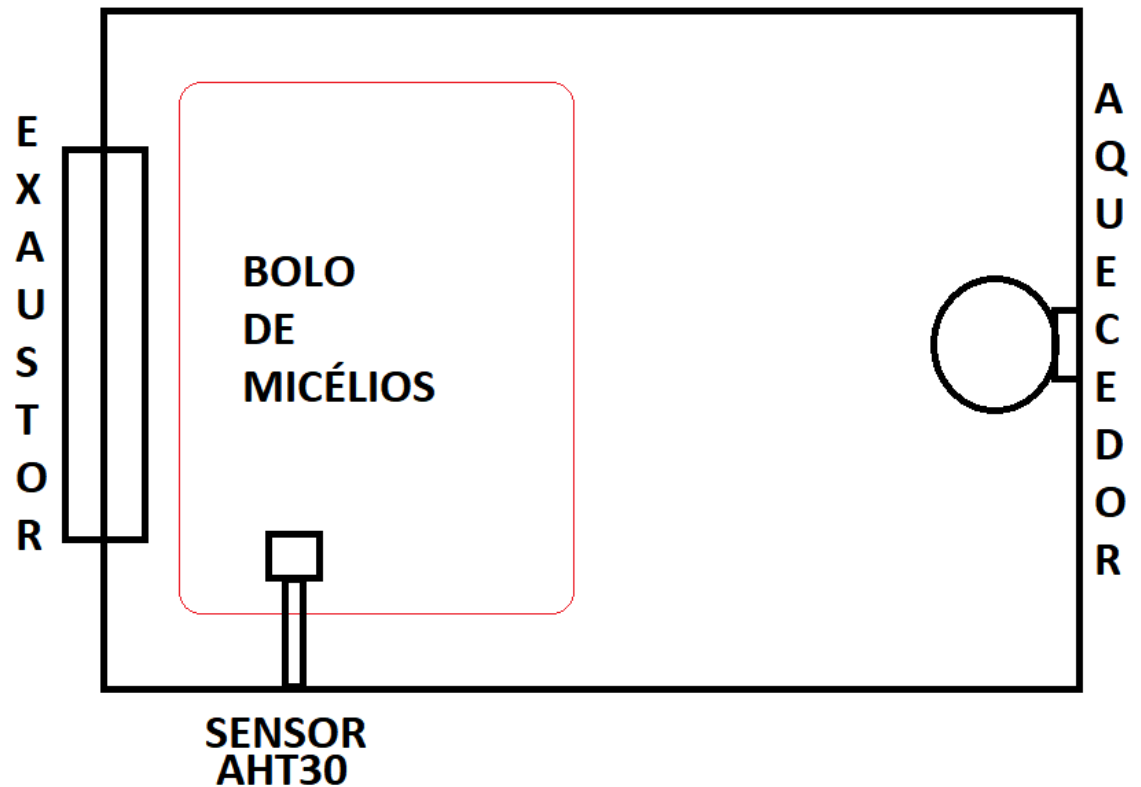


Imagem do autor (2025)

Para pequenas regulações da histerese de temperatura e ventilação, foi construído um teclado na placa perfurada de fenolite, com quatro botões disponíveis: 1) Seletor: altera entre as variáveis Umidade Máxima, Umidade Mínima, Temperatura Máxima e Temperatura Mínima; 2) Botão Menos: Subtrai 0,5 unidades da variável selecionada; 3) Botão Mais: Adiciona 0,5 unidades na variável selecionada; 4) Botão Salvar: Salva a nova configuração na memória EEPROM da placa, de modo que os dados atualizados não serão perdidos após o reinício do sistema ou em caso de queda de energia. Como referência de temperatura, um termo-higrômetro digital modelo FEPRO-MUT600S da EXBOM foi utilizado. A sonda “interna” foi inserida na estufa controle 1, monitorando a temperatura mínima e máxima da estufa por período de 24 horas. Já a sonda “externa” coletava os dados de umidade e temperatura mínima e máxima da sala em que o experimento foi instalado.

Figura 7 – Termo-higrômetro exibindo a temperatura máxima do dia.



Imagem do autor (2025)

Nas estufas automatizadas, o bolo de micélios foi colocado do lado esquerdo da caixa, aproximadamente 2 centímetros da parede da estufa, com o sensor AHT30 dois centímetros acima do bolo, apoiado em um suporte feito com palitos de picolé com formato da letra “L”, colados na parede; enquanto que a lâmpada aquecedora ficou na parede direita, aproximadamente 7 centímetros acima do chão. O cooler ficou na parede esquerda, do lado externo, tendo o lado interno recebido como agente filtrante de ar uma máscara de ar que foi recortada e adaptada. Já nas estufas controle, o bolo também foi colocado do lado esquerdo da caixa, com a diferença de não haver os mesmos sensores e dispositivos das estufas controle. Apenas a argila expandida e a solução de água com sanitizante se fez presente em ambos os tratamentos.

Figura 8 – Estufa vista por dentro. Ao fundo o sistema de filtragem de ar; à esquerda o suporte feito com palitos de picolé prendendo o sensor AHT30; bolo de micélios com os cogumelos se desenvolvendo ao centro e lâmpada aquecedora no canto inferior direito da imagem.



Imagem do autor (2025)

3) Cultivo

Para o preparo dos micélios, três bolos de micélios de 1kg cada foi comprado via internet (a variedade entregue foi a Melmac). O conteúdo foi, então, dividido ao meio (500g) para cada estufa, de modo que uma parte foi destinada para uma estufa automatizada e a outra parte para sua respectiva estufa controle. O bolo foi removido da marmitta de alumínio ao qual o produto veio dentro e foi transferido para uma tampa plástica transparente, que serviu como base. Após isso, um sache de vermiculita esterilizada, de aproximadamente 10g, que acompanhava o produto foi utilizado para cobrir a parte superior do bolo (5g para cada um), conforme instrução do produtor. Ao todo, 3 estufas de controle foram construídas e também a mesma quantidade para estufas automatizadas.

Após a compra dos micélios, montagem do sistema e testes, o cultivo foi iniciado. Para isso, os bolos de micélios foram transferidos para bandejas plásticas de 500 g de volume, passaram seis dias dentro das estufas e as bandejas foram então fechadas com as tampas e transferidas para o congelador por um período de dez minutos, com o objetivo de dar um choque térmico e estimular o crescimento dos cogumelos. Ao voltar para a estufa, o bolo foi

virado de cabeça para baixo, removendo o recipiente e utilizando a tampa como base. Os micélios foram colocados na estufa no dia 28 de agosto de 2025. Já o choque térmico das estufas controle e as automatizadas aconteceu sete dias depois, e a primeira colheita dos corpos de frutificação ocorreu após 12 dias, data em que foram separados e medidos utilizando como referência um paquímetro digital modelo Bomvink bom-6502. Além disso, a imagem 8 destaca a diferença entre os estágios de maturação dos basidiocarpos, em que na data de coleta, os indivíduos das estufas automatizadas já estavam maduros e haviam liberado os esporos, enquanto que nas estufas controle, os basidiocarpos ainda estavam em fase de maturação.

Figura 9 – Primeira coleta das estufas automatizada (esquerda) e controle (direita). Nota-se que o processo de automação acelerou a maturação e liberação dos cogumelos em relação às estufas controle, que ainda não entraram no estágio reprodutivo.



Imagem do autor (2025).

A secagem dos basidiocarpos foi feita em um desidratador de alimentos Meloni Pratic Dryer a 40 °C por 4 h 30 min., após a secagem foi feita a pesagem, utilizando uma balança digital de precisão Shimadzu Ay220.

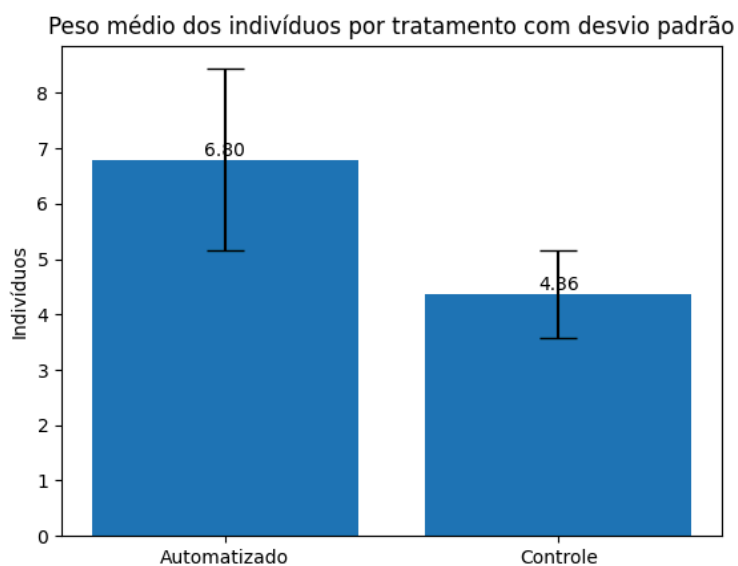
O experimento teve duração de 32 dias, tendo o seu fim com a coleta dos três últimos corpos de frutificação.

4 RESULTADOS

Com o objetivo de reduzir variações inerentes às unidades experimentais individuais, os dados obtidos em cada conjunto de estufas foram agrupados por tratamento. Assim, os valores de peso seco, tamanho dos basidiocarpos e número total de indivíduos foram somados e posteriormente expressos em médias e desvios padrão para cada condição experimental. Além disso, o número reduzido de réplicas por tratamento e a ausência de variação controlada dos parâmetros ambientais dentro dos grupos inviabilizaram análises correlacionais ou inferenciais robustas, reforçando o caráter exploratório do estudo.

Em relação ao peso seco, o grupo controle apresentou média de 4,361 g (DP = 0,786 g), enquanto o grupo automatizado apresentou média ligeiramente superior, de 6,797 g, com maior desvio padrão (DP = 1,639 g), conforme figura 10.

Figura 10 – Peso médio dos cogumelos por tratamento com desvio padrão.



(Fonte: Autoria própria, 2025)

Embora a diferença entre as médias dos tratamentos seja pequena, observa-se maior variabilidade no tratamento automatizado, sugerindo maior distribuição de biomassa em relação ao tratamento controle (tabela 2).

Tabela 1 – Peso total, médio e desvio padrão dos basidiocarpos por tratamento.

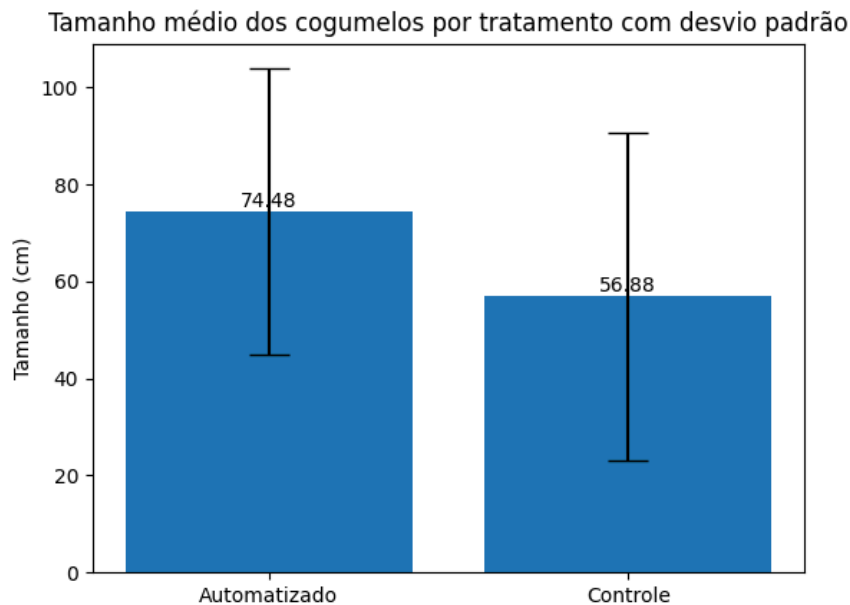
	Controle 1	Controle 2	Controle 3	Total
Peso total (g)	4,89	4,737	3,458	13,085
Peso médio (g)	2,445	0,677	0,576	4,361
desvio padrão (g)				0,786
	Automatizada 1	Automatizada 2	Automatizada 3	Total
Peso total (g)	5,162	8,44	6,791	20,393
Peso médio (g)	1,032	2,11	0,617	6,797
desvio padrão (g)				1,639

Fonte: elaborada pelo autor.

Apesar da pequena diferença de médias, o aumento da variabilidade indica maior desenvolvimento dos indivíduos no cultivo automatizado, característica desejável em sistemas produtivos.

As diferenças mais evidentes foram observadas no tamanho dos corpos de frutificação. O grupo controle apresentou comprimento médio de 56,88 mm, com elevado desvio padrão (33,68 mm), indicando grande heterogeneidade morfológica, como destaca a tabela 3. Em contraste, o tratamento automatizado apresentou valores totais e médios superiores, além de menor dispersão relativa. Em termos interpretativos, os valores sugerem que a automação do controle térmico e de exaustão pode ter contribuído para um desenvolvimento, refletido no desvio padrão (Figura 11).

Figura 11 – Tamanho médio dos cogumelos por tratamento com desvio padrão.



(Fonte: Autoria própria, 2025)

Além disso, observou-se que, no momento da primeira coleta, os basidiocarpos provenientes das estufas automatizadas já se encontravam em estágio avançado de maturação, com abertura do píleo e liberação de esporos, enquanto os indivíduos do grupo controle ainda apresentavam características de desenvolvimento incompleto.

Tabela 2 – Tamanho total, médio e desvio padrão dos basidiocarpos por tratamento.

	Controle 1	Controle 2	Controle 3	Total
Tamanho total (cm)	18,55	81,77	70,32	170,64
Tamanho médio (cm)	9,275	11,68	11,72	56,88
desvio padrão (cm)				33,68
	Automatizado 1	Automatizado 2	Automatizado 3	Total
Tamanho total (cm)	57	58	108,45	223,45
Tamanho médio (cm)	11,4	14,5	9,859	74,48

desvio padrão (cm)				29,42
--------------------	--	--	--	-------

Fonte: elaborada pelo autor.

O aumento expressivo no tamanho sugere que o controle automatizado da exaustão (e, conseqüentemente, dos níveis de CO₂) pode ter favorecido tal efeito. Estudos demonstram que altas concentrações de CO₂ durante a frutificação alteram a morfologia dos corpos frutificantes, resultando em supressão do diâmetro do chapéu e mudanças no padrão de crescimento do estipe. Essa modulação é atribuída ao efeito do CO₂ sobre mecanismos fisiológicos como divisão celular e expansão tecidual (Lee et al. 2025). A automação provavelmente manteve concentrações mais próximas do ideal, favorecendo um crescimento mais robusto e consistente dos basidiocarpos.

Em relação à quantidade de indivíduos, a produção total de corpos de frutificação foi maior no sistema automatizado, que apresentou 20 indivíduos ao final do experimento, enquanto o grupo controle produziu 15 indivíduos (Tabela 1). Esse resultado indica um aumento de aproximadamente 33 % na quantidade de basidiocarpos sob condições automatizadas.

Tabela 3 – Quantidade de indivíduos (basidiocarpos) por tratamento.

	Controle 1	Controle 2	Controle 3	Total
Indivíduos totais	2	7	6	15
	Automatizado 1	Automatizado 2	Automatizado 3	Total
Indivíduos totais	5	4	11	20

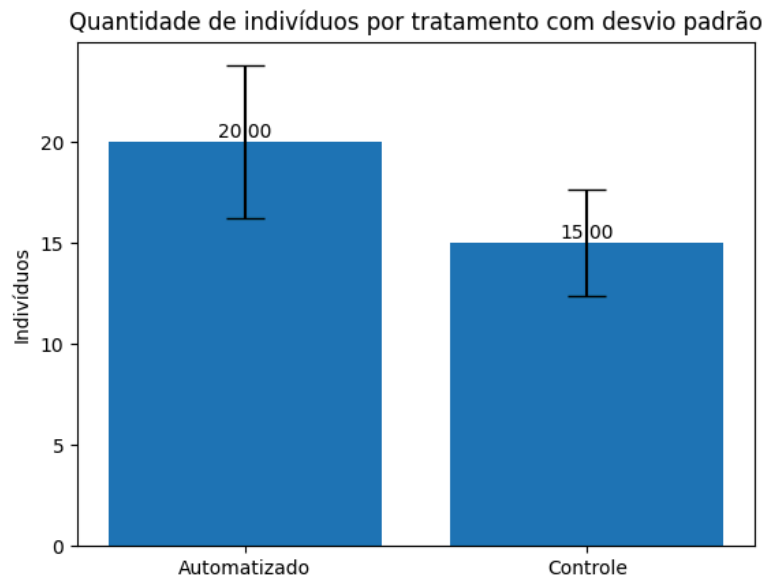
Fonte: elaborada pelo autor.

A análise da produtividade por número total de indivíduos também evidencia vantagem para o sistema automatizado, se avaliados por números absolutos. O grupo controle registrou média de 15 cogumelos (DP = 2,65), enquanto o grupo automatizado atingiu média de 20 indivíduos (DP = 3,79).

O aumento na quantidade de corpos de frutificação pode estar associado à estabilidade térmica, uma vez que flutuações de temperatura são conhecidas por afetar diretamente a formação de primórdios (Carrasco et al., 2023). Como as estufas automatizadas mantiveram o intervalo térmico de forma mais constante, isso possivelmente favoreceu a indução e

manutenção do maior número de primórdios, resultando em maior produtividade final (Observar Figura 12).

Figura 12 – Quantidade de indivíduos por tratamento com desvio padrão.



(Fonte: Autoria própria, 2025)

De forma geral, os resultados apontam que o sistema automatizado apresentou leve desempenho superior em quase todos os parâmetros avaliados. O peso seco apresentou leve aumento, o que representa um ganho modesto. Por outro lado, tanto o tamanho dos corpos de frutificação quanto a quantidade total de indivíduos apresentaram melhorias no tratamento automatizado.

Esses dados reforçam que o uso de automação no controle de parâmetros críticos, especialmente temperatura e exaustão, pode não apenas aumentar a produtividade, mas também reduzir a variabilidade entre ciclos, conferindo maior padronização ao processo. Mesmo com a falha na automatização da umidade, os resultados evidenciam o potencial de aprimoramento que sistemas automatizados oferecem ao cultivo de *Psilocybe cubensis*, abrindo a possibilidade de produção até de cogumelos comestíveis. Além disso, a falta de um sensor de CO₂ que permitisse realizar a troca gasosa com precisão também foi um dos fatores que impediu o pleno desenvolvimento dos basidiocarpos.

Um estudo de 2025 sobre um sistema digital automatizado reportou "resultados operacionais superiores", incluindo uma redução de 11 % no tempo total de cultivo e uma

drástica redução de 85 % nos custos de mão de obra em comparação com métodos tradicionais. O sistema também melhorou a consistência da produção (REHMAN; SARWAR, 2025). Embora neste trabalho o tempo até a maturidade completa não tenha sido mensurado individualmente para cada estufa, observou-se que, no momento da primeira colheita, os basidiocarpos do sistema automatizado já haviam atingido e ultrapassado a fase reprodutiva, enquanto aqueles do sistema controle ainda se encontravam em desenvolvimento. Considerando o tempo total do ciclo de aproximadamente 12 dias, essa diferença sugere uma aceleração mínima do processo de cultivo em torno de 8 %, valor compatível com a redução de tempo reportada na literatura para sistemas automatizados. Sendo este o mais notório desempenho do sistema automatizado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar se um sistema de automação de baixo custo, baseado em Arduino e voltado para o controle de temperatura e exaustão, poderia melhorar o desenvolvimento do *Psilocybe cubensis* em comparação ao cultivo manual tradicional. Mesmo diante de desafios técnicos significativos, como corrosão de sensores, interferência eletromagnética e inviabilidade da automatização da umidade, o experimento demonstrou resultados relevantes para um estudo exploratório.

Os dados obtidos apontam que a automação exerceu impacto positivo no cultivo do *P. cubensis*. Embora o peso seco médio dos basidiocarpos tenha apresentado apenas um aumento discreto em relação ao grupo controle, observou-se pouca variabilidade entre os indivíduos. Além disso, dois parâmetros críticos mostraram melhoria no sistema automatizado: o tamanho dos corpos de frutificação e a quantidade total de indivíduos produzidos. Esses resultados sugerem que o controle mais preciso da temperatura e, principalmente, da exaustão e consequentemente dos níveis de CO₂, pode ter favorecido o desenvolvimento morfológico e a indução de primórdios.

A impossibilidade de controlar a umidade de forma automatizada limitou o pleno funcionamento do sistema, especialmente considerando que a umidade é um dos fatores mais sensíveis para o sucesso do cultivo de basidiomicetos. Ainda assim, mesmo com essa limitação, o sistema automatizado superou o controle manual em alguns dos indicadores avaliados. Isso reforça que a implementação de tecnologias acessíveis da Agricultura 4.0 é uma estratégia viável e eficiente para melhorar processos de fungicultura, mesmo em condições laboratoriais simples e com recursos limitados.

O conjunto dos resultados demonstra que a automação indica um caminho promissor para a padronização, eficiência e aumento da produtividade no cultivo de cogumelos, inclusive para espécies de interesse comercial. O desempenho observado sugere que sistemas similares poderiam ser aplicados ao cultivo de espécies como Shimeji, Shitake e *Agaricus bisporus*, desde que adequações específicas fossem implementadas.

Como perspectivas futuras, recomenda-se:

- a) o desenvolvimento de um sistema de controle automatizado de umidade baseado em sensores mais resistentes e métodos de desinfecção menos corrosivos;
- b) a integração de sensores de CO₂ para realizar trocas gasosas de forma verdadeiramente precisa, evitando estimativas indiretas;
- c) a realização de experimentos com maior número amostral e ciclos repetidos, permitindo análises estatísticas mais robustas;
- d) a expansão do protótipo para sistemas maiores e de uso comercial, avaliando custos, escalabilidade e viabilidade econômica.

Dessa forma, conclui-se que a automação representa uma ferramenta eficiente para otimizar o cultivo do *Psilocybe cubensis*, oferecendo maior padronização e desempenho, e destacando-se como uma solução acessível, sustentável e alinhada às inovações contemporâneas da biotecnologia e da agricultura moderna.

REFERÊNCIAS

Agriculture 4.0: what is it and what are its tools and benefits? (2021). McCORMICK.

Disponível em:

<https://www.mccormick.it/as/agriculture-4-0-what-is-it-and-what-are-its-tools-and-benefits/>.

Acesso em: 15 dez. 2025.

ASWATHY, S.; SHYAMALAGOWRI, S.; HARI, Sowmya; KANIMOZHI, M.; MEENAMBIGA, S. S.; THENMOZHI, M.; KARTHIYAYINI, R.; SURESH, D.; MANJUNATHAN, J. *Comparative studies on the cultivation, yield, and nutritive value of an edible mushroom, Pleurotus tuber-regium (Rumph. ex Fr.) Singer, grown under different agro waste substrates*. 3 Biotech, v. 14, n. 4, p. 123, 2024. DOI: 10.1007/s13205-024-03968-x.

BEROVIC, M., PODGORNIK, B. B., & GREGORI, A. (2022). Cultivation Technologies for Production of Medicinal Mushroom Biomass: Review. Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35446518/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

BHAGARATHI, L. K., SUBRAMANIAN, G., & DaSilva, P. N. B. (2023). A review of mushroom cultivation and production, benefits and therapeutic potentials. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*. Disponível em:

<https://wjbphs.com/sites/default/files/WJBPHS-2023-0333>. Acesso em: 02 dez. 2025.

Cabrera, L. C., Constantino, L. V., Antunes, P. S., Gonçalves, L. S. A., & Corte, L. E. D. (2024). *Characterization of edible mushroom production: a case study in the region of Londrina, Paraná*. *Research, Society and Development*, 9(7), e4416. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/rsd/article/view/4416>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ČAPAS, V. et al. Intelligent Control of Mushroom Growing Conditions. *Applied Sciences*, v. 12, n. 24, p. 13040, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/13040>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CARHART-HARRIS, R. L. et al. Psilocybin with psychological support for treatment-resistant depression: an open-label feasibility study. *The Lancet Psychiatry*, v. 3, n. 7, p. 619–627, 2016.

CARRASCO, J., ZIED, D. C., NAVARRO, M. J., GEA, F. J., & PARDO-GIMÉNEZ, A. (s. d.). *Commercial Cultivation Techniques of Mushrooms*.

<https://www.dracena.unesp.br/Home/laboratoriosdepesquisa/centrodeestudosemcomogumelos/ch-2-jaime.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CHANG, S. T.; MILES, P. G. *Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

CHAUDHARY, D. K. *Mushroom Cultivation: Advances, Opportunities, and Challenges in Sustainable Agriculture*. 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.22848.65281.

FASCICOLO, B., PANZA, L., & LOMBARDI, F. (2024). Exploring the Integration of Industry 4.0 Technologies in Agriculture: A Comprehensive Bibliometric Review.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/20/8948>

FRAGOMELI, R., ANNUNZIATA, A., & PUNZO, G. (2024). Promoting the Transition towards Agriculture 4.0: A Systematic Literature Review on Drivers and Barriers. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2425>. Acesso em: 26 nov. 2025.

JACOB, M. S., XU, A., QIAN, K., Li, X., & ZHANG, B. (2025). Artificial Intelligence in Edible Mushroom Cultivation, Breeding, and Classification: A Comprehensive Review. National Library of Medicine. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12653317>. Acesso em: 15 dez. 2025.

KATO, K. et al. *Psilocybin treatment extends cellular lifespan and improves survival of aged mice*. *NPJ Aging*, v. 11, n. 1, p. 55, 2025. doi:10.1038/s41514-025-00244-x.

KURZBAUM, E.; PÁLENIČEK, T.; SHRCHATON, A.; AZERRAD, S.; DEKEL, Y. Exploring Psilocybe cubensis Strains: Cultivation Techniques, Psychoactive Compounds, Genetics and Research Gaps. *Journal of Fungi*, s.l., v. 11, n. 2, p. 99, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2309-608X/11/2/99>. Acesso em: 02 dez. 2025.

LEE, K.-W., PARK, C.-H., LEE, S.-C., SHIN, J.-H., & PARK, Y.-J. (2025). High Carbon Dioxide Concentration Inhibits Pileus Growth of *Flammulina velutipes* by Downregulating Cyclin Gene Expression. <https://www.mdpi.com/2309-608X/11/8/551>. Acesso em: 3 dez. 2025.

MISHRA, A., & SHANKAR, S. (2025). Edible mushrooms for improved human health, food security and environmental sustainability: A critical review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969725017334>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MÜLLER, M. et al. MushR: A Smart, Automated, and Scalable Indoor Harvesting System for Gourmet Mushrooms. *Agriculture*, 2023, 13(8), 1533.

OBEYSEKARE, E.; HIGGINS, C.; et al. *Mushroom cultivation in the developing world: A comparison of cultivation technologies*. GHTC 2017 – IEEE Global Humanitarian Technology Conference, 2017. DOI: 10.1109/GHTC.2017.8239314.

OMAR, S. et al. *IoT Enabled Mushroom Farm Automation with Machine Learning*. *Advanced and Sustainable Technologies (ASET)*, v. 3, n. 1, 2023. Disponível em: <https://ejournal.unimap.edu.my/index.php/aset/article/view/786>. Acesso em: 20 nov. 2025.

REHMAN, S. U.; SARWAR, M. S. *Automated Mushroom Farming: An Energy-Efficient Digital Cultivation System*. 2025. Preprint. DOI: 10.21203/rs.3.rs-6422555/v1.

RUKHIRAN, M., SUTANTHAVIBUL, C., BOOBSONG, S., & NETINANT, P. (2023). IoT-Based Mushroom Cultivation System with Solar Renewable Energy Integration: Assessing the Sustainable Impact of the Yield and Quality. MDPI. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13968>. Acesso em: 07 nov. 2025.

SUJATANAGARJUNA, ANANT; KIA, SHOHREH; BRIECHLE, DOMINIQUE F.; LEIDING, BENJAMIN. MushR: A Smart, Automated, and Scalable Indoor Harvesting

System for Gourmet Mushrooms. *Agriculture*, v. 13, n. 8, art. 1533, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13081533.

TOYSHOW. Ventilador portátil com umidificador preto sem fio USB. [S. l.], 2025.

Disponível em:

<https://www.toyshow.com.br/mkp/eletronicos/ventilador-portatil-com-umidificador-preto-sem-fio-usb-mkp>>. Acesso em: 27 out. 2025.

VLĂDUȚ, N.-V.; UNGUREANU, N. (2024). Beyond Agriculture 4.0: Design and Development of Modern Agricultural Machines and Production Systems. *Agriculture*, 14(7), 991. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14070991>.

WALDBLLING, A., BARANOVA, M., NEUMANN, S., ANDRADE, J., & SIDHU, *SHARAN. (2023). Exploring *Psilocybe* spp. mycelium and fruiting body chemistry for potential therapeutic compounds. *Frontiers*. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/journals/fungal-biology/articles/10.3389/ffunb.2023.1295223>.

Acesso em: 25 nov. 2025.

WOLFERT, S. et al. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 69-80, 2017.

ZAPAROLLI, D. (2020). Agriculture 4.0. *Revista Pesquisa Fapesp*.

<https://revistapesquisa.fapesp.br/en/agriculture-4-0>. Acesso em: 15 dez. 2025.