

Controle PI e *On-Off* para ambiente de cultivo de cogumelos

Marcos Carneiro Rodrigues

IFSP, Cubatão, SP, Brasil

Marcelo Saraiva Coelho

IFSP, Cubatão, SP, Brasil

Resumo: O mercado de cogumelos possui grande potencial de exploração, tanto nas áreas alimentícias quanto medicinais. Em paralelo, a engenharia de controle e automação vem se mostrando grande aliada à indústria alimentícia de modo a agregar valor ao produto e evitar desperdiçar recursos. Este trabalho utiliza controladores PI em conjunto com a técnica *On-Off* (liga-desliga) para controle de temperatura e umidade de ambientes de colonização de cogumelos. Foi desenvolvido um controlador PI com sistema *anti-windup* para o controle de temperatura com parâmetros de $K_p=206,88$ e $K_i=248,14$, alcançando um valor de 33% de sobressinal e tempo de assentamento de 367 segundos. O controle *On-Off* conseguiu manter os valores de umidade entre 70% e 90%. O sistema pode também monitorar de forma remota as variáveis de processo por meio de comunicação sem fio.

Palavras-chave: cogumelos, Controlador PI, Controle Liga-desliga, umidade, temperatura, monitoramento remoto

Abstract: The mushroom market has great potential for exploration, both in food and medicinal areas. In parallel, control and automation engineering has proved to be a great ally to the food industry in order to add value to the product and avoid wasting resources. This work uses PI controllers in conjunction with the *On-Off* technique to control temperature and humidity in mushroom colonization environments. A PI controller with *anti-windup* system was developed for temperature control with parameters of $K_p=206.88$ and $K_i=248.14$, reaching a value of 33% of overshoot and settling time of 367 seconds. The *On-Off* control managed to keep the humidity values between 70% and 90%. The system can also remotely monitor process variables via wireless communication.

Keywords: mushrooms, PI Controller, On-off Controller, humidity, temperature, remote monitoring.

INTRODUÇÃO

Quando se compara a população mundial do primeiro ano do século XXI até os dias atuais, percebe-se que seu rápido crescimento leva à existência de um debate a respeito de técnicas sustentáveis que atendam as demandas básicas da comunidade global. Segundo Gu (2021), o número registrado de pessoas no planeta em 1998 era de 6 bilhões, crescendo para 7 bilhões em 2010 e chegando a 7.8 bilhões em meados de 2020. O mundo experimenta mudanças demográficas de forma nunca vistas, como o crescimento populacional, faixa etária, e distribuição geográfica, levando a importantes implicações econômicas (MASON, 2022). Em paralelo, a sociedade pressiona cada vez mais o setor agroindustrial a implementar uma sistemática de gestão ambiental que englobe a busca por novas tecnologias, a revisão de processos, o estudo de ciclo de vida e a manufatura de “produtos verdes” (ARAÚJO, 2015). Sendo assim, busca-se cumprir exigências legais, aproveitar as oportunidades e, por fim, investir na imagem institucional (ARAÚJO, 2015). De forma a otimizar e reaproveitar os recursos disponíveis, a tecnologia vem se mostrando uma aliada no que se refere a eliminação de desperdício (ZAMAN, 2013).

A prática de controle de processos está presente não só na indústria, como também em setores primários, como na agricultura e pecuária. Sistemas agrícolas são complexos, multivariáveis e imprevisíveis (KAMILARIS, 2018). Na pecuária, uma questão universal que afeta os criadores de gado é a medição e alocação de pastagens de forma otimizar a utilização no dia a dia (LAWSON, 2022). Pouco a pouco, a otimização de recursos por meio da automação e controle vem se tornando uma ferramenta poderosa. A evolução eletrônica permitiu o avanço dos sistemas de coleta, monitoramento, armazenamento, tratamento de dados e geração de informações (GEBLER, 2018). Com o desenvolvimento da indústria 4.0 e suas vertentes, tecnologias como Internet das coisas vêm sendo utilizada no monitoramento e controle de processos, através de um sistema ciberfísico, conectando o mundo real a um ambiente virtual (SULISTYANTO *et al.*, 2018). Na

indústria alimentícia, a implementação de controle e automação contribui também para o aumento da qualidade ao realizar transformações de processo em matérias primas, agregando valor ao produto final (KRAJEWSKI, 2009). Entre diversas aplicações mencionadas, pode-se observar a viabilidade da colonização de cogumelos comestíveis e medicinais.

O mercado de cogumelos comestíveis possui uma demanda projetada em 20,84 milhões de toneladas para o ano de 2026 (ATALLAH *et al.*, 2021). É esperado que o consumo *per capita* seja alterado de 1kg em 2008 para 2.4kg em 2020 (WAHAB, 2019). Como utilizam material orgânico para seu crescimento, conhecido como substratos, e resíduos agrícolas, como a palha, o cogumelo pode contribuir não só com a eliminação de efluentes agroindustriais, mas também com a geração de recursos. Em 2009, 25% de toneladas de palha, que foram queimados na China, poderiam ter sido reaproveitados em uma variedade de aplicações (GRIMM *et al.*, 2018), entre elas o cultivo de cogumelos comestíveis. Segundo Atallah (2021), em 2015, a demanda global de cogumelos foi avaliada em mais de U\$35 bilhões. O efluente gerado na produção de cogumelos, quando realizado devidos tratamentos, pode ser utilizado como alimento para gado, substituindo com facilidade grãos e farelos (ATALLAH *et al.*, 2021). Ademais, os resultados a respeito das características nutritivas dos cogumelos se mostram promissoras. Comparados a alguns vegetais como batata e cenoura, é apresentada maior concentração de aminoácidos, além de uma menor concentração de gordura e calorias (GRIMM *et al.*, 2018). Para que a colonização de cogumelos seja realizada com sucesso, algumas variáveis devem ser controladas, entre elas a umidade e temperatura. O shimeji, também conhecido como cogumelo ostra, tem seu crescimento favorecido quando submetido a condições de temperatura entre 15°C e 30°C e umidade relativa entre 80 e 90% (SULISTYANTO, 2018).

A técnica de controle de ambientes de cultivo de cogumelos já vem sendo abordada por diversos pesquisadores, como por exemplo, a utilização de lógica difusa (*Fuzzy logic*) e Redes Neurais *Feedforward* aplicadas a controle de temperatura e umidade (ADHITYA, 2018). A lógica *Fuzzy* também foi explorada de forma a controlar a umidade de um ambiente de cultivo, levando a temperatura como um parâmetro de entrada, além do tempo do dia e da própria umidade do ambiente que realimentaria o

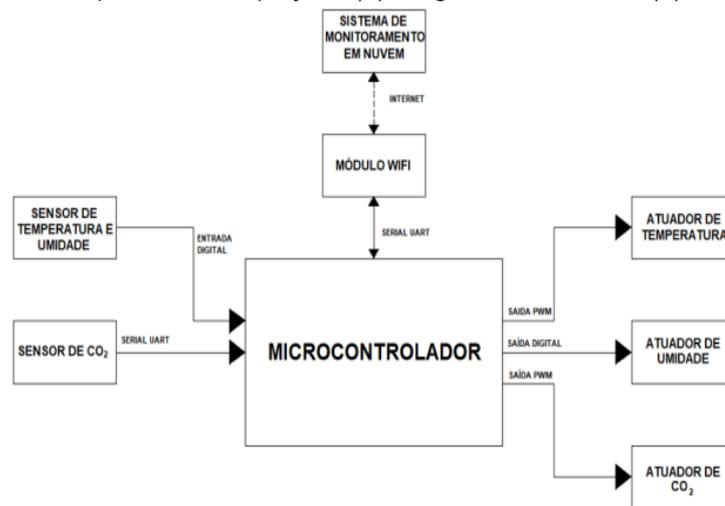
sistema de controle (DELA CRUZ-DEL AMEN, 2019). Pode-se citar também a utilização de Internet das coisas aplicada à climatização de uma câmara de colonização de cogumelos (ARIFFIN *et al.*, 2020)

O presente trabalho visa a realizar um controle de temperatura e umidade de um ambiente de cultivo de cogumelo do tipo *Pleurotus ostreatus* (Shimeji) utilizando diferentes técnicas de controle, com ênfase na tecnologia de controladores PI (Proporcional-Derivativo). Será realizado, utilizando Internet das Coisas, o monitoramento do ambiente de forma remota, por meio de comunicação sem fio (*Wireless Fidelity – Wifi*), através de uma plataforma de interface de programação da aplicação (*Application Programming Interface – API*).

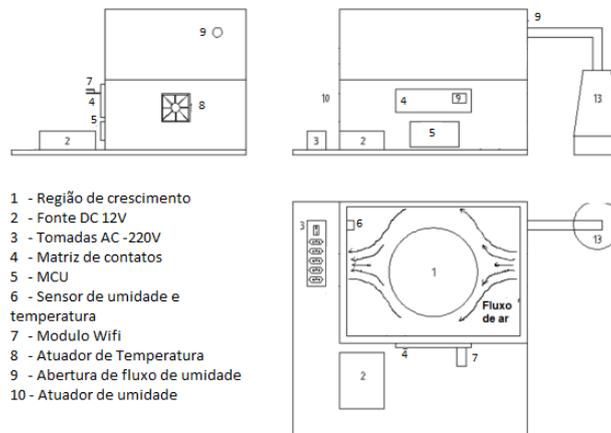
MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho proposto consiste na construção de uma câmara de madeira com 40x30x30cm, onde foi aplicada uma camada de verniz a fim de eliminar os efeitos da alta umidade sobre a madeira. Para efetuar as medições das variáveis, foi utilizado um sensor DHT22, capaz de realizar a leitura simultânea de temperatura e umidade, transmitindo a informações por um único condutor. O controle das variáveis foi realizado por um Arduino Due como unidade microcontroladora (*Microcontrolled Unit – MCU*), onde o algoritmo foi desenvolvido em linguagem C. O diagrama de blocos do sistema pode ser visualizado na Fig. 1 (a). A Fig. 1 (b) representa a montagem física do protótipo.

Figura 1 – Esquemático do projeto: (a) Diagrama de Blocos. (b) Disposição



Fonte: (RODRIGUES, 2022) (a)



Fonte: Rodrigues (2022) (b)

Para atuação na variável de temperatura foi utilizada uma pastilha termoelétrica semicondutora que utiliza os efeitos de uma corrente passando por junções p-n para realizar a transferência de calor entre suas superfícies, conhecida também como Placa Peltier (RIFFAT, 2003), de modo a retirar o calor interno da câmara para a parte externa. A técnica para atuação é a utilização de um módulo de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM), que irá modular a tensão média de entrada da placa.

A queda de temperatura interna da câmara é proporcional à tensão aplicada em seus terminais. Para atuar na umidade da câmara, um umidificador ultrassônico foi adaptado para que a névoa úmida produzida fosse canalizada até a região interna

do sistema. A ativação do umidificador se deu por técnica liga-desliga, onde um relé de estado sólido energizava o atuador de acordo com a faixa de controle definida.

Para coleta de dados, um módulo de comunicação sem fio ESP-01 realizou a comunicação com a plataforma de monitoramento em nuvem Tago.io, onde uma série histórica possibilitou a identificação do sistema dinâmico da câmara de cultivo. Os dados coletados passaram por tratamento de média móvel de modo a suavizar a os gráficos gerados. Com base nos testes de desempenho realizados, pôde-se construir um algoritmo de controle PI que foi processado pelo MCU com sintonia baseada na dinâmica do processo.

RESULTADOS

Após finalizada a construção física, a partir dos dados históricos de temperatura coletados na plataforma API, foi determinada a função de transferência do sistema de controle em resposta ao degrau unitário. A Tabela 1 mostra os parâmetros levantados, enquanto a Equação (1) estabelece a função de transferência do sistema $G(s)$.

Tabela 1 – Parâmetros da dinâmica do processo levantados em ensaio

| Parâmetros | Valor Médio |
|-------------------------------------|--------------|
| Ganho | 0,032 |
| Tempo morto (constante de tempo) | 74,5s 548 |

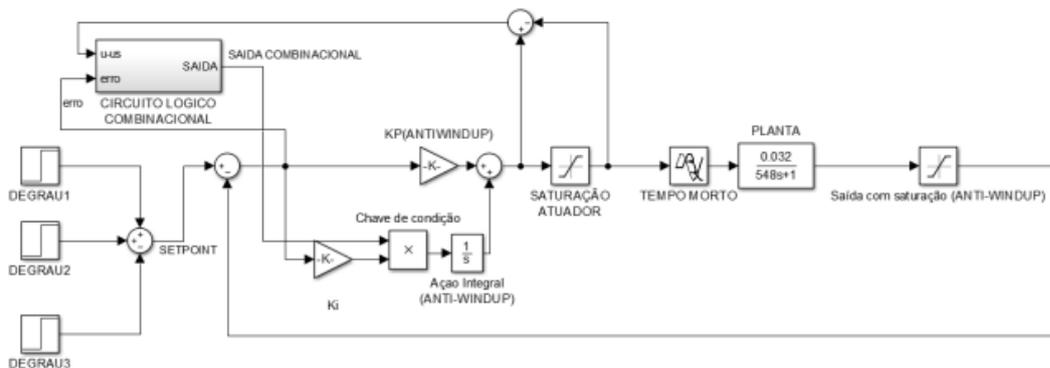
Fonte: Rodrigues (2022).

$$G(s) = \frac{0,032e^{-74,5s}}{548s + 1} \quad (1)$$

A dinâmica do processo em resposta ao degrau mostra que se trata de um sistema de primeira ordem. Se a resposta ao degrau se assemelha a um sistema de primeira ordem, um controlador PI é o suficiente para controle do processo (BEZERRA, 2010). Com base no primeiro critério de Ziegler e Nichols (DE CAMPOS, 2006), pode-se estabelecer que o ganho proporcional K_p é 206,88, enquanto a constante de tempo integral K_i é 248,14. Ao estabelecer um novo ensaio com o

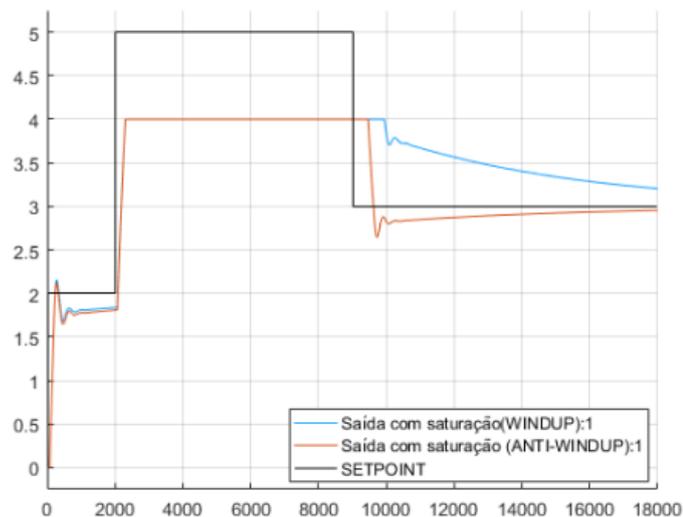
controlador implementado, percebeu-se que, devido à baixa controlabilidade do sistema, evidenciado por um ganho de 0,032, quando o processo se encontra fora de sua faixa de controle, é possível que exista um acúmulo do erro integral devido à saturação. Quando um controle acumula erro integral, ocorrem saturações e sobressinais indesejados (DAHLEM *et al.*, 2016). Este fenômeno é conhecido como *windup*. Para eliminar esse problema, um sistema *anti-windup* foi implementado, fazendo com que o erro integral só seja acumulado quando não exista saturação do atuador. A Fig. 2 mostra o diagrama de controle *anti-windup* e a Fig. 3, sua resposta comparada a um sistema *anti-windup*. Pôde-se observar que o sistema *anti-windup* converge com maior velocidade à referência, em relação ao sistema com *windup*.

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema *anti-windup*.



Fonte: Rodrigues (2022).

Figura 3 – Comparação de respostas do sistema com efeito *windup* e com sistema *anti-windup*



Fonte: Rodrigues (2022).

Após a implementação do sistema *anti-windup*, foi realizado um ensaio em malha fechada. A Tabela 2 mostra os parâmetros de desempenho do processo. Os

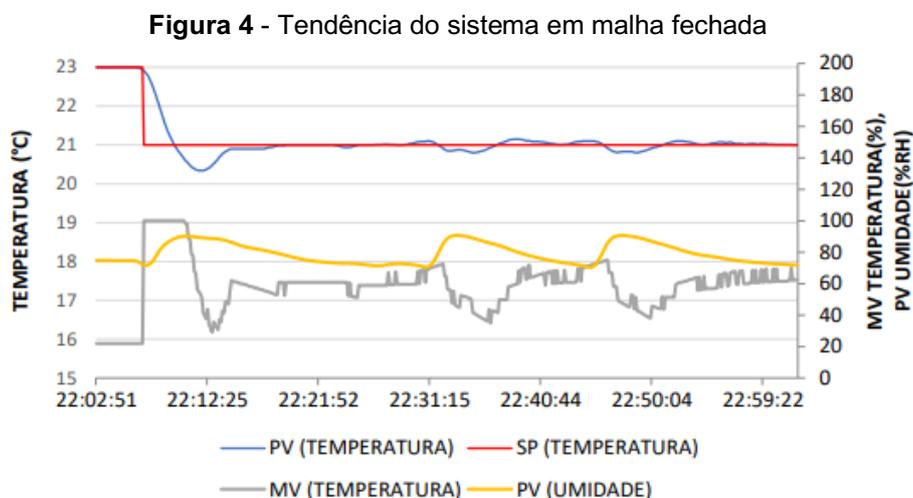
resultados indicam que o tempo de assentamento do sistema, comparado à dinâmica da Equação 1, reduziu drasticamente. O sobressinal, quando apresentado junto com os demais parâmetros de desempenho, mostra-se coerente, considerando a finalidade do sistema. A Fig. 4 ilustra a tendência da resposta em malha fechada. Podemos, então, observar que, quando há um sinal de controle em uma faixa de temperatura, o sistema busca rapidamente se adequar ao novo valor de referência.

Tabela 2 – Valores de Desempenho em malha fechada com controle PI e *anti-windup*.

| Parâmetros | Valor medido |
|------------|--------------|
| %OS | 33% |
| T_p | 277s |
| T_r | 155s |
| T_s | 367s |

Fonte: Rodrigues (2022).

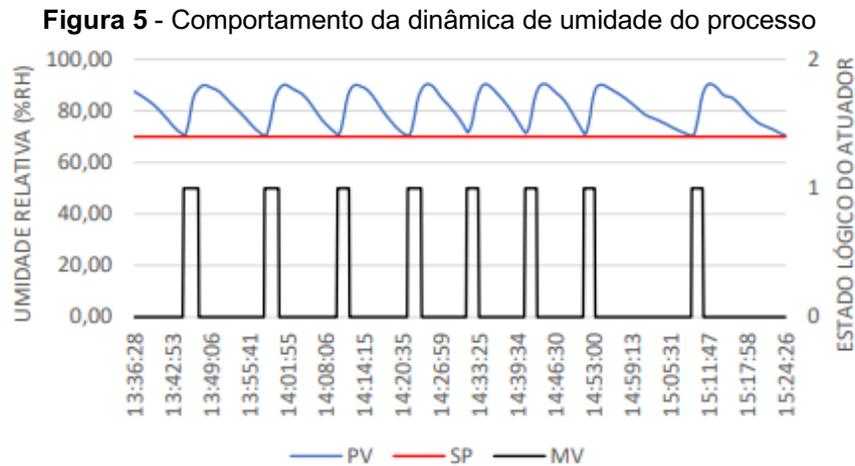
Os resultados mostrados na Tabela 2 indicam que o tempo de assentamento do sistema, comparado à dinâmica da Equação (1), reduziu drasticamente. O sobressinal, quando apresentado junto com os demais parâmetros de desempenho, mostra-se coerente, considerando a finalidade do sistema. A Fig. 4 indica a tendência da resposta em malha fechada. Podemos, então, observar que, quando há um sinal de controle em uma faixa de temperatura, o sistema busca rapidamente se adequar ao novo valor de referência.



Fonte: Rodrigues (2022).

Em relação à umidade, decidiu-se que o intervalo de controle seria entre 70% e 90%, próximo ao que foi estabelecido por Sulistyanto (2019). A atuação da

temperatura no processo influencia diretamente na umidade. Quando o limite inferior for atingido, o relê ativa o umidificador ultrassônico, elevando a temperatura até 90%, momento em que se desativa. Com isso, a dinâmica da umidade demonstrou um caráter cíclico, mostrado na Fig. 5.



Fonte: Rodrigues (2022).

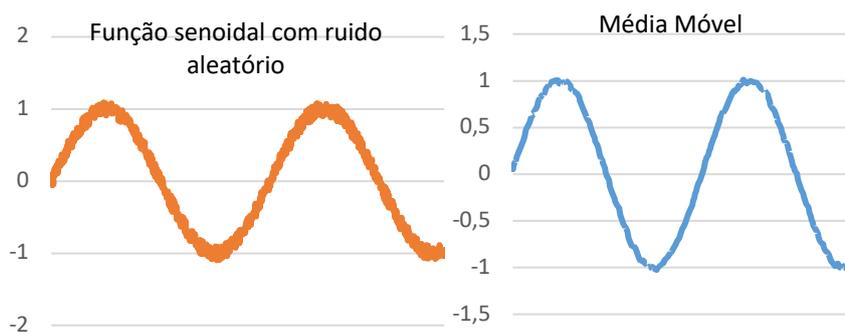
DISCUSSÃO

Para o controle de umidade do ambiente, observou-se que foi apresentado um comportamento cíclico da variável, acionando o atuador em intervalos regulares com média de 13 minutos. Essa estabilidade pode ser associada com o atuador de temperatura. Quando não há variação do ambiente externo, ao se acionar o atuador de temperatura, nota-se que, imediatamente, há uma queda na umidade interna da câmara. Ao atingir a referência de controle de umidade de 70%, o relê atuador aciona o umidificador, que eleva a umidade do ambiente até 90%. O limite escolhido impediu que houvesse precipitação de água no ambiente. Comparando com os resultados de Ariffin *et al.* (2020), que utilizava uma bomba centrífuga para dispersar a água sobre o ambiente, o umidificador ultrassônico conseguiu manter os valores de umidade relativa entre 70% e 90%. De acordo com Ariffin *et al.* (2020), a ocorrência de precipitação de água pode causar a ocorrência de agentes patógenos que irão contaminar toda produção de cogumelos.

Os primeiros testes produzidos no ensaio de malha aberta não se mostraram satisfatórios, devido aos erros apresentados devido à incerteza do sensor de umidade

e temperatura. De modo a se obter a função de transferência do sistema, foi necessário que os ruídos medidos no ensaio fossem tratados. Para isto, a média móvel foi utilizada de modo a suavizar a tendência da temperatura. Segundo Mitsantisuk *et al.* (2018), a média móvel equivale a um filtro de passa-baixa de resposta ao impulso finito, sendo um ótimo filtro de suavização no domínio do tempo. A Fig. 6 (a) representa um sinal senoidal com ruído aleatório, enquanto a Fig. 6 (b) indica o mesmo sinal tratado com média móvel, onde $M+1$ é o tamanho da amostragem da média móvel.

Figura 6 – Sinal senoidal: (a) com ruído. (b) com tratamento de média móvel



(a)

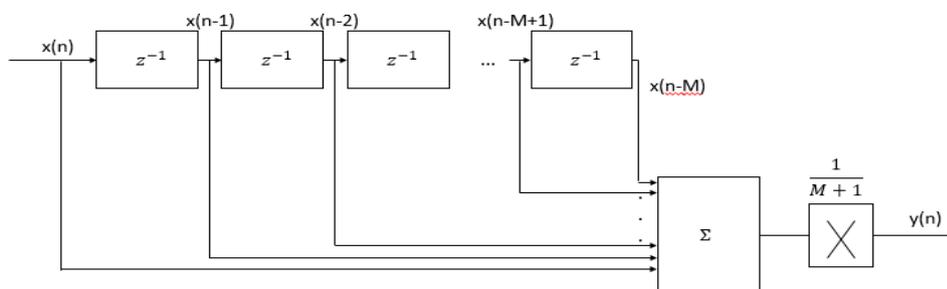
(b)

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Fig. 7 ilustra um diagrama de blocos para o tratamento com média móvel de sinais discretos. Para trabalhos futuros, pode-se realizar o tratamento da saída do sensor com outros filtros, comparando-os com a resposta obtida por média móvel neste trabalho.

Figura 7 – Diagrama de Blocos de um filtro com média móvel para sinais discretos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Inicialmente, o controle em malha fechada não previa o sistema *anti-windup*. Ao realizar a montagem dos atuadores de temperatura, o maior valor conseguido foi de 3,2°C abaixo da temperatura externa. Se a temperatura desejada for menor que a

temperatura mínima alcançada pelo atuador, ocorrerá a saturação do sinal de atuação. O sistema *anti-windup* foi escolhido para contornar o problema de saturação do atuador de temperatura. Como mostra Sakai *et al.* (2015), para sistemas do tipo zero, esta correção poderia fazer com que ocorra erro em regime estacionário. Escolher um atuador com maior ganho pode dispensar a necessidade de implementar o controle com correção *anti-windup*. Entre as melhorias propostas, podemos citar a substituição da madeira como material da câmara de cultivo, pois a baixa isolamento térmica proporcionou absorção de calor externo na câmara. Outra proposta seria readequar a posição física dos atuadores de temperatura, inicialmente na lateral da câmara de cultivo. Readequar o projeto para que os atuadores fiquem na parte superior melhorará a convecção térmica do sistema.

O sobressinal de 33% que ocorreu no controle de malha fechada, de acordo com a Tabela 2, foi devido à elevação da ordem do sistema quando a saída é realimentada pelo sensor. Sistemas de segunda ordem, quando subamortecidos, apresentam comportamento oscilatório, evidenciando um valor de sobressinal quando a tendência do sinal a ser controlado passa pelo sinal de referência. Um sobressinal de 33% equivale a uma refrigeração momentânea de 1,06°C abaixo do que o sinal de controle requer do controlador do processo. Os fenômenos de *overshoot* não são desejáveis, pois podem dificultar o controle do processo (MENG *et al.*, 2016). Considerando que isto se dará somente quando se aplica um degrau sobre a variável de referência, junto à baixa faixa de controlabilidade do sistema, a ação do sobressinal não irá prejudicar bruscamente o processo de cultivo, visto que o cultivo de cogumelos se torna inviável na ação de altas temperaturas (WAHAB *et al.*, 2019), e o projeto não prevê aquecimento da câmara de cultivo.

O tempo de assentamento do processo em malha fechada mostrou o quão rápido a variável controlada chega em regime estacionário. Inicialmente, em malha aberta, a constante de tempo de 548s mostra que, se o atuador sofrer um degrau sem controle de malha fechada, o sistema responde em aproximadamente 99% do valor em regime estacionário com aproximadamente 45 minutos. Quando se aplicou malha fechada, inicialmente, exigiu-se maior potência térmica do atuador, de modo a acelerar o tempo em que a variável irá chegar ao valor requerido. Os compensadores presentes no controle PI irão ditar o ganho que o controlador irá contribuir no processo.

O controle é proporcional ao erro da variável medida e o sinal de referência. Por fim, comparando o tempo de assentamento final com o controle inicial, percebeu-se que o tempo foi reduzido em 90% em relação a controlar em malha aberta.

Os testes mostraram que, apesar de o controle ser independentemente desenvolvido para cada variável, quando colocados em conjunto, apresentavam interatividade entre si. Estabelecer um novo valor de referência na temperatura fazia com que seu atuador entrasse em ação. A umidade do ambiente imediatamente era afetada de forma negativa, acelerando a atuação do umidificador. Foi observado também que, quando o atuador de umidade era ativo, a temperatura decaía mais rapidamente, diminuindo o tempo de assentamento. Por fim, mesmo respeitando os critérios de 90% de limite, quando havia queda de temperatura, podia-se notar condensação da névoa gerada pelo umidificador, que pode gerar efeitos negativos no cultivo, já citados anteriormente. O cultivo de cogumelos pode também necessitar de cuidados referentes à concentração de CO₂ do sistema. Ao se resfriar à câmara de cultivo, problemas referentes na dispersão do gás produzido na respiração dos cogumelos podem surgir.

O ambiente de monitoramento em nuvem recebeu em tempo real as variáveis de temperatura e umidade. A necessidade de se obter a dinâmica do processo através de ensaios de malha aberta levou à utilização integral da cota de dados transmitidos que a plataforma disponibilizava de forma gratuita. A plataforma permite que sejam enviados até um milhão de pontos de amostragem ao mês de forma gratuita. Para que se possa otimizar o uso, recomenda-se que sejam eliminadas algumas variáveis, como, por exemplo, a manipulada do atuador de temperatura. Outra sugestão seria capturar apenas variáveis que se alteram a cada ciclo de leitura.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou em síntese os resultados de controle de variáveis de um sistema de cultivo de cogumelos. A técnica utilizada foi o controle liga-desliga para umidade, que mostrou um resultado cíclico. Já no controle de temperatura, o controle PI mostrou diminuição do tempo de assentamento com sobressinal aceitável,

considerando as características de processo. O cultivo de cogumelos, utilizando técnicas de controle, pode se tornar uma alternativa no combate à fome.

Apresenta-se a seguir, alguns possíveis trabalhos futuros:

- a) Combinar o controle PI em temperatura com Lógica Fuzzy para umidade, substituindo a técnica *on-off*. Outra sugestão será buscar uma forma de melhorar o sistema de monitoramento via nuvem, possibilitando também o controle remoto.
- b) Estudar as consequências de falha do relé que atua o umidificador ultrassônico, em especial para situação que mantenha o umidificador ativo.
- c) Realizar um estudo sobre a interatividade do atuador de temperatura, de forma a contornar as desvantagens causadas, assim como aproveitar as vantagens.
- d) Investigar o controle de CO₂ junto a outras técnicas de controle.

REFERÊNCIAS

ADHITYA, R. Y.; RAMADHAN, M. A.; KAUTSAR, S.; RINANTO, N.; SARENA, S. T.; LI MANUDHIF; MAT SYAI'IN; SOELISTIJONO, R. T.; ADI SOEPRIJANTO. *Comparison methods of Fuzzy Logic Control and Feed Forward Neural Network in automatic operating temperature and humidity control system (Oyster Mushroom Farm House) using microcontroller*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND SMART DEVICES (ISESD), 2016. **Anais [...]**. ISESD, p. 168-173. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7886713/references#references>. Acesso em: 5 jun. 2022.

DELA CRUZ-DEL AMEN, Jennifer; VILLAVERDE, Jocelyn Flores. Fuzzy Logic-based Controlled Environment for the Production of Oyster Mushroom. In: **2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)**. IEEE. p. 1-5.

ARAÚJO, C. M; OLIVEIRA, A. L. N; SILVA, A. L. L; SOUZA, S. M. A; LIRA, W. S. Análise das práticas ambientais e otimização do uso de recursos naturais: um estudo em uma fábrica de couro-calçados de Campina Grande-PB. In: **ENGEMA - DESAFIOS DA SUSTENTABILIDADE NA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO**, 17, São Paulo, 2015. **Anais [...]**, São Paulo: Engema, 2015, p. 1-14. Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/75.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2022.

ARRIFFIN, M. A. M. *et al.* *Automatic Climate Control for Mushroom Cultivation Using IoT Approach*. **2020 IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)**. p. 123-128, 2015.

ATALLAH, E. *et al.* *Hydrothermal carbonization of spent mushroom compost waste compared against torrefaction and pyrolysis*. **Fuel Processing Technology**. v. 216. n. 106795. p. 12, 2021.

BEZERRA, D. C. **Controlador de Temperatura Utilizando um PI Digital Aplicado a um Nobreak de 1 kVA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em:
<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.2/DANIEL%20CARVALHO%20BEZERRA.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2022.

DAHLEM, E. A. *et al.* *Análise da influência da saturação de atuadores na ação de controle integral*. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS DE ENGENHARIA ELÉTRICA-CEEL, 14, Uberlândia, 2016.

DE CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006.

GLEBER, L. Estado da arte da automação agrícola: a fruticultura automatizada. **Agapomi**, Vacaria, p. 6-7, nov. 2018. Disponível em:
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1099818>. Acesso em: 5 jun. 2020.

GRIMM, D; WÖSTEN, H. A. B. *Mushroom cultivation in the circular economy*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, n. 7795, 12 p., 2018.

GU D. *et al.* *Major Trends in Population Growth Around the World*. **China CDC Wkly**, v. 3, n. 28, p. 604-613, 9 jul. 2021. Disponível em:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34594946/>. Acesso em: 5 jun. 2022.

KAMILARIS, A. *et al.* *Deep learning in agriculture: A survey*. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 147, p; 70-90, 2018.

KRAJEWSKI, L. *et al.* **Administração da Produção e operações**. 8 ed. São Paulo: Pearson Pretince Hall, 2009.

LAWSON, A. R. *et al.* *Multi-site calibration and validation of a wide-angle ultrasonic sensor and precise GPS to estimate pasture mass at the paddock scale*. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 195, n. 106786, 2022.

MASON, A. *et al.* *Six Ways Population Change Will Affect the Global Economy*. **Population and development review** . USA, p. 51-73, 2022.

MENG X. *et al.* *Research of overshoot phenomenon in frequency control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINERY, MATERIALS, ENVIRONMENT, BIOTECHNOLOGY AND COMPUTER*, 6. China, p. 688-691, 2016.

MITSANTISUK, C. *et al.* *Haptic Signal Processing for Human-Robot Collaboration System using Moving Average Filter. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL (AMC)*, 15, Japan, 2018. **Anais [...]** p. 675-680. Japão: AMC, 2018.

SAKAI, K. *et al.* *An Improved Anti-Windup Control Using a PI Controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, MODELLING AND SIMULATION*, 3, 2015. p. 197-201.

RIFFAT S. B; XIAOLI, Ma. **Thermoelectrics: a review of present and potential applications.** *Applied Thermal Engineering*, p. 913-935, 2003.

RODRIGUES, M. C; REIS, M. N. **Controle de um ambiente para cultivo de cogumelos do tipo Pleorotus Ostreatus (Shimeji) utilizando PID.** 2022 96 f. TCC (Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Cubatão, 2022.

SULISTYANTO, M. P. T. *et al.* *The controlling and monitoring system in oyster mushroom cultivation using fuzzy logic through web technology integrated with Internet of Things. MATEC Web of Conferences.* n. 15002, 2018.

WAHAB, H. *et al.* *Investigation of Temperature and Humidity Control System for Mushroom House. International Journal of Integrated Engineering.* Malasya, n. 6, p. 7, 2019.

ZAMAN, A. U. *Identification of waste management development drivers and potential emerging waste treatment technologies. International journal of environmental science and technology*, v. 10, p. 455-464, 2013.