

Desarrollo de un sistema iot para el cultivo automatizado de hongos comestibles pleurotus spp: alineado con principios de la industria 4.0

Por: Pineda R., David A. ; Sain, Pablo M.

Facultad de Ciencias para la Innovación y el Desarrollo, UCSE

RESUMEN

La producción sustentable de alimentos es un desafío global ante el crecimiento poblacional proyectado para 2030. En este contexto, el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp sobre desechos agroindustriales surge como una alternativa viable. Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema automatizado que optimiza las condiciones de cultivo en Santiago del Estero, controlando variables críticas para la fructificación: temperatura (18–25 °C), humedad relativa (70–90 %) y ventilación.

El sistema integra sensores ambientales, actuadores y tecnologías IoT para monitoreo y control en tiempo real, empleando diferentes plataformas de desarrollo.

Los resultados demuestran que el prototipo estabiliza eficazmente las condiciones ambientales, mejora la uniformidad del cultivo, reduce el tiempo de fructificación y permite una producción constante durante todo el año. Esto evidencia su viabilidad como solución sustentable para la producción local de alimentos.

Palabras claves: Cultivo automatizado de hongos, control ambiental, industria 4.0, IoT, agricultura sustentable.

ABSTRACT

Sustainable food production is a global challenge given the projected population growth by 2030. In this context, the cultivation of edible mushrooms of the genus *Pleurotus* spp. on agro-industrial waste emerges as a viable alternative. This work presents the development of an automated system that optimizes cultivation conditions in Santiago del Estero, controlling critical variables for fruiting: temperature (18–25 °C), relative humidity (70–90%), and ventilation. The system integrates environmental sensors, actuators, and IoT technologies for real-time monitoring and control, employing different development platforms. The results demonstrate that the prototype effectively stabilizes environmental conditions, improves crop uniformity, reduces fruiting time, and allows for consistent production throughout the year. This highlights its viability as a sustainable solution for local food production. Keywords: Automated mushroom cultivation, environmental control, Industry 4.0, IoT, sustainable agriculture.

INTRODUCCION

Los gobiernos, sociedades y empresas deben reinventarse para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que las Naciones Unidas planteó para 2030. Por lo tanto, es preciso cambiar los modelos de producción y de negocios, para incrementar el desarrollo económico, el cuidado ambiental y el bienestar social. El incremento de la producción mundial de alimentos no ha resultado eficiente en seguridad alimentaria ni en la eliminación del hambre. Peor aún, en las décadas venideras la población mundial acelerará su crecimiento llegando a más de 9000 millones de habitantes para 2050 y se precisará una duplicación de la producción de alimentos en todo el mundo. De esta manera la producción sustentable de alimentos se ha convertido hoy en un serio reto para la humanidad. En este contexto, el cultivo de hongos comestibles utilizando desechos agroindustriales como sustrato se presenta como una alternativa viable. Este trabajo propone el desarrollo de un sistema automatizado para optimizar las condiciones de cultivo de hongos del género *Pleurotus* spp., adaptando la producción en las condiciones ambientales que se desarrollan en Santiago del Estero. El cultivo de hongos comestibles depende de la regulación precisa de las condiciones ambientales, tales como la temperatura y la humedad relativa. Estas variables inciden directamente en el desarrollo fisiológico, la calidad y la productividad del hongo. Por consiguiente, la estabilidad de dichos parámetros resulta esencial para garantizar un crecimiento uniforme y obtener un rendimiento óptimo del cultivo. La implementación de un sistema de control automático para la gestión de estas condiciones representa una mejora significativa respecto al control manual tradicional. Mediante la automatización, las variables ambientales pueden ser monitoreadas y reguladas en tiempo real por medio de sensores y actuadores gobernados por un microcontrolador, lo que garantiza una mayor precisión, estabilidad y confiabilidad en el proceso de cultivo.

Desde el punto de vista ambiental, el sistema propuesto promueve prácticas de producción sostenibles al minimizar el impacto ecológico del proceso y optimizar el consumo de recursos naturales. En el ámbito económico, la automatización del control ambiental posibilita un uso más eficiente de la energía y del agua, y una disminución de las pérdidas ocasionadas por condiciones inadecuadas, lo que se traduce en una mayor rentabilidad y competitividad del cultivo.

De este modo, el proyecto contribuye tanto al desarrollo tecnológico como a la preservación del medio ambiente, consolidándose como una alternativa viable y responsable para el cultivo controlado de hongos comestibles.

Este trabajo propone el desarrollo de un sistema automatizado para optimizar las condiciones de cultivo de hongos del género *Pleurotus* spp., adaptando la producción en las condiciones ambientales que se desarrollan en Santiago del Estero, teniendo en cuenta las variables críticas para la fructificación: temperatura entre 18–25 °C, humedad relativa del 70–90 % y una ventilación adecuada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema propuesto se compone de diversos subsistemas interconectados e integrados entre sí, diseñados específicamente para el control automatizado de las condiciones ambientales dentro de un recinto cerrado, destinado a funcionar como cámara de fructificación para el cultivo de hongos comestibles. Este tipo de aplicación requiere un control preciso y continuo de variables fisicoquímicas críticas, tales como la temperatura y la humedad relativa, las cuales influyen directamente en el desarrollo, rendimiento y calidad del cultivo.

En dicho espacio, los parámetros mencionados serán monitoreados de manera continua mediante la implementación de seis sensores de temperatura y humedad del tipo DHT22, distribuidos estratégica-

mente en distintos puntos del recinto. Esta disposición permite obtener mediciones representativas del ambiente interno, minimizando errores asociados a gradientes térmicos o de humedad, y garantizando así una caracterización más precisa de las condiciones reales dentro de la cámara de fructificación.

El suministro de agua, proveniente de la red de la Universidad Católica de Santiago del Estero, ingresa al sistema a través de una manguera conectada a un dispensador de agua reacondicionado. Este dispositivo cumple la función de enfriar y almacenar el agua que será utilizada posteriormente en el proceso de humidificación. Una vez que el dispensador alcanza su nivel máximo de almacenamiento, una válvula flotante mecánica actúa de manera automática, interrumpiendo el flujo de agua y evitando posibles desbordes o desperdicios. Adicionalmente, el dispensador cuenta con un sistema de control térmico basado en un termostato, el cual se encuentra regulado a una temperatura de aproximadamente 20 °C, permitiendo mantener el agua dentro de un rango térmico constante y adecuado para su posterior utilización.

Cuando el sistema de control lo requiere, en función de las condiciones ambientales detectadas dentro de la cámara, el agua previamente enfriada es conducida desde el dispensador hacia el interior del recinto, a través de mangueras, mediante el accionamiento de una bomba de agua. Este proceso se realiza de manera controlada, garantizando un suministro eficiente y oportuno del recurso hídrico. El agua impulsada por la bomba es dirigida hacia un recipiente interno, especialmente diseñado para albergar los generadores de niebla. Dentro de este recipiente se encuentran instalados dichos dispositivos, los cuales son responsables de producir microgotas de agua mediante un proceso de atomización ultrasónica. Estas microgotas, al ser liberadas en forma de niebla dentro de la cámara de fructificación, incrementan significativamente el nivel de humedad relativa del ambiente. De manera simultánea, debido al proceso de evaporación, contribuyen al descenso de la temperatura interna, generando un efecto de enfriamiento que resulta altamente beneficioso para el desarrollo del cultivo.

El funcionamiento de la bomba de agua se encuentra automatizado y controlado mediante la incorporación de un sensor ultrasónico, el cual permite medir en tiempo real la distancia entre la superficie del agua y el propio sensor. Cuando dicha distancia alcanza un valor de 15 [cm], el sistema interpreta que el recipiente ha alcanzado el nivel de llenado óptimo, procediendo a desactivar la bomba de manera automática. Este mecanismo evita tanto el funcionamiento en vacío como posibles desbordamientos, asegurando un desempeño eficiente y seguro del sistema.

Por otra parte, los seis sensores distribuidos en la cámara realizan un monitoreo constante y en tiempo real de la temperatura y la humedad relativa del recinto. Los datos obtenidos son procesados por la unidad de control, la cual evalúa continuamente si las condiciones ambientales se encuentran dentro de los rangos óptimos previamente establecidos. En caso de detectarse un incremento de la temperatura o una disminución de la humedad por debajo de los valores deseados, el sistema activa automáticamente los generadores de niebla.

Una vez iniciada la producción de niebla, esta es impulsada hacia el exterior del recipiente mediante la utilización de cuatro ventiladores estratégicamente ubicados. Estos ventiladores generan un flujo de aire que facilita el transporte de la niebla, evitando su acumulación local y favoreciendo su distribución homogénea. La niebla es conducida y distribuida uniformemente dentro de la cámara de fructificación a través de un sistema de cañerías de PVC, diseñadas para asegurar una cobertura eficiente de todo el volumen interno del recinto. De esta manera, se logra una regulación uniforme de las condiciones ambientales, evitando zonas con déficit o exceso de humedad.

Todos los sensores y actuadores del sistema se encuentran conectados a una placa de desarrollo Arduino Mega, la cual actúa como unidad central de procesamiento y control. Este microcontrolador es el encargado de ejecutar el algoritmo de control, tomando

decisiones en función de los datos adquiridos por los sensores y determinando cuándo deben activarse o desactivarse los distintos actuadores del sistema.

Asimismo, el microcontrolador principal se encuentra vinculado a un módulo de comunicación ESP8266, el cual permite la transmisión de los datos hacia un servidor externo a través de una red inalámbrica. Esta funcionalidad posibilita la supervisión remota del sistema, brindando al usuario la capacidad de monitorear en tiempo real las condiciones de la cámara desde cualquier ubicación con acceso a internet.

Como resultado de la acción coordinada de los distintos subsistemas, la humedad relativa del ambiente se incrementa y/o la temperatura disminuye progresivamente hasta alcanzar los valores óptimos de operación establecidos para el cultivo. Una vez logradas estas condiciones, el sistema desactiva automáticamente tanto los generadores de niebla como los ventiladores, evitando consumos innecesarios de energía y prolongando la vida útil de los componentes.

Durante todo el proceso de funcionamiento, las variaciones de temperatura y humedad son visualizadas en tiempo real mediante una pantalla LCD 20x4, la cual proporciona información clara y accesible al usuario. Esta pantalla, junto con una botonera acoplada al sistema, constituye una interfaz de usuario sencilla, intuitiva y de fácil operación, permitiendo la configuración de parámetros y la supervisión local del sistema.

De manera complementaria, los mismos datos son enviados y visualizados mediante una interfaz remota accesible a través de una aplicación web desarrollada en el entorno MIT App Inventor. Esta aplicación permite la visualización de datos en tiempo real, ampliando significativamente las posibilidades de supervisión.

En conjunto, el sistema desarrollado constituye una solución tecnológica integral, capaz de mantener de manera autónoma las condiciones ambientales requeridas para el cultivo de hongos, optimizando recursos y reduciendo la intervención manual, lo cual representa una mejora significativa en términos de eficiencia, reproducibilidad y escalabilidad del proceso productivo.

RESULTADOS Y DISCUSION

La siguiente figura 1.1 representa, en tiempo real, la temperatura y humedad relativa promedios del sistema automático y ambos datos de cada uno de los seis sensores dentro de la cámara de fructificación. Una vez obtenidos de la misma, se envían a la placa ESP8266 que la misma los envía a la plataforma adafruit.io que interactúa como un bróker, para comunicarse con la aplicación desarrollada en el entorno MIT App Inventor:

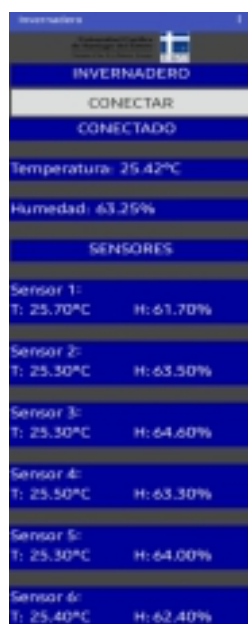


Figura 1.1 — App móvil desarrollada en MIT App Inventor.

La figura 1.2 representa los resultados obtenidos:

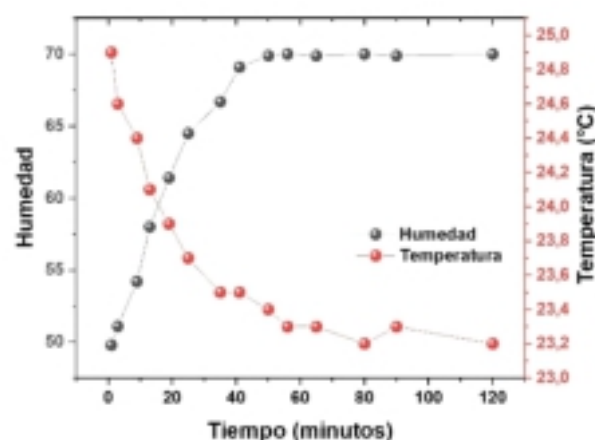


Figura 1.2 — Esta grafica representa la variación de la humedad y temperatura con respecto al tiempo.

La temperatura descendió de 25 °C a aproximadamente 23 °C, mientras que la humedad relativa alcanzó el 70%, en un lapso de 45 minutos, manteniéndose estable durante el proceso. Estos resultados evidencian la efectividad del sistema automatizado desarrollado para regular las condiciones de cultivo.

CONCLUSIONES

Se logró controlar los parámetros de temperatura y humedad óptimos para el cultivo con el sistema de control automatizado y el monitoreo en tiempo real, como también implementar un código de control en el microcontrolador Arduino MEGA, que permita gestionar las variables ambientales de acuerdo con los requerimientos del sistema, y en la placa NodeMCU ESP8266, que permite conectarse a servidores en la nube para monitoreo remoto. Con respecto a la interfaz de usuario se consiguió la optimización del uso de recursos, la mínima intervención manual y un entorno intuitivo. Por último, se validó el sistema de control en la cámara de fructificación instalada in situ, verificando su desempeño en condiciones reales de operación.

De esta forma se desarrolló con éxito un sistema de control automatizado para optimizar la producción de hongos comestibles. El proyecto permitió adquirir nuevos conocimientos y experiencias, aprendiendo de los errores y aplicando la esencia de la ingeniería, resolver problemas.

El compromiso de ir más allá de lo visto en clase, integrando nuevas tecnologías y enfrentando desafíos, fortaleció competencias profesionales como la innovación, la toma de decisiones y la planificación estratégica.

Más allá del desarrollo técnico, este trabajo ofrece una herramienta con potencial para ser implementada en una producción local, promoviendo el aprovechamiento de residuos, el ahorro de agua y energía, y la generación de alimentos con bajo impacto ambiental. Al mismo tiempo, su aplicación en contextos educativos permite el abordaje interdisciplinario desde diferentes carreras que ofrece la Universidad Católica de Santiago del Estero, facilitando el aprendizaje basado en proyectos reales y contribuyendo a la formación profesional con perspectiva sostenible.

FUTURAS MEJORAS

Este sistema, si bien cumple con los objetivos planteados en cuanto al control automatizado de las variables ambientales dentro de la cámara de fructificación, está lejos de ser una solución definitiva o completamente optimizada. Por el contrario, ha sido

concebido desde su diseño inicial como una plataforma modular, flexible y escalable, capaz de adaptarse a futuras mejoras e incorporaciones tecnológicas. Esta característica resulta fundamental en proyectos de ingeniería aplicada, donde la posibilidad de evolución progresiva permite no solo mejorar el rendimiento del sistema, sino también ampliar su campo de aplicación y robustecer su confiabilidad operativa.

En este sentido, se identifican diversas líneas de mejora que podrían implementarse en etapas posteriores del desarrollo, orientadas tanto a optimizar el funcionamiento interno del sistema como a incrementar su nivel de automatización, eficiencia energética y capacidad de supervisión inteligente.

Algunas de las posibles mejoras consideradas pueden ser, mejorar la aislación térmica de la cámara de fructificación para optimizar el rendimiento energético del sistema, reduciendo pérdidas de calor, disminuir la activación de actuadores prolongando su vida útil; incorporar una pequeña bomba dentro del recipiente para que regrese el agua del reciento hacia el recipiente principal, para que siempre haya agua fría y favorezca la recirculación continua, evitando zonas de estancamiento de agua que suelen ser propicias para la proliferación de bacterias, algas u otros contaminantes; aumentar el volumen de la cámara de fructificación para tener una mayor capacidad productiva del sistema; agrandar el gabinete que aloja las placas para mejor organización interna, facilitando tareas de mantenimiento, reducir interferencias y mejorar la disipación térmica de los componentes; integrar técnicas de IA, mediante el uso de visión artificial, permitiendo realizar un análisis más avanzado del estado del cultivo. A través del procesamiento de imágenes, sería posible detectar anomalías en el crecimiento, cambios de coloración, presencia de contaminantes, etc.; incorporar un servidor privado para que la aplicación móvil y futuras plataformas estén absentes de riesgos asociados a la seguridad y privacidad de los datos.

Con la implementación progresiva de las mejoras propuestas, el proyecto podría evolucionar hacia una versión más avanzada, integrando nuevas tecnologías y aumentando su nivel de automatización, inteligencia y eficiencia. Este proceso de evolución no solo potenciaría el desempeño del sistema, sino que también permitiría escalar su aplicación a contextos productivos de mayor envergadura, así como consolidarlo como una plataforma base para futuras investigaciones, desarrollos tecnológicos o innovaciones en el ámbito de la agricultura controlada y la producción de hongos en ambientes artificiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

“Cátedras de Sistemas de Control” – TEO –, C. “sistemas. (s/f). - ACCIONES DE CONTROL-. Edu.ar. Recuperado el 15 de octubre de 2025, de https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wpcontent/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf

Carrasco-González, J. A., Serna-Saldívar, S. O., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2017). Nutritional composition and nutraceutical properties of the *Pleurotus* fruiting bodies: Potential use as food ingredient. *Journal of Food Composition and Analysis: An Official Publication of the United Nations University, International Network of Food Data Systems*, 58, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.016>

Completo, V. mi P. (s/f). Control todo o nada (ON-OFF). Blogspot.com. Recuperado el 15 de octubre de 2025, de <https://ceiisa.blogspot.com/2015/01/control-todo-o-nada-on-off.html>

Gambo, A. O. E., Pettinelli, B., Renard, D., Annebicque, D., Emprin, F., & Riera, B. (2025). Introduction to traceability and IoT with HOME I/O and MIT app inventor. *IFAC-PapersOnLine*, 59(7), 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.08.024>

Instituto Europeo de Química, Física y Biología (2023). ¿Qué es el

bioprocesamiento y qué materias primas pueden utilizarse en él? (2023, julio 17). <https://ieqfb.com/que-es-el-bioprocesamiento/>

Luenberger, D. G., & Ye, Y. (2016). *Linear and nonlinear programming*. Springer International Publishing.

M. A. C. (2015, julio 1). How to Use DHT-22 sensor - Arduino Tutorial. Instructables. <https://www.instructables.com/How-to-use-DHT-22-sensor-Arduino-Tutorial/>

Ogata, K. (2006). *Discrete Time Control Systems*. Dorling Kindersley.