UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

“Sistema de monitoreo simultáneo de temperatura y CO_2 para el cultivo de hongos en invernaderos con diferentes sustratos orgánicos.”

Trabajo de grado previo a la obtención de título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Propuesta tecnológica

Autor:

Rafael Patricio Ayala Quishpe

Director:

MSc. Salazar García Hugo Eduardo

Asesor:

MSc. Paz Espinoza Juan Carlos

Ibarra, septiembre del 2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172723991-3		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Ayala Quishpe Rafael Patricio		
DIRECCIÓN:	Cayambe-Cangahua Calle Pedro Vicente Maldonado Y Vicente Rocafuerte		
EMAIL:	rpayalaq@utn.edu.ec – rafaayala3425@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	0223610855	**TELÉFONO MÓVIL:**	0995635784

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Sistema de monitoreo simultáneo de temperatura y CO_2 para el cultivo de hongos en invernaderos con diferentes sustratos orgánicos.
AUTOR (ES):	Ayala Quishpe Rafael Patricio
FECHA: DD/MM/AAAA	4/09/2025
PROGRAMA:	■ GRADO ☐ POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Salazar Garcia Hugo Eduardo, MSc. Paz Espinoza Juan Carlos

1. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 04 días del mes de septiembre de 2025

EL AUTOR:

.....

Nombre: Rafael Patricio Ayala Quishpe

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 04 de septiembre de 2025

MSc. Salazar García Hugo Eduardo

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)……

MSc. Salazar García Hugo Eduardo

C.C.: 1002582177

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "SISTEMA DE MONITOREO SIMULTÀNEO DE TEMPERATURA Y CO_2 PARA EL CULTIVO DE HONGOS EN INVERNADEROS CON DIFERENTES SUSTRATOS ORGÁNICOS." elaborado por RAFAEL PATRICIO AYALA QUISHPE, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f)……

MSc. Salazar García Hugo Eduardo

C.C.: 1002582177

(f)……

MSc. Paz Espinoza Juan Carlos

C.C.: 1002834800

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, paciencia y sacrificio, que han sido mi mayor ejemplo y sostén en cada paso de mi vida universitaria.

A mis hermanos, por su compañía y el ánimo que siempre me brindaron en los momentos más difíciles.

Y a mis abuelitos, que con su fe y confianza en mí me dieron la motivación para seguir adelante y alcanzar esta meta.

Este logro también les pertenece.

Rafael

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar con éxito este proyecto.

A mis padres, por su apoyo incondicional, su amor y sus sacrificios, que fueron el pilar fundamental para alcanzar este logro.

Y a mis docentes, quienes con paciencia, dedicación y conocimiento me guiaron en este camino académico, dejando en mí enseñanzas que llevaré para siempre.

Rafael

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un sistema de monitoreo simultáneo de temperatura y concentración de dióxido de carbono (CO_2) para optimizar el cultivo de hongos ostra en invernaderos utilizando diferentes sustratos orgánicos. El sistema está basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) e integra sensores de bajo costo, microcontroladores ESP32 y la plataforma Arduino IoT Cloud para la visualización remota de datos ambientales en tiempo real.

Se implementaron tres módulos independientes que permiten evaluar el comportamiento de variables ambientales en cultivos con sustratos de aserrín de eucalipto, paja de trigo y cascarilla de café. Los resultados obtenidos evidencian la viabilidad del sistema como herramienta de apoyo para agricultores, permitiendo un control más preciso de las condiciones de cultivo, reduciendo riesgos y optimizando la producción de hongos mediante decisiones informadas y supervisión continua.

Este desarrollo contribuye al aprovechamiento de residuos orgánicos y fortalece prácticas de agricultura de precisión mediante soluciones accesibles y replicables en contextos locales.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, IoT, CO_2, cultivo de hongos, Arduino IoT Cloud, sustratos orgánicos.

ABSTRACT

The present work develops a system for simultaneous monitoring of temperature and carbon dioxide (CO_2) concentration to optimize the cultivation of oyster mushrooms in greenhouses using different organic substrates. The system is based on Internet of Things (IoT) technologies and integrates low-cost sensors, ESP32 microcontrollers, and the Arduino IoT Cloud platform for remote real-time visualization of environmental data.

Three independent modules were implemented to evaluate the behavior of environmental variables in crops using eucalyptus sawdust, wheat straw, and coffee husk substrates. The results obtained demonstrate the feasibility of the system as a support tool for farmers, enabling more precise control of cultivation conditions, reducing risks, and optimizing mushroom production through informed decision-making and continuous monitoring.

This development contributes to the utilization of organic waste and strengthens precision agriculture practices through accessible and replicable solutions in local contexts.

Keywords: Environmental monitoring, IoT, CO_2, mushroom cultivation, Arduino IoT Cloud, organic substrates.

INDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA II

2. CONSTANCIAS III

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR . IV

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR V

DEDICATORIA VI

AGRADECIMIENTO VII

RESUMEN VIII

ABSTRACT IX

INDICE DE CONTENIDOS X

ÍNDICE DE FIGURAS XIV

ÍNDICE DE TABLAS XVI

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1

1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Objetivos 2

1.2.1 General 2

1.2.2 Específicos 2

1.3 Alcance y delimitación 2

1.4 Justificación 3

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 4

2.1 Antecedentes 4
2.2 Generalidades sobre los hongos 5
2.3 Cultivo de hongos ostra 6
2.3.1 Selección del sustrato 6
2.3.2 Preparación del material de cultivo 7
2.3.3 Pasteurización 7
2.3.4 Siembra 8
2.3.5 Incubación del hongo 8
2.3.6 Fructificación 8
2.4 Influencia de factores ambientales 9
2.4.1 Temperatura 9
2.4.2 Dióxido de carbono 9
2.4.3 Humedad 10
2.5 Agricultura 4.0 11
2.6 Agricultura inteligente 11
2.7 Internet de las Cosas IoT 12
2.8 Sensores 15
2.8.1 Sensores medidores de CO_2 15
2.8.2 Sensor de temperatura y humedad 16
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO 18
3.1 Enfoque y tipos de investigación 18
3.2 Descripción del área de estudio 18
3.3 Diseño de la Investigación 19

3.3.1 Fase 1: Adquisición de la información 19
3.3.2 Fase 2: Diseño del sistema de monitoreo 19
3.3.3 Fase 3: Construcción del Dispositivo 20
3.3.4 Fase 4: Pruebas de Funcionamiento 20
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS 21
4.1 Descripción y requerimientos del sistema 21
4.2 Solución propuesta 22
4.3 Especificaciones del sistema de monitoreo diseñado 23
4.3.1 Arquitectura del sistema 24
4.3.2 Selección de componentes 24
4.3.3 Plataforma IoT 28
4.3.4 Interfaz de usuario 29
4.4 Diagrama de conexión del Hardware 30
4.5 Estimación del consumo eléctrico 32
4.6 Diseño de la carcasa 33
4.7 Implementación 34
4.8 Análisis de costos 38
4.9 Funcionamiento 39
4.9.1 Resultados de temperatura 39
4.9.2 Resultados de humedad 40
4.9.3 Resultados de dióxido de carbono (CO_2) 41
4.10 Mantenimiento y calibración 42
CONCLUSIONES 45

RECOMENDACIONES 46

BIBLIOGRAFÍA.....47

ANEXOS.....51

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Representación del cultivo de *Flammulina velutipes* en ambientes con condiciones controladas y sin control[19], [20]. 10

Fig. 2.2 Logo de Arduino IoT Cloud[27]. 14

Fig. 2.3 Principio de detección del dióxido de carbono[29]. 15

Fig. 2.4 Esquema de sensor de gases de combustión[30], [31]. 16

Fig. 3.1 Localización geográfica del laboratorio de Agroindustria. 18

Fig. 4.1 Esquema de la tarjeta ESP32 WROOM 32E[38] 25

Fig. 4.2 Sensor MQ-135 26

Fig. 4.3 Sensor DHT22 27

Fig. 4.4 Esquema de integración de sensores y microcontroladores en red IoT basada en Arduino 28

Fig. 4.5 Interfaz de usuario 29

Fig. 4.6 Interfaz de la aplicación móvil del sistema de monitoreo. 30

Fig. 4.7 Diagrama de conexión 30

Fig. 4.8 Diseño del circuito impreso realizado en PCB Wizard. 31

Fig. 4.9 Modelado 3D de los componentes eléctricos. 31

Fig. 4.10 Diseño de la carcasa 33

Fig. 4.11 Estanterías usadas en el cultivo de hongos. 34

Fig. 4.12 Micelio de hongo ostra blanco. 35

Fig. 4.13 Pasteurización del sustrato. 36

Fig. 4.14 Escurrido del sustrato. 36

Fig.4.15 Inicio de proceso de inoculación. 37

Fig. 4.16 Propagación del micelio. 37

Fig. 4.17 Etapa de Fructificación. 38

Fig. 4.18 Comparativa de medición de sensores de temperatura en los tres diferentes sustratos..40

Fig. 4.19 Comparativa de medición de humedad en los tres diferentes sustratos.....40

Fig. 4.20 Comparativa de medición de sensores de CO_2 en los tres diferentes sustratos. 41

Fig. 4.21 Circuito experimental comparativo para validación de sensores de CO_2 43

Fig. 4.22 Comparación de lecturas entre el sensor MQ-135 y el sensor MH-Z19B durante la calibración empírica. 44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Condiciones ambientales óptimas para la incubación y fructificación del hongo ostra[18]. 11

Tabla 4.1 Comparación de microcontroladores utilizados en sistemas de monitoreo[35], [36], [37]. 25

Tabla 4.2 Comparación de sensores de CO_2 utilizados en sistemas de monitoreo[39], [40], [41]. 26

Tabla 4.3 Comparación de sensores de temperatura y humedad utilizados en sistemas de monitoreo[42], [43], [44]. 27

Tabla 4.4 Asignación de pines entre el ESP32 y los componentes del sistema. 32

Tabla 4.5 Precio de los sensores y componentes del sistema de monitoreo. 38

Tabla 4.6 Precio y cantidad de sustratos utilizados en cada tratamiento. 39

Tabla 4.7 Costo total estimado del sistema de monitoreo y cultivo. 39

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En Ecuador, la agricultura, silvicultura y pesca representó el 7,7% de su PIB para el 2023[1], destacándose como unas de las actividades con gran relevancia en el país, ya que están directamente vinculadas a la seguridad alimentaria[2].

Sin embargo, durante el desarrollo de estas actividades se generan grandes cantidades de residuos que por lo general se consideran como subproductos de muy baja importancia económica y por ende no se les proporciona un tratamiento adecuado siendo en su mayoría incinerados[3]. Solo cierto porcentaje de estos residuos son usado en otras actividades como alimento para varias especies animales, reincorporado al suelo o como materia prima para otros procesos industriales. Esto provoca una serie de impactos ambientales negativos debido a que no son aprovechados adecuadamente.

En el contexto de esta problemática se plantea al cultivo de hongos como una práctica que pueda ayudar en el aprovechamiento de estos recursos[3]. Esto se debe a que es posible hacer uso de diferentes residuos orgánicos como un excelente sustrato, y a que los hongos tienen un ciclo de crecimiento corto y alta productividad[4]. Además, los hongos destacan por ser una importante fuente de nutrientes y compuestos bioactivos[5]. No obstante, para poder maximizar la producción es necesario mantener ciertas condiciones ambientales al momento del cultivo, puesto que estas pueden influir de manera directa en la seta.

Una de las condiciones clave que se debe tomar en cuenta en el cultivo de hongos son la humedad, la temperatura y el dióxido de carbono (CO_2). El motivo de esto es porque con una humedad adecuada se beneficia la formación de micelio y la fructificación, mientras que al mantener un

nivel de CO_2 apropiado en cada fase del cultivo ayuda en la morfogénesis, influyendo directamente tanto la forma y tamaño del cuerpo fructífero[6]. Pero para garantizar estas condiciones es necesario disponer de herramientas que permitan realizar un control sencillo y preciso.

Por estas razones para este proyecto se plantea que diseñar un dispositivo que permita monitorear y almacenar los datos medidos de temperatura, humedad y CO_2, y que además estos datos puedan ser vistos de manera remota. Con el fin de permitir una supervisión constante y una respuesta rápida a cambios inesperados, mejorando así la productividad y al mismo tiempo brindar a los agricultores una herramienta tecnológica que permita optimizar sus procesos de producción.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Desarrollar un sistema de monitoreo simultáneo de temperatura y CO_2 para el cultivo de hongos con diferentes sustratos orgánicos.

1.2.2 Específicos

- Identificar el método adecuado para el monitoreo de CO_2 y temperatura enfocada en el cultivo de hongos en invernadero mediante el uso de Internet de las Cosas.
- Diseñar un sistema que cumpla con las especificaciones requeridas para el monitoreo.
- Validar el funcionamiento del dispositivo en un espacio piloto.

1.3 Alcance y delimitación

El presente proyecto tiene como finalidad diseñar e implementar un dispositivo de monitoreo con el uso de la tecnología de Internet de las Cosas, que permita al usuario visualizar en tiempo real

parámetros como la temperatura y el CO_2 en cultivos de hongos. Se buscará desarrollar una aplicación que le permitirá al usuario poder visualizar los datos obtenidos del monitoreo de manera remota, para posteriormente poder probarlo en un sitio experimental para las pruebas de funcionamiento, mediante el uso de diferentes sustratos. El dispositivo funciona mediante energía eléctrica suministrada de una fuente cercana al sitio de trabajo.

1.4 Justificación

Este proyecto de investigación surge a partir del contexto de la agricultura moderna en donde existe la necesidad de diseñar e implementar nuevos dispositivos de medición de parámetros ambientales que sean sencillos de usar y proporcionen datos que ayuden al cultivo.

El cultivo de hongos es una alternativa prometedora en la agricultura moderna, esto se explica gracias a que se puede hacer uso de diferentes tipos de residuos orgánicos obtenidos de otros procesos de producción, ya que estos son una gran fuente de nutrientes. Sin embargo, una de las condiciones para maximizar su potencial es el de contar con herramientas tecnológicas que faciliten un control preciso de las condiciones ambientales. Por este motivo se busca para este proyecto diseñar un sistema de monitoreo remoto de temperatura y CO_2, que sea capaz de brindar a los agricultores una herramienta que facilite la supervisión de las condiciones ambientales en el cultivo de los hongos, ayudando en la toma de decisiones con el fin de optimizar los procesos del cultivo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se resume la información empleada para desarrollar la solución planteada en el capítulo previo. Esto se realiza mediante la revisión de antecedentes, fundamentos y tecnologías aplicadas. Se exploran los aspectos clave relacionados con el cultivo de hongos, el monitoreo remoto y el uso de residuos orgánicos en la industria de alimentos.

2.1 Antecedentes

Este trabajo está fundamentado por medio de información existente, acerca del cultivo de hongos en diferentes condiciones y del contexto de la agricultura moderna en donde existe la necesidad de diseñar e implementar nuevos dispositivos de medición de parámetros ambientales que ayuden en el cultivo de hongos.

Sakamoto Yuichi [6] en su artículo de revisión sobre los hongos formadores de cuerpos fructíferos, habla acerca de la influencia que tienen los diferentes factores ambientales en el proceso de desarrollo de los cuerpos fructíferos en los hongos. En específico, resalta que niveles elevados de CO_2 influyen directamente en la formación del píleo, lo que impacta en el desarrollo del cuerpo fructífero del hongo.

Gavilánez Luis [7] diseñó un dispositivo de monitoreo de CO_2, humedad y temperatura, el cual fue probado en el cultivo de hongos en un invernadero ubicado en el sector de Ibarra. El sistema que diseñó utilizó un sensor K30 para la medición de los niveles de CO_2, un sensor LM35 para el registro de temperatura y fue controlado por una placa de Arduino Mega. Este estudio se trata de una investigación previa desarrollada en la Universidad Técnica del Norte en el cual se planteó como mejora para el mismo la implementación de funciones adicionales, entre ellas el monitoreo remoto y el análisis del CO_2 en estudios relacionados a su impacto en los cultivos.

Adicional a esto en la Universidad Técnica del Norte se han desarrollado diferentes trabajos de investigación enfocados en los hongos ostra (*Pleurotus ostreatus y Pleurotus djamor*), especialmente en el uso de diferentes sustratos alternativos como fuentes de nutrientes para el cultivo como aserrín, paja de cebada, cascarilla de café, bagazo de caña, entre otros residuos lignocelulósicos. En algunos de estos trabajos se han hablado sobre la necesidad de un sistema de monitoreo de las condiciones ambientales, esto con el fin de tener un control preciso y poder analizar lo que las variaciones ambientales provocan en los hongos.

2.2 Generalidades sobre los hongos

Los hongos constituyen un diverso y extenso grupo de organismos que incluyen a los mohos, las setas y las levaduras[8], siendo en la actualidad descrito alrededor de 100 mil especies de hongos, pero se estima que pueden existir aproximadamente entre 2,2 a 3,8 millones de especies[9]. Constituyen un conjunto de seres vivos que se caracterizan por ser organismos heterótrofos, carentes de clorofila, raíces y hojas. Su forma de reproducción es mediante esporas y tiene tres diferentes maneras de subsistir: tipo parasitaria, simbiótica o mediante la descomposición de materia orgánica[10].

Los hongos ostra o gírgola (Pleurotus ostreatus), reciben su nombre debido a su forma y textura resbaladiza similar al de una ostra. Se encuentra en el grupo de los basidiomicetos de orden Agaricales, y son comestibles. Las características de esta especie de hongos es tener un sombreo que crece hasta 13 cm de diámetro con una superficie lisa y brillante, pueden ser de diferentes colores dependiendo de la variedad y poseen láminas apretadas, delgadas y de color blanquecino. Mayormente son cultivados en países de Asia como China y Japón, pero cierto porcentaje también es producido en Europa y América[11].

El cultivo de hongos ha mostrado una tendencia al alza, esto tanto en términos de producción como consumo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, la producción de hongos comestibles para el año 2000 alcanzo alrededor de las 2.6 millones de toneladas y para 2007 esta cifra sobrepasó los 3.4 millones[3].

2.3 Cultivo de hongos ostra

Al igual que un cultivo tradicional, a los hongos ostra se debe proporcionar ciertos cuidados al momento del cultivo para maximizar la producción, en las cuales destacan las siguientes: entrega de alimento, suministrar agua y cuidar ciertas condiciones ambientales con el fin de garantizar su crecimiento[4].

2.3.1 Selección del sustrato

Para alimentarse el género Pleurotus toma los nutrientes del entorno donde crece, esta actividad la realiza a través la descomposición de compuestos como la celulosa y la lignina, mismos que se encuentran presentes en residuos agrícolas[12].

El sustrato es el medio orgánico donde se siembra el inóculo y entre los más comunes dentro del cultivo de hongos se encuentran: la paja proveniente de cultivos de gramíneas, subproductos o residuos derivados de la producción del café (borra o cascarilla), el bagazo de caña y la viruta proveniente de algunos tipos de madera. En algunos casos se recomienda para realizar el medio de cultivo la combinación de estos con el fin de aumentar la rentabilidad en la producción[13].

Al momento de la selección del sustrato se debe considerar ciertos criterios como la abundancia y la disponibilidad, esto se debe a que los sustratos pueden darse de manera estacionaria, provocando que su uso pueda verse afectado durante ciertos periodos de tiempo[14].

Existen otros factores relevantes a tomar en cuenta como: la capacidad de retención de humedad, un pH ligeramente ácido o neutro, una granulación que permita la circulación de aire y una composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina[15]. Sin embargo, existen cierto tipo de sustratos que contienen compuestos o características que obstaculizan el crecimiento del micelio[16].

2.3.2 Preparación del material de cultivo

Para el cultivo de hongos ostra lo primero que se realiza es la eliminación de todo tipo de impurezas como polvo, insectos o restos de rastrojos ajenos. Después se procede a picar el sustrato de ser necesario, recortándolo a un tamaño de 2.5 a 5 cm, garantizando así un aumento en la superficie de contacto, esto busca mejorar la estructura física del sustrato y facilitar así la circulación de agua y aire[15].

Una vez picado el sustrato se procede a dejarlo en remojo en un recipiente con agua alrededor de 1 a 3 días, esto se realiza con el fin de incrementar sus niveles de humedad en toda el área de cultivo y favoreciendo así la transmisión de calor, siendo esto un paso necesario previo al proceso de pasteurización[17].

2.3.3 Pasteurización

La pasteurización es un tratamiento de calor que se realiza para eliminar microrganismos presentes en el sustrato, con el fin de evitar su propagación y dificulten el crecimiento de las setas. El tiempo estimado para este proceso es alrededor de una hora si es un pasteurizado por inmersión y de 2 a 3 horas si es un pasteurizado al vapor. En cualquiera de estos dos métodos de pasteurización se debe exponer al sustrato a una temperatura superior a los 70º[15], [16]. Posterior a esto se debe dejar enfriar el sustrato hasta que alcance una temperatura de 30º.

2.3.4 Siembra

Para sembrar los hongos ostra debe realizarse en un ambiente con temperaturas inferiores a 30º y por lo general se usan bolsas o recipientes plásticos. Para garantizar propagación del micelio la siembra se realiza agregando de manera intercalada una capa de sustrato y una capa delgada de micelio hasta rellenar el recipiente, el otro método es agregar el micelio únicamente en los bordes de la bolsa del sustrato[15].

2.3.5 Incubación del hongo

Para esta actividad se debe contar con un ambiente limpio en un cuarto cerrado y oscuro, en este sitio se colocan las bolsas cerradas. Al día siguiente se deben realizar pequeñas perforaciones a las bolsas con el fin de evitar el exceso de humedad. Los hongos se mantienen en esta área hasta que el micelio cubra todo el sustrato[15].

2.3.6 Fructificación

Una vez el micelio cubre toda la bolsa es necesario modificar las condiciones ambientales del cultivo para inducir la formación de primordios. Este proceso se realiza mediante la perforación de las bolsas con un tamaño de 5 cm, permitiendo así la propagación del micelio y el surgimiento de los primordios[16].

Una vez aparezca el primordio este dura en llegar a su etapa adulta alrededor de 5 días, cuando esto pase es recomendable que se coseche las setas con un corte desde la base y se mantenga en refrigeración, se puede obtener hasta tres cosechas con el mismo sustrato y no es necesario volver a la etapa de incubación. Sin embargo, con cada cosecha el porcentaje nutricional disminuye con respecto al anterior[15].

2.4 Influencia de factores ambientales

2.4.1 Temperatura

Uno de los factores principales a tomar en cuenta al momento del cultivo es la temperatura y es el que se estudia con mayor frecuencia. Los rangos de temperatura tanto máximo como mínimos son fundamentales para determinar la supervivencia de una especie fúngica. El mayor interés en investigaciones experimentales está en la temperatura óptima, la producción de productos y la esporulación[18].

Los hongos basidiomicetos por lo general presentan un incremento de su actividad enzimática a temperaturas altas. Sin embargo, si esta supera ciertos rangos altos ocasiona la inactivación de las enzimas, afectando así el metabolismo y por consecuencia el crecimiento. La causa de que un hongo no se pueda desarrollar a temperaturas altas puede deberse a la imposibilidad de sintetizar ciertas vitaminas necesarias[18].

Para garantizar el crecimiento del micelio en la especie Pleurotus ostreatus en la etapa de incubación, es necesario mantener rangos de temperatura que oscilen entre 7º y 37º, con rangos óptimos que varíen entre el 26º y 28º. Por otro lado, durante el periodo de fructificación los rangos varían dependiendo la variedad, en el caso de cepas de temperatura alta van desde los 25º a los 30º, para las variedades de temperatura media son de 16º a 22º y las de temperatura fría van de 12º a 15º[18].

2.4.2 Dióxido de carbono

Los hongos dependen principalmente del oxígeno y el dióxido de carbono presentes en el aire. Sin embargo, en los hongos basidiomicetos la presencia excesiva de dióxido de carbono en el aire puede provocar malformaciones. Unos ejemplos de estas afecciones son el alargamiento del píleo,

un marcado alargamiento del estipe y en casos extremos con concentraciones superiores al 5% pueden provocar la inhibición total de la formación de primordios[18].

Sin embargo, en algunos cultivos como el de la especie *Flammulina velutipes,* se utilizan recipientes especiales con el objetivo de mantener concentraciones altas de CO_2, logrando conseguir que los hongos adquieran ciertas características deseadas en esta especie como estipes largos con píleos pequeños[18].

Fig. 2.1 Representación del cultivo de *Flammulina velutipes* en ambientes con condiciones controladas y sin control[19], [20].

2.4.3 Humedad

Por lo general, la mayoría de los hongos requieren para su desarrollo niveles altos de humedad. Es recomendable proporcionar una humedad relativa que varía entre el 95 y el 100% y un contenido de humedad del sustrato del 50 a al 70%, esto favorece al crecimiento óptimo de la mayoría de los blastomicetos, sin embargo, existen algunas especies de hongos adaptados a un bajo nivel de humedad[18].

En la **Tabla 2.1** se muestra un resumen de las condiciones ambientales ideales para la producción del hongo ostra en las etapas de incubación y fructificación:

Tabla 2.1

Condiciones ambientales óptimas para la incubación y fructificación del hongo ostra[18].

Proceso	Condiciones	Rangos
Incubación	Temperatura	De 26º a 28º
	Humedad relativa	Del 95% al 100%
	Concentración de CO_2	Mayor al 1100 ppm
	Luminosidad	Ambiente Oscuro
	Duración	De 15 a 30 días
Fructificación	Temperatura	De 16º a 22º
	Humedad ambiental	Del 95% al 100%
	Concentración de CO_2	Menor a 700 ppm
	Luminosidad	Luz indirecta

2.5 Agricultura 4.0

La agricultura 4.0 es la integración de una serie de innovaciones tecnológicas enfocadas en la optimización de la producción, mejora de la calidad, minimización del impacto ambiental y los riesgos relacionados con la producción agrícola. Esta revolución representa un nuevo nivel de organización y control, se basa en la toma y análisis en tiempo real de toda la cadena de producción[21].

Dentro de la agricultura 4.0, las tecnologías más utilizadas incluyen drones, sensores ambientales, el Internet de las Cosas (IoT) y la robótica. Estas soluciones desempeñan un papel clave dentro de la cadena de producción, interviniendo en tareas que van desde la vigilancia de las condiciones ambientales hasta la automatización y regulación de los procesos agrícolas.[21].

2.6 Agricultura inteligente

A medida que surgen nuevas máquinas y sensores inteligentes, los procesos agrícolas estarán basados cada vez más en los datos. La agricultura inteligente se define como integración de tecnologías al proceso de producción agrícolas con el fin de minimizar las pérdidas y mejorar la eficiencia en la producción[22].

Por su parte, la agricultura de precisión busca implementar sistemas de soporte que permita la toma de decisiones más acertadas, optimizando el uso de insumos y prolongando la conservación de los recursos[21].

Las principales ventajas que ofrece la agricultura de precisión son las siguientes:

- Reducción de costos de producción.
- Mayor margen de rendimiento.
- Incremento en las cosechas promovido por el manejo adecuado de recursos.

2.7 Internet de las Cosas IoT

Internet de las Cosas o IoT, es una red que interconecta de objetos tanto físicos como virtuales valiéndose de internet. Así cualquier dispositivo que sea capaz de establecer una conexión a Internet puede considerarse como una "cosa" en el contexto de IoT, como ejemplo están los electrodomésticos, electrónicos, muebles, maquinas agrícolas o industrial e incluso personas[23].

Aunque este concepto no es reciente, su adopción ha crecido notablemente en los últimos años, impulsada principalmente por avances tecnológicos como la mejora del hardware, la conectividad a internet, la comunicación inalámbrica entre dispositivos, la computación en la nube, la inteligencia artificial y el análisis de BIG DATA. La combinación de estas innovaciones ha permitido desarrollar una red de dispositivos capaces de intercambiar información y responder de manera activa a las señales recibidas dentro del sistema.[24].

La estructura de IoT se organiza en cuatro niveles, tomando en cuenta los elementos esenciales que conforman una solución de este tipo:

- Aplicación: monitoreo de plantaciones, control de enfermedades, riego, etc.

- Procesamiento: almacenamiento, filtración, procesamiento y análisis de datos, etc.
- Transporte: protocolo de red, protocolos de aplicación, etc.
- Percepción: nodos de sensores, GPS, etc.

Un sistema IoT está compuesto por sensores y actuadores conectados a una unidad central de procesamiento y recopilar información, que es enviarla mediante una red de comunicación a plataformas de almacenamiento y visualización en la nube[24].

2.7.1 Comunicación remota en sistemas IoT

Un componente fundamental en sistemas IoT es la comunicación remota, esta permite la transferencia de datos desde dispositivos de campo hasta servidores o plataformas en la nube, ayudando así en su análisis y gestión. Para llevar a cabo esto se emplean diversos protocolos de comunicación como HTTP, CoAP o MQTT, estos protocolos tienen características específicas que los hacen más o menos adecuados según la complejidad y restricciones de cada aplicación[25].

CoAP es un protocolo basado en el modelo cliente-servidor desarrollado para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT). Su estructura se inspira en la World Wide Web y en HTTP, y está orientado a la comunicación máquina a máquina (M2M), como ocurre en sistemas de energía inteligente y gestión de edificios. Destaca por su compatibilidad con redes y dispositivos con recursos limitados, así como por su capacidad de integración con HTTP a través de proxies simples[26].

Por su parte, MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) se ha consolidado como uno de los protocolos más empleados en entornos IoT. Gracias a su arquitectura ligera basada en cliente-servidor, facilita que dispositivos con limitaciones de recursos transmitan información de manera eficiente y confiable[26].

2.7.2 Plataformas IoT en la agricultura

Actualmente, hay múltiples plataformas y herramientas que facilitan la comunicación en entornos IoT. Estas soluciones son fundamentales para los sistemas de monitoreo remoto, ya que funcionan como un enlace entre los dispositivos físicos y los usuarios, permitiendo la visualización de los datos recopilados desde cualquier ubicación. Dependiendo de la plataforma utilizada, es posible acceder a diversas funcionalidades y opciones de personalización que se ajustan a los requerimientos particulares de cada proyecto.

2.7.3 Arduino IoT Cloud

Arduino IoT Cloud es una plataforma de desarrollo orientada a estudiantes, makers y profesionales. Permite trabajar con diversas placas de desarrollo como ESP32, Arduino, Raspberry Pi y STM32, y ofrece herramientas para gestionar de manera integral los proyectos, abarcando desde la creación de hardware y firmware, pasando por la programación, hasta la conexión con la nube y el desarrollo de aplicaciones móviles.[27].

Fig. 2.2 Logo de Arduino IoT Cloud[27].

Arduino captura eventos utilizando el protocolo MQTT mediante un flujo de datos estructurado. La interfaz de línea de comandos (CLI) permite interactuar con Arduino IoT Cloud a través de comandos directos. La comunicación se realiza mediante una conexión HTTPS segura, que emplea credenciales de clave API guardadas en el dispositivo local para la autenticación[27].

2.8 Sensores

Los sensores son elementos encargados de adquirir las variaciones físicas y convertirlas en señales eléctricas. Las variables físicas pueden ser de tipo mecánico, óptico, eléctrico, magnético y químico. Se los puede clasificar de acorde con su señal de salida (análoga y digital) y a su parámetro eléctrico.

2.8.1 Sensores medidores de CO_2

2.8.1.1 Sensores ópticos

Los sensores ópticos de CO_2 tipo NDIR operan mediante un indicador fluorescente o un colorímetro alojado en una membrana permeable. Estos sensores contienen una fuente de luz infrarroja que pasa a través de una celda de muestra, donde el CO_2 absorbe parte de la luz en una longitud de onda determinada. Un filtro óptico permite pasar solo la longitud característica del CO_2 hacia un detector que capta la cantidad de luz que no fue absorbida, para que al final la señal resultante sea traducida mediante un microcontrolador en concentración por partes por millón(ppm)[28].

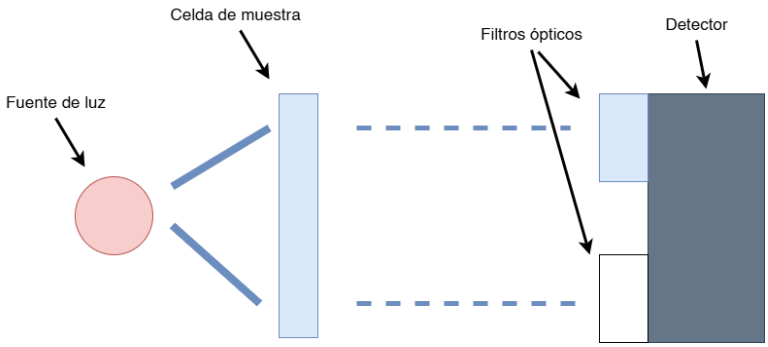


Fig. 2.3 Principio de detección del dióxido de carbono[29].

2.8.1.2 Sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos de CO_2 funcionan mediante la generación de una señal eléctrica a partir de una reacción química controlada entre el dióxido de carbono y un electrolito. Por lo general se encuentra formado por tres electrodos: un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar, todos estos se encuentran inmersos en una solución electrolítica o en contacto con una membrana permeable al CO_2[28].

Al entrar en contacto con la membrana, el CO_2 se disuelve y produce ácido carbónico, liberando iones de hidrógeno que afectan el potencial electroquímico registrado. El cambio de voltaje obtenido guarda relación directa con la cantidad de CO_2 presente en el aire. Los sensores electroquímicos se caracterizan por ser sensibles y compactos, pero tienen un tiempo de vida útil limitado ocasionado por el consumo de sus reactivos internos y con el tiempo es necesario una calibración[28].

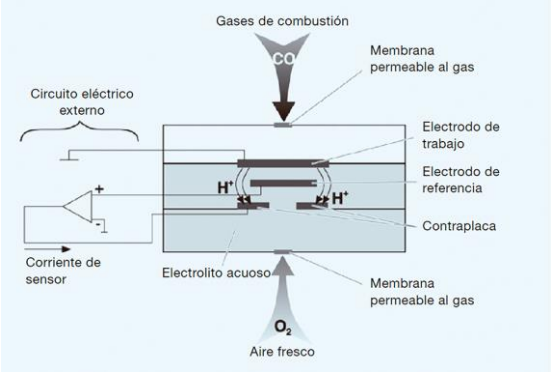


Fig. 2.4 Esquema de sensor de gases de combustión[30], [31].

2.8.2 Sensor de temperatura y humedad

Los sensores de temperatura son dispositivos capaces de detectar y registrar cambios térmicos en el ambiente o en superficies específicas. Estos sensores se basan en diferentes principios de funcionamiento, como la resistencia eléctrica (termistores), la termoelectricidad (termopares) o

la radiación infrarroja. La elección del tipo de sensor depende de la precisión requerida, el rango de medición y las condiciones ambientales del entorno. El uso de sensores de temperatura ha demostrado ser esencial, por ejemplo, en la agricultura de precisión, donde permite optimizar el crecimiento de cultivos mediante un control más eficiente del microclima[32].

Por otro lado, los sensores de humedad son dispositivos diseñados para medir la cantidad de vapor de agua presente en el aire, generalmente expresada como humedad relativa (HR), la cual es el porcentaje de la cantidad de vapor de agua en el aire respecto a la máxima posible a una temperatura dada[33].

Existen tres tipos principales de sensores de humedad: capacitivos, resistivos y térmicos. Los más comunes en aplicaciones ambientales y agrícolas son los sensores capacitivos, que consisten en un dieléctrico higroscópico colocado entre dos electrodos. La constante dieléctrica del material cambia con la humedad, lo que permite medir variaciones con buena precisión y estabilidad[34].

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque y tipos de investigación

La metodología empleada en este proyecto sigue un enfoque experimental y buscará de acuerdo con lo visto anteriormente la implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y CO_2 en un invernadero piloto, con el fin de evaluar cómo diferentes sustratos orgánicos impactan en el crecimiento de hongos bajo condiciones controladas.

El sistema se basará en tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), y el análisis será realizado sobre la base de datos obtenidos a partir de sensores.

3.2 Descripción del área de estudio

El estudio será realizado en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Agroindustrial, ubicados en el Colegio Universitario UTN, al frente de la calle Ulpiano de la Torre. En estos laboratorios se usará un área que fue usada en investigaciones previas relacionadas con el cultivo de hongos, para esto se procederá a hacer la adecuación del laboratorio y la instalación de los sensores en cada uno de los estantes de los que se dispone para realizar la investigación.

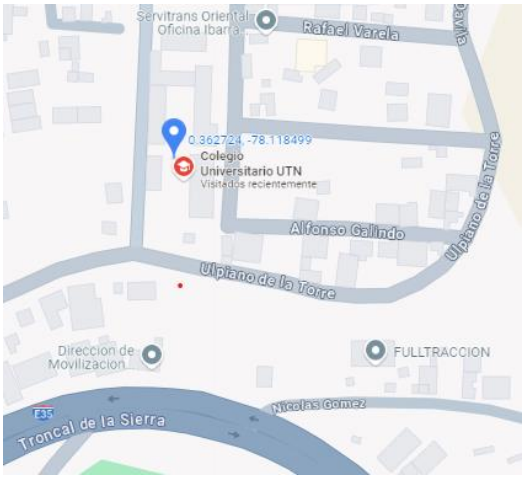


Fig. 3.1 Localización geográfica del laboratorio de Agroindustria.

3.3 Diseño de la Investigación

En esta sección se describe las diferentes fases y actividades necesarias para desarrollar el sistema de monitoreo de temperatura, humedad relativa y CO_2 planteados en los objetivos de la investigación.

3.3.1 Fase 1: Adquisición de la información

En esta fase se recopiló información referente al cultivo de hongos, el monitoreo de condiciones ambientales en el cultivo en invernaderos y la implementación de sistemas IoT en la agricultura:

Actividad 1: Investigación acerca de tema relacionados al cultivo de hongos; esta actividad permite obtener información acerca de la influencia de las condiciones ambientales en el cultivo.

Actividad 2: identificación de parámetros críticos y rangos ambientales al momento del cultivo; la actividad permite reconocer con exactitud las condiciones que deben tener los hongos para maximizar la producción.

Actividad 3: especificaciones del sistema; en esta actividad se establecen los requerimientos del sistema a diseñar.

3.3.2 Fase 2: Diseño del sistema de monitoreo

Se realizó el diseño del sistema de monitoreo a partir de los requerimientos establecidos previamente. También se realizó el diseño eléctrico y el diagrama de conexiones necesarios para la construcción del dispositivo.

Actividad 4: Selección de componentes; en esta actividad se comparan y seleccionan los componentes más apropiados para el sistema de monitoreo.

Actividad 5: Diseño eléctrico.

Actividad 6: Diagrama de conexión.

3.3.3 Fase 3: Construcción del Dispositivo

En esta fase se realizará la construcción del dispositivo y se verificará el funcionamiento de cada uno de los elementos de manera individual e integrado en el dispositivo, posteriormente se programará sus funciones.

Actividad 7: Integración de los componentes.

Actividad 8: Programación de funciones del sistema.

3.3.4 Fase 4: Pruebas de Funcionamiento

En esta fase se realizará las pruebas de funcionamiento del dispositivo de monitoreo en un área de estudio piloto. Adicional esto se ejecutarán ajustes para garantizar su correcto funcionamiento y se compararán los datos obtenidos de las diferentes muestras.

Actividad 9: implementación de un área de estudio piloto para las pruebas de funcionamiento del dispositivo.

Actividad 10: instalación y calibración de los sensores.

Actividad 11: Ajustes de funciones.

Actividad 12: comparación de los datos obtenidos de las diferentes muestras estudiadas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se describe el proceso empleado para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, así como la selección de componentes. Se abordarán etapas como la elaboración de la placa PCB, la integración de los sensores y la programación de la unidad central, esto último se realizará con ayuda del entorno de desarrollo de Arduino IoT Cloud.

4.1 Descripción y requerimientos del sistema

Para que el sistema de monitoreo simultáneo cumpla con los requerimientos planteados en los objetivos y de acuerdo a lo establecido en el marco teórico, el dispositivo debe cumplir con las siguientes características:

- Medir CO_2 en rangos estimados de 200 ppm a 1000 ppm.
- Medir humedad ambiental en rangos estimados de 50% al 95%.
- Medir la temperatura ambiental en rangos estimados de 10º a 30º.
- Permitir la visualización de datos en tiempo real y de manera remota.
- Registrar los datos medidos mediante el uso la nube o a una recopilación de datos local.
- Garantizar una estructura resistente a humedad, esto es por las condiciones ambientales propias de un invernadero.
- Usar una fuente de alimentación segura, continua y fácil de adquirir.
- Interfaz sencilla para el usuario final.
- Conexión de diferentes dispositivos con conexión con la misma plataforma IoT.

4.2 Solución propuesta

Para la solución se plantea el diseño de un dispositivo de monitoreo ambiental basado en un microcontrolador, el cual se encuentra conectado a sensores encargados de medir ciertas condiciones ambientales que influyen en el cultivo de hongos ostra. Para el desarrollo del proyecto se propone el uso de tres módulos en el que se sembrarán una variedad de hongos ostra, pero en diferentes sustratos, haciendo necesario la conexión simultanea de estos tres dispositivos con la misma aplicación.

Con base en los requerimientos identificados, se propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo ambiental orientado al cultivo de hongos ostra (*Pleurotus ostreatus*), el cual permita medir de forma simultánea y remota las variables de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono (CO_2).

La solución planteada se basa en el uso de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), integrando sensores y microcontroladores. El sistema está diseñado para operar en tiempo real y enviar la información recolectada a una plataforma en la nube, desde la cual el usuario puede acceder mediante una interfaz gráfica desde cualquier dispositivo conectado a internet.

Para la validación del sistema, se implementaron tres módulos independientes de monitoreo, cada uno ubicado en un estante con un sustrato diferente (aserrín de eucalipto, paja de trigo y cascarilla de café). Esta configuración permite comparar el comportamiento ambiental en función del sustrato, y evaluar el impacto de estas condiciones en el desarrollo del hongo.

El sistema permite, además, la expansión a múltiples puntos de monitoreo, la configuración de alertas ante valores fuera de rango, y ofrece una visualización clara de los datos históricos y en

tiempo real, lo que proporciona una herramienta útil para la toma de decisiones en procesos de agricultura de precisión.

4.3 Especificaciones del sistema de monitoreo diseñado

El sistema de monitoreo diseñado tiene como finalidad la medición simultánea de las variables ambientales que influyen directamente en el desarrollo del hongo ostra (Pleurotus ostreatus), específicamente la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Para ello, se utilizó una arquitectura basada en microcontroladores con conectividad Wi-Fi, sensores ambientales de bajo consumo y una plataforma de visualización en la nube, permitiendo el acceso remoto a los datos en tiempo real.

El diseño del sistema se realizó considerando los siguientes requerimientos técnicos y funcionales:

- Medición precisa y confiable de temperatura, humedad y CO_2 dentro del rango óptimo para el cultivo.
- Transmisión inalámbrica de los datos recolectados mediante conexión Wi-Fi.
- Visualización en tiempo real de los parámetros a través de una plataforma IoT accesible desde cualquier dispositivo con internet.
- Estructura modular, permitiendo la expansión a múltiples puntos de monitoreo en diferentes sustratos.
- Fuente de alimentación estable con protección ante variaciones de voltaje.
- Protección física adecuada de los componentes ante la humedad y el polvo del ambiente del invernadero.

4.3.1 Arquitectura del sistema

El sistema se compone de tres módulos independientes, cada uno con los siguientes elementos:

- Microcontrolador
- Sensor de CO_2
- Sensor de Temperatura y Humedad

4.3.2 Selección de componentes

La correcta selección de componentes es una etapa crítica en el diseño y desarrollo de cualquier sistema electrónico, especialmente cuando se trata de aplicaciones de monitoreo ambiental, dado que una mala elección puede comprometer la calidad de los datos, reducir la eficiencia energética o incluso provocar fallos en la operación del sistema.

Para seleccionar los elementos que componen el dispositivo de monitoreo se compararon 3 elementos con funcionamiento similar, y se seleccionó el elemento de acuerdo con diversas características que se detallan a continuación.

Unidad central

Tabla 4.1

Comparación de microcontroladores utilizados en sistemas de monitoreo[35], [36], [37].

Parámetros	ESP32 WROOM-32E	Arduino Nano 33 IoT	Raspberry Pi Pico
Frecuencia del CPU	Hasta 240 MHz	48 GHz	16 MHz
Conectividad	Wi-Fi, Bluetooth BLE	Wi-Fi, Bluetooth (BLE)	Requiere módulo externo
GPIO (Pines)	36 pines	22 pines	40 pines
Entradas Analógicas (ADC)	18 canales (12 bits)	8 canales ADC	16 canales (10 bits)
Voltaje de Operación	3.3 V	3.3 V	5 V
Capacidades de IoT	Ideal para IoT, integrado con Wi-Fi/Bluetooth	Soporte para comunicación segura con servicios en la nube	Limitado (requiere módulos externos)
Costo Aproximado	$11.50	$54	$20

Elemento seleccionado: Microcontrolador ESP32 WROOM-32E, se seleccionó por su bajo consumo, capacidad de conexión Wi-Fi, soporte para múltiples sensores y compatibilidad con diversas plataformas IoT.

Fig. 4.1 Esquema de la tarjeta ESP32 WROOM 32E[38]

Sensor de CO_2

Tabla 4.2

Comparación de sensores de CO_2 utilizados en sistemas de monitoreo[39], [40], [41].

Parámetros	MH-Z19B	SCD30	MQ135
Tecnología de Detección	NDIR (infrarrojo no dispersivo)	NDIR	Semiconductor
Rango de Medición (ppm)	0 – 5000 ppm	400 - 10,000 ppm	10 - 1000
Precisión	±50 ppm + 3 %	± (30 ppm + 3 %)	± (50-100 ppm, aproximado)
Voltaje de Operación (V)	3.3 – 5 V	3.3 – 5 V	5 V
Consumo de Energía	3.5 mA	19 mA	150 mA
Rango de Humedad Relativa	0% - 90% (sin condensación)	0% - 95% (sin condensación)	20% - 90%
Costo Aproximado	$50	$30	$5

Elemento seleccionado: Sensor de CO_2 MQ-135, es un sensor analógico utilizado para detectar gases como CO_2, amoníaco, benceno y compuestos volátiles. Requiere calibración inicial y se seleccionó por su bajo costo y disponibilidad.

Fig. 4.2 Sensor MQ-135

Sensor de temperatura y humedad

Tabla 4.3

Comparación de sensores de temperatura y humedad utilizados en sistemas de monitoreo[42], [43], [44].

Parámetros	**DHT11**	**DHT22 (AM2302)**	**BME280**
Rango de Temperatura (°C)	0 a 50	-40 a 80	-40 a 85
Precisión de Temperatura	±2 °C	±0.5 °C	±1 °C
Rango de Humedad (%)	20-90	0-100	0-100
Precisión de Humedad	±5 %	±2-5 %	±3 %
Resolución de Datos	Temperatura: 1 °C Humedad: 1 %	Temperatura: 0.1 °C Humedad: 0.1 %	Temperatura: 0.01 °C Humedad: 0.01 %
Voltaje de Operación (V)	3.3 - 5	3.3 - 6	1.8 - 3.6
Consumo de Energía	2.5 mA	2.5 mA	0.6 mA
Costo Aproximado	$ 2.30	$ 6.50	$ 22

Elemento seleccionado: Sensor de temperatura y humedad DHT22, es un sensor digital de precisión media, capaz de operar en rangos adecuados para el cultivo de hongos. Rango de temperatura: -40 °C a 80 °C con una precisión de ±0.5 °C. Rango de humedad: 0–100% HR con precisión de ±2–5%.

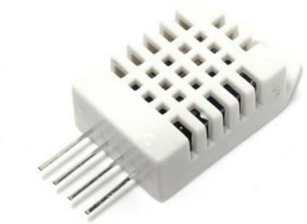


Fig. 4.3 Sensor DHT22

Y como elementos adicionales se utilizó una fuente de alimentación de 5V DC con regulador interno para estabilidad eléctrica y una carcasa plástica protectora diseñada mediante impresión 3D, con aberturas estratégicas para ventilación y protección básica frente a humedad.

4.3.3 Plataforma IoT

Para la supervisión remota del sistema, se utilizó Arduino IoT Cloud, que permite visualizar en tiempo real los valores de los sensores conectados. Esta plataforma utiliza el protocolo MQTT para el envío de datos de forma ligera y eficiente, y permite la creación de dashboards personalizados para el monitoreo continuo.

Se enviaron los datos de cada uno de los sensores a un microcontrolador, que a su vez envían esa información mediante una señal de red a la nube de Arduino IoT Cloud para posteriormente sean procesados y permita su visualización en un dispositivo móvil o computador.

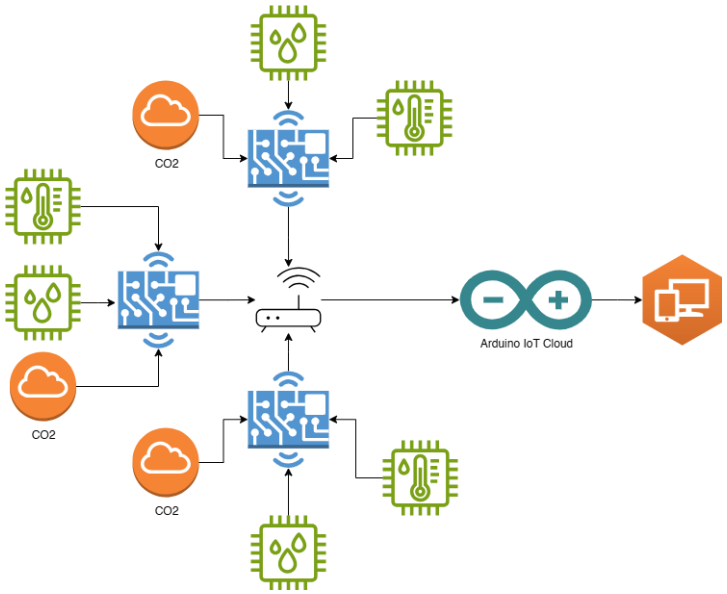


Fig. 4.4 Esquema de integración de sensores y microcontroladores en red IoT basada en Arduino

4.3.4 Interfaz de usuario

Se diseñó un panel de control digital dentro de la plataforma Arduino IoT Cloud, donde se visualizan los siguientes elementos:

- Gráficas de temperatura, humedad y CO_2 por cada módulo.
- Indicadores numéricos en tiempo real.
- Historial de datos por día y por semana.

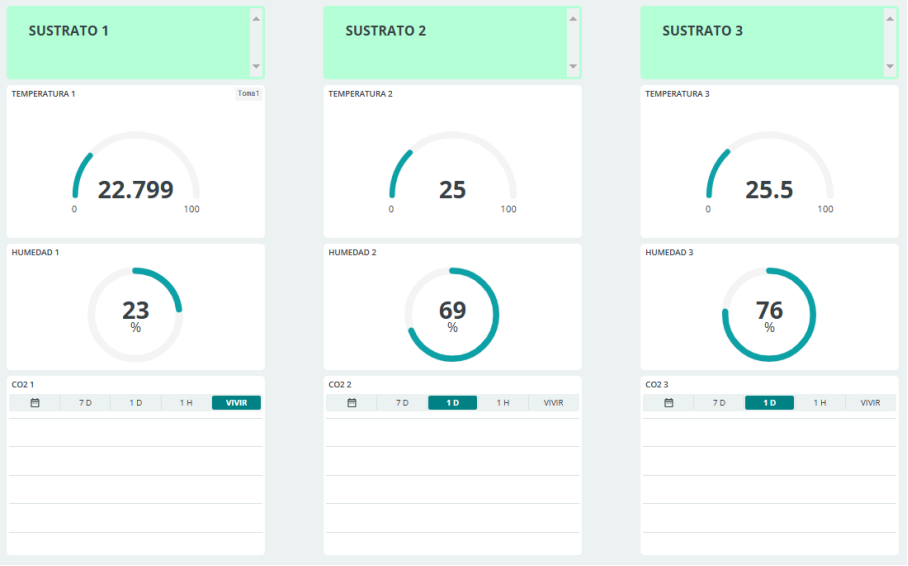


Fig. 4.5 Interfaz de usuario

Y para una interfaz más personalizada y con ayuda de la API que proporciona Arduino IoT Cloud, se diseñó una aplicación móvil en la cual se pueden observar los datos de las mediciones en tiempo real, tal y como se muestra en la. Para el desarrollo de la aplicación se utilizó MIT App Inventor, una herramienta de programación gráfica que facilitó la creación de aplicaciones móviles de manera didáctica y eficiente.

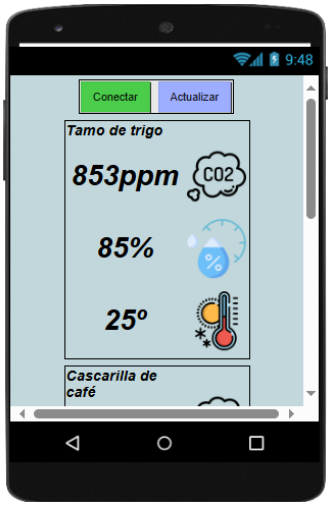


Fig. 4.6 Interfaz de la aplicación móvil del sistema de monitoreo.

La aplicación, los códigos y el método de configuración se encuentran presentes en el siguiente enlace:

- **https://github.com/ralft3425ls/MTRSensor**

4.4 Diagrama de conexión del Hardware

En esta sección se describe la conexión de los componentes del sistema de monitoreo. El dispositivo tiene como unidad centrar de procesamiento de datos un ESP32, este se encarga de la recopilación, el procesamiento de los datos y la comunicación con la plataforma IoT. En la siguiente **Fig. 4.7** se representa los componentes del dispositivo con sus respectivas conexiones.

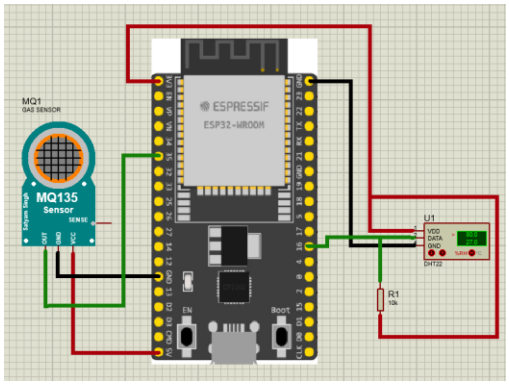


Fig. 4.7 Diagrama de conexión

A partir del modelo de conexiones de **Fig. 4.7** se diseñó la PCB, este circuito fue creado con ayuda del software PCB Wizard y sus componentes fueron modelados con el software SolidWorks, tal y como se muestra en **Fig. 4.9**.

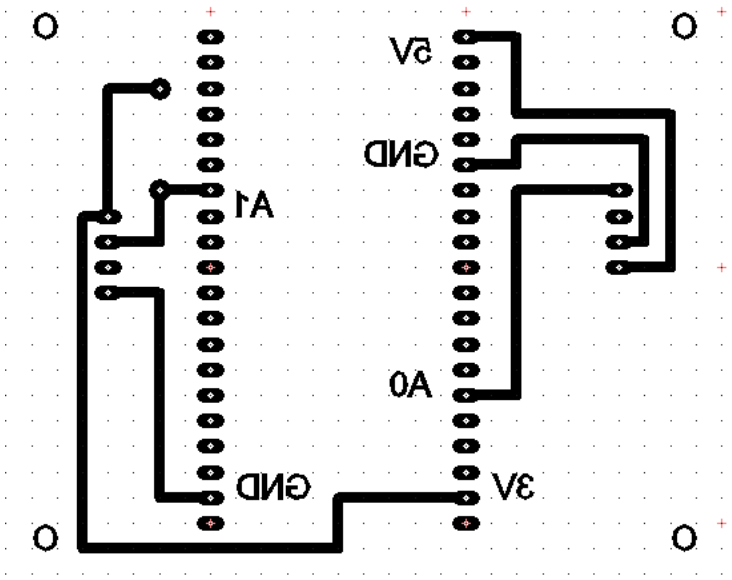


Fig. 4.8 Diseño del circuito impreso realizado en PCB Wizard.

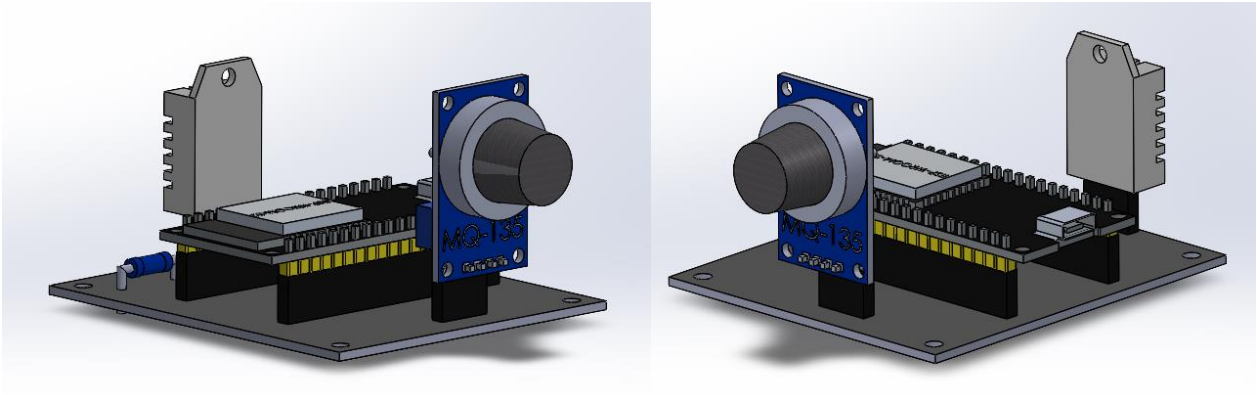


Fig. 4.9 Modelado 3D de los componentes eléctricos.

En la **Tabla 4.4**, se muestra las conexiones específicas entre los pines de los componentes y el microcontrolador ESP32. Esta tabla ofrece una descripción ordenada y clara de cómo se asignan los pines, facilitando tanto la replicación del circuito como la verificación eficaz de las conexiones.

Tabla 4.4

Asignación de pines entre el ESP32 y los componentes del sistema.

Componente	Pin del componente	Pin del ESP32	Detalle
MQ135	VCC	Vin 5V	Fuente de voltaje.
	GND	GND	Conexión a tierra común.
	ANALOG OUT	ADC 7	Lectura de sensores analógicos.
DHT22	VCC	3.3V	Fuente de voltaje.
	GND	GND16	Conexión a tierra común.
	ANALOG OUT	GPIO	Lectura del sensor.

Como adición, en la conexión del sensor DHT22 entre su salida digital y su entrada de voltaje, se encuentra conectado una resistencia de 10KΩ, esta ayuda a estabilizar la señal y evita interferencias.

4.5 Estimación del consumo eléctrico

Para garantizar la viabilidad técnica y operativa del sistema de monitoreo diseñado, se realizó una estimación del consumo eléctrico considerando los componentes principales: la unidad central de procesamiento ESP32 WROOM-32E y los sensores ambientales DHT22 para temperatura y humedad, y MQ-135 para detección de CO_2.

A partir de las hojas técnicas de cada componente se consideraron los siguientes valores de corriente:

- ESP32 WROOM-32E: Corriente típica de operación durante transmisión de datos vía Wi-Fi: 160 mA a 5 V.
- Sensor DHT22: Corriente típica de operación: 1.5 mA a 3.3 V (se alimenta directamente del regulador del ESP32).
- Sensor MQ-135: Corriente típica del elemento calefactor: 90 mA a 5 V.

Estos valores corresponden al escenario de operación continua, en el que el sistema permanece transmitiendo datos en tiempo real a la plataforma Arduino IoT Cloud.

La potencia total del dispositivo se calcula mediante la ecuación:

$$P = V\ x\ I \quad (1)$$

Donde P es la potencia total, V es el voltaje y I la intensidad de la corriente. Dado que la fuente de alimentación es de 5 V DC podemos calcular la corriente aproximada:

$$I_{total} = 160\ mA\ (ESP32) + 1.5\ mA\ (DHT22) + 90\ mA\ (MQ135) \quad (2)$$

$$I_{total} = 251.5\ mA \quad (3)$$

Por lo tanto, la potencia consumida por el dispositivo de monitoreo es:

$$P_{total} = 5\ V\ x\ 0.2515\ A \quad (4)$$

$$P_{total} = 1.26\ W \quad (5)$$

4.6 Diseño de la carcasa

La carcasa del proyecto se diseñó empleando el programa SolidWorks, elegido ya que se contaba con experiencia previa en su uso. En la **Fig. 4.10** se muestran dos vistas del modelo tridimensional de la caja creada para proteger el sistema de monitoreo ambiental destinado al cultivo de hongos.

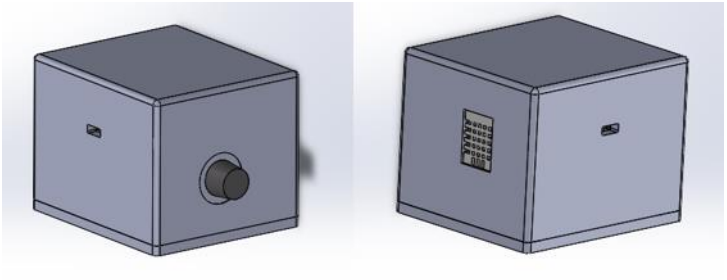


Fig. 4.10 Diseño de la carcasa

El proceso de manufactura que se seleccionó para la fabricación de la carcasa fue impresión 3D, esto se debe a que es ideal cuando se trata de lotes pequeños de producción y reduce tiempo de desarrollo. El material con el que se imprimió fue PLA, su selección se debió a su amplio rango de propiedades, su biodegradabilidad y su fácil procesamiento[45].

4.7 Implementación

4.7.1 Adecuación del área de estudio

De acuerdo con los objetivos planteados, para desarrollar las pruebas de funcionamiento del dispositivo de monitoreo se instaló en un ambiente piloto, el lugar fue en un laboratorio previamente usado en investigaciones anteriores con temática afín al cultivo de hongos. Se hizo uso de 3 estanterías pertenecientes al laboratorio de la carrera de agroindustrias de 1.2m de largo, 2.2 m de alto y 0.35 cm de ancho. Previamente al cultivo de hongos se realizó una esterilización mediante una desinfección química por solventes alcohólicos, para ello se utilizó alcohol diluido al 70%.

Posterior a la desinfección se instalaron cortinas plásticas en cada uno de los estantes con el fin de brindar protección de la luz solar al micelio.

Fig. 4.11 Estanterías usadas en el cultivo de hongos.

4.7.2 Adquisición de la materia prima

Los sustratos que se adquirieron fueron los siguientes: aserrín de eucalipto, cascarilla de café y la paja de trigo. La selección de estos tres tipos de sustratos se debió a su disponibilidad en mercados colindantes a la ciudad de Ibarra y Cayambe.

El micelio fue comprado en "Fungi Andino", un emprendimiento dedicado a la producción de hongos ostra y micelio. La variedad de hongo ostra que se adquirió para la realización del proyecto es el *Pleurotus ostreatus* o hongo ostra blanco, el motivo de esta elección es su tiempo de incubación y fructificación relativamente cortos. Se adquirió un total de 3 kilos de micelio, esto con el fin de realizar 10 cultivos por cada muestra de sustrato.

Fig. 4.12 Micelio de hongo ostra blanco.

4.7.3 Pasteurización

Para este proceso primero se procedió a remojar cada una de las muestras de sustrato, en total se utilizó alrededor de 10 kg, esto corresponde al peso del sustrato seco. Después de que se cumpliera un periodo de remojo de 2 días se procedió a pasteurizar, se sometió a cada una de las muestras a una temperatura de 90º por 40 minutos y se usó el método de inmersión. En esta parte del proceso se debe tener especial cuidado en no cometer errores, ya que, si no se realiza adecuadamente, existe el riesgo de contaminación del sustrato, lo que impediría la propagación del micelio

Fig. 4.13 Pasteurización del sustrato.

Una vez terminado el proceso de pasteurización se dejó el sustrato en reposo hasta que alcance temperaturas de 30º como máximo.

Fig. 4.14 Escurrido del sustrato.

4.7.4 Siembra

Los sustratos fueron sembrados en relación de 9 a 1, eso quiere decir que en cada bolsa de 1kg se utilizó 900 gramos de sustrato y 100 g de micelio. Se prepararon alrededor de 9 bolsas por cada tipo de sustrato. Una vez rellenadas las bolsas se sellaron e instalaron en los estantes previamente adecuados. A partir de esta etapa se empezó con la medición de las condiciones ambientales dentro de cada uno de los estantes.

Fig.4.15 Inicio de proceso de inoculación.

4.7.5 Inoculación

Después de dos días se realizaron perforaciones en la parte inferior de cada una de las bolsas, esto para evitar la acumulación excesiva de humedad y CO_2. Este periodo duró alrededor de 2 semanas en el cual se hizo revisiones diarias del avance de la propagación del micelio y el funcionamiento de los dispositivos de medición.

Fig. 4.16 Propagación del micelio.

4.7.6 Fructificación

Una vez completado el proceso de inoculación se procedió a quitar las cortinas plásticas y colgar las bolsas plásticas en unos ganchos, pero antes se realizaron cortes de 10 cm en los alrededores de estas. En general los primeros brotes aparecieron después de los 15 a 21 días después de la

inoculación. En este tiempo se realizaron riegos constantes, pero se evitó un riego directo tanto a las bolsas como a los sensores.

Fig. 4.17 Etapa de Fructificación.

4.8 Análisis de costos

El análisis de costos se divide en 2 fases, la primera es relacionada con la fabricación del dispositivo del monitoreo y la segunda es el cultivo de hongos en diferentes sustratos.

Tabla 4.5

Precio de los sensores y componentes del sistema de monitoreo.

Elemento	Cantidad	Precio/U	Total	
MQ-135	3	5.50	$	16.50
ESP32 WROOM-32E	3	11.50	$	34.50
DHT22	3	6.42	$	19.26
Resistencia 10 KΩ	3	0.10	$	0.30
Conector header	4	0.50	$	2.00
Baquelita	3	1.54	$	4.62
Cloruro férrico	3	1.50	$	4.50
Rollo de estaño	1	4.50	$	4.50
Carcasas	3	5.00	$	15.00
Tornillos	16	0.10	$	1.60
Costo de envió			$	15.00
Total			$	17.78

Tabla 4.6

Precio y cantidad de sustratos utilizados en cada tratamiento.

Elemento	Peso	Cantidad	Precio/U	Precio Total
Micelio Ostra Blanco	1 kg	3	$ 10.00	$ 30.00
Aserrín de eucalipto	20 kg	1	$ 3.00	$ 3.00
Paca de tamo de trigo	18 kg	1	$ 5.00	$ 5.00
Cascarilla de café	20 kg	1	$ 5.00	$ 5.00
Bolsas plásticas de 1 kg		1	$ 3.00	$ 3.00
1 cilindro de Gas		1	$ 3.50	$ 3.50
Costo de envío				$ 14.00
Total				$ 63.50

Tabla 4.7

Costo total estimado del sistema de monitoreo y cultivo.

Grupo	Precio Total
Precio sistema de monitoreo	$ 117.78
Precio cultivo piloto de hongos ostra	$ 63.50
Total	$ 181.28

4.9 Funcionamiento

4.9.1 Resultados de temperatura

Los valores de temperatura registrados en los tres sustratos evaluados durante el cultivo de hongos presentaron variaciones mínimas entre sí. Esta uniformidad térmica se atribuye a las condiciones ambientales controladas del espacio de cultivo, donde todos los sustratos se mantuvieron en proximidad inmediata (dentro de un radio de 1.5 metros), sometidos a idénticas condiciones de temperatura ambiente y flujo de aire. La **Fig. 4.18** representa el valor de la temperatura durante un periodo de 8 días de mediciones, y presenta un pico durante las 12:00 hasta las 15:00 de la tarde.

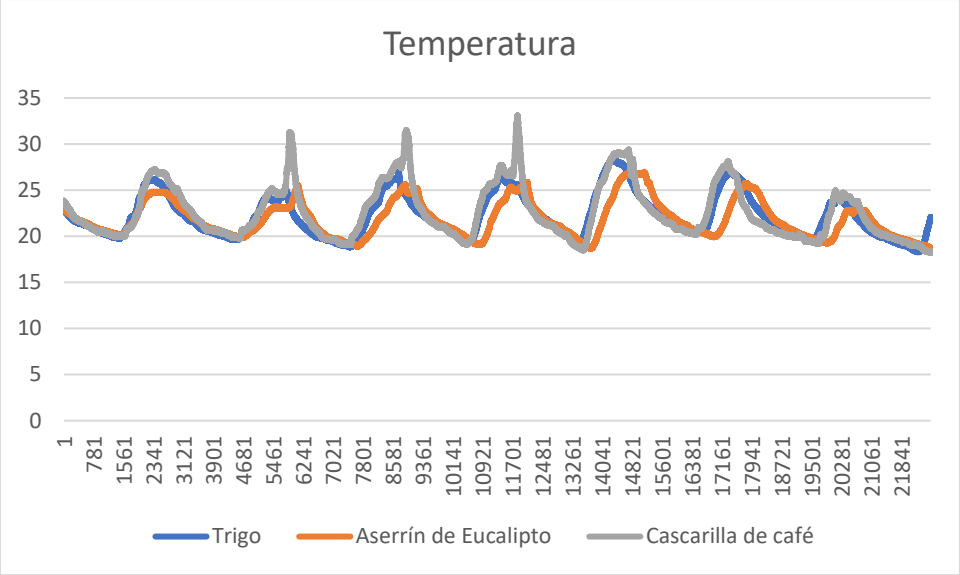


Fig. 4.18 Comparativa de medición de sensores de temperatura en los tres diferentes sustratos.

4.9.2 Resultados de humedad

Las mediciones de humedad fueron tomadas en un periodo de 22 días, esta condición fue la que más varió con respecto a las otras condiciones. La diferencia que se presentó en las mediciones se considera que es producto de que el riego se realizó únicamente con una bomba agrícola, y no fue realizado en la misma medida y tiempo en todos los sustratos.

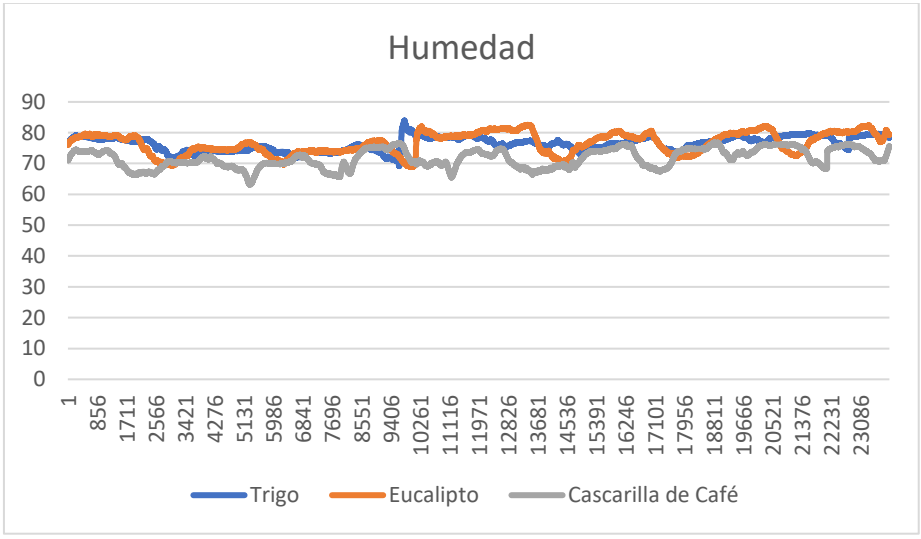


Fig. 4.19 Comparativa de medición de humedad en los tres diferentes sustratos.

4.9.3 Resultados de dióxido de carbono (CO_2)

El monitoreo de las concentraciones de dióxido de carbono se llevó a cabo mediante un protocolo de medición sistemática y periódica, con un intervalo de muestreo constante de 25 segundos entre cada registro. Este esquema de adquisición de datos se mantuvo de forma ininterrumpida a lo largo de un ciclo completo de 22 días, abarcando desde la fase inicial de inoculación del sustrato (con una duración variable entre 15 y 17 días, dependiendo de las condiciones ambientales y biológicas) hasta alcanzar la etapa de primera cosecha, la cual ocurrió dentro de un margen de 5 a 7 días posteriores a la finalización de la inoculación.

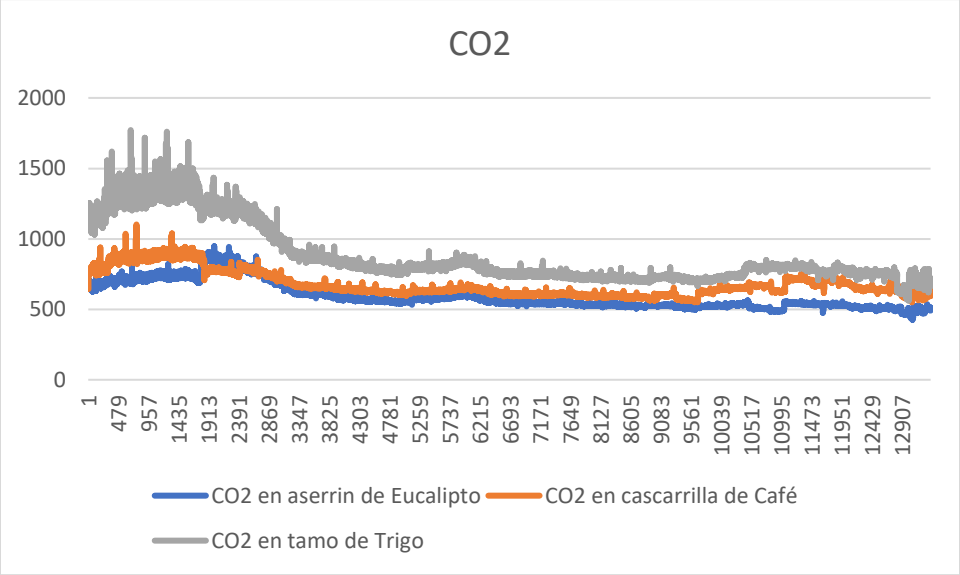


Fig. 4.20 Comparativa de medición de sensores de CO_2 en los tres diferentes sustratos.

Durante la fase inicial del cultivo de hongos, los diferentes sustratos se mantuvieron en condiciones de confinamiento hermético, observándose un incremento progresivo en las concentraciones de CO_2 producto de la actividad metabólica del micelio. El sustrato de trigo demostró una mayor tasa de generación de CO_2 en comparación con los demás sustratos, lo que sugiere una actividad biológica más intensa asociada a su composición nutricional.

A partir del séptimo día, se implementó una ventilación controlada mediante la apertura parcial de las cortinas instaladas en el sistema de cultivo. Esta intervención permitió una disipación gradual del CO_2 acumulado, alcanzando un estado de equilibrio dinámico entre la producción microbiana y el intercambio gaseoso con el exterior.

En la última fase del cultivo, al retirar completamente las cortinas, el nivel de CO_2 dejó de mantenerse estable y empezó a subir y bajar con más frecuencia. Estos cambios se debieron a que, con la ventilación abierta, factores como el aire exterior, la temperatura y el proceso natural de crecimiento de los hongos.

4.10 Mantenimiento y calibración

El sistema de monitoreo diseñado requiere un mantenimiento enfocado principalmente en la calibración de los sensores MQ135, lo cual se detalla a continuación.

Previo a realizar las mediciones de los parámetros ambientales en el cultivo de hongos fue necesario calibrar los sensores MQ135. Este proceso se realizó mediante una calibración inicial la cual que consistió en mantenerlos encendidos en un ambiente con aire limpio y con temperatura controlada, esto ayuda a permitir que su resistencia interna se estabilice y así garantizar lecturas más precisas. Sin embargo, antes de la calibración el sensor se sometió a un tiempo de espera en el que se dejó encendido en busca de quemar la resistencia interna que posee, el tiempo estimado de esta acción es de 12 a 24 horas.

Una vez terminado este proceso se realiza la toma del valor de la resistencia del sensor en aire limpio, esto para que sea usado como referencia en la medición de CO_2. Este proceso dura alrededor de 30 minutos a 1 hora, lo que se busca es que estabilicen los valores y así poder promediarlos. El valor obtenido puede variar dependiendo del sensor.

Usando el valor promedio del sensor en aire limpio se remplaza en la programación del dispositivo y se obtiene el valor de CO_2 en ppm.

Para comprobar la efectividad de la calibración realizada se utilizó al sensor MH-Z19b como referencia conectada a un microcontrolador ESP32 WROOM tal y como se muestra en la Fig. 4.21.

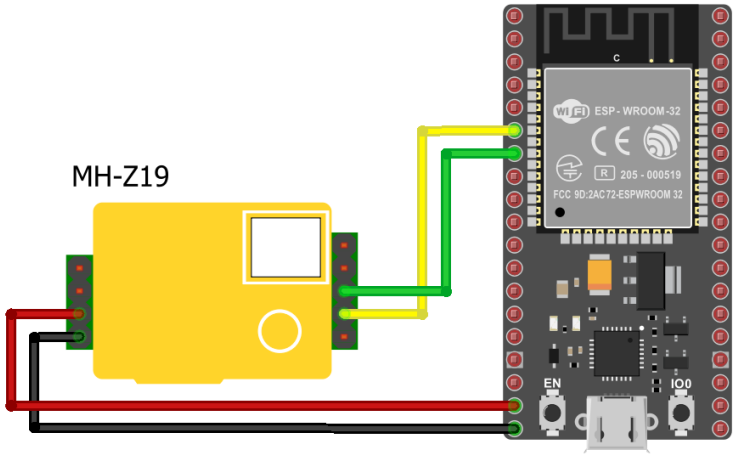


Fig. 4.21 Circuito experimental comparativo para validación de sensores de CO_2

Se comparó los valores obtenidos por el sensor MQ135 con los resultados medidos por el MH-Z19b. Este proceso se realizó con los tres sensores, tal y como se muestra en la.

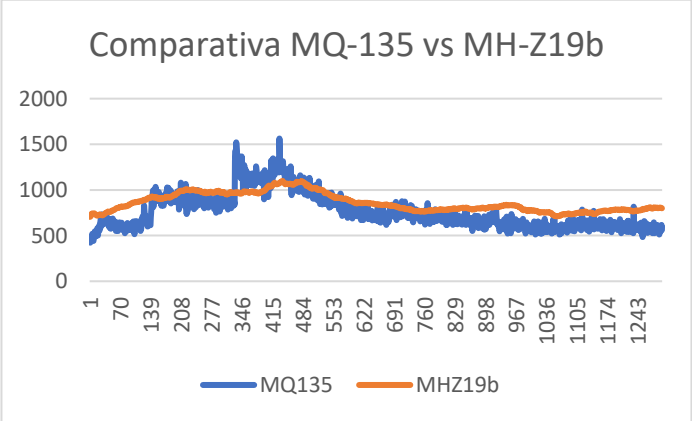


Fig. 4.22 Comparación de lecturas entre el sensor MQ-135 y el sensor MH-Z19B durante la calibración empírica.

A pesar de que el sensor MH-Z19b ofrece mayor exactitud y estabilidad en las lecturas de CO_2, no se lo utilizó como único sensor de medición en este proyecto, el motivo fue a que su disponibilidad era limitada en el mercado local al momento de realizar el proyecto y a su costo relativamente elevado en comparación con el MQ-135.

El resto de los componentes del sistema, como el sensor de temperatura y humedad DHT22 y el microcontrolador ESP32, no requieren mantenimiento complejo, salvo revisiones periódicas de conexiones y limpieza para evitar acumulación de humedad o suciedad que pueda afectar su funcionamiento.

Conclusiones

El sistema de monitoreo diseñado permitió registrar de los parámetros de temperatura, humedad y CO_2 en un invernadero piloto, demostrando su funcionalidad en condiciones reales de cultivo.

La integración de tecnologías IoT y la plataforma Arduino IoT Cloud facilitó la visualización remota de datos en tiempo real, brindando a los usuarios información clave para la toma de decisiones.

La comparación entre diferentes sustratos mostró variaciones en la concentración de CO_2, evidenciando la importancia de monitorear este parámetro para optimizar el rendimiento del cultivo de hongos.

El dispositivo desarrollado es replicable, de bajo costo y adaptable, lo que lo convierte en una herramienta viable para productores interesados en implementar prácticas de agricultura de precisión.

Recomendaciones

Implementar mejoras en la calibración de los sensores de CO_2 para optimizar la precisión de las mediciones en futuros cultivos.

Ampliar el sistema de monitoreo para incluir más variables ambientales como luminosidad o pH del sustrato, dependiendo de las necesidades del cultivo.

Fomentar la capacitación de productores en el uso de herramientas IoT para maximizar los beneficios de la supervisión remota.

Desarrollar versiones del sistema con fuentes de alimentación autónomas (energía solar) para garantizar operatividad en zonas sin suministro eléctrico estable.

Bibliografía

[1] Grupo Banco Mundial, “Agricultura, silvicultura y pesca, valor agregado (% del PIB) - Ecuador”. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2023&locations=EC&start=1960&view=chart

[2] N. Rodriguez y C. Jaramillo, “Cultivo de hongos comestibles del género Pleurotus sobre residuos agrícolas de la zona cafetera”, Colombia, oct. 2004. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10778/582

[3] M. Vásquez y I. David, “PRODUCCIÓN DE HONGOS GOURMET (Pleurotus ostreatus Jacq.) MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS EN LA GRANJA EXPERIMENTAL LA PRADERA””, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12153

[4] I. Montenegro y C. Stuardo, “Introducción al cultivo de hongos comestibles”, Valdivia - Chile, 2021. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/31294/31294.pdf

[5] F. Alexander y R. Solano, “EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ENRIQUECIDOS CON MAÍZ DURO (Zea mays L.) PARA LA PRODUCCIÓN DE HONGOS (Pleurotus ostreatus Jacq.) EN LA GRANJA EXPERIMENTAL LA PRADERA, CHALTURA.”, Ibarra, 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14747

[6] Y. Sakamoto, “Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi”, el 1 de septiembre de 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.fbr.2018.02.003.

[7] L. A. Gavilanez Zumárraga, “Medidor de CO2 y Temperatura para invernadero UTN”, 2020. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10848

[8] Madigan Michael, Martinko John, Bender Kelly, Buckley Daniel, y Stahl David, *Biología de los Microorganismos 14ª Edición*, 14.ª. Madrid-España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2015.

[9] D. L. Hawksworth y R. Lücking, “Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species”, *Microbiol Spectr*, vol. 5, núm. 4, ago. 2017, doi: 10.1128/microbiolspec.funk-0052-2016.

[10] Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, 23.ª ed. 2014. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dle.rae.es/hongo?m=form

[11] A. Davidson, *The Oxford companion to food*, 2nd ed. New York, 2014.

[12] R. Gaitán-Hernándes, D. Salmones, R. Pérez, y G. Mata, “MANUAL PRÁCTICO DEL CULTIVO DE SETAS Aislamiento, siembra y producción”, 2006. [En línea]. Disponible en: http://www1.inecol.edu.mx/cv/CV_pdf/libros/Manual_PleurotusGaitan.pdf

[13] C. Ardon, “Producción de hongos comestibles”, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2007. Consultado: el 1 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/07/07_1932.pdf

[14] Josselyn Xiomara Tinoco Tello, “EVALUACIÓN DE LA DESINFECCIÓN Y EFICIENCIA DE SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DEL HONGO OSTRA ROSADO (Pleurotus djamor B) CON RESIDUOS AGRO FORESTALES EN SAN JOSÉ DE CHALTURA”, Universidad Técnica del Norte, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12154

[15] Narváez Abigail, “EVALUACIÓN DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN Y POSCOSECHA DEL HONGO OSTRA ROSADO (Pleurotus djamor B.) PIMAMPIRO, IMBABURA”, Ibarra, 2023. Consultado: el 1 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14638

[16] G. Guzmán, *El Cultivo de los hongos comestibles*. México: Instituto Politécnico Nacional, 1993.

[17] P. Stamets, “GROWING GOURMET and MEDICINAL MUSHROOMS”, 1993.

[18] P. G. Miles y S.-T. Chang, “Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact”, vol. 2nd ed, 2004, doi: https://doi.org/10.1201/9780203492086.

[19] Grainspawn.cl, “Semilla de hongo Enokki 1,2 kg-Imagen de producto”. Consultado: el 1 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://grainspawn.cl/product/semilla-de-hongo-enokki-12-kg/

[20] Identificaciones de hongos: la biblioteca definitiva de hongos., “Flammulina velutipes”, https://ultimate-mushroom.com/es/edible/33-flammulina-velutipes.html.

[21] Santos Valle S., “Agricultura 4.0 Robótica agrícola y equipos automatizados para la producción agrícola sostenible”, 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/publications/es

[22] E. Navarro, N. Costa, y A. Pereira, “A systematic review of iot solutions for smart farming”, el 1 de agosto de 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20154231.

[23] S. Madakam, R. Ramaswamy, y S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review”, *Journal of Computer and Communications*, vol. 03, núm. 05, pp. 164–173, 2015, doi: 10.4236/jcc.2015.35021.

[24] H. Yi, D. Wen, y P. Sandhu, *The Study and Application of the IOT Technology in Agriculture*. IEEE, 2010.

[25] N. Naik, “Choice of Effective Messaging Protocols for IoT Systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP”, oct. 2017. doi: 10.1109/SysEng.2017.8088251.

[26] Ian Craggs, “MQTT vs CoAP para IoT”, https://www.hivemq.com/blog/mqtt-vs-coap-for-iot/.

[27] Arduino, “Acerca de Arduino”, https://www.arduino.cc/en/about/.

[28] X. Meng, S. Kim, P. Puligundla, y S. Ko, “Carbon dioxide and oxygen gas sensors-possible application for monitoring quality, freshness, and safety of agricultural and food products with emphasis on importance of analytical signals and their transformation”, el 3 de diciembre de 2014, *Korean Society for Applied Biological Chemistry*. doi: 10.1007/s13765-014-4180-3.

[29] Industrial Physics., “Sensores infrarrojos de dióxido de carbono.”, https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/sensores-infrarrojos-de-dioxido-de-carbono/.

[30] Proinstalaciones.com, “El uso de sensores electroquímicos en analizadores de combustión para mediciones de emisiones en aplicaciones industriales. ”, https://www.proinstalaciones.com/articulos/tecnico/3247-el-uso-de-sensores-electroquimicos-en-analizadores-de-combustion-para-mediciones-de-emisiones-en-aplicaciones-industriales.

[31] B. Knospe y L. Walleser, “Flue Gas Analysis in Industry (Practical guide for Emission and Process Measurements).”, 2004, Consultado: el 24 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Prem_Baboo/post/Testing_Setup_for_Gas_Composition_and_Dust_Concentration_measurement/attachment/59d64cf879197b80779a6a0e/AS%3A486321006354433%401492959371834/download/Flue_Gas_in_Industry_0981_2773.pdf

[32] Tamoghna Ojha, Sudip Misra, y Narendra Singh Raghuwanshi, “Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges”, *https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011.*, 2015.

[33] G. Korotcenkov, “Paper-Based Humidity Sensors as Promising Flexible Devices: State of the Art: Part 1. General Consideration”, el 1 de marzo de 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/nano13061110.

[34] T. Xie, A. F. Abdul Rahman, A. Abu Bakar, y A. Arsad, “Design and Optimization of Metal Oxide-Based Humidity Sensors: A Review on Mechanisms and Material Engineering”, el 1 de agosto de 2025, *Springer*. doi: 10.1007/s10876-025-02869-0.

[35] Espressif, “ESP32-WROOM-32 Datasheet”. [En línea]. Disponible en: www.espressif.com/en/subscribe.

[36] Arduino, “Arduino® Nano 33 IoT”.

[37] Raspberry Pi Ltd, “Radpberry Pi Pico Darasheet”, 2020. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/

[38] Documentación de SunFounder ESP32 Starter Kit, “ESP32 WROOM 32E”, https://docs.sunfounder.com/projects/esp32-starter-kit/es/latest/components/component_esp32_extension.html.

[39] Sensirion AG, “Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module”, may 2020. [En línea]. Disponible en: www.sensirion.com

[40] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co, “Leading gas sensing solutions supplier in China! Intelligent Infrared CO2 Module (Model: MH-Z19B) User’s Manual”. [En línea]. Disponible en: www.winsen-sensor.com

[41] Hanwei Electronics CO., “MQ-135 HANWEI | Alldatasheet”, Hanwei. [En línea]. Disponible en: http://www.hwsensor.com

[42] ASAIR, “温湿度模块, DHT11 产品手册 [Manual del producto DHT11]”, 2017. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://osepp.com/downloads/pdf/DHT11_ASAIRv1.3-2017331.pdf

[43] Aosong Electronics Co., “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module”. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.aosong.com/en/

[44] Bosch Sensortec GmbH, “Combined humidity and pressure sensor”, BOSCH. Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: www.bosch-sensortec.com

[45] J. Rampérez Barrajón, “El ácido poliláctico (PLA): Un material innovador en la actualidad.”, 2021, Consultado: el 2 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.claraboyas.es/wp-content/uploads/2021/04/Trabajo-PLA.pdf

Anexos

Anexo A. Código para calibración empírica del parámetro RZERO del sensor MQ135

```
#include <MQ135.h>

// Instancia del sensor MQ135 en GPIO34

MQ135 gasSensor = MQ135(34);

void setup() {

  // Inicializa puerto serie

  Serial.begin(9600);

  delay(1500);

  Serial.println("Calibrando sensor MQ135...");

  Serial.println("Coloca el sensor en aire limpio (~400ppm CO2)...");

}

void loop() {

  // Lee la concentración de CO2 (estimada)

  float ppm = gasSensor.getPPM();

  // Calcula el RZERO actual

  float rzero = gasSensor.getRZero();

  // Imprime resultados
```

```
  Serial.print("CO2 PPM estimado: ");
  Serial.println(ppm);
  Serial.print("RZERO calculado: ");
  Serial.println(rzero);
  delay(5000); // Espera 5 segundos
}
```

Anexo B. Código de monitoreo ambiental con MQ135 y DHT22.

```
#include <MQ135.h>   // Librería para usar el sensor MQ135 (CO₂ y gases)
#include <DHTesp.h>  // Librería para usar el sensor DHT22 (temperatura y humedad)
#include "thingProperties.h" // Archivo generado por Arduino IoT Cloud para enlazar variables y conexión
// Instancia del sensor DHT22
DHTesp dht1;
// Valor de RZERO calibrado para este sensor MQ135 específico.
#define RZERO 97.5  // Este valor puede cambiar dependiendo de cada sensor.
// Instancia del sensor MQ135 conectado al pin GPIO34, usando el valor de RZERO definido arriba
MQ135 gasSensor = MQ135(34, RZERO);
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicializa el puerto serial (opcional, útil para depuración local)
  delay(1500); // Pequeña espera para asegurar que el monitor serial esté listo
  // Inicializa las propiedades y variables de Arduino IoT Cloud
  initProperties();
  ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
  // Define el nivel de mensajes de depuración de la nube (2 = información básica)
```

```
  setDebugMessageLevel(2);
  ArduinoCloud.printDebugInfo();
  // Inicializa el sensor DHT22 en el pin GPIO17
  dht1.setup(17, DHTesp::DHT22);
}
void loop() {
  ArduinoCloud.update();
  // Lee temperatura y humedad del DHT22 y actualiza las variables de la nube
  dht22_temperatura1 = dht1.getTemperature();
  dht22_humedad1 = dht1.getHumidity();
  // Lee la concentración de CO₂ estimada por el MQ135 y la envía a la nube
  sensor_CO2_1 = gasSensor.getPPM();
  // Espera 5 segundos antes de la siguiente lectura
  delay(5000);
}
```

Anexo C. Código de referencia para validación de CO_2 con sensor MH-Z19B

```
#include "thingProperties.h"

#include <MHZ19.h>

#include <SoftwareSerial.h>

// Pines de conexión

#define RX_PIN 32   // Pin del ESP32 conectado al TX del MH-Z19B

#define TX_PIN 33   // Pin del ESP32 conectado al RX del MH-Z19B

// Crea el puerto serie software y el objeto del sensor

SoftwareSerial mySerial(RX_PIN, TX_PIN);

MHZ19 myMHZ19;

void setup() {

  // Inicializa Serial para debug

  Serial.begin(115200);

  delay(1000);

  // Inicializa el puerto SoftwareSerial para el MH-Z19B

  mySerial.begin(9600);

  // Inicializa el sensor

  myMHZ19.begin(mySerial);
```

```
  myMHZ19.autoCalibration(); // Habilita calibración automática

  // Inicializa las propiedades y la conexión a Arduino IoT Cloud

  initProperties();

  ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);

  setDebugMessageLevel(2);

  ArduinoCloud.printDebugInfo();

}
```

Anexo D. Diagrama de flujo del dispositivo de monitoreo ambiental con Arduino IoT Cloud y App móvil

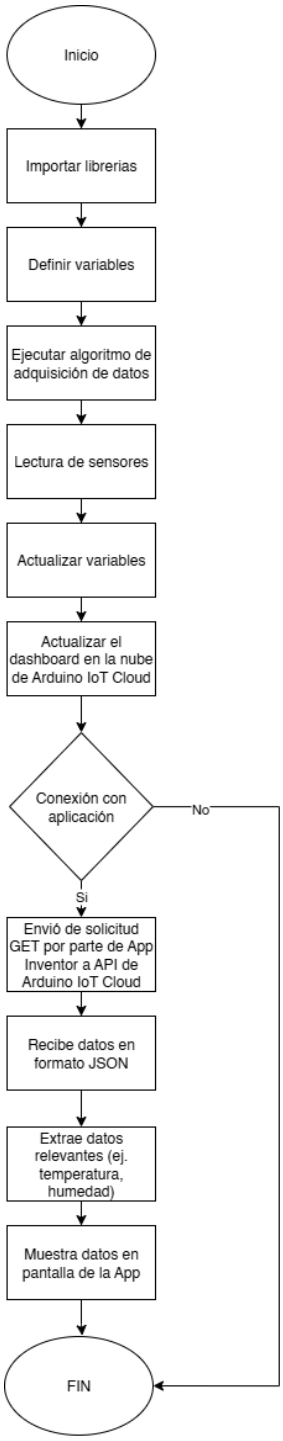


Fig. 1 Diagrama de flujo.

Anexo E. Fotografías del cultivo de hongos en diferentes sustratos orgánicos.

Fig. 2. Instalación del dispositivo

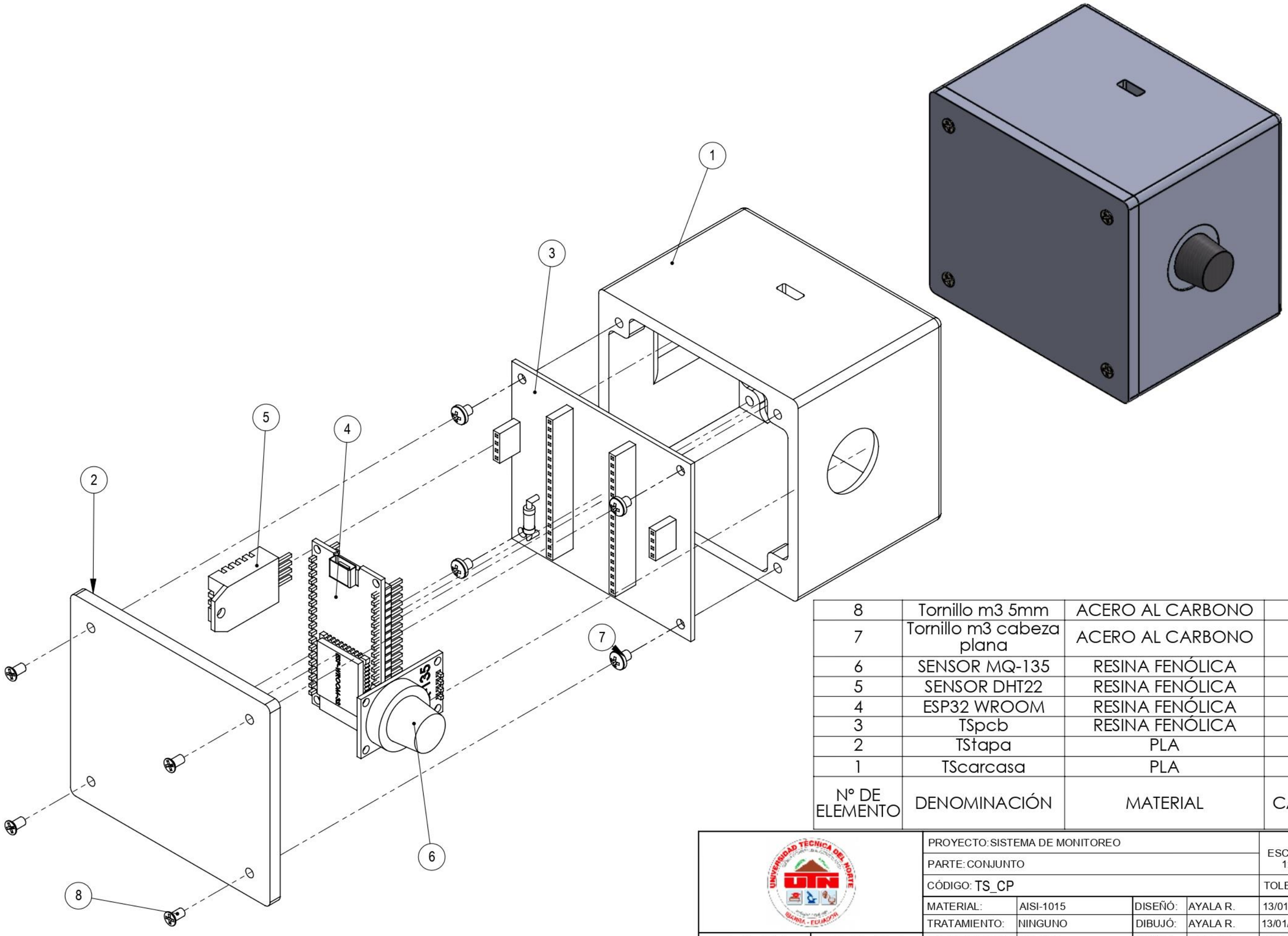
Fig. 3. Hongos cultivados en cascarilla de café.

Fig. 4. Hongos cultivados en aserrín de eucalipto.

Fig. 5. Hongos cultivados en paja de trigo

Anexo F.

Planos del dispositivo de monitoreo ambiental

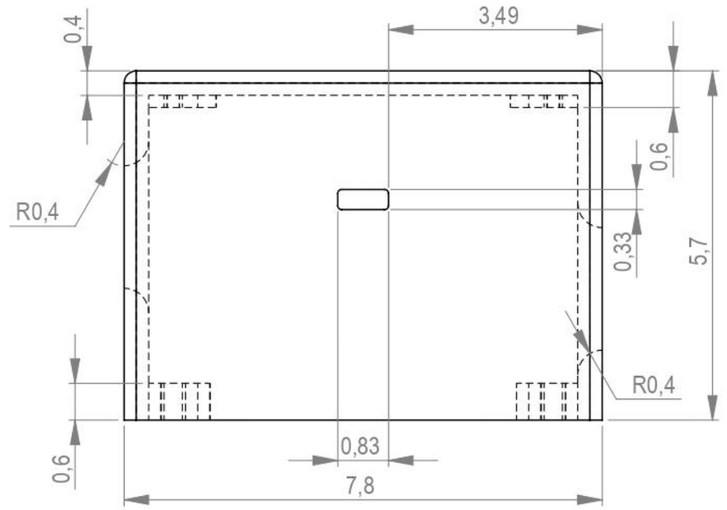


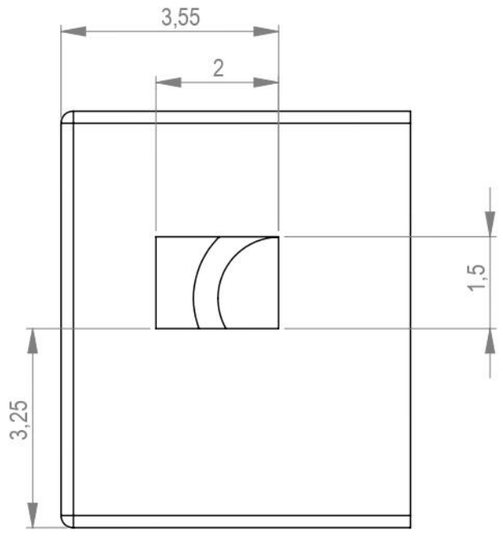
N° DE ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
8	Tornillo m3 5mm	ACERO AL CARBONO	4
7	Tornillo m3 cabeza plana	ACERO AL CARBONO	4
6	SENSOR MQ-135	RESINA FENÓLICA	1
5	SENSOR DHT22	RESINA FENÓLICA	1
4	ESP32 WROOM	RESINA FENÓLICA	1
3	TSpcb	RESINA FENÓLICA	1
2	TStapa	PLA	1
1	TScarcasa	PLA	1

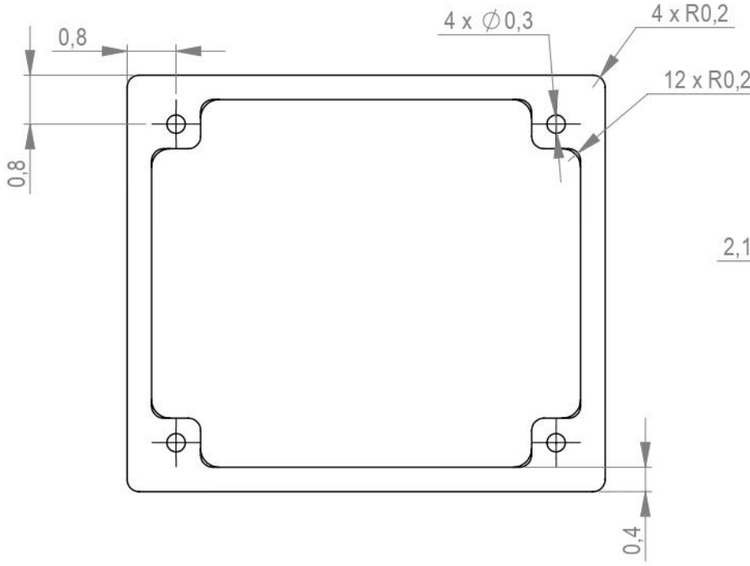
UTN | CIME

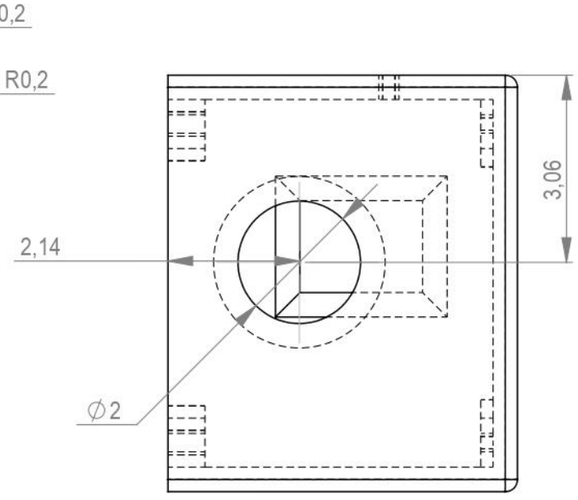
PROYECTO: SISTEMA DE MONITOREO
PARTE: CONJUNTO
CÓDIGO: TS_CP
ESCALA: 1:1
TOLERANCIA: ±0.1

MATERIAL:	AISI-1015	DISEÑÓ:	AYALA R.	13/01/2025	HOJA: 1/3 A3
TRATAMIENTO:	NINGUNO	DIBUJÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
RECUBRIMIENTO:	CROMO	REVISÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
CANTIDAD:	1	APROBÓ:	AYALA R.	13/01/2025	

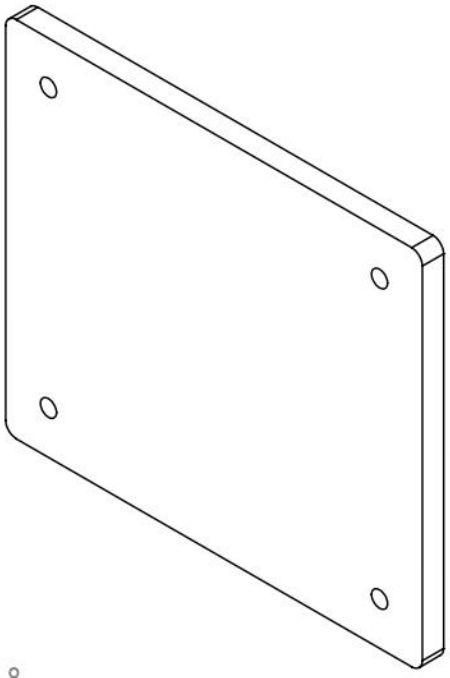


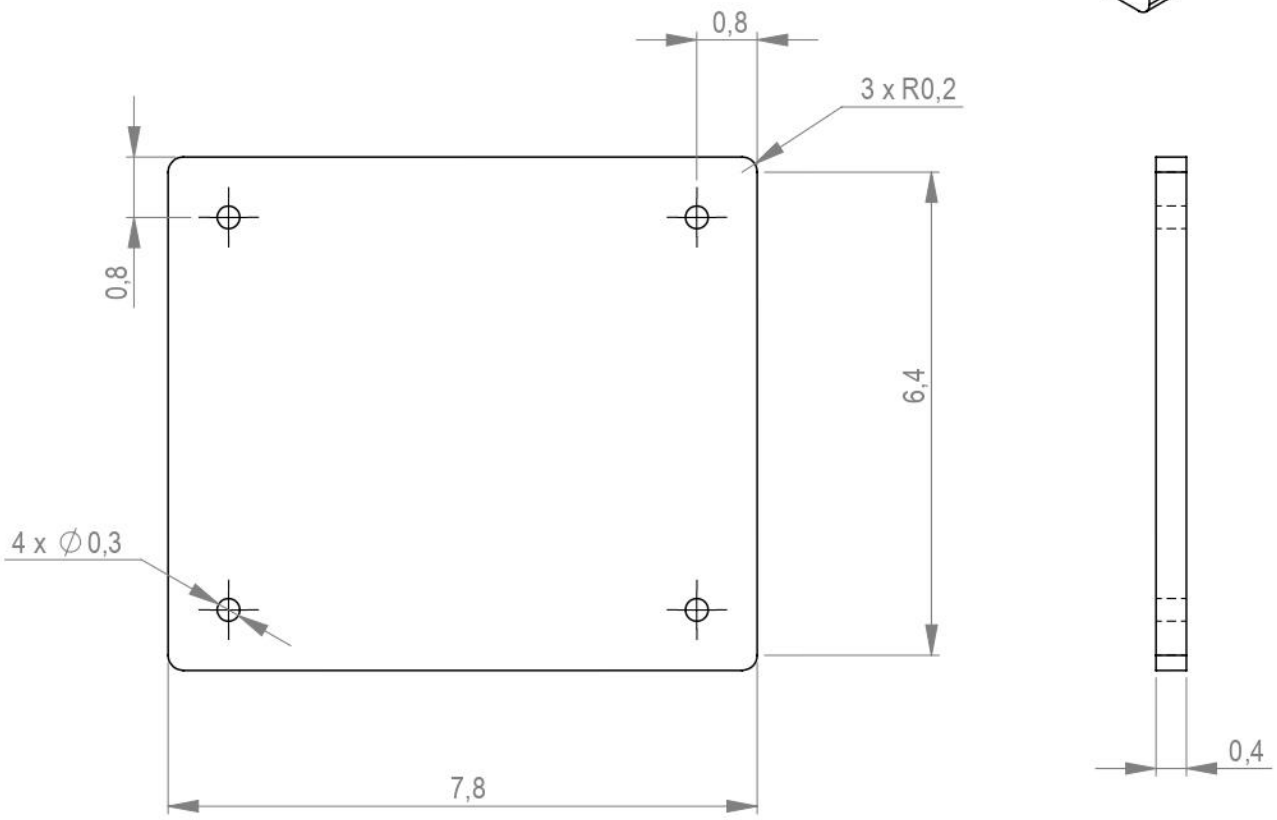






UTN CIME	PROYECTO: SISTEMA DE MONITOREO				ESCALA: 1:1	
	PARTE: TS_CR01					
	CÓDIGO: TScarcasa				TOLERANCIA: ±0.1	
	MATERIAL:	PLA	DISEÑÓ:	AYALA R.	13/01/2025	HOJA: 2/3 A3
	TRATAMIENTO:	LIJADO	DIBUJÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
	RECUBRIMIENTO:	NINGUNO	REVISÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
	CANTIDAD:	3	APROBÓ:	AYALA R.	13/01/2025	





UTN CIME	PROYECTO: SISTEMA DE MONITOREO				ESCALA: 1:1	
	PARTE: TS_TP01					
	CÓDIGO: TStapa				TOLERANCIA: ±0.1	
	MATERIAL:	PLA	DISEÑÓ:	AYALA R.	13/01/2025	HOJA: 3/3 A3
	TRATAMIENTO:	LIJADO	DIBUJÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
	RECUBRIMIENTO:	NINGUNO	REVISÓ:	AYALA R.	13/01/2025	
	CANTIDAD:	3	APROBÓ:	AYALA R.	13/01/2025	