



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

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“MONITOREO Y CONTROL AUTOMATIZADO DE CONDICIONES
AMBIENTALES EN EL CULTIVO DE CHAMPIÑONES EN EL
SECTOR DE SAN JUAN DE ILUMÁN”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en
Telecomunicaciones

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Zhara Jholy Monteros Bernal

DIRECTOR:

Luis Edilberto Suárez Zambrano

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

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:	DE	1004537401	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	Monteros Bernal Zhara Jholy	
DIRECCIÓN:		Panamericana y entrada a Cotacachi	
EMAIL:		zharamonteros12@gmail.com / zjmonterosb@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	062946300 / 0967827672

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	MONITOREO Y CONTROL AUTOMATIZADO DE CONDICIONES AMBIENTALES EN EL CULTIVO DE CHAMPIÑONES EN EL SECTOR DE SAN JUAN DE ILUMÁN
AUTOR (ES):	MONTEROS BERNAL ZHARA JHOLY
FECHA: DD/MM/AAAA	27/01/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES
ASESOR /DIRECTOR:	MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO / MSC. JAIME ROBERTO MICHILENA CALDERÓN

2. 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 27 días del mes de enero de 2026

EL AUTOR:

Monteros Bernal Zhara Jholy

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 27 de enero de 2026

MSC. LUIS EDILBERTO SUÁREZ ZAMBRANO

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. Luis Edilberto Suárez Zambrano

C.C.: 1002304291

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, por su amor incondicional, su sacrificio constante y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi mayor apoyo y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la responsabilidad.

A mis hermanas, por su compañía, paciencia y palabras de ánimo, que fueron un impulso fundamental a lo largo de mi formación académica.

A mi novio, por su apoyo, comprensión y motivación constante, por acompañarme en cada etapa del proceso y por ser un pilar importante durante el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, estuvieron presentes durante mi carrera universitaria, aportando con su apoyo, consejos y confianza en mí.

Zhara Monteros

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte y a la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para el desarrollo de mi carrera profesional.

A mis docentes de la carrera de Telecomunicaciones, quienes a lo largo de mi formación compartieron sus conocimientos, experiencias y valores profesionales, contribuyendo de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

De manera especial, agradezco al MSc. Luis Suárez, tutor del presente Trabajo de Integración Curricular, por su guía, acompañamiento y valiosos aportes durante el desarrollo del proyecto; así como al MSc. Jaime Michilena, asesor del trabajo, por su apoyo académico, observaciones y orientación constante.

A mis amigos y compañeros, por el apoyo, la colaboración y los momentos compartidos a lo largo de la carrera, que hicieron este camino más llevadero y enriquecedor.

Finalmente, agradezco profundamente a mi familia y a todas las personas que, directa o indirectamente, estuvieron presentes durante mi formación universitaria, brindándome apoyo moral, motivación y confianza para alcanzar este logro.

Zhara Monteros

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	7
AGRADECIMIENTO	8
ÍNDICE DE FIGURAS	16
ÍNDICE DE TABLAS	17
RESUMEN	19
ABSTRACT	20
CAPÍTULO I	
1.1 Planteamiento del Problema	21
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo General	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 Alcance y delimitación	23
1.4 Justificación	24
CAPÍTULO II	
2.1 Producción de Alimentos	26
2.1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y su relación con la producción alimentaria	26
2.1.2 Rol de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la seguridad alimentaria	27
2.2 Agricultura tradicional vs. Agricultura Tecnológica	28

2.2.1	Transición hacia la agricultura tecnológica	29
2.2.2	Beneficios del uso de tecnología en la agricultura para la sostenibilidad	30
2.3	Cultivo de Champiñones	31
2.3.1	Historia y evolución del cultivo de champiñones	31
2.3.2	Importancia económica, social y ambiental del cultivo de champiñones	32
2.3.3	Ciclo de vida de los champiñones	32
2.3.4	Principales especies de champiñones cultivados	33
2.3.4.1	<i>Agaricus Bisporus</i> Champiñón común	33
2.3.4.2	<i>Pleurotus ostreatus</i> Ostra	34
2.3.4.3	<i>Lentinula edodes</i> Shiitake	35
2.3.5	Técnicas de cultivo	36
2.3.5.1	Aire Libre	36
2.3.5.2	Invernadero	37
2.3.5.3	Composteras	38
2.3.6	Parámetros Ambientales en el Cultivo de Champiñones - Invernadero	38
2.4	Monitoreo y Control de Variables Ambientales	39
2.4.1	Importancia del monitoreo en sistemas agrícolas controlados	40
2.4.2	Tipos de sensores aplicados al monitoreo	40
2.4.2.1	Sensores de temperatura	41
2.4.2.2	Sensores de humedad	41
2.4.2.3	Sensores de CO ₂	42
2.4.2.4	Otros sensores relacionados (luminosidad, pH)	43
2.5	Tecnologías Aplicadas al Monitoreo Agrícola	43

2.5.1	Agricultura de Precisión	44
2.5.2	Internet de las cosas.	44
2.5.3	Integración en sistemas IoT (Internet de las cosas).	45
2.5.3.1	Funcionamiento y aplicaciones en el monitoreo de cultivos	45
2.5.3.2	Redes inalámbricas.	46
2.5.3.3	Transmisión de datos mediante redes inalámbricas	46
2.5.4	Sistema de análisis de datos en tiempo real	47
2.5.4.1	Plataformas de software para monitoreo y control ambiental	47
2.5.4.2	Visualización de datos en aplicaciones móviles y computadoras	48
2.6	Lógica Difusa Aplicada al Control de Variables Ambientales	49
2.6.1	Principios de la lógica difusa	49
2.6.2	Aplicación en sistemas de control agrícola.	50
2.6.3	Ventajas de la lógica difusa frente a métodos tradicionales	51
2.6.4	Monitoreo y control inteligente.	52
 CAPÍTULO III		
3.1	METODOLOGÍA	53
3.1.1	Descripción general de la metodología de cascada.	55
3.2	ETAPA DE ANÁLISIS	56

3.2.1	Situación actual	56
3.2.2	Identificación de requerimientos	57
3.2.2.1	Determinación de Stakeholders	58
3.2.2.2	Nomenclatura de Requerimientos	58
3.2.2.3	Priorización de los Requerimientos del Sistema	59
3.3	Requerimientos operacionales y de usuario	59
3.4	Requerimientos del Sistema	60
3.4.0.1	Requerimientos de Arquitectura (SRSH)	61
3.5	Selección de Hardware y Software	62

3.5.1	Elección de Hardware	63
3.5.1.1	Elección de plataforma de procesamiento en la nube	63
3.5.1.2	Elección de la placa nodal	66
3.5.1.3	Elección del sensor de temperatura y humedad	69
3.5.1.4	Elección del sensor de Dióxido de Carbono	71
3.5.1.5	Elección del sensor de PH	74
3.5.1.6	Elección del sensor de luminosidad	76
3.5.2	Elección de Tecnología Inalámbrica (WiFi)	78
3.5.3	Elección fuente de alimentación	79
3.5.4	Elección de Software.	81
3.5.4.1	Software para la adquisición de datos	82
3.5.4.2	Software para procesamiento y análisis	82
3.5.4.3	Software para el almacenamiento de datos	83
3.5.4.4	Software para la visualización	84
3.6	ETAPA DE DISEÑO	86

3.6.1	Diseño del Sistema	86
3.6.1.1	Arquitectura general del sistema	86
3.6.1.2	Diagrama de conexión del Nodo Sensor	90
3.6.1.3	Diagrama de conexión de plataforma de procesamiento	93
3.6.1.4	Diagrama de flujo del nodo sensor.	93
3.6.1.5	Diagrama de flujo del procesamiento en la nube	96
3.6.1.6	Calibración y lectura de datos mediante Sensores	97
3.6.1.7	Programación del ESP32 para envío de datos a la nube	101
3.6.2	Creación y estructuración de la base de datos para el análisis inteligente	103
3.6.2.1	Implementación del algoritmo de lógica difusa en Google Cloud.	104
3.6.2.2	Sistema de decisión ambiental basado en lógica difusa.	106
3.7	ETAPA DE IMPLEMENTACIÓN	107
3.7.1	Implementación del nodo sensor IoT en el entorno de cultivo	107
3.7.2	Acceso a la interfaz web	108
3.7.3	Visualización de variables ambientales.	109
3.7.4	Gestión de alertas	110
 CAPÍTULO IV		
4.1	Descripción del escenario de pruebas	114
4.2	Pruebas de funcionamiento del sistema	115
4.2.1	Prueba de continuidad en la adquisición de datos.	117
4.2.2	Prueba de almacenamiento y procesamiento en la nube	118
4.2.3	Prueba de visualización y actualización de datos en la interfaz web	120
4.3	Análisis semana a semana del comportamiento ambiental del cultivo	121

4.3.1	Semana 1: condiciones iniciales y comportamiento del sistema.	121
4.3.2	Semana 2: ajustes del sistema y respuesta del cultivo	122
4.3.3	Semana 3: estabilidad ambiental y mejora en las condiciones del cultivo	124
4.3.4	Semana 4: consolidación parcial del control ambiental	125
4.3.5	Semana 5: comportamiento consolidado del sistema	127
4.3.6	Semana 6: estado estable del sistema automatizado	128
4.4	Comparación de las condiciones ambientales y la producción semanal	130
4.4.1	Cálculo del porcentaje de reducción de pérdidas	131
4.5	Evaluación del sistema de alertas	133
4.5.1	Consideraciones observadas durante la fase de pruebas	133
4.6	Costos del Sistema	134
4.6.1	Costo de Hardware	134
4.6.2	Costo de Software	135
4.6.3	Costo de Infraestructura	135
4.6.4	Costo Total del Sistema.	136
4.6.5	Análisis Costo–Beneficio	136
4.7	Validación de la propuesta	137
	CONCLUSIONES	139
	RECOMENDACIONES	141
	BIBLIOGRAFÍA	142
	ANEXOS	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Hongo champiñón (Agaricus bisporus).</i>	34
Figura 2	Hongo Ostra (<i>Pleurotus ostreatus</i>).	35
Figura 3	<i>Hongo shiitake (Lentinula edodes).</i>	36
Figura 4	<i>Metodología de Cascada.</i>	54
Figura 5	<i>Zona de cultivo.</i>	57
Figura 6	Plataforma Google Cloud	66
Figura 7	Placa nodal	68
Figura 8	Sensor SH31	71
Figura 9	Sensor MQ135	73
Figura 10	Sensor SEN0169	75
Figura 11	Sensor de luminosidad	78
Figura 12	<i>Arquitectura general del sistema.</i>	88
Figura 13	<i>Diagrama de Conexión del Nodo Sensor</i>	91
Figura 14	<i>Diagrama de Conexión de plataforma de procesamiento</i>	93
Figura 15	Diagrama de flujo del nodo sensor	95
Figura 16	Diagrama de flujo del procesamiento	97
Figura 17	FireBase Datos Recibidos	104
Figura 18	Implementación real del nodo sensor IoT con integración de sensores ambientales.	107
Figura 19	Nodo sensor IoT instalado en el entorno real de cultivo de champiñones.	108
Figura 20	Página Web	110
Figura 21	Mensajes de alertas mediante telegram	112
Figura 22	Registro de datos ambientales procesados en la base de datos, incluyendo marca temporal y conteo de alertas generadas	116
Figura 23	Identificación del estado de las variables ambientales, destacando la variable temperatura en condición de alerta	116
Figura 24	Notificación de alerta enviada al usuario mediante Telegram ante una condición crítica de temperatura	117
Figura 25	Registro continuo de datos ambientales almacenados en la base de datos, evidenciando la recepción de información a intervalos regulares de un minuto	118
Figura 26	Definición de las reglas difusas globales del cultivo y funciones auxiliares utilizadas para la evaluación de las variables ambientales	119
Figura 27	Estructura de almacenamiento de los datos procesados en la base de datos en la nube	120
Figura 28	Interfaz web del sistema de monitoreo mostrando la visualización y actualización de las variables ambientales en tiempo casi real	121
Figura 29	Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 1	122
Figura 30	Gráficas de los promedios diarios de las variables ambientales durante la Semana 1	122
Figura 31	Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 2	123

Figura 32	Gráficas de los promedios diarios de las variables ambientales durante la Semana 2	123
Figura 33	Promedios diarios de las variables ambientales y promedio general correspondiente a la Semana 3 del cultivo de champiñones	124
Figura 34	Representación gráfica de los promedios diarios de temperatura, humedad, concentración de CO ₂ , luminosidad y pH durante la Semana 3	125
Figura 35	Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 4 del cultivo de champiñones	126
Figura 36	Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 4	126
Figura 37	Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 5 del cultivo de champiñones	127
Figura 38	Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 5	128
Figura 39	Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 6 del cultivo de champiñones	129
Figura 40	Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 6	129
Figura 41	Comparación semanal entre variables ambientales promedio y producción del cultivo	131
Figura 42	Ejemplo de alerta generada por el sistema ante una condición ambiental fuera de rango	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparación entre agricultura tradicional y agricultura tecnológica. . . .	29
Tabla 2	Condiciones óptimas para el cultivo de champiñones.	39
Tabla 3	Comparación entre métodos tradicionales y lógica difusa en control de variables ambientales.	51
Tabla 4	Lista de Stakeholders	58
Tabla 5	Nomenclatura de Requerimientos	58
Tabla 6	Priorización de los Requerimientos del Sistema	59
Tabla 7	Requerimientos Operacionales y de Usuario	60
Tabla 8	Requerimientos del Funcionamiento del Sistema (SySR)	61
Tabla 9	Requerimientos de Arquitectura del Sistema	62
Tabla 10	Evaluación comparativa de plataformas de procesamiento en la nube . . .	64
Tabla 11	Características técnicas de la plataforma Google Cloud	65
Tabla 12	Evaluación comparativa de placas nodales	67
Tabla 13	Especificaciones técnicas de la placa nodal ESP32 DevKit V1	68
Tabla 14	Evaluación comparativa de sensores de temperatura y humedad	69
Tabla 15	Especificaciones técnicas de sensores de temperatura y humedad	70
Tabla 16	Evaluación comparativa de sensores de CO ₂	72
Tabla 17	Especificaciones técnicas de sensores de CO ₂	73
Tabla 18	Evaluación comparativa de sensores de pH	74
Tabla 19	Especificaciones técnicas de sensores de pH	75
Tabla 20	Evaluación comparativa de sensores de luminosidad	76
Tabla 21	Especificaciones técnicas de sensores de luminosidad	77
Tabla 22	Selección de Tecnología Inalámbrica	79
Tabla 23	Consumo eléctrico del nodo sensor	80
Tabla 24	Software del Nodo Sensorial (ESP32)	82
Tabla 25	Software del Bloque de Procesamiento	83
Tabla 26	Selección de la Plataforma de Almacenamiento	84
Tabla 27	Selección de Software de Visualización	85
Tabla 28	Conexión de sensores al ESP32	92
Tabla 29	Reglas del sistema de lógica difusa para el monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones	105
Tabla 30	Niveles de alerta del sistema de monitoreo ambiental	113
Tabla 31	Comparación semanal de las condiciones ambientales promedio y la producción del cultivo de champiñones	130
Tabla 32	Costos de Hardware	135
Tabla 33	Costos de Software	135
Tabla 34	Costos de Infraestructura	136
Tabla 35	Costo Total del Sistema	136
Tabla 36	Conexión de sensores al ESP32	151

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema inteligente para el monitoreo y control de las condiciones ambientales en el cultivo de champiñones, específicamente en la parroquia de San Juan de Ilumán. La solución propuesta integra sensores IoT (temperatura, humedad, CO₂, pH y luminosidad) conectados a un microcontrolador ESP32, que transmite los datos directamente a Firebase, donde se procesan y visualizan a través de una plataforma web desarrollada en Google Cloud. El sistema emplea lógica difusa para evaluar el estado del cultivo y generar alertas automáticas cuando las variables exceden los rangos óptimos definidos. La implementación ha demostrado ser beneficiosa para optimizar las condiciones del cultivo, mejorar la productividad y reducir pérdidas, constituyéndose en una herramienta efectiva, económica y replicable para pequeños productores agrícolas.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, cultivo de champiñones, IoT, sensores, lógica difusa, Firebase, automatización agrícola.

ABSTRACT

This project aims to design and implement an intelligent system for monitoring and controlling environmental conditions in mushroom cultivation, specifically in the parish of San Juan de Ilumán. The proposed solution integrates IoT sensors (temperature, humidity, CO₂, pH, and light) connected to an ESP32 microcontroller, which transmits data directly to Firebase. The information is processed and displayed through a web platform developed on Google Cloud. The system uses fuzzy logic to assess the cultivation status and automatically triggers alerts when variables exceed optimal thresholds. The implementation has proven beneficial for optimizing growing conditions, improving productivity, and reducing losses, positioning the system as an effective, cost-efficient, and scalable tool for small agricultural producers.

Keywords: Environmental monitoring, mushroom cultivation, IoT, sensors, fuzzy logic, Firebase, smart agriculture

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En Ecuador, la producción de champiñones está concentrada en las provincias de Pichincha y Carchi, que cubren aproximadamente el 80 % del consumo nacional. El 20 % restante es importado, lo que refleja una oportunidad de crecimiento para la producción local. Aunque zonas como Otavalo, en la provincia de Imbabura, cuentan con condiciones climáticas favorables, los pequeños productores de estas áreas enfrentan barreras significativas debido a la falta de tecnología adecuada para optimizar el cultivo (Mogrovejo Lazo et al., 2020).

La ausencia de sistemas automatizados de monitoreo y control limita la capacidad de los agricultores para manejar variables críticas del cultivo. Estas variables, que son indispensables para el crecimiento óptimo de los champiñones, son gestionadas manualmente, lo que incrementa el riesgo de condiciones desfavorables. Este manejo manual también puede provocar pérdidas significativas en la calidad y cantidad del producto final (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2021). Por otra parte, la falta de precisión en el control de las condiciones ambientales incrementa los costos operativos, ya que los agricultores deben realizar intervenciones correctivas con frecuencia. Esto reduce la competitividad del producto nacional frente a los importados, que generalmente cumplen con estándares de calidad más altos gracias a la implementación de tecnologías más avanzadas (Villacrés et al., 2022).

La parroquia de San Juan de Ilumán, ubicada en el cantón Otavalo, es conocida por su clima favorable para la agricultura, lo que la convierte en una región con gran potencial productivo. Sin embargo, al centrarnos en un invernadero de esta zona, se ha identificado que el cultivo de champiñones enfrenta desafíos importantes debido a la ausencia de condiciones am-

bientales controladas para garantizar su desarrollo óptimo. A pesar de las ventajas climáticas generales, los productores se enfrentan a la dificultad de no poder intervenir eficazmente para estabilizar las variaciones climáticas, lo que agrava la problemática de mantener un ambiente adecuado. Esta incapacidad para manejar eventualidades incrementa el riesgo de pérdidas en la producción, comprometiendo tanto la calidad como la cantidad del producto final. Además, estas limitaciones restringen el potencial agrícola de la región y dificultan la implementación de procesos más eficientes y sostenibles. C

Esta situación subraya la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan automatizar el monitoreo y control de las condiciones climáticas en los cultivos de champiñones. Dichas soluciones no solo deberán ser capaces de gestionar múltiples variables ambientales de manera flexible, sino que también mejorarán la calidad del producto, reducirán los costos operativos y fomentarán la sostenibilidad. Este enfoque busca potenciar la competitividad de los pequeños productores de San Juan de Ilumán, promoviendo una producción eficiente y alineada con las exigencias del mercado nacional e internacional (Mena & Mena, 2021).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Monitorear las condiciones ambientales en un invernadero de la parroquia de San Juan de Ilumán para el cultivo de champiñones, mejorando su productividad.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1. Recopilar información sobre las condiciones ambientales necesarias para el cultivo óptimo de champiñones.

2. Definir los requisitos técnicos para el diseño de un sistema de monitoreo automático para el invernadero.
3. Desarrollar un sistema de monitoreo que permita regular las variables ambientales críticas dentro del invernadero.
4. Realizar pruebas del sistema de monitoreo implementado y evaluando su efectividad en la mejora de las condiciones del cultivo.

1.3 Alcance y delimitación

El desarrollo del proyecto seguirá la metodología de cascada, donde cada fase se completará de forma secuencial y estructurada, asegurando que se cumpla con los requisitos del sistema a medida que se avanza en cada etapa. Las fases principales del proyecto serán las siguientes:

Fase I: Análisis de Requisitos

En esta primera fase, se realizará un análisis exhaustivo de los requisitos del sistema, que incluye la identificación de las variables ambientales que deben ser monitoreadas como temperatura, humedad, CO₂ y otros factores relevantes. También se evaluará el entorno del invernadero en la parroquia de San Juan de Ilumán, considerando sus condiciones específicas y las necesidades de los productores locales. Esta fase también abarcará la selección de los sensores más adecuados y el establecimiento de las especificaciones técnicas necesarias para que el sistema sea eficiente y cumpla con los objetivos del proyecto.

Fase II: Diseño del Sistema

En esta fase, se procederá con el diseño detallado del sistema de monitoreo. Esto incluirá la selección de la arquitectura adecuada para la integración de los sensores, el diseño de la interfaz de usuario y la estructura del sistema de control. Se definirán la disposición y configuración de los sensores en el invernadero, las conexiones entre los dispositivos y la infraestructura para la transmisión de datos. También se elaborará el diseño del software que controlará el monitoreo en tiempo real y las alertas automáticas para los usuarios, facilitando el acceso

remoto y la gestión del sistema.

Fase III: Implementación

Durante esta fase, el sistema será instalado en el invernadero seleccionado, incluyendo la colocación de sensores y hardware de control. Posteriormente, se procederá a integrar este hardware con el software desarrollado para el monitoreo y análisis de datos en tiempo real. Este paso garantizará que todos los componentes funcionen de manera conjunta y eficiente, sentando las bases para su uso operativo.

Fase IV: Pruebas

Se realizarán pruebas exhaustivas del sistema en condiciones reales dentro del invernadero. Estas pruebas incluirán la validación de los sensores, la calibración del sistema, y la evaluación de la precisión en la recolección de datos. Se verificará que el sistema opere continuamente, genere alertas oportunas y sea accesible desde dispositivos móviles y computadoras. Además, se evaluará la efectividad de la lógica difusa aplicada en el control de la variable seleccionada.

1.4 Justificación

La implementación de un sistema de control y monitoreo inteligente para el cultivo de champiñones en la parroquia de San Juan de Ilumán responde a la urgente necesidad de modernizar y optimizar los procesos agrícolas, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 2, que busca lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible (ODS 2 Hambre Cero | Pacto Mundial ONU, 2020). Este proyecto no solo busca mejorar la eficiencia en el manejo ambiental del cultivo, sino también potenciar la productividad y competitividad de los pequeños agricultores en el mercado local. A través de la incorporación de tecnologías avanzadas como sensores de monitoreo ambiental y sistemas automatizados, se contribuirá a mejorar las condiciones de crecimiento de los champiñones, reduciendo el impacto de las variaciones climáticas y aumentando la calidad del producto.

En el contexto de la parroquia de San Juan de Ilumán, los productores de champiñones enfrentan desafíos significativos debido a la falta de acceso a tecnologías adecuadas para controlar y ajustar las condiciones ambientales de sus invernaderos. La escasez de herramientas tecnológicas adecuadas limita su capacidad para optimizar el proceso productivo, exponiéndolos a riesgos de pérdidas económicas y una baja competitividad en el mercado. Este proyecto se alinea con el Plan Nacional de Agricultura Sostenible 2021-2025, el cual señala la necesidad de fomentar la adopción de tecnologías de vanguardia en el sector agrícola para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad en la producción de alimentos (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca, 2021).

Además, el uso del Internet de las Cosas (IoT) en el sector agrícola tiene un gran potencial para mejorar la gestión de los recursos naturales y optimizar los procesos productivos, tal como lo destacan estudios recientes (Quiñónez Muñoz, 2019). En este caso, la implementación de sensores para medir variables ambientales interconectados en una plataforma digital, permitirá a los agricultores monitorear en tiempo real las condiciones de los invernaderos, mejorando la toma de decisiones y la eficiencia en el cultivo de champiñones. Esto no solo incrementará la calidad y cantidad de la producción, sino que también ayudará a disminuir los costos operativos, reduciendo el consumo innecesario de energía y recursos.

Según Lenco et al. (2017), la inclusión de tecnología en el agro no solo tiene un impacto positivo en la calidad de los productos, sino que también optimiza el tiempo invertido en cada fase del proceso de producción. La implementación de tecnologías de monitoreo y control ambiental, como las que propone este proyecto, facilitará a los agricultores de San Juan de Ilumán una gestión más eficiente de sus cultivos, mejorando así su rentabilidad y competitividad en el mercado local. Este proyecto busca, en última instancia, contribuir al desarrollo sostenible del sector agrícola, empoderando a los pequeños productores con herramientas tecnológicas que les permitan enfrentar los desafíos del cambio climático, mejorar su productividad y, por ende, generar mayores oportunidades de ingresos y bienestar para las comunidades rurales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El Capítulo 2 establece el marco integral para el desarrollo del sistema de monitoreo y control automatizado del cultivo de champiñones. Inicia contextualizando el proyecto en los ODS y la seguridad alimentaria según la OMS, destacando la transición de la agricultura tradicional a la tecnológica. Luego, analiza la historia, importancia y evolución del cultivo de champiñones, sus principales especies y ciclo de vida. Se abordan técnicas de cultivo y sus desafíos, seguido de la aplicación de la lógica difusa para el control ambiental. Finalmente, se exploran sensores, IoT y plataformas cloud, proporcionando la base conceptual y técnica del proyecto.

2.1 Producción de Alimentos

La producción de alimentos es un pilar fundamental para el desarrollo de las sociedades, asegurando la disponibilidad y el acceso a los recursos necesarios para la nutrición humana. En un contexto global, se enfrenta a desafíos como el cambio climático, el aumento de la población y la sostenibilidad de los métodos productivos. La innovación y las tecnologías emergentes juegan un papel crucial en la mejora de la eficiencia y la resiliencia de los sistemas agrícolas.

2.1.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y su relación con la producción alimentaria

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por las Naciones Unidas en 2015, son un marco global con 17 objetivos que abordan desafíos como la pobreza, el hambre, la desigualdad y el cambio climático. En particular, el ODS 2 se centra en "poner fin al

hambre, lograr la seguridad alimentaria y promover la agricultura sostenible”, subrayando la necesidad de prácticas agrícolas que aumenten la productividad de manera sostenible y resiliente frente al cambio climático (Unidas, 2015).

La transición hacia una producción alimentaria más sostenible está vinculada también al ODS 12, que promueve patrones de consumo y producción responsables. Este objetivo busca reducir el desperdicio de alimentos y optimizar el uso de los recursos naturales, lo que favorece la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria a largo plazo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019). Además, el ODS 13 enfatiza la urgencia de adoptar medidas contra el cambio climático, un desafío clave para la agricultura, que es tanto vulnerable al clima como responsable de emisiones significativas (Pachauri et al., 2014).

La implementación de los ODS en la producción alimentaria busca transformar los sistemas agroalimentarios para que sean más equitativos y sostenibles. Esto incluye fomentar la innovación tecnológica, reducir pérdidas postcosecha y apoyar a los pequeños productores, contribuyendo a un desarrollo agrícola más inclusivo y un futuro sostenible que equilibre las necesidades sociales, económicas y ambientales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2019).

2.1.2 Rol de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en la seguridad alimentaria

La Organización Mundial de la Salud (OMS) juega un papel crucial en la promoción de la inocuidad alimentaria, que es esencial para garantizar la seguridad alimentaria y proteger la salud pública. La inocuidad alimentaria implica la ausencia de peligros en los alimentos que puedan dañar la salud, como contaminantes biológicos, químicos o físicos. La OMS trabaja junto con otras organizaciones internacionales para garantizar la inocuidad de los alimentos a lo largo de toda la cadena alimentaria, siguiendo el enfoque de *Una sola Salud* (O. M. de la Salud, 2020).

Entre las acciones de la OMS se incluyen el desarrollo de directrices y normativas internacionales, fortalecimiento de capacidades nacionales, y sensibilización sobre la manipulación segura de alimentos. También apoya a los países en la implementación de sistemas eficaces de control de riesgos y respuesta ante emergencias, facilitando la cooperación internacional a través de redes como la Red Internacional de Autoridades de Inocuidad de los Alimentos (INFOSAN) (O. P. de la Salud, 2025).

La OMS también promueve programas educativos para fomentar prácticas seguras en la manipulación de alimentos, tanto para manipuladores como para consumidores. Esto contribuye a la prevención de enfermedades transmitidas por alimentos, mejorando la vigilancia y la acción en todo el mundo, y apoyando a los países a integrar estas actividades en sus sistemas nacionales de vigilancia y respuesta, según el Reglamento Sanitario Internacional (O. M. de la Salud, 2020).

2.2 Agricultura tradicional vs. Agricultura Tecnológica

La Tabla 1 ofrece una comparación detallada entre la agricultura tradicional y la agricultura tecnológica, destacando las diferencias en términos de métodos, productividad, sostenibilidad, costo inicial, manejo de recursos, adaptabilidad e impacto social. Mientras que la agricultura tradicional se basa en métodos heredados y conocimientos ancestrales, con una productividad limitada y un uso intensivo de recursos, la agricultura tecnológica incorpora tecnologías avanzadas como IoT, inteligencia artificial y maquinaria automatizada, lo que permite optimizar el monitoreo y control ambiental, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y aumentar la competitividad en el mercado.

Tabla 1.

Comparación entre agricultura tradicional y agricultura tecnológica.

Criterio	Agricultura Tradicional	Agricultura Tecnológica
Definición	Uso de métodos heredados y conocimientos ancestrales, generalmente manuales.	Uso de tecnologías avanzadas como IoT, IA y maquinaria automatizada.
Productividad	Limitada, depende de condiciones climáticas y métodos manuales.	Alta, optimizada por el monitoreo y control automatizado.
Sostenibilidad	Puede generar impactos negativos en el medio ambiente debido al uso ineficiente de recursos.	Mejora la sostenibilidad mediante la optimización de insumos y reducción de desperdicios.
Costo Inicial	Bajo costo inicial, accesible para pequeños productores.	Alto costo inicial debido a la adquisición de equipos y tecnología.
Manejo de Recursos	Uso intensivo de agua, energía y suelo sin optimización.	Uso eficiente de recursos mediante sistemas inteligentes.
Adaptabilidad	Limitada a técnicas tradicionales, con baja capacidad de adaptación a cambios.	Alta adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales mediante el uso de sensores y algoritmos.
Impacto Social	Mayor integración de prácticas culturales, pero limitada en acceso a mercados globales.	Incrementa la competitividad, mejora los ingresos y fomenta el desarrollo rural tecnológico.

2.2.1 Transición hacia la agricultura tecnológica

La agricultura en Ecuador está en transición hacia la incorporación de tecnologías avanzadas que mejoren la eficiencia y sostenibilidad, complementando las prácticas tradicionales que dependen de herramientas manuales y conocimientos ancestrales. Mientras que la agricultura tradicional busca la autosuficiencia, la agricultura tecnológica optimiza el uso de recursos, mejora la productividad y reduce el impacto ambiental (Asquimen, 2022)primicias2023.

Iniciativas como la Estrategia Tecnológica Jóvenes Rurales del MAG capacitan a jóvenes en el uso de nuevas tecnologías, mientras que programas como AgroInventa buscan mejorar la calidad de cultivos mediante innovación. Además, se promueven prácticas agrícolas sostenibles en la región amazónica, beneficiando a productores y protegiendo los bosques (MAG, 2023)ambiente2023.

La provincia de Tungurahua destaca por su adopción de tecnología agrícola avanzada, ofre-

ciendo formación a jóvenes y fomentando una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente (Farmonaut, 2023).

2.2.2 Beneficios del uso de tecnología en la agricultura para la sostenibilidad

La implementación de tecnologías avanzadas en la agricultura, como sistemas automatizados de monitoreo y control ambiental, contribuye significativamente a la sostenibilidad al mejorar la gestión de factores clave como la temperatura, humedad y luz en el cultivo de champiñones. Estos sistemas optimizan el uso de recursos como agua, energía y nutrientes, lo que incrementa la eficiencia y reduce el desperdicio. Además, permiten un control en tiempo real de los parámetros ambientales, disminuyendo los costos asociados al uso excesivo de insumos y reduciendo el impacto ambiental (Conapa, 2019).

El uso de tecnologías como sensores avanzados y sistemas de información geográfica también juega un papel crucial en la mejora de la eficiencia agrícola. Estas herramientas permiten una gestión precisa y adaptada a las condiciones locales, optimizando recursos y reduciendo la necesidad de productos químicos y fertilizantes. Asimismo, facilitan la toma de decisiones informadas, basadas en datos precisos, lo que mejora la adaptabilidad de los cultivos a las condiciones climáticas cambiantes y minimiza el impacto ambiental (Verde, 2021).

En el caso del cultivo de champiñones en San Juan de Ilumán, la adopción de estas tecnologías puede optimizar el entorno de producción, promoviendo una agricultura más eficiente y responsable. La digitalización y automatización de los procesos agrícolas también mejora la planificación y el control de los cultivos, lo que asegura una mayor productividad y una reducción en el uso de recursos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y competitividad tanto a nivel local como global (Asquimen, 2022).

2.3 Cultivo de Champiñones

El cultivo de champiñones es una opción agrícola sostenible y eficiente, destacada por su bajo requerimiento de recursos y su alto valor nutricional. Es una fuente importante de proteínas y nutrientes esenciales, con creciente demanda en los mercados.

2.3.1 Historia y evolución del cultivo de champiñones

El cultivo de champiñones tiene una historia extensa que se remonta al siglo XII en Asia, donde los primeros registros de producción de hongos Shiitake surgieron en China. Los agricultores utilizaban troncos humedecidos del árbol shii para favorecer su crecimiento, técnica que posteriormente se extendió a Japón y Corea. Estas prácticas ancestrales sentaron las bases para los métodos modernos de cultivo de hongos (Fungiturismo, 2021).

En Europa, el cultivo del *Agaricus bisporus* comenzó en Francia alrededor de 1650, cuando agricultores parisinos observaron su crecimiento en compost de caballo. Este hallazgo llevó al desarrollo de cultivos en las catacumbas de París, proporcionando condiciones óptimas para su producción. En el siglo XVIII, las técnicas se difundieron a otros países europeos, impulsadas por publicaciones especializadas como *The Gardener's Dictionary* de Philip Miller (Fungiturismo, 2021). Posteriormente, la Revolución Industrial en el siglo XIX trajo innovaciones en el uso de sustratos agrícolas y la transición de cultivos en grutas a instalaciones especializadas (Mushrooms, 2019).

En América Latina, el cultivo de champiñones es relativamente reciente, destacando su introducción en Colombia hace cinco décadas gracias al empresario alemán Alfredo Beck, quien modernizó su producción y comercialización (ANEIA, 2020). Actualmente, la actividad se ha beneficiado de avances tecnológicos como el monitoreo ambiental automatizado y el manejo sostenible de sustratos, lo que ha optimizado la eficiencia productiva y reducido el impacto ambiental de este cultivo.

2.3.2 Importancia económica, social y ambiental del cultivo de champiñones

El cultivo de champiñones en Ecuador representa una actividad económica relevante, especialmente en las provincias de Pichincha y Carchi, que concentran aproximadamente el 80 % de la producción nacional. El 20 % restante del consumo interno es abastecido mediante importaciones, lo que señala un margen significativo para el crecimiento de la producción local (Redalyc, 2023). En el ámbito social, se han desarrollado iniciativas como la producción de hongos ostra en la región del Sumaco - Colombia, donde las comunidades locales se han beneficiado al combinar conservación ambiental y generación de ingresos. Estas actividades han promovido la seguridad alimentaria y mejorado las condiciones de vida de los involucrados (Solutions, 2023).

Desde el punto de vista ambiental, el cultivo de champiñones tiene un bajo impacto ecológico debido a su capacidad de aprovechar residuos agrícolas como sustrato. Este proceso no solo contribuye al reciclaje de materia orgánica, sino que también minimiza la generación de desechos. Además, el cultivo suele realizarse de manera orgánica, reduciendo el uso de productos químicos y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles que benefician tanto al medio ambiente como a la salud de los consumidores (Zuleta, 2023).

2.3.3 Ciclo de vida de los champiñones

El ciclo de vida de los champiñones comienza con la liberación de esporas por parte de un hongo maduro, que germinan y forman estructuras llamadas hifas al encontrar condiciones ambientales favorables. Estas hifas se extienden y ramifican, creando una red llamada micelio, la cual actúa como base para el crecimiento del hongo. Bajo condiciones óptimas de temperatura, humedad y luz, el micelio produce primordios que evolucionan en cuerpos fructíferos, conocidos como champiñones. Cuando los champiñones maduran, liberan nuevas esporas, reiniciando el ciclo (Bros, 2023).

Factores ambientales como la temperatura, la humedad y la luz son cruciales en cada fase del ciclo. Por ejemplo, muchas especies de champiñones requieren altos niveles de humedad y

temperaturas moderadas para desarrollarse correctamente. Además, algunas especies necesitan luz para fructificar, mientras que otras pueden hacerlo en total oscuridad (Cabezas, 2023).

2.3.4 Principales especies de champiñones cultivados

Las principales especies de champiñones cultivados son el champiñón común (*Agaricus bisporus*), el ostra (*Pleurotus ostreatus*) y el shiitake (*Lentinula edodes*), cada una apreciada por sus características de sabor, textura y facilidad de cultivo.

2.3.4.1 *Agaricus Bisporus* Champiñón común

El *Agaricus bisporus*, conocido como champiñón blanco, es una de las variedades más cultivadas y consumidas a nivel mundial. Su versatilidad en la cocina y su valor nutricional lo convierten en un alimento clave en muchas dietas. En la Figura 1, se observa su morfología característica.

Este hongo es una fuente rica en vitaminas del grupo B, minerales como fósforo y potasio, y compuestos antioxidantes con posibles beneficios para la salud, incluyendo propiedades inmunológicas y cardiovasculares (Verleal, 2024). En Ecuador, su cultivo ha cobrado relevancia, destacándose la importancia de los sustratos adecuados para optimizar la producción (García Martínez, 2009).

Dado su impacto económico y nutricional, el *Agaricus bisporus* representa una oportunidad para fortalecer la producción agrícola y la seguridad alimentaria en el país.

Figura 1.

Hongo champiñón (Agaricus bisporus).



Imagen tomada de [Ministerio del Ambiente, 2023].

2.3.4.2 *Pleurotus ostreatus* Ostra

El *Pleurotus ostreatus*, conocido como hongo ostra, es una variedad comestible con gran relevancia en Ecuador, tanto por su valor nutricional como por su potencial en la valorización de residuos agroindustriales. En la Figura 2, se muestra su morfología característica.

Este hongo se cultiva ampliamente en el país junto con otras especies como el *P. djamor* (ostra rosado) y el *Agaricus bisporus* (champiñón blanco) (Bionatura, 2024). Su capacidad para descomponer sustratos lignocelulósicos permite su cultivo en residuos como cascarilla de arroz y aserrín, optimizando la producción con una alta eficiencia biológica (Cruz, 2021).

Por su alto contenido proteico, vitaminas y minerales, el *Pleurotus ostreatus* es una alternativa nutricional accesible y sostenible, con potencial para fortalecer la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola en Ecuador.

Figura 2.

Hongo Ostra (*Pleurotus ostreatus*).



Imagen tomada de [Ministerio del Ambiente, 2023].

2.3.4.3 *Lentinula edodes* Shiitake

El *Lentinula edodes*, conocido como shiitake, es un hongo comestible con alto valor nutricional y medicinal. En la Figura 3, se muestra su morfología característica, destacando su relevancia en la producción agrícola sostenible.

En Ecuador, diversas investigaciones han explorado su cultivo y aprovechamiento. Estudios en la Universidad Técnica de Ambato han demostrado que el shiitake puede crecer en sustratos orgánicos como aserrín de eucalipto y residuos de café, promoviendo la gestión sostenible de desechos agrícolas (de Ambato, 2023). Asimismo, investigaciones en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo han evaluado su capacidad para descomponer residuos madereros, contribuyendo a la reducción de desechos lignocelulósicos (de Chimborazo, 2023).

Además, un estudio en la Universidad Agraria del Ecuador confirmó que el shiitake es una fuente importante de vitaminas B y D, así como de ácidos grasos esenciales, lo que resalta su valor nutricional en la dieta ecuatoriana (del Ecuador, 2023).

El cultivo de *Lentinula edodes* en Ecuador representa una alternativa viable para la valorización de residuos agroindustriales y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria, consolidándolo como un recurso clave en la producción agrícola sostenible.

Figura 3.

Hongo shiitake (Lentinula edodes).



Imagen tomada de [Ministerio del Ambiente, 2023].

2.3.5 Técnicas de cultivo

Las técnicas de cultivo de champiñones, como el aire libre, las composteras y los invernaderos, ofrecen diversas ventajas al adaptarse a diferentes condiciones. Cada método permite un control adecuado del ambiente para optimizar la producción según los recursos disponibles.

2.3.5.1 Aire Libre

El cultivo del champiñón (*Agaricus bisporus*) al aire libre presenta desafíos significativos debido a la necesidad de controlar factores ambientales como temperatura, humedad y ventilación. Tradicionalmente, este hongo se cultiva en condiciones controladas para optimizar su producción. Sin embargo, algunas investigaciones han explorado métodos alternativos que podrían facilitar su cultivo en ambientes menos controlados.

Una tesis de la Universidad Nacional Autónoma de México propone una alternativa de bajo impacto ambiental para la producción de champiñones, utilizando sustratos como semilla de

trigo estéril y perlita. Este método busca reducir la necesidad de compostaje y controlar mejor las condiciones de cultivo, aunque no se especifica si es aplicable al aire libre (de México, 2023).

Aunque el cultivo al aire libre del champiñón presenta desafíos debido a la necesidad de controlar factores ambientales, investigaciones recientes están explorando métodos alternativos que podrían facilitar su producción en condiciones menos controladas. Sin embargo, la mayoría de las prácticas comerciales actuales requieren ambientes controlados para garantizar una producción eficiente y de alta calidad.

2.3.5.2 Invernadero

El cultivo de champiñones (*Agaricus bisporus*) en invernaderos permite un control eficiente de factores ambientales como temperatura, humedad y ventilación, lo que optimiza la producción y calidad del hongo. La elaboración del compost, que consiste en la descomposición controlada de materiales orgánicos como estiércol y paja, es fundamental, ya que la calidad del compost influye directamente en el rendimiento de la cosecha (Carrasco Carrasco, 2018).

Mantener condiciones ambientales adecuadas es crucial, con una temperatura constante entre 55 y 60°F (13-16°C) y un ambiente húmedo. El diseño del invernadero debe adaptarse al clima local y al espacio disponible, y el uso de tecnologías automatizadas y energías limpias mejora la eficiencia, como en los sistemas de control modular que aumentan la producción. Además, el manejo adecuado de plagas y enfermedades, como la telaraña del champiñón, es esencial para mantener una producción saludable (Moreno Rivera, 2018).

La planificación de la producción y comercialización de champiñones es vital para garantizar la viabilidad económica del cultivo. Es necesario considerar factores como la demanda del mercado, los costos de producción y las estrategias de distribución para asegurar el éxito a largo plazo (Castañón Ibacache, 2018).

2.3.5.3 Composteras

El cultivo de champiñones (*Agaricus bisporus*) en composteras es esencial, ya que el compost actúa como un sustrato nutritivo que favorece el crecimiento y la fructificación de los hongos. La elaboración del compost involucra la descomposición controlada de materiales orgánicos, como paja de trigo y estiércol de aves, lo cual impacta directamente en el rendimiento y la calidad de la cosecha (E. López, 2014).

El proceso de compostaje se basa en la bioconversión de materiales orgánicos, donde los microorganismos presentes descomponen los materiales creando un ambiente adecuado para el desarrollo del micelio. Es fundamental mantener la temperatura interna del compost entre 55 y 60°F (13-16°C) para promover la actividad microbiana. Además, se deben evitar las corrientes de aire excesivas, ya que pueden afectar el crecimiento de los champiñones (Muñoz, 2001).

El control de condiciones ambientales como humedad y temperatura es crucial para la fructificación exitosa de los champiñones. Además, es necesario gestionar las plagas y enfermedades, como la telaraña del champiñón, mediante un manejo integrado para evitar pérdidas. El uso de compost también mejora las propiedades del suelo y contribuye a la regeneración de suelos agotados, además de reducir la huella de carbono agrícola al promover la captura de carbono en el suelo (Qazi et al., 2009).

2.3.6 Parámetros Ambientales en el Cultivo de Champiñones - Invernadero

El cultivo de champiñones requiere condiciones ambientales específicas para garantizar un crecimiento óptimo y una producción de alta calidad. Factores como la temperatura, humedad, concentración de CO₂, iluminación y características del sustrato influyen directamente en el desarrollo del micelio y la fructificación. La Tabla 2 presenta los rangos óptimos de estos parámetros y su importancia en cada etapa del cultivo, destacando la necesidad de un control preciso para evitar problemas como enfermedades, crecimiento irregular o reducción en la vi-

da útil del producto.

Tabla 2.

Condiciones óptimas para el cultivo de champiñones.

Parámetro	Rango Óptimo	Importancia
Temperatura	Colonización: 24°C a 27°C Fructificación: 12°C a 18°C Post-cosecha: <10°C	Mantener el rango adecuado asegura el crecimiento del micelio, formación de primordios y alta calidad de champiñones. Temperaturas incorrectas afectan el desarrollo y vida útil.
Humedad Relativa	Colonización: 60 % a 75 % Fructificación: 85 % a 95 % Post-cosecha: 90 %	La humedad alta es esencial para el desarrollo del micelio y la fructificación. Humedad excesiva puede causar enfermedades, y niveles bajos deshidratan los champiñones.
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Colonización: 300 a 800 ppm Fructificación: hasta 1200 ppm	Niveles controlados de CO ₂ son cruciales para el desarrollo del micelio y la formación de primordios. Un CO ₂ elevado inhibe el crecimiento y niveles bajos afectan la fructificación.
Iluminación	Colonización: oscuridad total Fructificación: luz tenue (200 lux, 12 h/día)	Aunque los champiñones no dependen de la fotosíntesis, la luz tenue estimula la formación de primordios y favorece un crecimiento uniforme durante la fructificación.
Condiciones del Sustrato	Composición: materiales orgánicos pH: 6 a 7 Contenido de agua: 60 % a 70 %	Un sustrato adecuado proporciona nutrientes y soporte para el micelio. Un sustrato inadecuado afecta la colonización y la formación de champiñones.

2.4 Monitoreo y Control de Variables Ambientales

El monitoreo y control de variables ambientales, como temperatura, humedad y CO₂, son clave para mantener condiciones óptimas en el cultivo de champiñones. Sensores y sistemas automáticos ajustan factores como ventilación y riego, mejorando la productividad y reduciendo riesgos.

2.4.1 Importancia del monitoreo en sistemas agrícolas controlados

Un proyecto desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana en 2023 diseñó un sistema de control y monitoreo para un galpón de cultivo de champiñones, enfocándose en variables como temperatura, humedad y ventilación, esenciales para el crecimiento del hongo (Cartoles, 2023). Además, en la Universidad Católica de Colombia, se desarrolló un prototipo basado en Internet de las Cosas (IoT) para monitorear y controlar variables ambientales en cultivos, mejorando la eficiencia y productividad agrícola (Samberino, 2021).

En la Universidad Santo Tomás, se implementó un sistema piloto para monitorear variables ambientales en cultivos de palma africana, resaltando la importancia de la recopilación de datos precisos para tomar decisiones informadas que optimicen la producción (Díaz & Vacca, 2015). Por otro lado, la Universidad Autónoma Metropolitana diseñó un invernadero en azoteas para la producción de hongos comestibles, evaluando las condiciones climáticas y espaciales necesarias para cultivos urbanos sostenibles (Ahumada, 2020).

Estas investigaciones destacan la importancia del monitoreo y control tecnológico en la agricultura, mostrando cómo la innovación puede transformar la producción, garantizando condiciones óptimas para el crecimiento y la sostenibilidad de los cultivos.

2.4.2 Tipos de sensores aplicados al monitoreo

Los sensores utilizados en el monitoreo de cultivos de champiñones miden variables clave como temperatura, humedad, CO₂ y pH. Estos datos en tiempo real permiten ajustar automáticamente las condiciones del entorno, optimizando el crecimiento y la productividad de los champiñones.

2.4.2.1 Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son fundamentales en el monitoreo y control de variables ambientales en el cultivo de champiñones, ya que permiten regular la temperatura, un factor clave para el desarrollo del hongo. Durante la fructificación, la temperatura ideal varía entre 18 y 24 °C, mientras que durante la incubación debe mantenerse más baja. Por ello, un monitoreo constante es esencial para asegurar condiciones óptimas de crecimiento (Díaz & Vaca, 2015).

Existen diversos tipos de sensores de temperatura utilizados en estos sistemas. Los termistores son comunes debido a su sensibilidad y costo accesible, mientras que los sensores de resistencia de platino (RTD) ofrecen alta precisión y estabilidad, adecuados para invernaderos. Los sensores infrarrojos, que miden la temperatura sin contacto, son útiles para monitorear tanto el sustrato como el aire en áreas específicas del cultivo (Samberino, 2021).

En sistemas automatizados, los sensores de temperatura se integran con controladores electrónicos que ajustan equipos de climatización, como ventiladores y calefactores. Esto no solo mantiene el ambiente adecuado para los champiñones, sino que también optimiza el consumo de energía, reduciendo costos operativos y el impacto ambiental (Cartoles, 2023).

2.4.2.2 Sensores de humedad

Los sensores de humedad son esenciales para el monitoreo ambiental en los cultivos de champiñones, ya que la humedad relativa es crucial para su crecimiento. Mantener niveles entre el 85 % y el 95 % durante la fructificación es clave para evitar la deshidratación del sustrato o la proliferación de patógenos. Por ello, la medición precisa y el control de la humedad son fundamentales para crear un ambiente adecuado para el desarrollo del hongo (Samberino, 2021).

Los sensores capacitivos, debido a su alta precisión y durabilidad, son los más comunes, ya que miden cambios en la capacitancia provocados por variaciones de humedad. También se

utilizan sensores resistivos, que detectan variaciones en la conductividad eléctrica de materiales higroscópicos. Además, los sensores ópticos, que miden la absorción de luz infrarroja por las moléculas de agua, se están utilizando en sistemas más avanzados (Díaz & Vaca, 2015).

Integrar estos sensores en sistemas de monitoreo automatizado permite ajustar parámetros como la activación de nebulizadores o sistemas de ventilación, asegurando un microclima controlado. Esto no solo optimiza las condiciones para el crecimiento de los champiñones, sino que también mejora la eficiencia en el consumo de recursos como agua y energía (Cartoles, 2023).

2.4.2.3 Sensores de CO₂

Los sensores de dióxido de carbono (CO₂) son esenciales en el cultivo de champiñones, ya que su concentración influye en el crecimiento y la calidad de los hongos. Durante la fructificación, es crucial mantener niveles de CO₂ entre 600 y 1,000 partes por millón (ppm) para asegurar un desarrollo adecuado de los sombreros y tallos (H. Cabezas, 2021).

Los sensores NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) son los más comunes para medir CO₂, ya que miden la absorción de luz infrarroja por las moléculas de CO₂, ofreciendo alta precisión y estabilidad en ambientes controlados. También existen sensores de semiconductores, que son más económicos pero menos precisos y sensibles (Pranaair, 2021).

Integrados en sistemas automatizados, estos sensores permiten monitorear en tiempo real los niveles de CO₂ y ajustar parámetros como la ventilación, activando extractores de aire si los niveles son demasiado altos. Esto garantiza condiciones óptimas para el cultivo de champiñones y mejora tanto la calidad como el rendimiento de la producción (Pranaair, 2021).

2.4.2.4 Otros sensores relacionados (luminosidad, pH)

Los sensores de luminosidad son cruciales en los cultivos de hongos, ya que, aunque estos organismos no realizan fotosíntesis, una exposición adecuada a la luz puede influir positivamente en su desarrollo, favoreciendo la fructificación. Los sensores de luminosidad permiten medir la radiación fotosintética activa (PAR) y ajustar la iluminación artificial, evitando tanto la sobreexposición como la falta de luz, lo que es clave para un rendimiento y calidad óptimos en el cultivo de champiñones (Pierra, 2020).

El pH del sustrato es otro factor esencial en el cultivo de champiñones, ya que afecta la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Mantener un pH en el rango de 6.5 a 7.5 asegura que los nutrientes estén disponibles para el micelio y favorece el crecimiento de microorganismos beneficiosos. Los sensores de pH permiten monitorear de manera continua el sustrato, facilitando ajustes rápidos y asegurando condiciones ideales para el cultivo (Moreno Rivera, 2018).

La integración de sensores de luminosidad y pH en sistemas automatizados optimiza el control de las condiciones ambientales. Al proporcionar datos en tiempo real, estos sensores permiten ajustar otros parámetros, como la ventilación y la humedad, lo que mejora la calidad y cantidad de la cosecha. Además, contribuyen a la sostenibilidad del cultivo, reduciendo el uso de recursos y mejorando la eficiencia de la producción (Pierra, 2020).

2.5 Tecnologías Aplicadas al Monitoreo Agrícola

Las tecnologías aplicadas al monitoreo agrícola incluyen el uso de sensores inteligentes, sistemas de riego automatizados, análisis y software de gestión que recopila y analiza datos en tiempo real. Estas herramientas permiten un monitoreo preciso de las condiciones del cultivo, optimizando el uso de recursos y mejorando la eficiencia y productividad.

2.5.1 Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión ha transformado el monitoreo agrícola mediante el uso de sensores, imágenes satelitales, GPS y análisis de datos, permitiendo un control detallado de las condiciones de cultivo. Este enfoque optimiza los recursos y minimiza el impacto ambiental, mejorando la toma de decisiones basada en información específica de cada área cultivada (Lara-Vargas et al., 2019).

Uno de los avances clave en esta tecnología es la integración de sensores inteligentes que monitorean en tiempo real factores como la humedad del suelo, temperatura, iluminación y niveles de nutrientes. Esto permite ajustar prácticas agrícolas como el riego, la fertilización y el manejo de plagas con mayor precisión, incrementando la eficiencia de los insumos y reduciendo desperdicios (Rojas-Rodríguez et al., 2020).

En Ecuador, la agricultura de precisión ha sido aplicada principalmente en cultivos comerciales como flores, banano y cacao, mientras que en cultivos no tradicionales, como el champiñón, su implementación aún es incipiente. Sin embargo, su adopción en este sector tiene gran potencial, ya que permite un control preciso de variables ambientales esenciales como el CO₂ y la humedad. Además, herramientas como drones e inteligencia artificial están mejorando la detección temprana de problemas y optimizando la producción (Valencia-Balladares, 2021).

2.5.2 Internet de las cosas

El Internet de las Cosas (IoT) es la interconexión de objetos físicos a través de internet, permitiendo que recojan y compartan datos de manera autónoma. Estos dispositivos, como electrodomésticos, vehículos o sensores, mejoran la eficiencia y el control en sectores como la salud, la agricultura y las ciudades inteligentes. IoT transforma la forma en que interactuamos con el entorno, optimizando procesos y ofreciendo nuevas soluciones tecnológicas.

2.5.3 Integración en sistemas IoT (Internet de las cosas)

Los sensores integrados en sistemas IoT recopilan y transmiten datos en tiempo real, permitiendo el monitoreo remoto de variables como temperatura y humedad. Esto mejora la gestión de cultivos y optimiza el uso de recursos.

2.5.3.1 Funcionamiento y aplicaciones en el monitoreo de cultivos

Los sensores en sistemas de Internet de las Cosas (IoT) permiten el monitoreo en tiempo real de cultivos mediante la recopilación y transmisión de datos sobre temperatura, humedad, CO₂, pH del suelo y luminosidad. Estos dispositivos envían la información a través de redes inalámbricas como ZigBee, LoRa o Wi-Fi hacia una unidad central o la nube, donde es procesada por algoritmos para facilitar decisiones precisas en la gestión agrícola (Jiménez et al., 2020).

La integración de estos sensores optimiza el uso de recursos y mejora la productividad. Sensores de humedad y temperatura permiten ajustar el riego automáticamente, evitando desperdicio de agua, mientras que los sensores de CO₂ en invernaderos aseguran condiciones óptimas para el crecimiento de cultivos. Asimismo, los sensores de pH ayudan a mantener un suelo adecuado, y cuando se combinan con predicciones climáticas, pueden ajustar los parámetros ambientales para mejorar la resiliencia del cultivo (Valencia-Balladares, 2021).

En Ecuador, la implementación de sensores IoT está en crecimiento, con aplicaciones en cultivos de alto valor como flores y banano. En el cultivo de champiñones, su uso permite mantener un ambiente controlado, optimizar la producción y reducir costos operativos e impacto ambiental. Esto refuerza un enfoque de agricultura sostenible, que combina precisión tecnológica con menores dependencias de insumos químicos (Gómez-Pérez et al., 2021).

2.5.3.2 Redes inalámbricas

Las redes inalámbricas permiten la transmisión de datos sin la necesidad de cables, utilizando ondas electromagnéticas como radiofrecuencia o microondas. Estas redes ofrecen una gran flexibilidad y movilidad, ya que los dispositivos pueden conectarse y moverse sin perder la señal. Son ampliamente utilizadas en tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y 5G, cada una adecuada para diferentes aplicaciones, desde conexiones de internet en hogares y oficinas hasta la comunicación entre dispositivos en el Internet de las Cosas (IoT). Las redes inalámbricas también ofrecen ventajas como una instalación más sencilla y menor costo de infraestructura, lo que las convierte en una opción ideal para diversas necesidades de comunicación en entornos dinámicos y de rápida expansión.

2.5.3.3 Transmisión de datos mediante redes inalámbricas

La transmisión de datos mediante redes inalámbricas es clave en la agricultura moderna, especialmente en sistemas con sensores IoT. Esta tecnología permite el monitoreo en tiempo real de variables ambientales como temperatura, humedad y CO₂, optimizando el desarrollo de cultivos como el champiñón al enviar datos a servidores en la nube o controladores locales para su análisis y gestión eficiente.

Las redes inalámbricas más utilizadas en el sector agrícola incluyen Wi-Fi, ZigBee, LoRa y NB-IoT, cada una con ventajas específicas. Mientras que ZigBee y LoRa destacan por su bajo consumo de energía y amplia cobertura en zonas rurales, Wi-Fi es más adecuado para entornos pequeños con alta densidad de datos. Estas tecnologías permiten la recopilación y análisis de información, facilitando respuestas automatizadas como el ajuste de ventilación o riego en cultivos controlados (Martínez et al., 2021).

En Ecuador, estas soluciones se han implementado en cultivos de exportación como el banano y están ganando terreno en la producción de hongos comestibles. Su uso contribuye a la sostenibilidad al reducir el consumo innecesario de insumos y energía. Sin embargo, la conec-

tividad en zonas rurales sigue siendo un reto, lo que ha impulsado el desarrollo de soluciones híbridas que combinan redes satelitales y terrestres para garantizar una cobertura eficiente (Villafuerte & Salazar, 2022).

2.5.4 Sistema de análisis de datos en tiempo real

Un sistema de análisis de datos en tiempo real procesa información de los sensores instantáneamente, permitiendo ajustes automáticos y mejorando la eficiencia en el cultivo.

2.5.4.1 Plataformas de software para monitoreo y control ambiental

El análisis de datos en tiempo real es una herramienta clave en la agricultura moderna, permitiendo a los productores optimizar la gestión de variables críticas como temperatura, humedad, CO₂, pH y luminosidad en cultivos de champiñones. Las plataformas de software para monitoreo ambiental integran datos de sensores IoT y presentan información visualmente a través de gráficos, tableros de control y alertas automáticas, facilitando la toma de decisiones (Morales et al., 2021).

En Ecuador, la adopción de estas plataformas ha crecido en cultivos bajo invernadero, donde agricultores utilizan software basado en Arduino y Raspberry Pi, conectado a sistemas en la nube. Esto les permite acceder a la información en tiempo real desde dispositivos móviles y optimizar procesos como riego y ventilación. Además, algunas soluciones incorporan modelos predictivos con inteligencia artificial para ajustar automáticamente las condiciones ambientales y reducir riesgos de enfermedades o plagas (Paredes & Sánchez, 2020).

A pesar de sus beneficios, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos como la limitada conectividad en áreas rurales. Para superar esto, se han desarrollado soluciones híbridas que combinan almacenamiento local con sincronización en la nube, mejorando la eficiencia en cultivos de alto valor como los champiñones. Estas innovaciones no solo reducen costos operativos, sino que también aumentan la competitividad del producto en el mercado

(Villafuerte & Salazar, 2022).

2.5.4.2 Visualización de datos en aplicaciones móviles y computadoras

La visualización de datos en aplicaciones móviles y computadoras es fundamental en los sistemas de monitoreo agrícola, ya que facilita la interpretación de información mediante gráficos interactivos y dashboards personalizados. En el cultivo de champiñones, estas herramientas permiten controlar variables críticas como temperatura, humedad y CO₂, optimizando las condiciones de crecimiento en tiempo real. Su integración con sensores IoT ha impulsado el desarrollo de soluciones accesibles y eficientes para los agricultores (C. López & Cabrera, 2021).

En Ecuador, el uso de aplicaciones móviles y plataformas web en la agricultura ha crecido, destacándose por ofrecer alertas en tiempo real, reportes detallados y análisis predictivos con inteligencia artificial. Investigaciones han demostrado que estas herramientas pueden mejorar la gestión de recursos y reducir costos operativos, beneficiando especialmente a agricultores en zonas rurales. Además, la combinación de bases de datos en la nube con interfaces intuitivas permite el acceso remoto a la información y la recepción de notificaciones sobre cambios críticos en las condiciones ambientales (Mendoza et al., 2022).

A pesar de sus ventajas, la conectividad limitada en áreas rurales sigue siendo un desafío. Sin embargo, soluciones híbridas que combinan almacenamiento local con sincronización en la nube han demostrado ser efectivas para garantizar un monitoreo continuo. Se espera que estas tecnologías sigan evolucionando con la incorporación de realidad aumentada y visualización tridimensional de datos, mejorando la experiencia del usuario y la toma de decisiones (Gómez et al., 2020).

2.6 Lógica Difusa Aplicada al Control de Variables Ambientales

La lógica difusa permite controlar variables ambientales mediante reglas flexibles, ajustando gradualmente parámetros como temperatura y humedad para mantener condiciones óptimas en el cultivo.

2.6.1 Principios de la lógica difusa

La lógica difusa, también conocida como lógica borrosa, es una extensión de la lógica clásica que permite manejar la incertidumbre y la vaguedad, lo que la convierte en una herramienta útil para sistemas de control y toma de decisiones en entornos complejos. A diferencia de la lógica tradicional, donde las variables son clasificadas estrictamente como verdaderas o falsas, la lógica difusa permite que las variables tomen valores en un rango continuo entre 0 y 1, reflejando mejor las condiciones del mundo real, donde las decisiones no son absolutas sino que implican grados de certeza (García & Sánchez, 2020).

En el contexto del control ambiental, la lógica difusa es útil para modelar sistemas donde las variables de entrada son imprecisas o fluctuantes. Por ejemplo, en el cultivo de champiñones, parámetros como la temperatura, la humedad o la concentración de CO₂ pueden variar dentro de límites ideales, pero no siempre se miden de forma exacta. La lógica difusa incorpora estas imprecisiones, permitiendo tomar decisiones basadas en reglas flexibles, como "Si la temperatura es alta, entonces disminuir la ventilación", lo que es más adecuado para entornos donde las condiciones cambian continuamente (Pérez & López, 2021).

Además, la lógica difusa se puede integrar con otros métodos de control, como los controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo), y con sistemas de inteligencia artificial, como redes neuronales, para mejorar la precisión del control. En la agricultura, esta capacidad de manejar variables imprecisas es especialmente valiosa para ajustar dinámicamente las condiciones del entorno, asegurando que los cultivos, como los champiñones, se mantengan dentro de los rangos óptimos de crecimiento, incluso cuando los datos no sean completamente

precisos o completos (García & Sánchez, 2020).

2.6.2 Aplicación en sistemas de control agrícola

La lógica difusa aplicada al control agrícola ofrece una solución avanzada para gestionar la incertidumbre y las variaciones en los parámetros ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En particular, en sistemas de cultivo de champiñones, donde las condiciones del entorno deben ser controladas con gran precisión, la lógica difusa permite crear sistemas de control más flexibles y adaptativos. A través de reglas difusas, los sistemas pueden tomar decisiones basadas en condiciones no precisas o incompletas, lo que los hace ideales para manejar variables fluctuantes como la temperatura, humedad y concentración de CO₂ (García & Sánchez, 2020).

En estos sistemas, la lógica difusa permite integrar múltiples variables de manera que los sistemas se ajusten gradualmente según las condiciones actuales y pasadas. Por ejemplo, en el cultivo de champiñones, si la temperatura es "moderadamente alta" y la humedad es "baja", el sistema podría activar el riego de forma parcial, optimizando el uso de recursos como agua y energía, y evitando desperdicios (García & Sánchez, 2020). Este control adaptativo es crucial para mantener las condiciones ideales sin intervención humana constante.

Además, la lógica difusa se puede combinar con tecnologías como sensores IoT para crear sistemas más eficientes. Los sensores proporcionan datos en tiempo real sobre las condiciones ambientales, que son procesados por el controlador difuso para ajustar la ventilación, iluminación y riego de manera autónoma. Esto mejora la precisión de las predicciones sobre el rendimiento de los cultivos, anticipando cambios en las condiciones y optimizando la adaptación a situaciones variables, lo que también puede combinarse con técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático (Pérez & López, 2021).

2.6.3 Ventajas de la lógica difusa frente a métodos tradicionales

La lógica difusa ha surgido como una alternativa eficiente a los métodos tradicionales en el control de variables ambientales, permitiendo una gestión más flexible y adaptable a condiciones cambiantes. Mientras que los enfoques convencionales dependen de valores predefinidos y ajustes manuales, la lógica difusa optimiza la toma de decisiones en entornos con incertidumbre y variabilidad. La Tabla 3 presenta una comparación detallada entre ambos métodos, destacando sus diferencias en términos de flexibilidad, precisión, escalabilidad y optimización de recursos.

Tabla 3.

Comparación entre métodos tradicionales y lógica difusa en control de variables ambientales.

Criterio	Métodos Tradicionales	Lógica Difusa
Flexibilidad	Limitada a valores exactos predefinidos.	Alta flexibilidad, puede manejar valores imprecisos o vagos.
Adaptabilidad	Necesita ajustes manuales frecuentes.	Se adapta automáticamente a cambios en las condiciones ambientales.
Manejo de Incertidumbre	No diseñado para manejar incertidumbre.	Eficaz en la toma de decisiones con información incompleta o incierta.
Precisión de Control	Basado en rangos fijos que no consideran variaciones sutiles.	Capaz de ajustar el control de manera más precisa, respondiendo a fluctuaciones pequeñas.
Reactividad	Requiere intervención humana para ajustarse a nuevas condiciones.	Control automático basado en reglas difusas que responden dinámicamente.
Complejidad de Implementación	Relativamente más simple y directo, pero limitado.	Requiere modelado y definición de reglas, pero mejora el control a largo plazo.
Optimización de Recursos	Poca optimización, a menudo se desperdician recursos (agua, energía).	Mejora la eficiencia en el uso de recursos al ajustar dinámicamente los sistemas.
Escalabilidad	Difícil de adaptar a sistemas más grandes o complejos.	Fácilmente escalable para sistemas más grandes y más variables.
Costo de Implementación	Menor costo inicial debido a su simplicidad.	Puede tener un costo inicial más alto, pero reduce costos operativos a largo plazo.

2.6.4 Monitoreo y control inteligente

La aplicación de la lógica difusa en el monitoreo y control de variables ambientales ha transformado la gestión de procesos de producción agrícola, incluido el cultivo de champiñones. A diferencia de los sistemas convencionales, que dependen de reglas rígidas y valores fijos, la lógica difusa ofrece flexibilidad y adaptabilidad para manejar la variabilidad inherente a los entornos agrícolas (García & Sánchez, 2020).

Este enfoque se basa en la recopilación y análisis continuo de datos en tiempo real, como la temperatura, humedad y concentración de CO₂, que son procesados por algoritmos difusos. Al trabajar con datos imprecisos o inciertos, los sistemas de lógica difusa toman decisiones que reflejan la naturaleza dinámica del entorno agrícola. Esto permite ajustes automáticos en las condiciones del invernadero o área de cultivo, optimizando los recursos y asegurando un entorno propicio para el crecimiento de los cultivos (García & Sánchez, 2020).

Una ventaja clave de la lógica difusa es su capacidad para manejar datos vagos o intermedios, lo que permite integrar múltiples variables y analizar las interacciones complejas entre ellas. Esto mejora la precisión del control de las condiciones ambientales y reduce la intervención humana, haciendo los procesos de producción más eficientes (Pérez & López, 2021).

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta técnica del sistema de monitoreo y control automatizado para el cultivo de champiñones, aplicado en el sector de San Juan de Ilumán. El desarrollo se estructura bajo la metodología de cascada, lo cual permite abordar de forma ordenada cada una de las etapas del proyecto, desde el análisis de requisitos hasta las pruebas del sistema. Se parte con la identificación de variables ambientales críticas como temperatura, humedad, dióxido de carbono, luminosidad y pH, fundamentales para garantizar el crecimiento óptimo del hongo. Posteriormente, se presenta el diseño del sistema, incluyendo la selección de sensores, arquitectura de hardware y lógica difusa, así como el diseño de una plataforma digital para la visualización y generación de alertas. Finalmente, se expone la implementación del sistema en un entorno real de invernadero y se detallan las pruebas de validación y funcionamiento para comprobar su efectividad en la mejora de la productividad del cultivo.

3.1 METODOLOGÍA

En este proyecto, se emplea la metodología en cascada (Pressman & Maxim, 2015), también conocida como ciclo de vida clásico, que propone un enfoque secuencial y estructurado para el desarrollo de sistemas. Cada fase del proyecto se inicia únicamente cuando la anterior ha finalizado, generando una documentación exhaustiva que sirve de base para la siguiente etapa. Este método es adecuado cuando los requerimientos están claramente definidos desde el inicio, permitiendo una planificación detallada y un control riguroso en cada fase. No obstante, su rigidez implica que los cambios en las etapas avanzadas pueden resultar costosos o complejos de manejar.

El propósito central de este proyecto es diseñar un sistema de monitoreo y control para el cultivo de champiñones, integrando sensores de variables ambientales y un componente de inteligencia artificial para optimizar la producción. La Figura 4 ilustra de forma detallada las fases de la metodología en cascada aplicadas en este trabajo, abarcando el análisis de requerimientos, el diseño del sistema, la implementación de hardware y software, la verificación y pruebas. Cada una de estas etapas se describe con mayor detalle en las secciones posteriores.

Figura 4.

Metodología de Cascada.

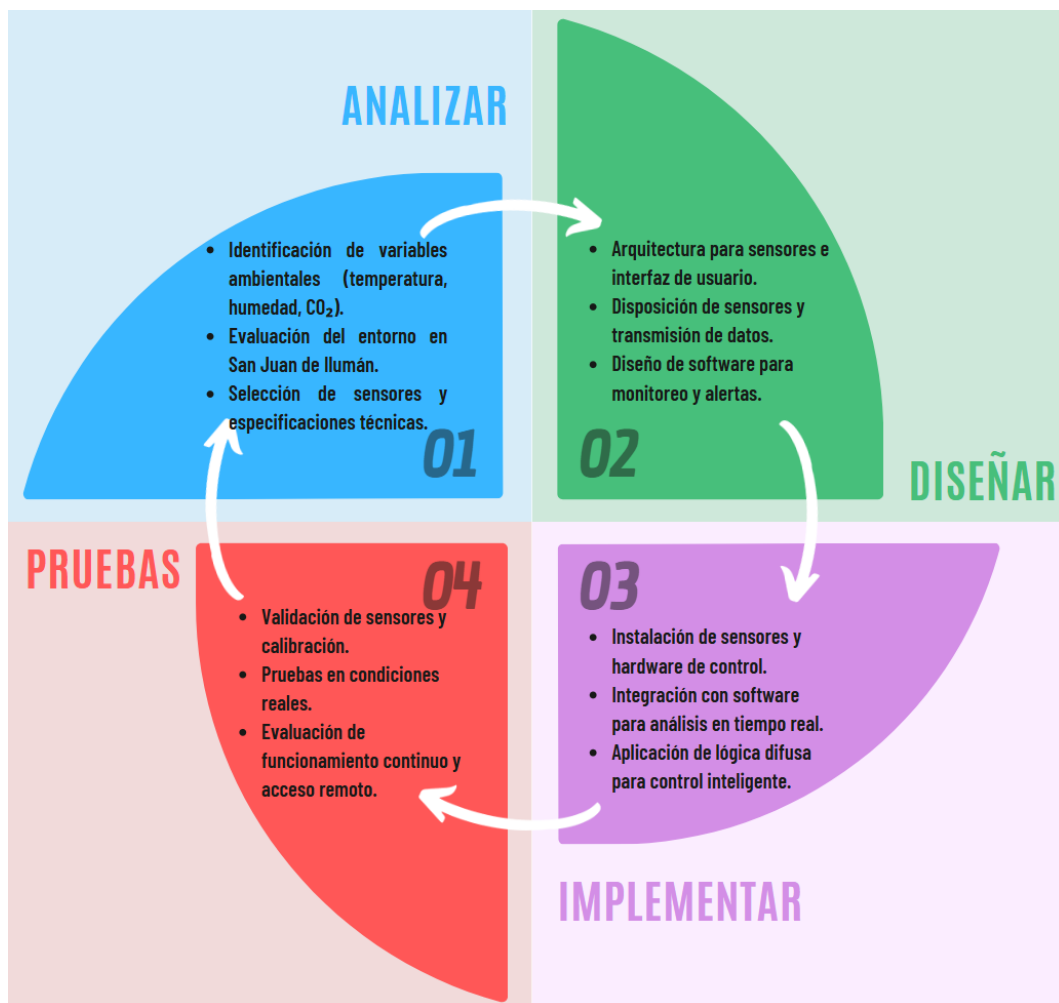


Imagen adaptada de [Pressman y Maxim, 2015.]

Este ciclo de cuatro fases se adapta perfectamente a la implementación del sistema de monitoreo y control automatizado en el cultivo de champiñones, asegurando una transición ordenada y eficiente en cada etapa.

Análisis de Requisitos: Se realiza una evaluación detallada de las variables ambientales críti-

cas a monitorear en el invernadero, considerando factores como temperatura, humedad y CO₂. Esta etapa permite comprender la problemática y definir los sensores y tecnologías más adecuadas para el sistema.

Diseño del Sistema: Se establecen los parámetros de la arquitectura del sistema, incluyendo la distribución de sensores, la estructura de transmisión de datos y la interfaz de usuario para la visualización en tiempo real. Además, se incorpora el uso de lógica difusa para optimizar la toma de decisiones en el control ambiental.

Implementación: Se procede con la instalación de los sensores y hardware de control dentro del invernadero, integrando el software desarrollado para la recopilación y análisis de datos en tiempo real. En esta fase, el sistema comienza a operar de manera conjunta, garantizando una correcta comunicación entre los dispositivos.

Pruebas: Se verifican la precisión y fiabilidad del sistema mediante pruebas en condiciones reales dentro del invernadero. Se calibra la funcionalidad de los sensores y se evalúa el desempeño de la lógica difusa en la optimización de la variable ambiental seleccionada. Además, se analiza la accesibilidad y continuidad del sistema en su operación remota.

3.1.1 Descripción general de la metodología de cascada

La metodología en cascada es un enfoque estructurado que organiza el desarrollo del sistema en una secuencia de fases bien definidas, donde cada etapa debe completarse antes de avanzar a la siguiente. Este modelo permite un flujo de trabajo ordenado, facilitando una planificación detallada y una implementación sistemática. En este proyecto, se emplea la metodología en cascada para garantizar que el sistema de monitoreo y control ambiental en el cultivo de champiñones se desarrolle de manera eficiente, asegurando una integración efectiva de sensores, un diseño optimizado y una validación rigurosa de su funcionamiento en condiciones reales.

3.2 ETAPA DE ANÁLISIS

En esta etapa se realiza un análisis de la situación actual del cultivo de champiñones en San Juan de Ilumán, identificando las condiciones ambientales que afectan su desarrollo y productividad. Este análisis permite establecer los requerimientos del sistema y delimitar el alcance del proyecto, sentando las bases para el diseño e implementación de una solución tecnológica adecuada.

3.2.1 Situación actual

En la actualidad, el cultivo de champiñones en el sector de San Juan de Ilumán enfrenta limitaciones importantes debido al manejo manual de las condiciones ambientales, lo que afecta negativamente su productividad y calidad. Uno de los principales problemas es la falta de un sistema automatizado que permita controlar y monitorear variables como la temperatura, humedad, concentración de CO₂ y luminosidad, factores esenciales para el óptimo desarrollo del hongo. El proyecto se implementará en un terreno delimitado, como se observa en la Figura 5, donde una parte específica ha sido destinada a la zona de cultivo. Este entorno presenta variaciones microclimáticas propias de un área con vegetación y construcciones cercanas, lo que refuerza la necesidad de contar con una solución tecnológica que permita un control ambiental preciso y en tiempo real.

Figura 5.

Zona de cultivo.



Imagen adaptada de [GOOGLE EARTH]

3.2.2 Identificación de requerimientos

Como parte del proceso de análisis dentro de la metodología en cascada, se definen los requerimientos que orientarán el diseño del sistema de monitoreo ambiental. Para ello, se adopta un enfoque basado en la norma ISO/IEC/IEEE 29148, la cual facilita la organización y redacción estructurada de los requisitos del sistema. Esta normativa permite establecer una nomenclatura clara que diferencia los requerimientos funcionales, no funcionales y técnicos. Con esta base, se procede a identificar las necesidades específicas del entorno de cultivo y del usuario final, lo cual guía la posterior selección de sensores, dispositivos de procesamiento y herramientas de software. Esta etapa garantiza una planificación ordenada que servirá de soporte para el desarrollo e implementación del sistema.

3.2.2.1 Determinación de Stakeholders

Para el desarrollo del sistema de monitoreo ambiental en el cultivo de champiñones, se identificaron los actores clave que intervienen directa o indirectamente en el proyecto. Estos stakeholders cumplen distintos roles, desde el uso final del sistema hasta la supervisión académica y el desarrollo técnico. La correcta identificación de los involucrados permite establecer una comunicación efectiva, comprender sus necesidades y expectativas, y asegurar que el sistema cumpla con los objetivos definidos. A continuación, se presenta la tabla 4 de stakeholders considerados en este proyecto.

Tabla 4.

Lista de Stakeholders

N°	Rol	Nombre
1	Usuario Directo	Ing. Andres Quishpe
2	Usuario Indirecto	Sr. Julio Cuasquer
3	Tutor	Msc. Luis Suárez
4	Asesor	Msc. Jaime Michilena
5	Desarrollador	Srta. Zhara Monteros

FUENTE:*Autoría.*

3.2.2.2 Nomenclatura de Requerimientos

Para facilitar la organización y trazabilidad de los requerimientos definidos en el proyecto, se ha establecido una nomenclatura que permite clasificarlos según su origen y naturaleza. Esta codificación ayuda a diferenciar entre los requerimientos planteados por los stakeholders, los requerimientos propios del sistema y aquellos relacionados con la arquitectura general. En la siguiente tabla se detalla la nomenclatura empleada en la tabla 5.

Tabla 5.

Nomenclatura de Requerimientos

N°	Abreviatura	Descripción
1	StSR	Requerimientos de Stakeholders
2	SySR	Requerimientos del Sistema
3	SRSR	Requerimientos de Arquitectura

FUENTE:*Autoría.*

3.2.2.3 Priorización de los Requerimientos del Sistema

Una vez identificados los requerimientos del sistema, es necesario asignar un nivel de prioridad a cada uno de ellos con el fin de enfocar los esfuerzos de desarrollo en aquellos aspectos críticos para el funcionamiento del sistema. La priorización permite tomar decisiones adecuadas durante el diseño e implementación, especialmente en situaciones donde existan limitaciones de tiempo o recursos. A continuación, se presenta la escala utilizada para clasificar los requerimientos según su nivel de importancia en la tabla 6.

Tabla 6.

Priorización de los Requerimientos del Sistema

Prioridad	Descripción
Alta	Indispensable para garantizar la funcionalidad del sistema.
Media	Puede ser omitido en circunstancias extremas, pero su ausencia afecta parcialmente el rendimiento.
Baja	No afecta significativamente el funcionamiento del sistema si no se implementa.

FUENTE:*Autoría.*

3.3 Requerimientos operacionales y de usuario

Previo al diseño e implementación del sistema automatizado para el cultivo de champiñones, se establecen los requerimientos que permiten garantizar su correcto funcionamiento, así como aquellos relacionados con la experiencia del usuario final. Estos requerimientos fueron definidos a partir del análisis de necesidades en campo y las condiciones específicas del invernadero en San Juan de Ilumán. La Tabla 7 presenta los requerimientos operacionales y de usuario considerados fundamentales para el desarrollo del sistema.

Tabla 7.

Requerimientos Operacionales y de Usuario

StSR	Requerimientos	Alta	Media	Baja
REQUERIMIENTOS OPERACIONALES				
StSR1	El sistema debe operar de manera continua durante las 24 horas del día.	X		
StSR2	Captura en tiempo real de temperatura, humedad, CO ₂ , pH y luminosidad.	X		
StSR3	El sistema debe almacenar los datos recolectados para análisis posteriores.	X		
StSR4	Debe contar con comunicación inalámbrica estable entre sensores y plataforma.	X		
StSR5	El hardware debe estar protegido frente a humedad y temperaturas variables.		X	
REQUERIMIENTOS DE USUARIO				
StSR6	El usuario debe visualizar datos en tiempo real desde una app o interfaz web.	X		
StSR7	La interfaz debe ser intuitiva y accesible para usuarios con conocimientos básicos.		X	
StSR8	El sistema debe permitir configurar alertas por parámetros fuera de rango.	X		

FUENTE: *Autoría.*

3.4 Requerimientos del Sistema

Los requerimientos del sistema comprenden las funcionalidades y condiciones técnicas necesarias para que el sistema de monitoreo y control ambiental funcione de manera adecuada en el entorno de cultivo de champiñones. Estos requerimientos incluyen aspectos relacionados con la interfaz, facilidad de uso, estado operativo, disposición física de los elementos y condiciones de seguridad, tal como se muestra en la Tabla 8. Su cumplimiento es esencial para garantizar la operatividad y eficiencia del sistema propuesto.

Tabla 8.

Requerimientos del Funcionamiento del Sistema (SySR)

SySR	Requerimiento	Alta	Media	Baja
REQUERIMIENTOS DE INTERFAZ				
SySR1	El sistema debe permitir visualizar los datos recolectados en tiempo real desde una aplicación.	X		
SySR2	Debe existir comunicación entre los nodos sensores y el servidor local o en la nube.	X		
SySR3	El sistema debe contar con una fuente de alimentación continua y estable.	X		
REQUERIMIENTOS DE USO				
SySR4	La instalación del sistema debe ser sencilla y no requerir conocimientos técnicos avanzados.		X	
SySR5	El sistema debe tener compatibilidad con diferentes estructuras de cultivo (invernadero o caseta).		X	
REQUERIMIENTOS DE ESTADO/MODO				
SySR6	El sistema debe operar de forma continua sin necesidad de intervención frecuente.	X		
REQUERIMIENTOS FÍSICOS				
SySR7	Los sensores deben estar ubicados estratégicamente para obtener lecturas precisas del ambiente.	X		
SySR8	Los dispositivos deben estar protegidos ante la humedad presente en el cultivo.		X	
REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD				
SySR9	Los componentes eléctricos deben tener protección contra sobrecargas o cortocircuitos.	X		
SySR10	El sistema debe contar con mecanismos de respaldo ante fallos de energía.		X	

FUENTE: *Autoría.***3.4.0.1 Requerimientos de Arquitectura (SRSH)**

Los requerimientos de arquitectura permiten establecer las condiciones técnicas que debe cumplir la solución propuesta para asegurar su funcionamiento eficiente y coherente. Estos requisitos abarcan aspectos de software, hardware, eléctricos y de diseño, y orientan la selección de componentes, herramientas de desarrollo e infraestructura. La Tabla 9 muestra los requerimientos definidos para el sistema de monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones.

Tabla 9.

Requerimientos de Arquitectura del Sistema

SRSH	Requerimiento	Alta	Media	Baja
REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE				
SRSH1	El sistema debe utilizar lenguajes de programación libres y flexibles.	X		
SRSH2	Debe contar con librerías compatibles para sensores y procesamiento de datos.	X		
SRSH3	Se requiere una base de datos que permita almacenamiento seguro y rápido.	X		
SRSH4	El software debe ser capaz de integrarse con algoritmos de IA y lógica difusa.	X		
SRSH5	Compatibilidad entre módulos cliente-servidor en red local o nube.	X		
REQUERIMIENTOS DE HARDWARE				
SRSH6	Los sensores deben medir temperatura, humedad, CO ₂ , pH y luz.	X		
SRSH7	El microcontrolador debe soportar múltiples entradas analógicas.	X		
SRSH8	Se requiere capacidad de procesamiento local para análisis en tiempo real.	X		
SRSH9	Los módulos deben ser compactos para integrarse en espacios reducidos.		X	
SRSH10	Disponibilidad de componentes en el mercado local.		X	
REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS				
SRSH11	El sistema debe funcionar con una fuente de alimentación entre 5V y 12V.	X		
SRSH12	Debe incluir conexiones GND y VCC para todos los módulos.	X		
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO				
SRSH13	Se debe diseñar una carcasa para proteger los sensores del ambiente.	X		

FUENTE: *Autoría.*

3.5 Selección de Hardware y Software

Una vez establecidos los requerimientos según los Stakeholders y el análisis del entorno de cultivo en San Juan de Ilumán, se procede a la elección del hardware y software necesario para la implementación del sistema automatizado. La metodología de selección se basa en una

tabla comparativa binaria, donde cada componente recibe una valoración de 0 (no cumple) o 1 (cumple) respecto a los requisitos técnicos del sistema. Aquellos con mayor puntuación son considerados más óptimos para el proyecto.

3.5.1 Elección de Hardware

La elección del hardware se establece según los diferentes bloques funcionales que conforman el sistema de monitoreo y control ambiental para el cultivo de champiñones en San Juan de Ilumán. Estos bloques incluyen: la placa central de procesamiento o gateway (Raspberry pi 4), encargada de la recopilación, análisis e integración de datos; y las placas modulares de adquisición (ESP32), que actúan como nodos encargados de la lectura de variables ambientales y la transmisión inalámbrica de información hacia el gateway.

Además, se consideran los sensores especializados para la medición de variables críticas como temperatura y humedad relativa, dióxido de carbono (CO₂), pH y luminosidad, los cuales se conectan a las placas ESP32 para formar módulos sensores autónomos. Cada uno de estos elementos ha sido seleccionado considerando criterios como precisión, compatibilidad con los microcontroladores, resistencia a condiciones ambientales variables, consumo energético, facilidad de integración y disponibilidad en el mercado local. La evaluación se realizó mediante una tabla comparativa binaria, en la cual se asignó un valor de 1 (cumple) o 0 (no cumple) para determinar el grado de cumplimiento de cada componente frente a los requerimientos técnicos definidos previamente.

3.5.1.1 Elección de plataforma de procesamiento en la nube

La selección de la plataforma de procesamiento en la nube es un componente clave dentro del sistema automatizado de monitoreo ambiental para el cultivo de champiñones. Esta plataforma cumple el rol central de procesar la información recolectada por los nodos sensores, ejecutar los algoritmos de análisis y lógica difusa, y gestionar la interacción con la base

de datos y la interfaz de visualización. A diferencia de arquitecturas tradicionales basadas en gateways físicos, el sistema propuesto delega estas funciones a servicios cloud, mejorando la escalabilidad y reduciendo la dependencia de hardware local.

Para la elección de la plataforma se consideraron criterios técnicos definidos en los requerimientos del sistema, tales como la capacidad de procesamiento continuo, compatibilidad con lenguajes de programación de código abierto, soporte para algoritmos de inteligencia artificial y lógica difusa, integración con bases de datos en la nube, disponibilidad de servicios IoT y facilidad de despliegue mediante APIs. En este contexto, se evaluaron distintas alternativas de computación en la nube, entre ellas Google Cloud, Amazon Web Services (AWS) y Microsoft Azure, asignando un valor de “1” si el equipo cumple con el requerimiento y “0” si no lo hace. La alternativa con mayor puntuación es seleccionada para su implementación en el sistema.

Tabla 10.

Evaluación comparativa de plataformas de procesamiento en la nube

Requerimientos	Google Cloud	AWS	Microsoft Azure
StSR1 – Operación continua 24/7	1	1	1
StSR2 – Procesamiento de datos en tiempo real	1	1	1
StSR4 – Comunicación segura vía APIs	1	1	1
SRSH4 – Soporte para lógica difusa / IA	1	1	1
SRSH5 – Compatibilidad cliente-servidor	1	1	1
SRSH8 – Procesamiento escalable en la nube	1	1	1
SRSH10 – Disponibilidad y soporte global	1	1	1
SRSH11 – Integración con bases de datos IoT	1	1	0
Valoración total	8	7	7

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Google Cloud

Fuente: *Autoría.*

En la Tabla 11 se presentan las principales características técnicas de Google Cloud, plataforma seleccionada para el procesamiento y análisis de los datos del sistema de monitoreo ambiental propuesto, considerando aspectos como su infraestructura en la nube, compatibilidad con lenguajes de programación, integración con bases de datos, escalabilidad, disponibilidad y soporte para algoritmos de inteligencia artificial y lógica difusa. Su elección se fundamenta en la capacidad de realizar procesamiento remoto y escalable, la integración nativa con Firebase y el uso de entornos de desarrollo basados en Python, lo que permite implementar análisis inteligente sin depender de hardware local, asegurando un sistema confiable, flexible y adecuado para aplicaciones IoT en el ámbito agrícola.

Tabla 11.

Características técnicas de la plataforma Google Cloud

Parámetros	Google Cloud Platform
Tipo de infraestructura	Computación en la nube (Cloud Computing)
Modelo de servicio	IaaS / PaaS / FaaS
Lenguajes soportados	Python, JavaScript, Java, Go, entre otros
Soporte IA / lógica difusa	Compatible mediante librerías de IA y frameworks en Python
Integración con base de datos	Integración nativa con Firebase y bases de datos NoSQL
Escalabilidad	Escalado automático según carga de procesamiento
Disponibilidad del servicio	Alta disponibilidad (24/7)
Acceso	Mediante APIs y servicios web seguros
Consumo energético local	No aplica (procesamiento remoto)
Costo estimado	Modelo de pago por uso

Fuente: Documentación oficial de Google Cloud Platform.

Figura 6.

Plataforma Google Cloud



Fuente: Documentación oficial de Google Cloud Platform.

3.5.1.2 Elección de la placa nodal

En la Tabla 12 se muestra la evaluación comparativa entre tres placas nodales: ESP32 DevKit V1, ESP8266 NodeMCU y Arduino Uno, considerando los requerimientos técnicos del sistema. Los criterios incluyen capacidad de conexión con múltiples sensores, comunicación inalámbrica, eficiencia energética, disponibilidad comercial y soporte de librerías. La ESP32 DevKit V1 (38 pines) destaca por su mayor número de interfaces, procesamiento más robusto y conectividad Wi-Fi integrada, lo que la convierte en la opción más adecuada para la implementación del nodo sensorial del sistema de monitoreo ambiental.

Tabla 12.

Evaluación comparativa de placas nodales

Requerimientos	ESP32 DevKit V1	ESP8266 No-deMCU	Arduino Uno
SRSH6 – Lectura de múltiples sensores (I2C, UART, ADC)	1	0	0
SRSH2 – Integración con Wi-Fi	1	1	0
SRSH8 – Procesamiento local básico	1	1	0
SRSH7 – Disponibilidad de librerías	1	1	1
SRSH10 – Disponibilidad en mercado local	1	1	1
SRSH11 – Consumo energético eficiente	1	1	0
SRSH13 – Tamaño compacto / montaje flexible	1	1	0
Valoración total	7	5	2

Cumple “1” — No cumple “0”**Elección:** ESP32 DevKit V1 (38 pines)**FUENTE:** Autoría

La Tabla 13 resume las principales especificaciones de las placas nodales evaluadas para el sistema de monitoreo, considerando procesador, memoria, interfaces, consumo y conectividad. La ESP32 DevKit V1 destaca como la opción más completa por su doble núcleo, conectividad inalámbrica integrada y amplia capacidad de integración con sensores.

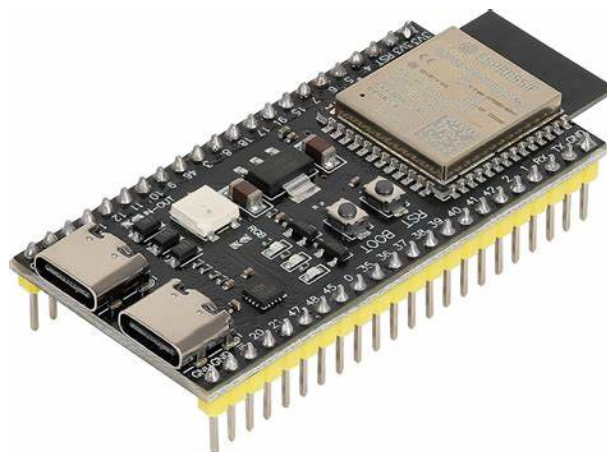
Tabla 13.

Especificaciones técnicas de la placa nodal ESP32 DevKit V1

Parámetro	ESP32 DevKit V1
Modelo	ESP32 DevKit V1 (38 pines)
Fabricante	Espressif / Genérico
Núcleo del procesador	Dual-core Tensilica LX6
Velocidad del CPU	Hasta 240 MHz
Memoria RAM	520 KB SRAM
Almacenamiento	4 MB Flash
Interfaces disponibles	I2C, UART, SPI, ADC, PWM, GPIO
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 BLE
Voltaje de operación	3.3 V (5V vía USB)
Consumo típico	~160–260 mA
Entradas analógicas (ADC)	Hasta 18 canales (12 bits)
Interfaz de programación	USB (Arduino IDE / PlatformIO)
Tamaño aproximado	51 × 25 mm
Tipo de montaje	Protoboard o caja de distribución

Figura 7.

Placa nodal



Fuente: Esp32 oficial

3.5.1.3 Elección del sensor de temperatura y humedad

En la Tabla 14 se presenta la evaluación comparativa de tres sensores de temperatura y humedad: **SHT85**, **SHT31** y **DS18B20**, según los requerimientos técnicos del sistema de monitoreo ambiental. Se evalúan aspectos como precisión, tipo de interfaz, resistencia a la humedad, consumo, compatibilidad con el ESP32 y disponibilidad comercial. Aunque el SHT85 ofrece mayor robustez, se elige el SHT31 por su alta precisión, buena tolerancia ambiental y fácil adquisición, lo que lo convierte en la alternativa más viable para el monitoreo del cultivo de champiñones.

Tabla 14.

Evaluación comparativa de sensores de temperatura y humedad

Requerimientos	SHT85	SHT31	DHT22
SRSH6 – Precisión en temperatura ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ o mejor)	1	1	0
SRSH6 – Precisión en humedad ($\pm 2\%$ HR o mejor)	1	1	0
SRSH6 – Rango de temperatura adecuado ($10\text{--}30^{\circ}\text{C}$)	1	1	1
SRSH6 – Rango de humedad adecuado ($70\text{--}95\%$ HR)	1	1	1
StSR5 – Soporte a condiciones ambientales variables	1	1	0
SRSH7 – Interfaz compatible (I2C / digital)	1	1	1
SRSH2 – Integración con ESP32 (librerías disponibles)	1	1	1
SRSH10 – Disponibilidad en mercado local	1	1	1
SRSH11 – Bajo consumo energético (5V o menos)	1	1	1
SRSH13 – Encapsulado robusto / protección física	1	1	0
Valoración total	10	10	6

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Sensor SHT31

FUENTE: Fichas técnicas oficiales de cada sensor

Para complementar la evaluación comparativa y respaldar técnicamente la selección del

sensor de temperatura, en la Tabla 15 se presentan las principales especificaciones técnicas de los sensores analizados: SHT85, SHT31-D y DS18B20. Esta tabla detalla características clave como el rango de operación, precisión, tipo de interfaz, voltaje de alimentación, consumo energético y tipo de encapsulado, entre otros. La información recopilada permite evidenciar las diferencias en robustez, exactitud y facilidad de integración de cada sensor, aportando una base técnica sólida para justificar la selección final dentro del sistema de monitoreo ambiental propuesto.

Tabla 15.

Especificaciones técnicas de sensores de temperatura y humedad

Parámetro	SHT31
Modelo	SHT31-D
Fabricante	Sensirion
Rango de temperatura	-40 a 125 °C
Precisión (temperatura)	±0.3 °C
Rango de humedad	0 a 100 % RH
Precisión (humedad)	±2.0 % RH
Interfaz de comunicación	I2C
Voltaje de operación	2.4 – 5.5 V
Consumo típico	~1 mA
Encapsulado	Sensor expuesto en PCB
Dimensiones aproximadas	14 x 10 x 2 mm
Tipo de montaje	Breakout board (placa)

Figura 8.
Sensor SH31



3.5.1.4 Elección del sensor de Dióxido de Carbono

En la Tabla 16 se compara el desempeño de dos sensores de dióxido de carbono: SCD30 y MH-Z19C, considerando los requerimientos técnicos definidos para el sistema de monitoreo ambiental. La evaluación contempla criterios como precisión de lectura, rango de detección, resistencia a condiciones ambientales variables, compatibilidad con el ESP32, disponibilidad comercial y eficiencia energética. Si bien ambos sensores presentan buena integración y cobertura de rango, el SCD30 destaca por su mayor precisión y tolerancia a la humedad, factores cruciales para un entorno agrícola como el cultivo de champiñones. Por ello, se selecciona como la opción más adecuada para el sistema propuesto.

Tabla 16.Evaluación comparativa de sensores de CO₂

Requerimientos	SCD30	MH-Z19C
SRSH6 – Medición precisa de CO ₂ (± 30 ppm o mejor)	1	0
SRSH6 – Rango adecuado (400–5000 ppm mínimo)	1	1
StSR5 – Resistencia a humedad y condiciones variables	1	0
SRSH7 – Interfaz compatible (I2C / UART)	1	1
SRSH2 – Integración con ESP32 (librerías disponibles)	1	1
SRSH10 – Disponibilidad en mercado local	1	1
SRSH11 – Bajo consumo energético (5V)	1	1
SRSH13 – Protección / encapsulado disponible	1	0
Valoración total	8	5

Cumple “1” — No cumple “0”**Elección:** Sensor SCD30**Fuente:** Fichas técnicas oficiales de cada sensor

La Tabla 17 resume las características técnicas de los sensores SCD30 y MH-Z19C, evaluando su precisión, consumo energético, rango operativo y compatibilidad con sistemas embebidos. Esta información complementa la selección del sensor más adecuado para el monitoreo de CO₂ en el cultivo de champiñones.

Figura 9.
Sensor MQ135



Tabla 17.
Especificaciones técnicas de sensores de CO₂

Parámetro	SCD30
Modelo	SCD30
Fabricante	Sensirion
Tecnología de detección	NDIR (infrarrojo no dispersivo)
Rango de medición (ppm)	400 – 10,000 ppm
Precisión	±(30 ppm + 3 %)
Interfaz de comunicación	I2C
Voltaje de operación	3.3 – 5.5 V
Consumo típico	~19 mA
Tiempo de respuesta (t ₉₀)	<20 s
Dimensiones aproximadas	35 × 23 × 7 mm
Encapsulado	Módulo cerrado con ranura de ventilación
Tipo de montaje	Montaje en placa (PCB)

3.5.1.5 Elección del sensor de PH

En la Tabla 18 se presenta la evaluación comparativa de dos sensores de pH: SEN0169-V2 de DFRobot y pH-4502C, considerando los requerimientos técnicos definidos para el sistema de monitoreo ambiental. La comparación toma en cuenta aspectos clave como precisión de lectura, rango operativo, resistencia a la humedad, compatibilidad con el ESP32, consumo energético y disponibilidad en el mercado. Aunque ambos sensores permiten una integración sencilla con microcontroladores, el modelo SEN0169-V2 destaca por estar diseñado específicamente para la medición directa en suelos, su encapsulado robusto y su buena precisión, lo que lo convierte en la opción más adecuada para entornos agrícolas como el cultivo de champiñones.

Tabla 18.

Evaluación comparativa de sensores de pH

Requerimientos	SEN0169-V2	pH-4502C
SRSH6 – Medición precisa de pH ($\pm 0.01-0.1$)	1	0
SRSH6 – Rango adecuado (0–14)	1	1
StSR5 – Resistencia a humedad / condiciones variables	1	0
SRSH7 – Interfaz compatible (analógica)	1	1
SRSH2 – Integración con ESP32 (librerías disponibles)	1	1
SRSH10 – Disponibilidad en mercado local	1	1
SRSH11 – Bajo consumo energético (5V o menos)	1	1
SRSH13 – Protección / encapsulado del sensor	1	0
Valoración total	8	5

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Sensor SEN0169-V2 (DFRobot)

Fuente: Fichas técnicas oficiales de cada sensor

La Tabla 19 muestra una comparación detallada de las especificaciones técnicas de los sensores de pH SEN0169-V2 y pH-4502C, ambos considerados para el sistema de monitoreo

ambiental en el cultivo de champiñones. Se incluyen parámetros relevantes como rango de medición, precisión, tipo de interfaz, voltaje de operación, encapsulado y tipo de calibración. La ventaja del SEN0169-V2 radica en su diseño especializado para suelos, precisión aceptable, encapsulado resistente y facilidad de uso en entornos rústicos, lo que lo convierte en una opción óptima para el monitoreo agrícola.

Tabla 19.

Especificaciones técnicas de sensores de pH

Parámetro	SEN0169-V2 (DFRobot)
Modelo	SEN0169-V2
Fabricante	DFRobot
Rango de medición	3 – 9 pH
Precisión	±0.3 pH
Interfaz de comunicación	Analógica
Voltaje de operación	3.3 – 5.0 V
Consumo típico	~5 mA
Calibración	Manual con tornillo multivuelta
Encapsulado	Resistente, sellado, especial para suelo
Tipo de montaje	Directo en tierra o sustrato

Figura 10.

Sensor SEN0169



3.5.1.6 Elección del sensor de luminosidad

En la Tabla 20 se presenta la evaluación comparativa de dos sensores de luminosidad: BH1750 y TSL2561, con base en los requerimientos técnicos establecidos para el sistema de monitoreo ambiental en el cultivo de champiñones. Se analizan aspectos como precisión de medición, rango operativo, tolerancia a condiciones ambientales variables, compatibilidad con el microcontrolador ESP32, consumo energético y disponibilidad comercial. Ambos sensores ofrecen un amplio rango de detección y comunicación digital mediante I²C, sin embargo, el BH1750 destaca por su mayor resistencia a la humedad y posibilidad de encapsulado, lo cual lo convierte en la alternativa más adecuada para entornos agrícolas con condiciones cambiantes de luz y humedad.

Tabla 20.

Evaluación comparativa de sensores de luminosidad

Requerimientos	BH1750	TSL2561
SRSH6 – Medición precisa de iluminación (lux)	1	1
SRSH6 – Rango adecuado para cultivo (hasta 65,000 lux)	1	1
StSR5 – Tolerancia a humedad y ambiente variable	1	0
SRSH7 – Interfaz compatible (I2C digital)	1	1
SRSH2 – Integración con ESP32 (librerías disponibles)	1	1
SRSH10 – Disponibilidad en mercado local	1	1
SRSH11 – Bajo consumo energético (5V o menos)	1	1
SRSH13 – Posibilidad de encapsulado protector	1	0
Valoración total	8	6

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Sensor BH1750

Fuente: Fichas técnicas oficiales de cada sensor

La Tabla 21 presenta las especificaciones técnicas de los sensores de luminosidad BH1750FVI

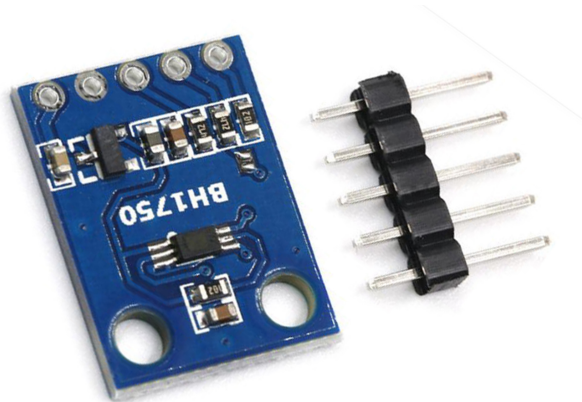
y TSL2561, seleccionados como opciones viables para el monitoreo de luz en el entorno del cultivo de champiñones. La información fue obtenida de sus respectivas hojas de datos (datasheets oficiales) y contempla características clave como rango de medición, resolución, consumo energético, voltaje de operación e interfaz de comunicación. Ambos sensores ofrecen salida digital por I²C y buen desempeño en ambientes controlados; sin embargo, el BH1750FVI destaca por su mayor rango operativo, menor consumo y tolerancia a voltajes más amplios, lo que lo convierte en la opción más adecuada para el sistema propuesto.

Tabla 21.

Especificaciones técnicas de sensores de luminosidad

Parámetro	BH1750FVI	TSL2561
Modelo	BH1750FVI	TSL2561
Fabricante	ROHM Semiconductor	AMS (antes TAOS)
Tipo de sensor	Sensor de luz digital (luxómetro)	Sensor de luz visible + IR (canales separados)
Rango de medición (lux)	1 – 65,535 lux	0.1 – 40,000 lux
Resolución	1 lux	0.1 lux
Interfaz de comunicación	I2C	I2C
Voltaje de operación	3.0 – 5.0 V	2.7 – 3.6 V
Consumo típico	~0.12 mA (modo activo)	~0.6 mA (activo)
Tiempo de respuesta	~120 ms	~100 ms
Encapsulado	Plástico tipo SOP-8	Tipo FN (6 pines)
Tipo de montaje	Montaje en placa (SMD)	Montaje en placa (SMD)

Figura 11.
Sensor de luminosidad



3.5.2 Elección de Tecnología Inalámbrica (WiFi)

El sistema de monitoreo ambiental propuesto requiere establecer una comunicación eficiente entre los nodos sensores basados en ESP32 y la infraestructura en la nube, donde se realiza el almacenamiento y posterior procesamiento de los datos. Por esta razón, es fundamental seleccionar una tecnología inalámbrica que se adapte a las condiciones del entorno del invernadero, garantice conectividad a Internet y mantenga un equilibrio adecuado entre facilidad de implementación, estabilidad de transmisión, consumo energético y compatibilidad con plataformas IoT en la nube.

En la Tabla 22 se analizan tres alternativas comunes para soluciones IoT: Wi-Fi, Zigbee y LoRa, considerando los requerimientos técnicos del sistema previamente establecidos. Esta evaluación permite seleccionar la tecnología más adecuada para asegurar una transmisión confiable de datos en tiempo real, manteniendo la escalabilidad del sistema y su viabilidad operativa.

Tabla 22.

Selección de Tecnología Inalámbrica

Requerimientos	Wi-Fi	Zigbee	LoRa
StSR4 – Comunicación inalámbrica estable	1	1	1
SySR4 – Instalación sencilla	1	1	1
SySR11 – Alimentación continua y eficiente	1	1	1
SRSR2 – Compatibilidad con el sistema (ESP32/Jetson)	1	1	0
SRSR5 – Compatibilidad cliente-servidor	1	0	0
SRSR10 – Disponibilidad en el mercado local	1	1	1
Valoración total	6	5	4

Cumple “1” — No cumple “0”**Elección: Wi-Fi****Fuente: Autoría**

La tecnología Wi-Fi resulta la más adecuada frente a otras opciones como Zigbee o LoRa, al ofrecer una mayor velocidad de transmisión, integración directa con placas ESP32 sin requerir módulos adicionales. Aunque Zigbee y LoRa son eficientes en consumo energético y cobertura, presentan una mayor complejidad de implementación y menor ancho de banda, lo que limita su aplicación en sistemas que requieren monitoreo en tiempo real. Por estas razones, Wi-Fi cumple con los requerimientos funcionales y estructurales del sistema propuesto, garantizando una comunicación estable y accesible en el entorno de cultivo.

3.5.3 Elección fuente de alimentación

El sistema automatizado de monitoreo ambiental requiere que el nodo sensor funcione de manera continua y estable dentro del entorno de cultivo de champiñones. Dado que el prototipo se implementa en un invernadero fijo con acceso a red eléctrica, se priorizó una solución de alimentación que garantice operación ininterrumpida, estabilidad energética y facilidad de

mantenimiento.

Durante las pruebas iniciales se evaluó el uso de baterías recargables para alimentar el microcontrolador ESP32 y los sensores asociados. Sin embargo, esta alternativa no proporcionó la energía suficiente para sostener de manera confiable el funcionamiento simultáneo de los sensores y la comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi, lo que generaba reinicios y pérdida de datos. Por esta razón, se optó por una alimentación directa desde la red eléctrica, utilizando un adaptador de corriente tipo USB (5 V), similar a los empleados en cargadores de dispositivos móviles.

En la Tabla 23 se presenta el consumo estimado de cada componente electrónico del nodo sensor, diferenciando su comportamiento en modo activo y en reposo.

Tabla 23.

Consumo eléctrico del nodo sensor

Elemento	Consumo en funcionamiento	Consumo en modo Sleep
SHT31 (Temperatura y Humedad)	1.5 mA	0.01 mA
BH1750 (Luminosidad)	0.12 mA	0.01 mA
SCD30 (CO ₂)	19 mA	0.04 mA
Sensor de pH (4502C)	5 mA	0.1 mA
ESP32 DevKit V1	50 mA	0.05 mA
Total	75.62 mA	0.21 mA

Para determinar el consumo energético promedio del nodo sensor, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo total} = \frac{(T_{cn} \cdot I_{cn}) + (T_{cd} \cdot I_{cd})}{T_{cn} + T_{cd}} \quad (3.1)$$

Donde:

- $T_{cn} = 180 \text{ s}$ (tiempo en modo activo cada 5 minutos)
- $I_{cn} = 75,62 \text{ mA}$ (corriente en modo activo)
- $T_{cd} = 120 \text{ s}$ (tiempo en modo reposo)
- $I_{cd} = 0,21 \text{ mA}$ (corriente en modo reposo)

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\text{Consumo total} = \frac{(180 \cdot 75,62) + (120 \cdot 0,21)}{180 + 120} = \frac{13611,6 + 25,2}{300} = 45,45 \text{ mA} \quad (3.2)$$

La elección de una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica resulta adecuada para el contexto del proyecto, ya que el sistema se instala en un entorno controlado con disponibilidad de energía comercial. No obstante, en trabajos futuros podría evaluarse la incorporación de sistemas de respaldo energético, como baterías o soluciones fotovoltaicas, para mejorar la resiliencia del sistema ante posibles interrupciones del suministro eléctrico.

3.5.4 Elección de Software

La elección del software constituye un aspecto clave para el desarrollo eficiente del sistema, por lo que se analizan diferentes alternativas de lenguajes de programación y plataformas de código abierto. La selección se orienta hacia herramientas que no solo sean accesibles, sino que también ofrezcan estabilidad y buen rendimiento en la ejecución de modelos de inteligencia artificial. Dado que el proyecto incluye procesos de monitoreo, análisis y control automatizado, es fundamental asegurar que el software sea totalmente compatible con el hardware utilizado, permitiendo una integración fluida y confiable en el entorno operativo.

3.5.4.1 Software para la adquisición de datos

Para la selección del software de programación utilizado en el nodo sensorial (ESP32), se ha considerado el cumplimiento de requerimientos técnicos clave relacionados con la compatibilidad con hardware, facilidad de integración de librerías específicas para sensores, y eficiencia operativa en entornos embebidos. A partir de este análisis, se evaluaron dos opciones: Arduino IDE y Python (MicroPython). Como se muestra en la Tabla 24, se priorizó la opción que mejor se ajusta al entorno de trabajo con el ESP32 y que garantiza un desempeño estable dentro del sistema de monitoreo ambiental.

Tabla 24.

Software del Nodo Sensorial (ESP32)

Software	SRSH1	SRSH2	SRSH3	Valoración
Python (MicroPython)	1	1	0	2
Arduino IDE	1	1	1	3

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Arduino IDE

Fuente: Autoría

3.5.4.2 Software para procesamiento y análisis

En la Tabla 25 se comparan tres lenguajes de programación comúnmente utilizados para el procesamiento de datos: Python, C++ y MATLAB. La evaluación se realiza considerando criterios como la compatibilidad con librerías de inteligencia artificial y lógica difusa, la integración con servicios en la nube y la facilidad de implementación en arquitecturas IoT basadas en comunicación mediante APIs.

En el sistema propuesto, el procesamiento inteligente de los datos no se realiza en el nodo sensor, sino en la nube, utilizando servicios de Google Cloud que se comunican con la base de datos Firebase. En este contexto, Python destaca como la opción más adecuada debido a su

amplia compatibilidad con las APIs de Google Cloud y Firebase, su soporte para librerías de análisis de datos y lógica difusa, y su facilidad para el desarrollo de servicios escalables en la nube.

Por otro lado, C++ presenta una mayor complejidad de desarrollo y menor flexibilidad para la integración con plataformas cloud, mientras que MATLAB, aunque potente para análisis numérico, requiere licencias comerciales que limitan su uso en sistemas productivos y entornos distribuidos.

En función de estos criterios, Python se selecciona como el lenguaje principal para el bloque de procesamiento y análisis en la nube del sistema de monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones.

Tabla 25.

Software del Bloque de Procesamiento

Lenguaje	SRSH1	SRSH2	SRSH3	Valoración
Python	1	1	1	3
C++	1	1	0	2
MATLAB	0	1	0	1

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Python

Fuente: Autoría

3.5.4.3 Software para el almacenamiento de datos

La plataforma seleccionada para el almacenamiento de datos debe permitir registrar de manera eficiente la información enviada por los nodos ESP32, garantizando disponibilidad continua, acceso remoto y sincronización en tiempo real. En el sistema propuesto, los datos capturados por los sensores son enviados directamente a una base de datos en la nube, lo que facilita su posterior procesamiento, análisis y visualización.

Para este propósito, se utiliza Google Firebase, una plataforma de base de datos en tiempo real basada en la nube, que permite la comunicación directa con dispositivos IoT mediante

servicios web y APIs. Firebase ofrece alta escalabilidad, baja latencia y soporte nativo para aplicaciones distribuidas, lo que resulta adecuado para sistemas de monitoreo ambiental que requieren actualización constante de la información.

En la Tabla 26 se comparan distintas alternativas de almacenamiento evaluadas considerando criterios como facilidad de integración con servicios en la nube, compatibilidad con arquitecturas IoT, soporte para comunicación mediante APIs, escalabilidad y disponibilidad del servicio. A partir de este análisis, Firebase se selecciona como la solución más conveniente para el almacenamiento de datos del sistema de monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones.

Tabla 26.

Selección de la Plataforma de Almacenamiento

Software	StSR2	SRS1	SRS2	SRS3	Valoración
MySQL	1	1	1	0	3
FireBase	1	1	1	1	4
PostgreSQL	1	1	1	0	3

Cumple “1” — No cumple “0”

Elección: Firebase

Fuente: Autoría

3.5.4.4 Software para la visualización

En la Tabla 27 se comparan diferentes alternativas para la visualización de datos en sistemas IoT, considerando su compatibilidad con aplicaciones web, capacidad de actualización en tiempo real, facilidad de integración con bases de datos en la nube y soporte para servicios backend mediante APIs. Estas características son fundamentales para garantizar que los datos monitoreados en el cultivo de champiñones puedan ser consultados de forma clara, accesible y oportuna por el usuario final.

Tabla 27.

Selección de Software de Visualización

Software	SRSH1	SRSH2	SRSH3	SRSH4	Valoración
Grafana	1	1	1	1	4
Power BI	1	0	1	1	3
Aplicación Web (HTML/CSS/JS)	1	1	1	1	4

Cumple “1” — No cumple “0”**Elección:** Aplicación Web (HTML/CSS/JS)**Fuente:** Autoría

Entre las opciones evaluadas, se seleccionó el desarrollo de una aplicación web personalizada, desplegada en Google Cloud, como solución para la visualización de datos del sistema de monitoreo ambiental. Esta alternativa permite mostrar en tiempo real la información almacenada en Firebase mediante el consumo de APIs, garantizando compatibilidad multiplataforma y acceso desde cualquier navegador web sin necesidad de software adicional.

La aplicación web facilita la representación gráfica de las variables ambientales monitoreadas, el historial de datos y la generación de alertas visuales cuando los valores superan los rangos establecidos. Además, al estar alojada en la nube, asegura alta disponibilidad incluso ante cortes de energía locales, lo cual resulta especialmente relevante para el contexto rural donde se implementa el sistema.

Esta solución se adapta mejor al perfil del usuario agrícola, ya que permite el acceso remoto desde dispositivos móviles o computadoras, reduce la complejidad de mantenimiento y se integra de forma nativa con los servicios de Google Cloud utilizados para el procesamiento y análisis inteligente de los datos.

3.6 ETAPA DE DISEÑO

La etapa de diseño constituye una fase fundamental en el desarrollo del sistema de monitoreo y control ambiental para el cultivo de champiñones, ya que permite estructurar de manera lógica y visual cada uno de los componentes que lo integran. En esta etapa se definen las interacciones entre los bloques funcionales previamente establecidos, detallando tanto el diseño físico como lógico del sistema. Se incluyen representaciones gráficas como diagramas de bloques, esquemas eléctricos, diagramas de flujo y arquitectura de software, los cuales facilitan la comprensión del funcionamiento integral y sirven como guía para su implementación práctica. Este diseño se elabora con base en los requerimientos técnicos levantados en fases anteriores, asegurando coherencia, funcionalidad y viabilidad en el desarrollo del proyecto.

3.6.1 Diseño del Sistema

A partir del análisis de requerimientos y la información recopilada en fases previas, se procede a definir y estructurar los elementos que conformarán el sistema propuesto. Esta sección presenta el diseño general del sistema mediante la elaboración de diagramas funcionales que permiten visualizar de forma organizada y clara el comportamiento de cada componente. Se inicia con el diagrama de bloques general, el cual ofrece una visión integral del sistema y sus interacciones principales. A continuación, se detallan los diagramas específicos por bloques funcionales, como el de adquisición de datos, procesamiento, almacenamiento y visualización. Además, se incluyen los diagramas eléctricos, diagramas de flujo del software, y las pruebas realizadas durante el desarrollo e implementación, proporcionando así una base estructurada para la ejecución del proyecto.

3.6.1.1 Arquitectura general del sistema

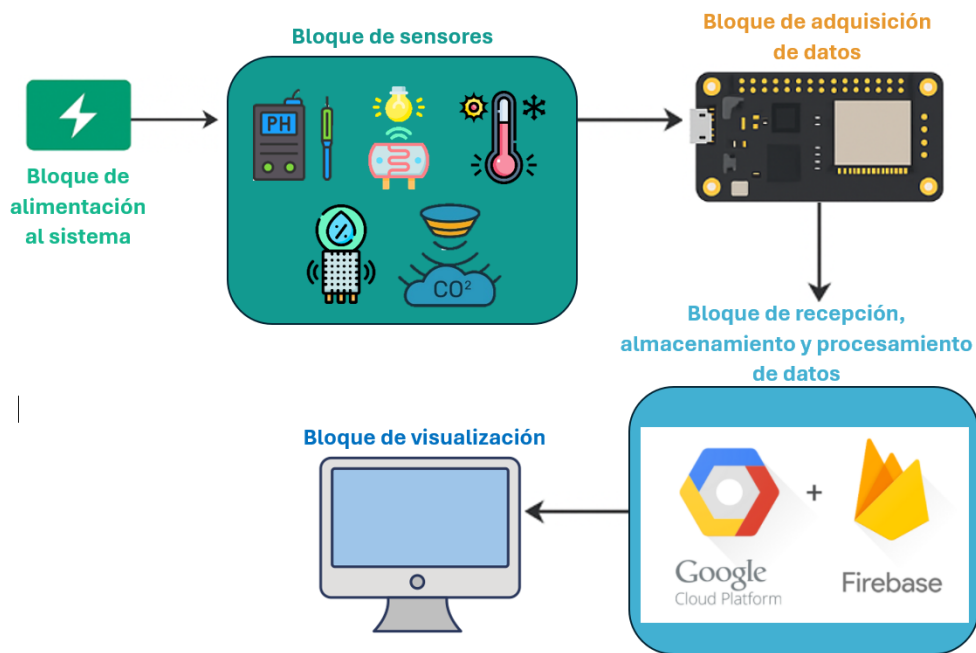
La arquitectura general del sistema, representada en la Figura 12, muestra de manera estructurada los principales bloques funcionales que conforman el sistema de monitoreo y con-

trol ambiental aplicado al cultivo de champiñones. Esta arquitectura permite comprender el flujo de energía e información desde el bloque de alimentación del nodo sensor, pasando por el bloque de sensores encargados de registrar variables ambientales como temperatura, humedad, luminosidad, dióxido de carbono (CO₂) y pH del sustrato.

Los datos capturados son procesados inicialmente por la placa ESP32, que actúa como nodo de adquisición y transmisión, encargándose del empaquetado de la información y su envío de forma inalámbrica a la base de datos en la nube (Firebase Realtime Database). Posteriormente, los datos almacenados son accedidos por la plataforma de procesamiento en Google Cloud, donde se ejecutan los algoritmos de análisis y el sistema de decisión basado en lógica difusa, permitiendo evaluar el estado ambiental del cultivo y generar alertas cuando se detectan condiciones fuera de los rangos establecidos. Finalmente, los resultados del procesamiento son almacenados nuevamente en la base de datos y presentados al usuario a través del bloque de visualización web, proporcionando una interfaz interactiva para el monitoreo en tiempo real y el análisis histórico de las variables ambientales. Esta arquitectura modular y distribuida garantiza una operación eficiente, escalable y adaptable a distintos escenarios de producción agrícola.

Figura 12.

Arquitectura general del sistema.



FUENTE: Autoría

A continuación se detallan los bloques que conforman la arquitectura general del sistema automatizado de monitoreo y control ambiental, desarrollado para optimizar las condiciones de cultivo de champiñones.

- **Bloque de alimentación del sistema:**

Este bloque proporciona la energía necesaria para el funcionamiento continuo de los sensores, las placas ESP32 y el gateway Jetson Nano. Está compuesto por una fuente de alimentación regulada conectada a la red eléctrica, complementada por un sistema de respaldo con baterías recargables para garantizar autonomía ante cortes de energía. Se incluye protección contra sobrecorrientes y regulación de voltaje para evitar daños en los componentes sensibles.

- **Bloque de sensores:**

Conjunto de módulos encargados de medir en tiempo real las variables críticas del entorno del invernadero. Incluye sensores:

- **Temperatura y humedad:** Sensor digital SHT31, que entrega valores de temperatura y humedad relativa con alta precisión.
- **Luminosidad:** Sensor BH1750, con salida digital I²C y sensibilidad de hasta 65,535 lux.
- **Dióxido de carbono (CO₂):** Sensor MQ-135, que permite estimar concentraciones de CO₂.
- **pH del sustrato:** Sensor pH-E-201-C, conectado a través de interfaz analógica.

Los sensores están conectados al microcontrolador ESP32 mediante interfaces I²C y analógicas, permitiendo su lectura de forma eficiente.

■ **Bloque de adquisición de datos (ESP32):**

Esta unidad descentralizada se encarga de recolectar las lecturas de los sensores, realizar un preprocesamiento básico (como validación de rangos y formato) y transmitir los datos a la plataforma de Firebase mediante Wi-Fi, utilizando protocolos ligeros como API . La ESP32 es una placa de bajo consumo energético y alta versatilidad, adecuada para aplicaciones IoT en campo.

■ **Bloque de recepción, procesamiento y almacenamiento en la nube (Google Cloud):**

Este bloque constituye el núcleo lógico del sistema propuesto. Recibe los datos enviados por el nodo ESP32 y almacenados inicialmente en la base de datos Firebase. Posteriormente, dichos datos son procesados en la infraestructura de Google Cloud mediante servicios backend y algoritmos implementados en lenguaje Python, donde se aplica lógica difusa para el análisis inteligente de las condiciones ambientales monitoreadas.

Una vez procesada la información, los resultados son enviados nuevamente a Firebase, permitiendo su almacenamiento seguro, trazabilidad histórica y acceso remoto en tiempo real. Esta arquitectura basada en la nube elimina la necesidad de un servidor físico local, mejora la disponibilidad del sistema ante cortes eléctricos y facilita la escalabilidad, garantizando que los datos puedan ser consultados desde cualquier dispositivo con conexión a Internet.

- **Bloque de visualización y supervisión:**

Este bloque proporciona al usuario final una interfaz gráfica intuitiva y accesible desde un navegador web, permitiendo la supervisión en tiempo real de las variables ambientales del cultivo. A través de esta interfaz, el usuario puede visualizar los datos procesados, recibir alertas cuando los valores se encuentren fuera de los rangos establecidos y apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del invernadero.

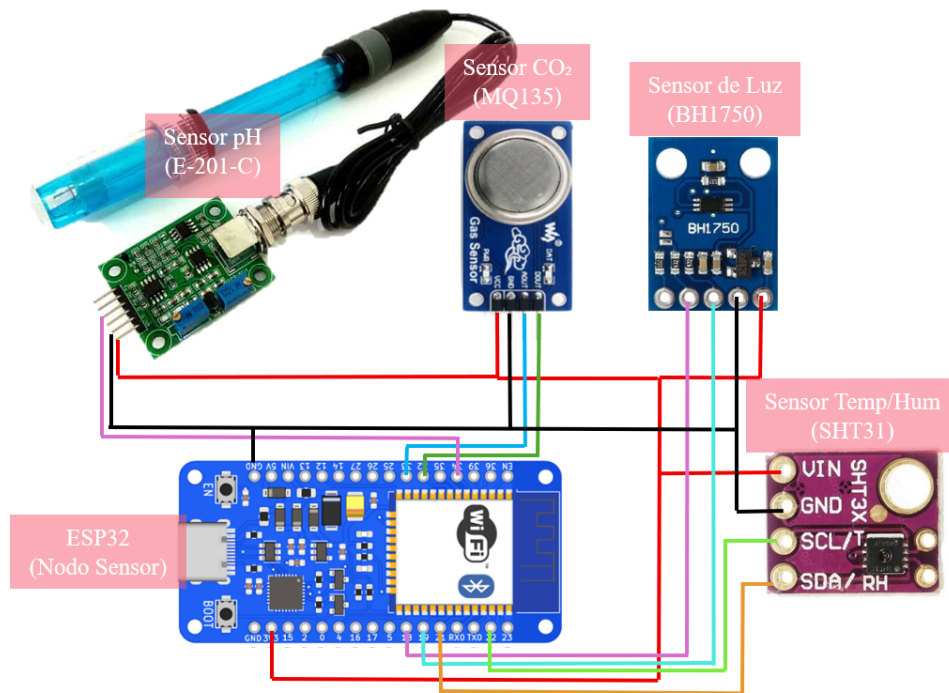
La visualización se basa en tecnologías web modernas, integradas con la base de datos Firebase y los servicios de procesamiento en Google Cloud, lo que garantiza acceso remoto, disponibilidad continua y compatibilidad con distintos dispositivos, como computadoras y teléfonos móviles. El desarrollo de la interfaz se realiza mediante herramientas de programación web, asegurando escalabilidad y facilidad de mantenimiento.

3.6.1.2 Diagrama de conexión del Nodo Sensor

Para el desarrollo del nodo sensor, se utilizó una placa ESP32, la cual permite múltiples entradas analógicas y buses I2C para la comunicación con sensores. La Figura 13 muestra la conexión física de los sensores al microcontrolador.

Figura 13.

Diagrama de Conexión del Nodo Sensor



FUENTE: Autoría

Cada sensor se conectó cuidadosamente respetando los pines definidos en el código fuente. El sensor de pH (modelo E-201-C) utiliza una salida analógica conectada al pin GPIO34, mientras que el sensor de gas MQ135 se conecta tanto de forma analógica (GPIO32) como digital (GPIO33). Por otra parte, el sensor de luminosidad BH1750 se comunica mediante el bus I2C principal (GPIO18 como SDA y GPIO19 como SCL), y el sensor de temperatura y humedad SHT31 utiliza el bus I2C secundario (GPIO21 como SDA y GPIO22 como SCL). Todos los sensores están alimentados con 3.3V para asegurar compatibilidad y evitar daños en la placa.

La Tabla 36 resume la conexión de cada sensor al ESP32, especificando el número de GPIO utilizado, su función correspondiente y el color de cableado representado en la figura.

Tabla 28.

Conexión de sensores al ESP32

Sensor	Función	GPIO	Pin físico	Color (figura)
Sensor pH (E-201-C)	Salida analógica	GPIO34	34	Violeta
	VCC	3.3V	3V3	Rojo
	GND	GND	GND	Negro
MQ135 (CO ₂)	Salida analógica (A0)	GPIO32	32	Verde
	Salida digital (D0)	GPIO33	33	Celeste
	VCC	3.3V	3V3	Rojo
	GND	GND	GND	Negro
BH1750 (luz)	SDA (I2C)	GPIO18	18	Fucsia
	SCL (I2C)	GPIO19	19	Turquesa
	VCC	3.3V	3V3	Rojo
	GND	GND	GND	Negro
SHT31 (temp/hum)	SDA (I2C)	GPIO21	21	Naranja
	SCL (I2C)	GPIO22	22	Verde Lima
	VCC	3.3V	3V3	Rojo
	GND	GND	GND	Negro

La imagen 14 representa la arquitectura conceptual de conexión del sistema, donde el ESP32 actúa como nodo de adquisición de datos ambientales y transmite la información de forma inalámbrica a través de Internet hacia la plataforma en la nube. Los datos recolectados por los sensores son almacenados y procesados en Google Firebase y Google Cloud, donde se ejecutan los algoritmos de análisis y lógica difusa. Posteriormente, la información procesada es enviada nuevamente a la base de datos para su visualización en una interfaz web, permitiendo al usuario monitorear en tiempo real las condiciones del cultivo de champiñones sin necesidad de un gateway físico local.

3.6.1.3 Diagrama de conexión de plataforma de procesamiento

Figura 14.

Diagrama de Conexión de plataforma de procesamiento



FUENTE: Autoría

3.6.1.4 Diagrama de flujo del nodo sensor

El diagrama de flujo del nodo sensor, figura 15 describe de manera secuencial el funcionamiento completo del sistema, desde la inicialización del microcontrolador hasta el envío periódico de los datos ambientales a la base de datos en la nube. En este proceso, la placa ESP32 actúa como el núcleo de operación del nodo sensor, iniciando con la carga de librerías, la configuración de pines y la inicialización de los sensores y del módulo de comunicación Wi-Fi.

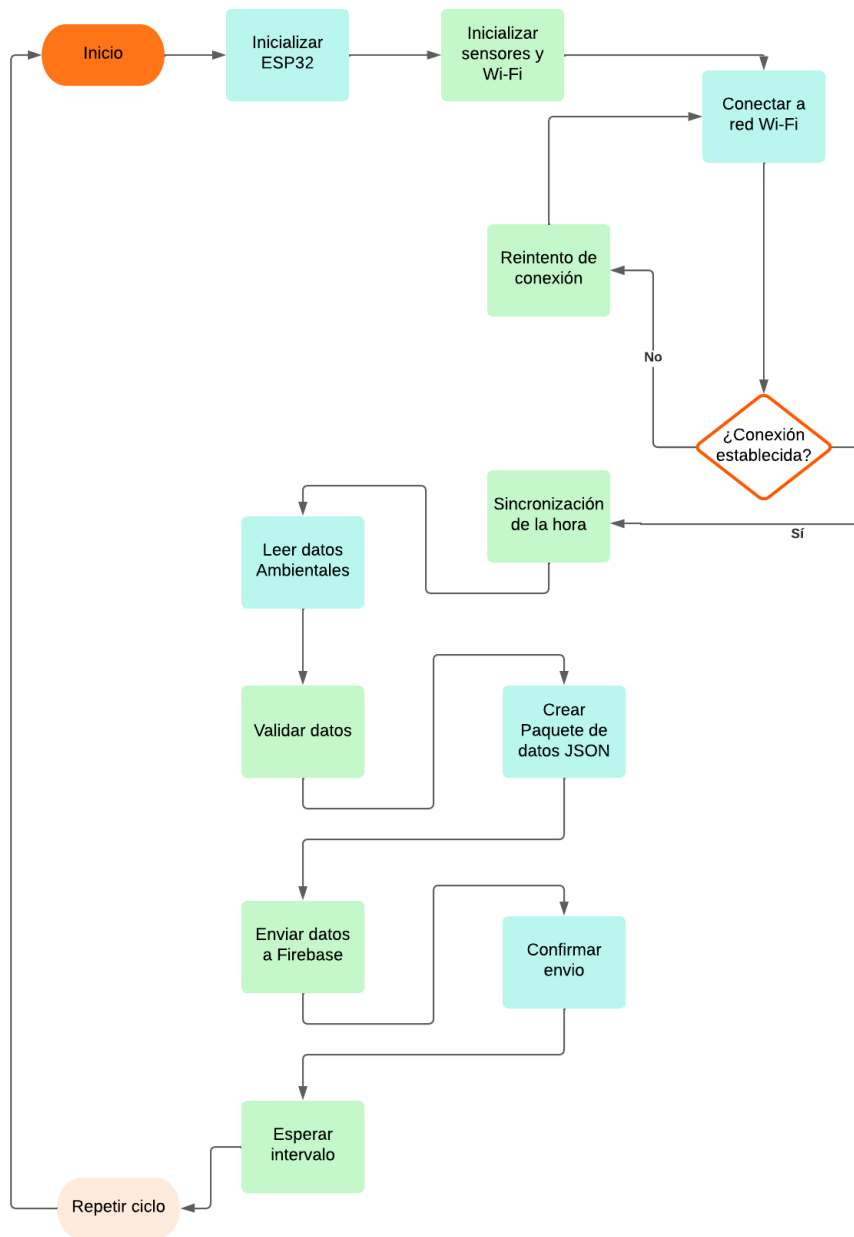
Una vez iniciado el sistema, el ESP32 intenta establecer conexión con la red inalámbrica configurada. En caso de que la conexión no sea exitosa, el sistema ejecuta una rutina de reintento hasta lograr la comunicación, garantizando la continuidad del monitoreo. Cuando la conexión Wi-Fi se establece correctamente, el nodo sincroniza la hora del sistema mediante servicios de red, lo que permite registrar los datos con marcas de tiempo precisas.

Posteriormente, se realiza la lectura de las variables ambientales a través de los sensores conectados, incluyendo temperatura, humedad, concentración de CO₂, pH y luminosidad. Los datos obtenidos son validados para asegurar su consistencia y luego encapsulados en una estructura de datos en formato JSON, facilitando su transmisión y almacenamiento. Finalmente,

la información es enviada a la base de datos Firebase, donde queda disponible para su posterior procesamiento, análisis y visualización.

El flujo de operación incorpora además rutinas de confirmación de envío, control del intervalo de muestreo y repetición cíclica del proceso, lo que permite un funcionamiento estable, eficiente y continuo del nodo sensor dentro del entorno del invernadero.

Figura 15.
Diagrama de flujo del nodo sensor



FUENTE: Autoría

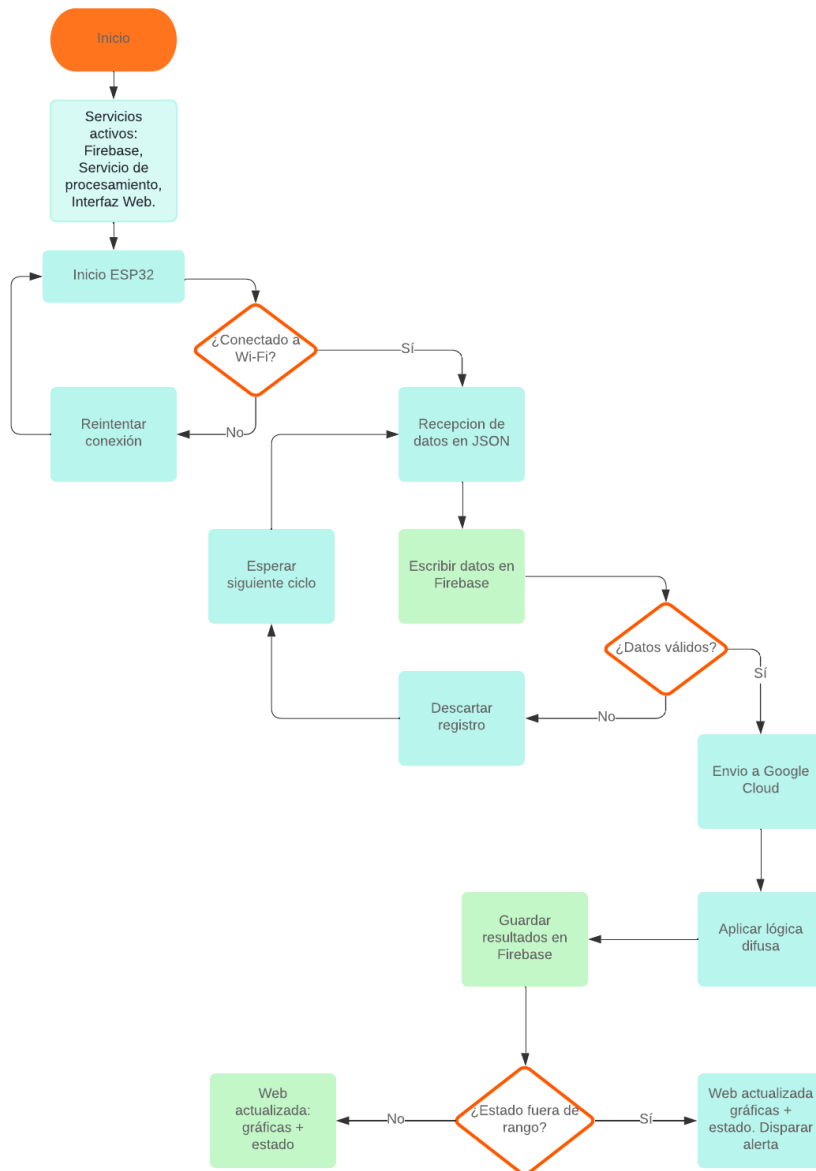
Como se observa en la Figura 15, el código es ejecutado por la ESP32-WROOM, encargada de gestionar todo el proceso de adquisición, procesamiento y envío de datos en el nodo sensor.

3.6.1.5 Diagrama de flujo del procesamiento en la nube

El diagrama de flujo de procesamiento 14 describe el funcionamiento del sistema de monitoreo ambiental para el cultivo de champiñones desde la inicialización de los servicios hasta la visualización de la información. El proceso inicia con la activación de los servicios en la nube, incluyendo Firebase Realtime Database, el servicio de procesamiento en Google Cloud y la interfaz web. Posteriormente, el nodo sensor basado en ESP32 se inicia e intenta establecer conexión con la red Wi-Fi; en caso de fallo, el sistema ejecuta reintentos automáticos hasta lograr una conexión estable. Una vez conectado, el ESP32 adquiere las variables ambientales, empaqueta los datos en formato JSON y los envía a Firebase, donde se almacenan y se valida su integridad.

Cuando los datos son considerados válidos, estos son procesados en Google Cloud mediante un algoritmo de lógica difusa, el cual evalúa el estado de las condiciones ambientales en función de los rangos óptimos definidos para el cultivo. Los resultados del análisis se almacenan nuevamente en Firebase, permitiendo la actualización en tiempo real de la interfaz web. Finalmente, el sistema visualiza las gráficas y el estado del ambiente, y en caso de detectar condiciones fuera de rango, se generan alertas automáticas para notificar al usuario, repitiéndose el ciclo de forma continua según el intervalo de muestreo establecido.

Figura 16.
Diagrama de flujo del procesamiento



3.6.1.6 Calibración y lectura de datos mediante Sensores

Esta sección describe los procedimientos realizados para la calibración y lectura de datos de los sensores conectados al nodo ESP32, los cuales permiten monitorear las condiciones ambientales en el cultivo de champiñones. Cada subsección incluye una breve explicación del funcionamiento del sensor, la forma de conexión con el microcontrolador y el código de ejemplo utilizado para la lectura de los datos en tiempo real.

Sensor de temperatura y humedad SHT31

El sensor SHT31 permite medir con alta precisión la temperatura y humedad relativa del ambiente. Utiliza comunicación digital I2C y se conecta fácilmente al ESP32 a través de los pines SDA y SCL. Requiere una librería específica para su uso.

```
34     #include <Wire.h>
35     #include "Adafruit_SHT31.h"
36
37     Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31();
38
39     void setup() {
40         Serial.begin(115200);
41         if (!sht31.begin(0x44)) {
42             Serial.println("No se encontró el sensor SHT31");
43             while (1);
44         }
45     }
46
47     void loop() {
48         float temp = sht31.readTemperature();
49         float humidity = sht31.readHumidity();
50
51         if (!isnan(temp)) {
52             Serial.print("Temperatura: ");
53             Serial.print(temp);
54             Serial.println("°C");
55         }
56
57         if (!isnan(humidity)) {
58             Serial.print("Humedad: ");
59             Serial.print(humidity);
60             Serial.println("%");
61         }
62         delay(2000);
```

```
63     }
```

Listing 1: Código de lectura del sensor SHT31

Sensor de luminosidad BH1750

El sensor BH1750 permite medir la intensidad lumínica en lux utilizando comunicación I2C. Es ideal para aplicaciones agrícolas donde se requiere controlar la exposición lumínica.

```
34     #include <Wire.h>
35     #include <BH1750.h>
36
37     BH1750 lightMeter;
38
39     void setup() {
40         Serial.begin(115200);
41         Wire.begin();
42         lightMeter.begin();
43     }
44
45     void loop() {
46         float lux = lightMeter.readLightLevel();
47         Serial.print("Luminosidad:");
48         Serial.print(lux);
49         Serial.println(" lux");
50         delay(1000);
51     }
```

Listing 2: Código de lectura del sensor BH1750

Sensor de dióxido de carbono SCD30

El sensor SCD30 permite medir el nivel de CO₂, temperatura y humedad. Utiliza I2C para comunicación y ofrece alta precisión. Es ideal para monitorear la calidad del aire en entornos

agrícolas.

```
34     #include <Wire.h>
35     #include "SparkFun_SCD30_Arduino_Library.h"
36
37     SCD30 airSensor;
38
39     void setup() {
40         Serial.begin(115200);
41         Wire.begin();
42         airSensor.begin();
43     }
44
45     void loop() {
46         if (airSensor.dataAvailable()) {
47             Serial.print("CO2:");
48             Serial.print(airSensor.getCO2());
49             Serial.println("ppm");
50
51             Serial.print("Temperatura:");
52             Serial.print(airSensor.getTemperature());
53             Serial.println("°C");
54
55             Serial.print("Humedad:");
56             Serial.print(airSensor.getHumidity());
57             Serial.println("%");
58         }
59         delay(2000);
60     }
```

Listing 3: Código de lectura del sensor SCD30

Sensor de pH SEN0169-V2 (DFRobot)

Este sensor permite medir el pH directamente en suelos húmedos. Se conecta a una entrada analógica del ESP32 y requiere calibración previa con soluciones buffer.

```
34     #define SensorPin 34
35     float voltage, pHValue;
36
37     void setup() {
38         Serial.begin(115200);
39     }
40
41     void loop() {
42         voltage = analogRead(SensorPin) * (3.3 / 4095.0); // conversión
43                 ADC
44         pHValue = 7 + ((2.5 - voltage) / 0.18); // fórmula estimada de
45                 calibración
46         Serial.print("pH del suelo: ");
47         Serial.println(pHValue);
48         delay(2000);
49     }
```

Listing 4: Código de lectura del sensor de pH SEN0169-V2

3.6.1.7 Programación del ESP32 para envío de datos a la nube

En esta etapa se desarrolla la programación del nodo sensor basado en ESP32, orientada a la transmisión directa de los datos ambientales hacia la plataforma de almacenamiento en la nube.

El ESP32 se encarga de inicializar los sensores ambientales, establecer la conexión a la red Wi-Fi disponible y estructurar los datos adquiridos en formato JSON. Posteriormente, estos datos son enviados a la base de datos Firebase Realtime Database mediante solicitudes HTTP

seguras, garantizando su almacenamiento en tiempo real.

Esta arquitectura permite que los datos recolectados sean procesados posteriormente en la nube, específicamente en Google Cloud, donde se aplican algoritmos de análisis y lógica difusa para la evaluación de las condiciones ambientales del cultivo. Una vez procesados, los resultados son almacenados nuevamente en Firebase y puestos a disposición de la interfaz web para su visualización y generación de alertas.

La programación del ESP32 incluye además mecanismos de validación de datos, control de errores de comunicación y sincronización temporal, asegurando un funcionamiento continuo, confiable y acorde a los requerimientos del sistema de monitoreo ambiental propuesto.

```
34 #include <WiFi.h>
35 #include <HTTPClient.h>
36
37 const char* ssid = "Monteros";
38 const char* password = "17005270625";
39 const char* serverName = "http://192.168.1.100:5000/datos"; // IP del
    gateway
40
41 void setup() {
42     Serial.begin(115200);
43     WiFi.begin(ssid, password);
44     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
45         delay(500);
46         Serial.print(".");
47     }
48     Serial.println("Conectado a WiFi");
49 }
50
51 void loop() {
52     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
53         HTTPClient http;
54         http.begin(serverName);
55         http.addHeader("Content-Type", "application/json");
```

```

56
57     String postData = "{\"temp\":24.5,\"hum\":65.2,\"ph\":6.3}";
58     int httpResponseCode = http.POST(postData);
59
60     if (httpResponseCode > 0) {
61         String response = http.getString();
62         Serial.println("Respuesta del servidor: " + response);
63     } else {
64         Serial.print("Error en envío: ");
65         Serial.println(httpResponseCode);
66     }
67
68     http.end();
69 }
70
71 delay(5000); // espera antes de enviar de nuevo
72 }

```

Listing 5: Envío de datos del ESP32 al Gateway por HTTP

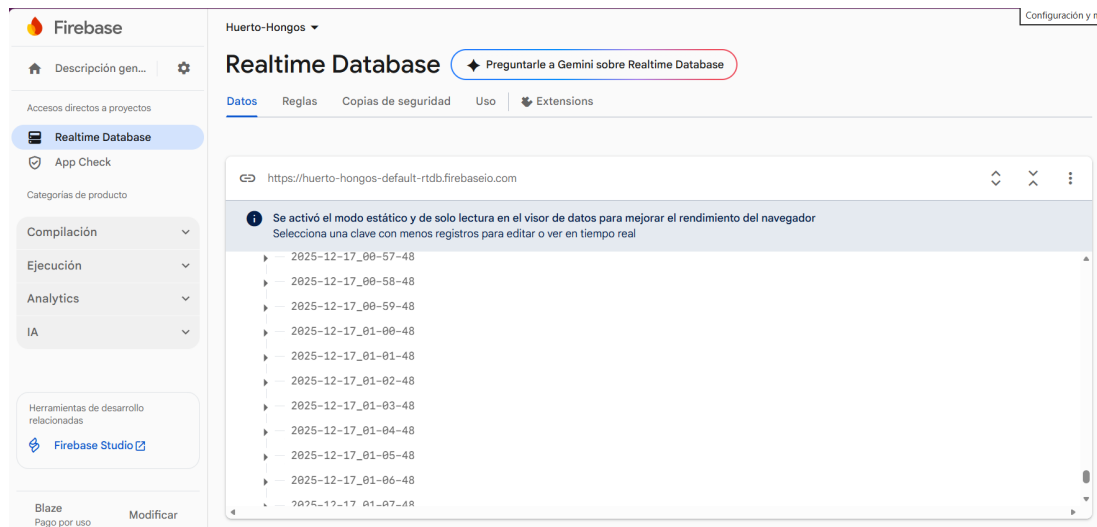
3.6.2 Creación y estructuración de la base de datos para el análisis inteligente

En esta etapa se realiza la creación y estructuración de la base de datos que soporta el análisis inteligente de las condiciones ambientales del cultivo de champiñones como se ve en la figura 17. La base de datos cumple la función de almacenar de manera ordenada y persistente los datos recolectados por los nodos sensores ESP32, permitiendo su posterior análisis, visualización y procesamiento en la nube.

Para el desarrollo del sistema se utiliza Firebase Realtime Database, debido a su capacidad para manejar datos en tiempo real, su integración nativa con servicios en la nube y su compatibilidad con aplicaciones IoT. Los datos almacenados incluyen registros de variables ambientales como temperatura, humedad, concentración de CO₂, pH y luminosidad, junto con marcas de tiempo generadas automáticamente.

Figura 17.

FireBase Datos Recibidos



FUENTE: Autoría

La estructura de la base de datos se diseñó de forma jerárquica, permitiendo organizar los registros por fecha y tipo de variable, lo que facilita el acceso eficiente a la información histórica y en tiempo real. Esta organización resulta fundamental para el posterior procesamiento de los datos mediante algoritmos de lógica difusa implementados en la plataforma de procesamiento en la nube.

La correcta estructuración de la base de datos garantiza la integridad de la información, la escalabilidad del sistema y la posibilidad de aplicar análisis inteligente sin depender de procesamiento local, lo cual es especialmente adecuado para entornos agrícolas con recursos limitados.

3.6.2.1 Implementación del algoritmo de lógica difusa en Google Cloud

Las reglas del sistema de lógica difusa integran múltiples variables ambientales críticas tal como se indica en la tabla 29, incluyendo temperatura, humedad, concentración de CO₂, pH y luminosidad. La incorporación de la luminosidad permite evaluar condiciones de iluminación inadecuadas que podrían afectar el desarrollo del cultivo, aun cuando no sea un factor fotosintético directo en los champiñones.

Tabla 29.

Reglas del sistema de lógica difusa para el monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones

Regla	Temperatura	Humedad	CO₂	pH	Luminosidad	Estado del Cultivo
R1	Baja	Baja	Bajo	Ácido	Alta	Crítico
R2	Baja	Media	Medio	Ácido	Media	Deficiente
R3	Media	Alta	Medio	Óptimo	Baja	Óptimo
R4	Media	Alta	Alto	Óptimo	Media	Aceptable
R5	Alta	Media	Alto	Básico	Alta	Deficiente
R6	Media	Media	Medio	Óptimo	Baja	Óptimo
R7	Alta	Baja	Alto	Básico	Alta	Crítico
R8	Baja	Alta	Bajo	Óptimo	Media	Aceptable
R9	Media	Media	Alto	Ácido	Alta	Deficiente

Fuente: Autoría.

Si bien el sistema dispone de un conjunto de reglas difusas para la evaluación y toma de decisiones ante condiciones ambientales anómalas, durante el periodo de pruebas no se presentaron escenarios que permitieran su activación completa, ya que las variables se mantuvieron mayoritariamente dentro de rangos aceptables o con desviaciones leves y temporales. No obstante, las reglas difusas se encuentran correctamente implementadas y preparadas para actuar de manera automática en caso de que se presenten condiciones adversas más severas o persistentes, activando los mecanismos de alerta y control correspondientes. De esta forma, aunque no hayan sido plenamente activadas durante la validación, su integración fortalece la capacidad de respuesta, confiabilidad y aplicabilidad del sistema de monitoreo y control ambiental para el cultivo de champiñones.

3.6.2.2 Sistema de decisión ambiental basado en lógica difusa

El sistema de decisión ambiental basado en lógica difusa constituye el núcleo del proceso inteligente de análisis dentro del sistema de monitoreo de condiciones ambientales para el cultivo de champiñones. Este enfoque permite interpretar información ambiental caracterizada por incertidumbre y variabilidad, propia de los entornos agrícolas controlados, donde las variables no siempre presentan comportamientos lineales o valores exactos.

La lógica difusa se emplea para evaluar de manera conjunta las variables ambientales monitoreadas —temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, pH y luminosidad— mediante un conjunto de reglas lingüísticas definidas a partir del conocimiento técnico y recomendaciones agronómicas. Estas reglas permiten transformar los valores numéricos obtenidos por los sensores en etiquetas difusas, tales como bajo, medio u alto, facilitando una evaluación más cercana al razonamiento humano.

El sistema de decisión se implementa en la plataforma de procesamiento en la nube (Google Cloud), donde los datos almacenados previamente en la base de datos son analizados en tiempo casi real. A partir del proceso de inferencia difusa y la posterior defuzzificación, el sistema determina el estado general del cultivo, clasificándolo en niveles como óptimo, aceptable, deficiente o crítico. Este resultado permite generar alertas informativas al productor y sirve como base para la toma de decisiones relacionadas con el manejo ambiental del invernadero.

La adopción de un sistema de decisión basado en lógica difusa mejora la capacidad de análisis del sistema, al considerar simultáneamente múltiples variables y sus interacciones, reduciendo la dependencia de umbrales rígidos y permitiendo una evaluación más flexible y adaptativa de las condiciones ambientales del cultivo.

3.7 ETAPA DE IMPLEMENTACIÓN

3.7.1 Implementación del nodo sensor IoT en el entorno de cultivo

En la Figura 18 se presenta la implementación real del nodo sensor IoT utilizado en el sistema propuesto. El nodo integra un microcontrolador ESP32 junto con los sensores de temperatura y humedad, concentración de dióxido de carbono, luminosidad y pH, contenidos en una caja de protección para su operación en el entorno de cultivo. Esta configuración permitió la adquisición continua de datos ambientales y su envío a la infraestructura en la nube para su posterior procesamiento.

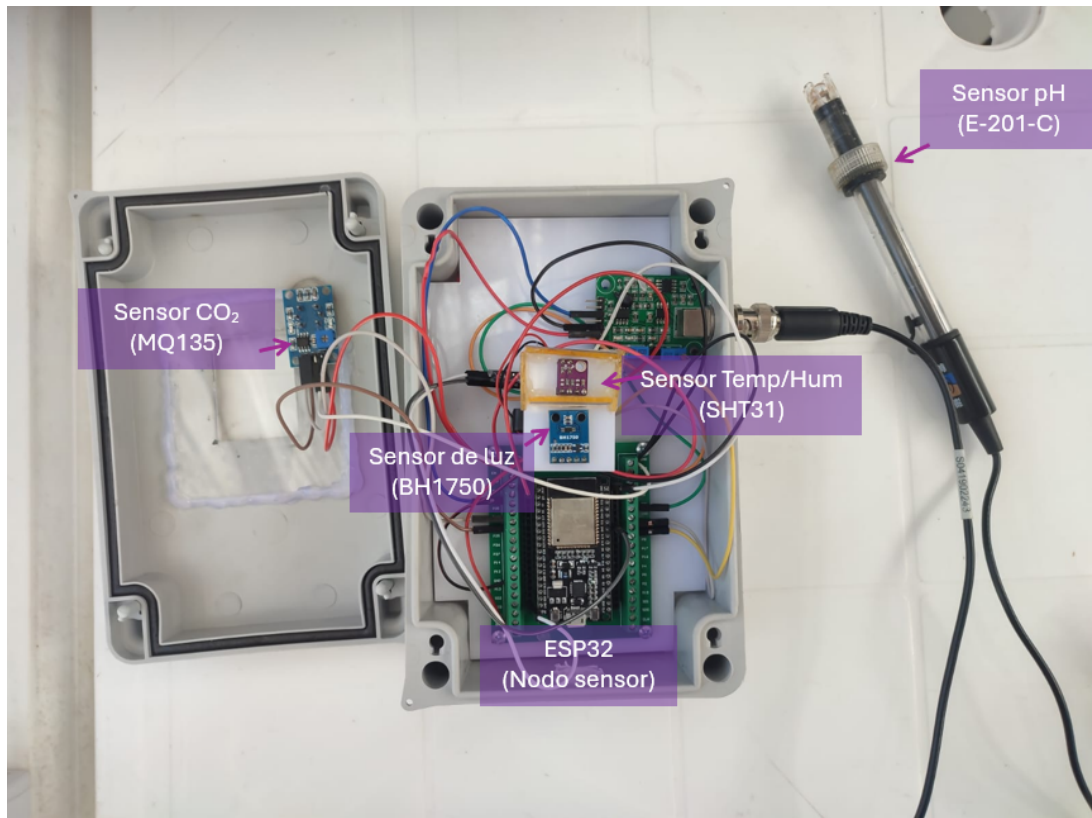


Figura 18. Implementación real del nodo sensor IoT con integración de sensores ambientales.

La Figura 19 muestra la instalación del nodo sensor IoT directamente en el entorno de cultivo, permitiendo la adquisición de datos ambientales en condiciones reales durante la etapa de producción.



Figura 19.

Nodo sensor IoT instalado en el entorno real de cultivo de champiñones.

3.7.2 Acceso a la interfaz web

El sistema de monitoreo y control ambiental implementado cuenta con una interfaz web que permite al usuario final acceder de forma remota a la información recolectada por los nodos sensores instalados en el invernadero. Esta interfaz facilita la visualización en tiempo real de las variables ambientales monitoreadas, así como el análisis de los datos procesados me-

diante los algoritmos implementados en la nube.

La plataforma web fue desarrollada y desplegada utilizando servicios de Google Cloud, lo que garantiza alta disponibilidad, acceso seguro y compatibilidad con distintos dispositivos, tales como computadoras, tabletas y teléfonos móviles, sin requerir la instalación de software adicional.

El acceso a la interfaz web se encuentra disponible mediante el siguiente enlace:

<https://huerto-hongos.web.app/>

A través de esta plataforma, el usuario puede supervisar el comportamiento de las condiciones ambientales del cultivo, identificar variaciones relevantes y recibir alertas cuando los valores registrados se encuentren fuera de los rangos establecidos. La disponibilidad pública de la interfaz constituye una evidencia del correcto funcionamiento del sistema propuesto y permite validar su aplicación en un entorno real de producción de champiñones.

3.7.3 Visualización de variables ambientales

La Figura 20 presenta la interfaz web desarrollada para la visualización de las variables ambientales monitoreadas en el cultivo de champiñones. Esta plataforma permite observar en tiempo real la evolución de los parámetros registrados por el sistema, facilitando el análisis del comportamiento ambiental dentro del invernadero.

En el panel se muestran gráficas individuales correspondientes a temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), pH y luminosidad, organizadas de forma clara e intuitiva. Cada gráfica representa la variación temporal de la variable, permitiendo identificar tendencias, fluctuaciones y posibles condiciones fuera de los rangos óptimos establecidos para el cultivo.

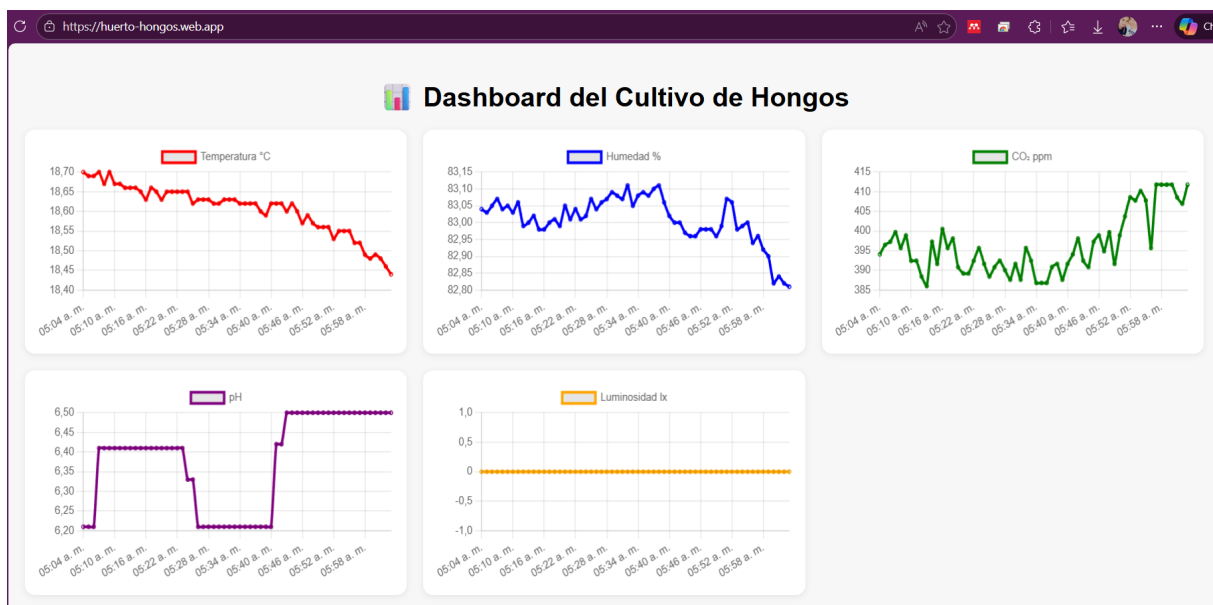
La visualización de estos datos resulta fundamental para la toma de decisiones, ya que pro-

porciona al productor o usuario una herramienta de supervisión continua que permite evaluar el estado ambiental del cultivo sin necesidad de realizar mediciones manuales. Además, la actualización dinámica de la información confirma la correcta comunicación entre los nodos sensores, la base de datos en la nube y la interfaz web.

Esta sección evidencia la correcta implementación del sistema de monitoreo propuesto y demuestra su aplicabilidad práctica en un entorno real, contribuyendo a mejorar el control de las condiciones ambientales y a optimizar el manejo del cultivo de champiñones.

Figura 20.

Página Web



FUENTE: Autoría

3.7.4 Gestión de alertas

La gestión de alertas constituye un componente fundamental del sistema de monitoreo ambiental, ya que permite notificar de manera oportuna a los productores cuando una o más variables ambientales del cultivo de champiñones se encuentran fuera de los rangos óptimos establecidos. Este mecanismo tiene como objetivo principal reducir el tiempo de respuesta ante condiciones adversas y prevenir posibles afectaciones en la productividad del cultivo.

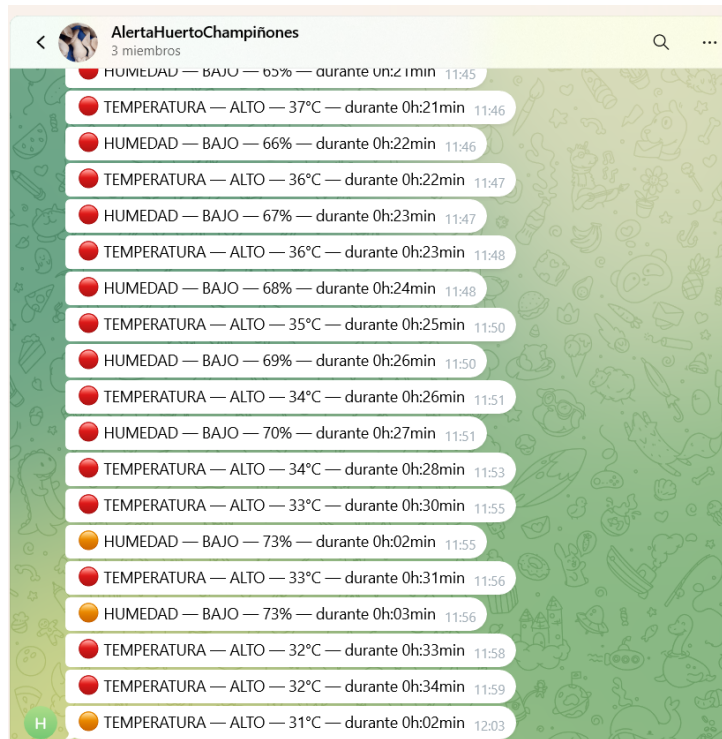
El sistema de alertas se basa en el análisis continuo de los datos almacenados en la base de datos Firebase, los cuales son procesados en la nube mediante los servicios de Google Cloud. A partir de este procesamiento, se evalúan en tiempo real los valores de las variables ambientales, considerando tanto su magnitud como el tiempo de permanencia fuera de los rangos definidos. De esta forma, el sistema es capaz de identificar condiciones anómalas persistentes y clasificarlas según su nivel de criticidad.

Cuando una variable supera los límites permitidos durante un intervalo de tiempo determinado, el sistema genera automáticamente una notificación de alerta que es enviada a través de la plataforma Telegram, mediante un bot previamente configurado. Como se observa en la Figura 21, las alertas incluyen información relevante como la variable afectada (temperatura o humedad), el estado de la condición (alto o bajo), el valor medido, así como el tiempo acumulado durante el cual la variable ha permanecido fuera del rango permitido. Esta información permite al usuario identificar con claridad la severidad y persistencia del evento.

La implementación de Telegram como canal de notificación garantiza que las alertas sean recibidas en tiempo real desde cualquier dispositivo móvil con acceso a Internet, ofreciendo una solución accesible, de bajo costo y alta confiabilidad. De este modo, el sistema no se limita únicamente a la visualización pasiva de datos, sino que incorpora un mecanismo activo de supervisión continua y apoyo a la toma de decisiones, fortaleciendo la gestión eficiente del cultivo de champiñones.

Figura 21.

Mensajes de alertas mediante telegram



FUENTE: Autoría

La Tabla 30 presenta la clasificación de los niveles de alerta utilizados en el sistema de monitoreo ambiental del cultivo de champiñones. Esta clasificación permite identificar de manera clara el estado de las variables monitoreadas y facilita la toma de decisiones oportunas mediante notificaciones automáticas enviadas al usuario.

Tabla 30.

Niveles de alerta del sistema de monitoreo ambiental

Nivel de alerta	Condición detectada	Acción del sistema
Normal	La variable ambiental se mantiene dentro del rango óptimo definido para el cultivo de champiñones.	Registro continuo de datos en la base de datos sin generación de alertas.
Advertencia	La variable se encuentra fuera del rango óptimo de manera leve o durante un período corto de tiempo.	Envío de notificación informativa mediante Telegram, indicando la variable afectada, su valor actual y la tendencia observada.
Crítica	La variable permanece fuera del rango óptimo por un tiempo prolongado o alcanza valores que pueden afectar el desarrollo del cultivo.	Envío inmediato de alerta crítica mediante Telegram, resaltando la urgencia de intervención y el tiempo acumulado fuera de rango.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo presenta las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos durante la operación del sistema de monitoreo y control automatizado de condiciones ambientales aplicado al cultivo de champiñones. En esta sección se evalúa el funcionamiento del sistema en condiciones reales, el comportamiento semanal de las variables ambientales y su relación con la producción del cultivo, con énfasis en la identificación y reducción del porcentaje de pérdidas. Asimismo, se analizan los registros históricos, la producción semanal obtenida y la efectividad del sistema de alertas, con el fin de determinar el impacto del sistema en la mejora del proceso productivo.

4.1 Descripción del escenario de pruebas

Las pruebas del sistema se realizaron en un entorno real de cultivo de champiñones ubicado en el sector de San Juan de Ilumán, bajo condiciones normales de operación del invernadero. El periodo de evaluación comprendió varias semanas consecutivas, durante las cuales el sistema de monitoreo se mantuvo en funcionamiento continuo, registrando las variables ambientales de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono, luminosidad y potencial de hidrógeno. Los datos obtenidos fueron almacenados y procesados en la plataforma en la nube, permitiendo su análisis semanal y su posterior visualización a través de la interfaz web. Este escenario de pruebas permitió evaluar el comportamiento del sistema frente a variaciones reales del entorno y analizar su impacto en el desarrollo del cultivo y en la reducción de pérdidas durante el periodo de estudio.

4.2 Pruebas de funcionamiento del sistema

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del sistema, se realizaron pruebas orientadas a validar la recepción, procesamiento y publicación de los datos ambientales, así como la generación de alertas ante condiciones fuera de los rangos establecidos. Durante estas pruebas se comprobó que los datos enviados por el nodo sensor fueron almacenados correctamente en la base de datos en la nube, incluyendo la marca temporal de recepción y los valores procesados de cada variable ambiental. Adicionalmente, se verificó la identificación de variables en estado de alerta y la notificación automática al usuario mediante la aplicación de mensajería Telegram, confirmando la operatividad integral del sistema en condiciones reales.

Como se observa en la Figura 22, el sistema registra correctamente los datos ambientales procesados en la base de datos en la nube, incluyendo la marca temporal de recepción y el conteo de alertas generadas. Asimismo, en la Figura 23 se evidencia la identificación del estado de las variables ambientales, destacándose la variable temperatura en condición de alerta. Finalmente, la Figura 24 muestra la notificación enviada automáticamente al usuario a través de la aplicación Telegram, confirmando que el sistema no solo detecta condiciones fuera de rango, sino que también comunica oportunamente dicha información, validando así el correcto funcionamiento integral del sistema.

Figura 22.

Registro de datos ambientales procesados en la base de datos, incluyendo marca temporal y conteo de alertas generadas

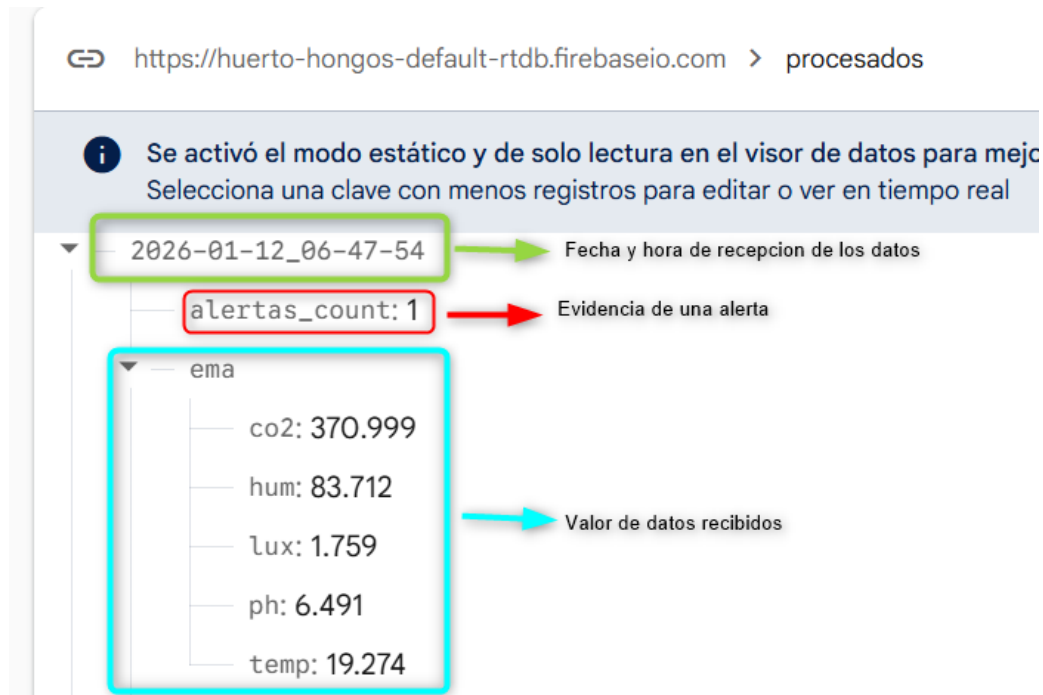


Figura 23.

Identificación del estado de las variables ambientales, destacando la variable temperatura en condición de alerta

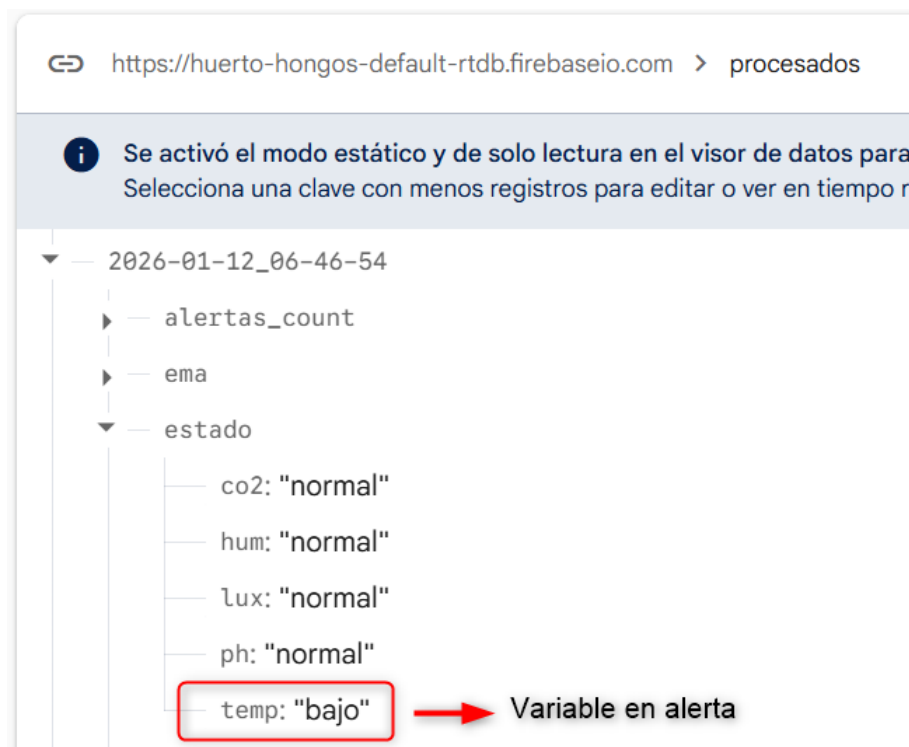


Figura 24.

Notificación de alerta enviada al usuario mediante Telegram ante una condición crítica de temperatura



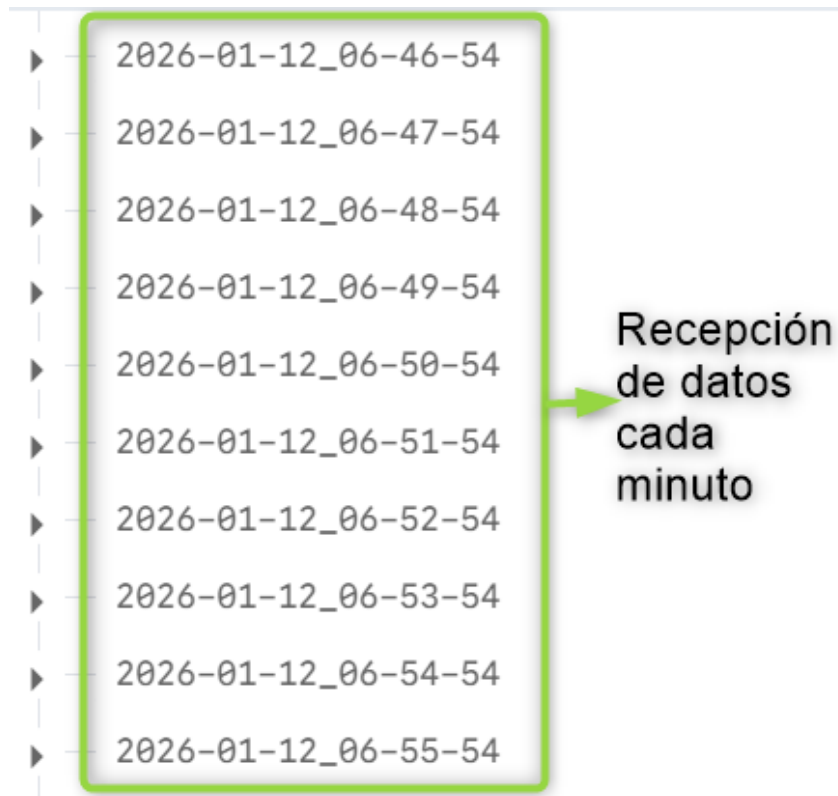
4.2.1 Prueba de continuidad en la adquisición de datos

La prueba de continuidad en la adquisición de datos se realizó con el objetivo de verificar que el sistema mantenga un registro constante y periódico de las variables ambientales durante su operación continua.

Como se observa en la Figura 25, los datos fueron recibidos y almacenados en la base de datos a intervalos regulares de un minuto, identificados mediante marcas temporales consecutivas. Este comportamiento evidencia que el sistema no presenta interrupciones significativas en la adquisición de información, garantizando un monitoreo continuo y confiable de las condiciones ambientales del cultivo de champiñones.

Figura 25.

Registro continuo de datos ambientales almacenados en la base de datos, evidenciando la recepción de información a intervalos regulares de un minuto



4.2.2 Prueba de almacenamiento y procesamiento en la nube

En este apartado se describe la prueba de almacenamiento y procesamiento en la nube, cuyo objetivo es verificar que los datos adquiridos desde el nodo sensor sean correctamente analizados mediante la lógica difusa implementada y posteriormente almacenados en la base de datos. Para ello, se presenta primero la definición de las reglas difusas y funciones de pertenencia utilizadas en el procesamiento de la información, y a continuación se evidencia el almacenamiento de los datos ya procesados, incluyendo estados, niveles de gravedad, tendencias y conteo de alertas.

Como se observa en la Figura 26, el sistema implementa un conjunto de reglas difusas globales que permiten evaluar el estado del cultivo a partir de la combinación de las variables ambientales, complementadas con funciones de pertenencia asociadas a cada variable inde-

pendiente. Estas reglas constituyen la base lógica del procesamiento de los datos en la nube.

Figura 26.

Definición de las reglas difusas globales del cultivo y funciones auxiliares utilizadas para la evaluación de las variables ambientales

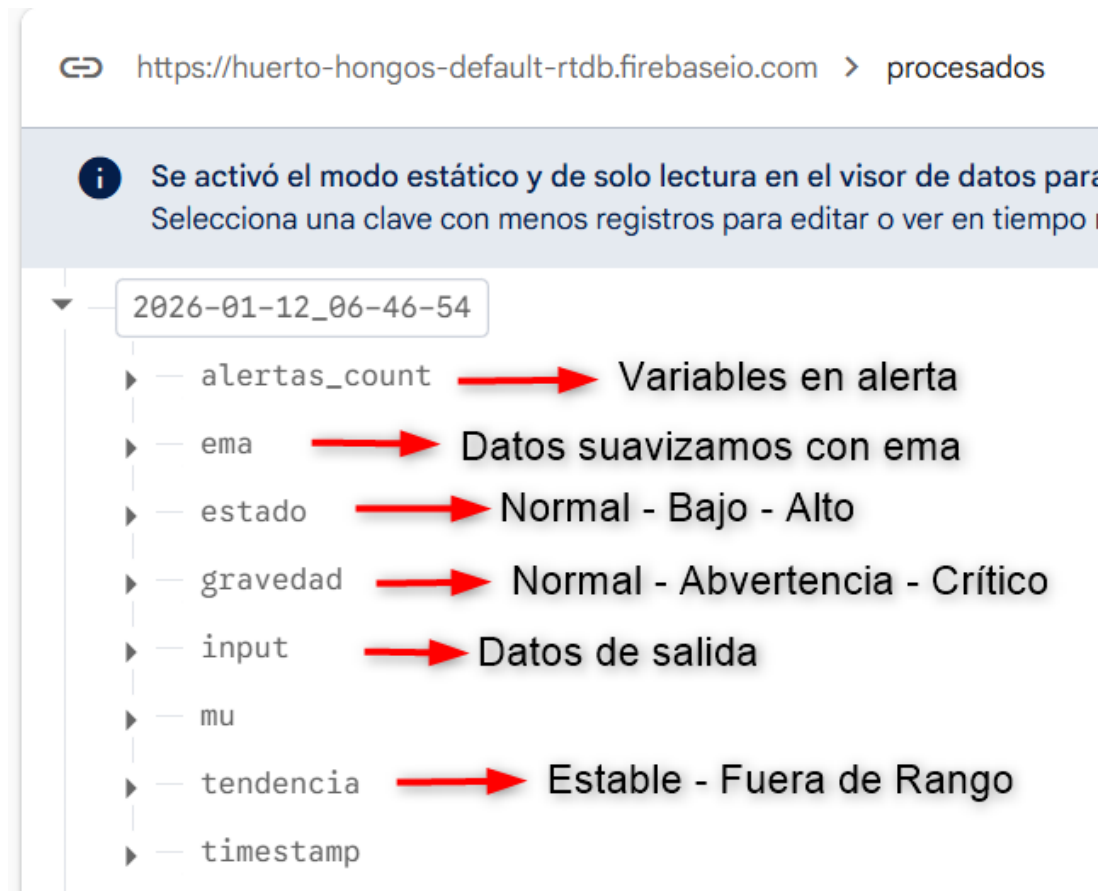


```
estructura_inicial.j index.js package.json .env.txt index.html firebase.json #include Wi +
Archivo Editar Ver
/* ----- REGLAS DIFUSAS GLOBALES (ESTADO DEL CULTIVO)----- */
const REGLAS_CULTIVO = [
  { id: "R1", temp: "bajo", hum: "bajo", co2: "bajo", ph: "acido", lux: "alto", estado: "critico" },
  { id: "R2", temp: "bajo", hum: "medio", co2: "medio", ph: "acido", lux: "medio", estado: "deficiente" },
  { id: "R3", temp: "medio", hum: "alto", co2: "medio", ph: "optimo", lux: "bajo", estado: "optimo" },
  { id: "R4", temp: "medio", hum: "alto", co2: "alto", ph: "optimo", lux: "medio", estado: "aceptable" },
  { id: "R5", temp: "alto", hum: "medio", co2: "alto", ph: "basico", lux: "alto", estado: "deficiente" },
  { id: "R6", temp: "medio", hum: "medio", co2: "medio", ph: "optimo", lux: "bajo", estado: "optimo" },
  { id: "R7", temp: "alto", hum: "bajo", co2: "alto", ph: "basico", lux: "alto", estado: "critico" },
  { id: "R8", temp: "bajo", hum: "alto", co2: "bajo", ph: "optimo", lux: "medio", estado: "aceptable" },
  { id: "R9", temp: "medio", hum: "medio", co2: "alto", ph: "acido", lux: "alto", estado: "deficiente" },
];
/* ----- FUNCIONES AUXILIARES DIFUSAS (variables independientes) ----- */
function muBajo(v, { min, tol }) {
  if (v >= min) return 0;
  if (v <= min - tol) return 1;
  return (min - v) / tol;
}
function muAlto(v, { max, tol }) {
  if (v <= max) return 0;
  if (v >= max + tol) return 1;
  return (v - max) / tol;
}
Reglas difusas de acuerdo a los parametros de las variables independientes
```

En la Figura 27 se evidencia el almacenamiento de los datos una vez procesados en la nube, donde se incluyen los valores de entrada, los datos suavizados mediante el método EMA, el estado y nivel de gravedad de cada variable, la tendencia de comportamiento y el conteo de alertas generadas. Esto confirma que el sistema no almacena información cruda, sino datos previamente analizados.

Figura 27.

Estructura de almacenamiento de los datos procesados en la base de datos en la nube



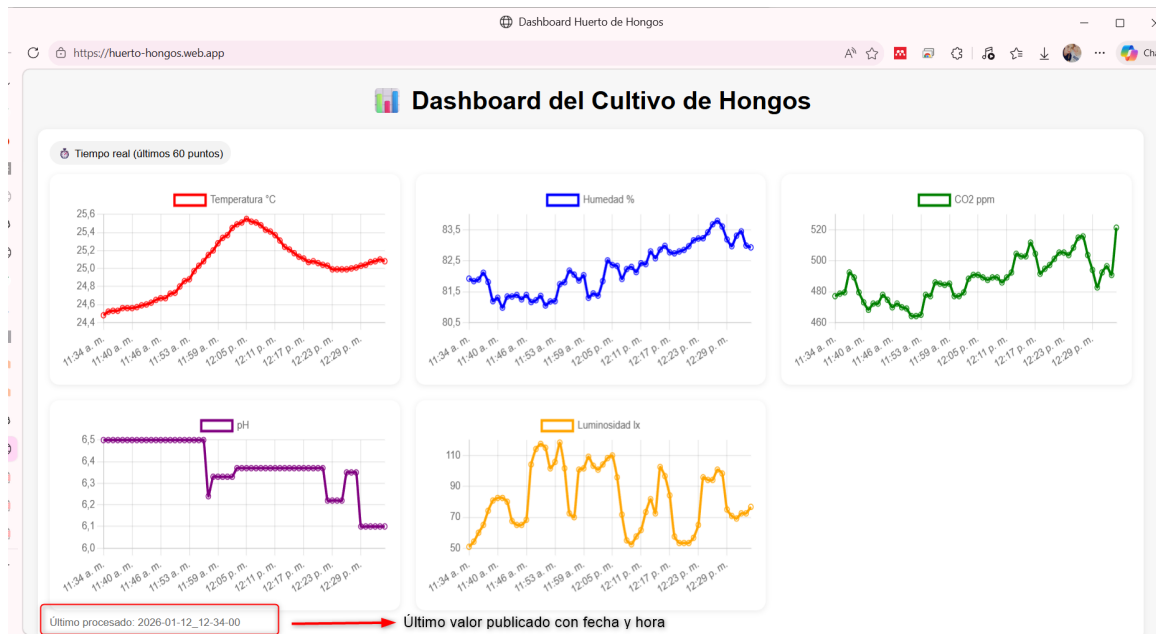
4.2.3 Prueba de visualización y actualización de datos en la interfaz web

En esta prueba se verifica el correcto funcionamiento de la interfaz web desarrollada para el monitoreo del cultivo de hongos, comprobando que los datos procesados en la nube sean visualizados de manera clara y que se actualicen automáticamente conforme se reciben nuevas lecturas desde el sistema. La interfaz permite al usuario supervisar en tiempo casi real el comportamiento de las variables ambientales y conocer la fecha y hora del último dato procesado.

Como se observa en la Figura 28, la interfaz web presenta gráficas dinámicas de las variables ambientales del cultivo, tales como temperatura, humedad, concentración de CO₂, pH y luminosidad, correspondientes a los últimos registros procesados. Asimismo, se visualiza el último valor publicado junto con su fecha y hora, lo que confirma que la información mostrada se actualiza automáticamente a partir de los datos almacenados en la nube.

Figura 28.

Interfaz web del sistema de monitoreo mostrando la visualización y actualización de las variables ambientales en tiempo casi real



4.3 Análisis semana a semana del comportamiento ambiental del cultivo

4.3.1 Semana 1: condiciones iniciales y comportamiento del sistema

Durante la Semana 1 se realizó el análisis del comportamiento ambiental inicial del cultivo de hongos, considerando de manera conjunta las variables de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), luminosidad y potencial de hidrógeno (pH). El análisis se basa en los promedios diarios obtenidos a partir de los datos procesados por el sistema, permitiendo evaluar las condiciones ambientales predominantes durante el inicio de la operación y establecer una línea base para las semanas posteriores.

Como se observa en la Figura 29, los promedios diarios y el promedio general de la semana evidencian variaciones considerables en las condiciones ambientales durante el período analizado. De manera complementaria, la Figura 30 permite visualizar de forma gráfica el comportamiento diario de cada variable, destacando fluctuaciones que reflejan una etapa inicial de operación con condiciones aún inestables para el cultivo.

Figura 29.

Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 1



Figura 30.

Gráficas de los promedios diarios de las variables ambientales durante la Semana 1



Gráfica de promedios de la Semana 1

Durante la Semana 1, la producción total del cultivo de champiñones fue de **413 kg**. Este valor corresponde al registro de cosecha proporcionado por el responsable del cultivo y se utiliza como referencia inicial para el análisis del impacto de las condiciones ambientales monitoreadas sobre el rendimiento productivo.

4.3.2 Semana 2: ajustes del sistema y respuesta del cultivo

Durante la Semana 2 se analizó el comportamiento ambiental del cultivo correspondiente al período comprendido entre el 8 y el 14 de diciembre de 2025, considerando de manera

conjunta las variables de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), luminosidad y potencial de hidrógeno (pH). Este análisis permite evaluar la respuesta del sistema luego de los ajustes realizados en el monitoreo y control ambiental, comparando su comportamiento con respecto a la semana inicial.

Como se observa en la Figura 31, los promedios diarios y el promedio general de la semana evidencian una mayor estabilidad en las condiciones ambientales en comparación con la semana inicial, especialmente en la temperatura y la humedad relativa. De forma complementaria, la Figura 32 permite visualizar un comportamiento más uniforme de las variables a lo largo de los días, lo que refleja una respuesta positiva del sistema ante los ajustes realizados en el monitoreo y control ambiental.

Figura 31.

Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 2

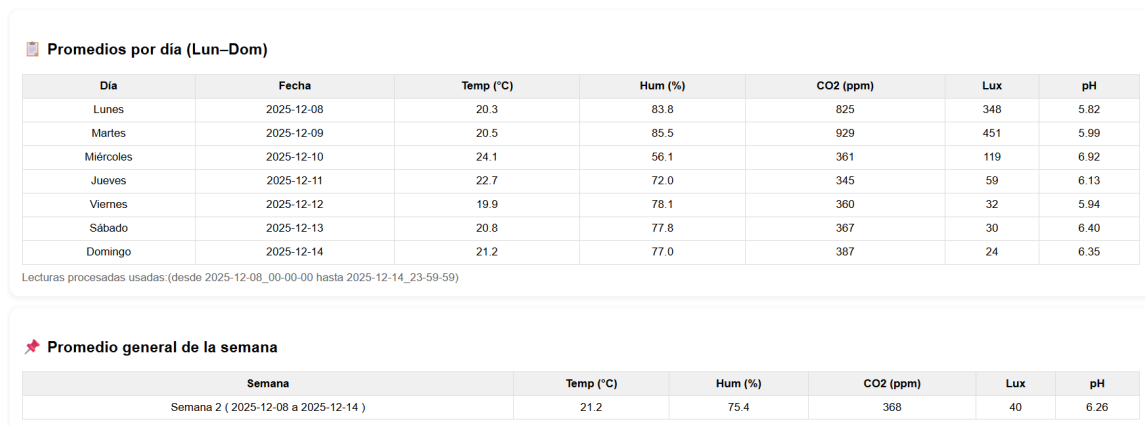
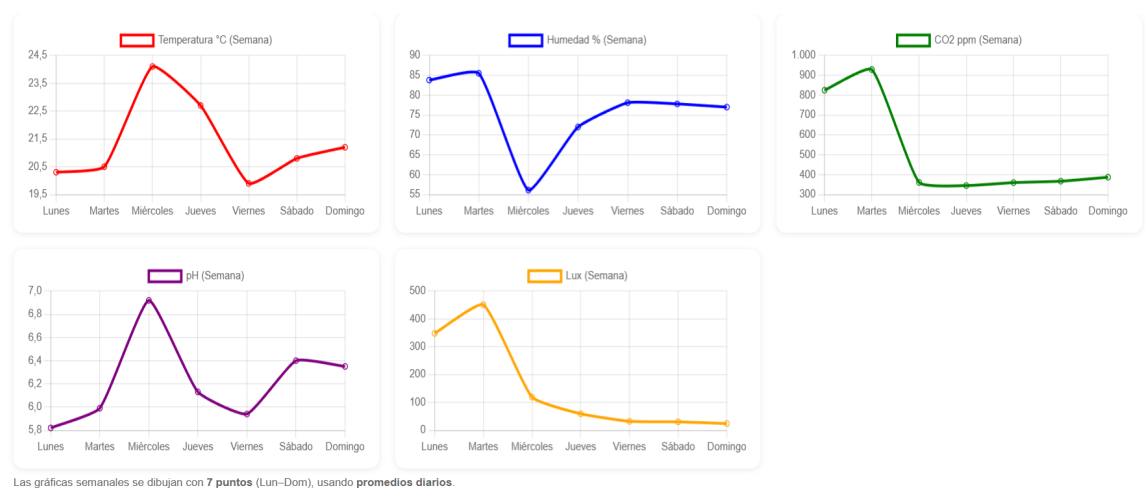


Figura 32.

Gráficas de los promedios diarios de las variables ambientales durante la Semana 2



Durante la Semana 2, la producción total del cultivo de champiñones alcanzó un valor de **464 kg**. Este incremento respecto a la semana anterior permite evidenciar una mejora progresiva en el rendimiento del cultivo, asociada a los ajustes ambientales implementados y al funcionamiento continuo del sistema de monitoreo y control.

4.3.3 Semana 3: estabilidad ambiental y mejora en las condiciones del cultivo

En esta subsección se presenta el análisis del comportamiento ambiental del cultivo de champiñones correspondiente a la Semana 3, en la cual se observa una mayor estabilidad en las variables monitoreadas como resultado del funcionamiento continuo del sistema de monitoreo y control. A partir de los promedios diarios y del promedio general semanal, se evalúa la consistencia de las condiciones ambientales, así como su influencia en el mantenimiento de un entorno adecuado para el desarrollo del cultivo.

En la Figura 33 se presentan los valores promedio diarios y el promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 3, lo cual permite verificar la estabilidad alcanzada en las condiciones del cultivo. Por su parte, la Figura 34 muestra la evolución semanal de cada variable, evidenciando variaciones controladas y un comportamiento ambiental adecuado para el desarrollo del cultivo de champiñones.

Figura 33.

Promedios diarios de las variables ambientales y promedio general correspondiente a la Semana 3 del cultivo de champiñones

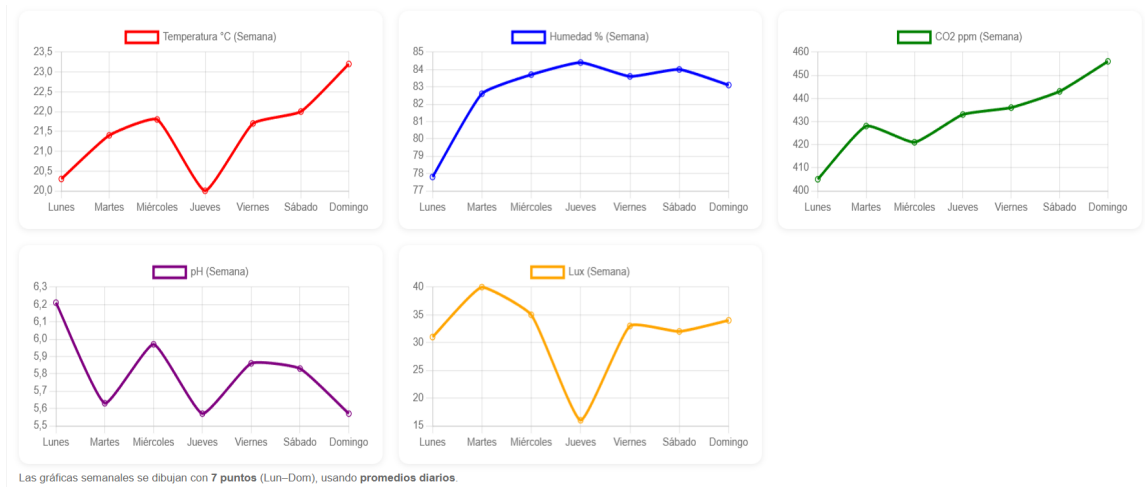
Promedios por día (Lun-Dom)						
Día	Fecha	Temp (°C)	Hum (%)	CO2 (ppm)	Lux	pH
Lunes	2025-12-15	20.3	77.8	405	31	6.21
Martes	2025-12-16	21.4	82.6	428	40	5.63
Miércoles	2025-12-17	21.8	83.7	421	35	5.97
Jueves	2025-12-18	20.0	84.4	433	16	5.57
Viernes	2025-12-19	21.7	83.6	436	33	5.86
Sábado	2025-12-20	22.0	84.0	443	32	5.83
Domingo	2025-12-21	23.2	83.1	456	34	5.57

Lecturas procesadas usadas: (desde 2025-12-15_00-00-00 hasta 2025-12-21_23-59-59)

Promedio general de la semana					
Semana	Temp (°C)	Hum (%)	CO2 (ppm)	Lux	pH
Semana 3 (2025-12-15 a 2025-12-21)	21.5	82.8	431	32	5.81

Figura 34.

Representación gráfica de los promedios diarios de temperatura, humedad, concentración de CO₂, luminosidad y pH durante la Semana 3



Durante la Semana 3, se registró una producción total de **750 kg** de champiñones. Este aumento significativo refleja una respuesta favorable del cultivo ante la mayor estabilidad de las variables ambientales, destacando el impacto positivo del sistema automatizado sobre el desarrollo productivo.

4.3.4 Semana 4: consolidación parcial del control ambiental

Durante la Semana 4, el sistema de monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones evidencia una consolidación parcial en la regulación de las variables ambientales, reflejando una mayor estabilidad en comparación con las semanas iniciales. En este periodo, los ajustes aplicados previamente permiten que las variables monitoreadas —temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), luminosidad y pH— se mantengan mayoritariamente dentro de rangos aceptables para el desarrollo del cultivo.

El análisis se realiza a partir de los promedios diarios y del promedio general semanal, los cuales permiten evaluar el comportamiento conjunto del sistema. Adicionalmente, las gráficas semanales facilitan la identificación de tendencias y posibles variaciones residuales, confirmando que el sistema se encuentra en una fase de transición hacia un funcionamiento más estable y confiable.

Las Figuras 35 y 36 muestran el comportamiento ambiental del cultivo durante la Semana 4, evidenciando una reducción progresiva de las variaciones extremas y una mayor estabilidad de las variables monitoreadas. Estos resultados indican que el sistema se encuentra en una etapa de consolidación parcial del control ambiental, lo cual contribuye a mejorar las condiciones del cultivo y a disminuir el riesgo de pérdidas productivas.

Figura 35.

Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 4 del cultivo de champiñones

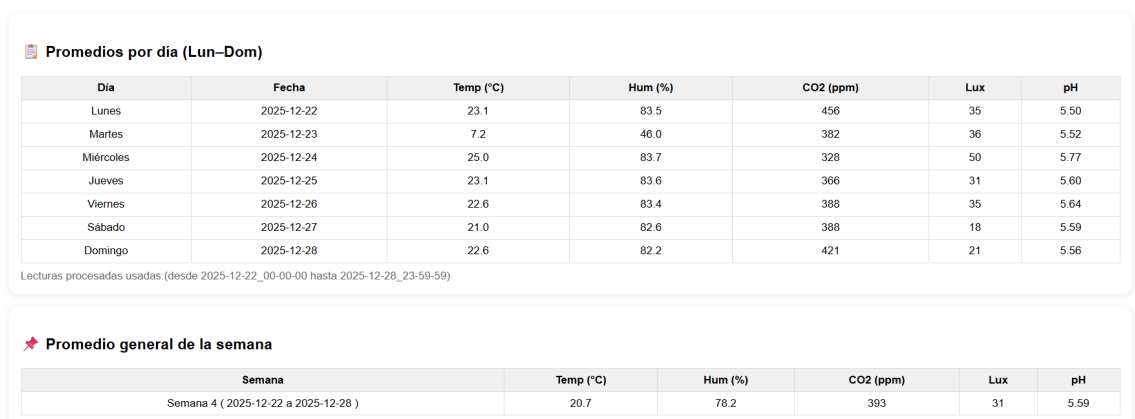


Figura 36.

Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 4



En la Semana 4, la producción total del cultivo de champiñones fue de **834 kg**. Este valor evidencia la consolidación del sistema de monitoreo y control ambiental, así como una mejora sostenida en el rendimiento del cultivo, asociada a la reducción de condiciones críticas y a la estabilidad alcanzada en las variables monitoreadas.

4.3.5 Semana 5: comportamiento consolidado del sistema

Durante la Semana 5, correspondiente al período comprendido entre el 29 de diciembre de 2025 y el 04 de enero de 2026, se evidencia un comportamiento ambiental altamente estable del cultivo de champiñones. En esta etapa, el sistema de monitoreo y control se encuentra plenamente operativo, mostrando una adecuada regulación de las variables ambientales y una disminución significativa de fluctuaciones abruptas respecto a semanas iniciales.

Los promedios diarios y el promedio general semanal reflejan que la temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), luminosidad y pH se mantienen dentro de rangos aceptables para el desarrollo del cultivo. Asimismo, las gráficas semanales permiten visualizar una tendencia uniforme y controlada, lo cual confirma la efectividad del procesamiento de datos en la nube y la correcta operación del sistema automatizado durante esta fase consolidada.

Las Figuras 37 y 38 evidencian la estabilidad alcanzada por el sistema durante la Semana 5, destacando la coherencia entre los promedios diarios, el promedio general semanal y las tendencias observadas en las representaciones gráficas. Estos resultados confirman que el sistema se encuentra en una etapa de funcionamiento consolidado, contribuyendo a la reducción de condiciones críticas y al mantenimiento de un entorno adecuado para la producción del cultivo de champiñones.

Figura 37.

Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 5 del cultivo de champiñones

Promedios por día (Lun-Dom)						
Día	Fecha	Temp (°C)	Hum (%)	CO2 (ppm)	Lux	pH
Lunes	2025-12-29	21.9	81.0	443	27	5.60
Martes	2025-12-30	22.3	81.3	450	31	5.57
Miércoles	2025-12-31	22.4	81.6	461	19	5.57
Jueves	2026-01-01	22.3	81.8	457	21	5.71
Viernes	2026-01-02	22.3	81.8	453	20	5.74
Sábado	2026-01-03	21.6	81.9	425	26	5.59
Domingo	2026-01-04	22.6	82.0	467	26	5.72

Lecturas procesadas usadas (desde 2025-12-29_00-00-00 hasta 2026-01-04_23-59-59)

Promedio general de la semana					
Semana	Temp (°C)	Hum (%)	CO2 (ppm)	Lux	pH
Semana 5 (2025-12-29 a 2026-01-04)	22.2	81.6	450	24	5.64

Figura 38.

Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 5



Durante la Semana 5, la producción total del cultivo de champiñones fue de **610 kg**. Este valor corresponde al registro de cosecha proporcionado por el responsable del cultivo y refleja un rendimiento estable, coherente con la etapa de consolidación del sistema de monitoreo y control ambiental alcanzada durante este periodo.

4.3.6 Semana 6: estado estable del sistema automatizado

Durante la Semana 6, el sistema de monitoreo y control ambiental del cultivo de champiñones alcanza un estado de estabilidad operativa, evidenciando la madurez del funcionamiento del sistema automatizado. En este periodo, las variables ambientales monitoreadas presentan variaciones mínimas y controladas, manteniéndose de forma consistente dentro de los rangos definidos como adecuados para el desarrollo óptimo del cultivo.

El análisis de los promedios diarios y del promedio general semanal permite comprobar que el sistema responde de manera eficiente a las condiciones del entorno, reduciendo significativamente la ocurrencia de estados críticos y la generación de alertas prolongadas. Asimismo, las representaciones gráficas semanales reflejan tendencias estables, confirmando que el procesamiento de datos en la nube y la lógica aplicada contribuyen a un control ambiental confiable y continuo.

Las Figuras 39 y 40 evidencian la estabilidad alcanzada por el sistema durante la Semana 6, mostrando coherencia entre los promedios diarios, el promedio general semanal y las tendencias observadas en las gráficas. Estos resultados confirman que el sistema se encuentra en una fase de madurez operativa, contribuyendo de manera efectiva al mantenimiento de condiciones ambientales adecuadas y a la reducción del riesgo de pérdidas en el cultivo de champiñones.

Figura 39.

Promedios diarios y promedio general de las variables ambientales correspondientes a la Semana 6 del cultivo de champiñones

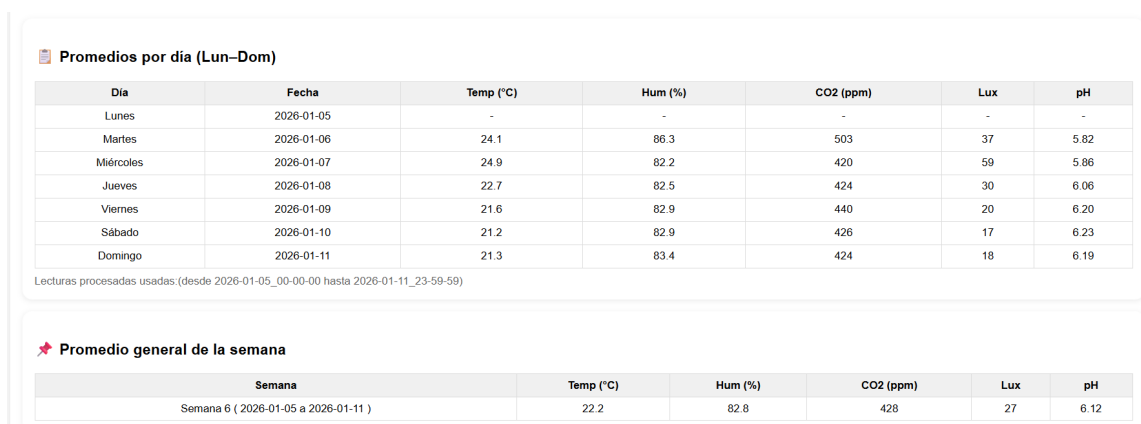
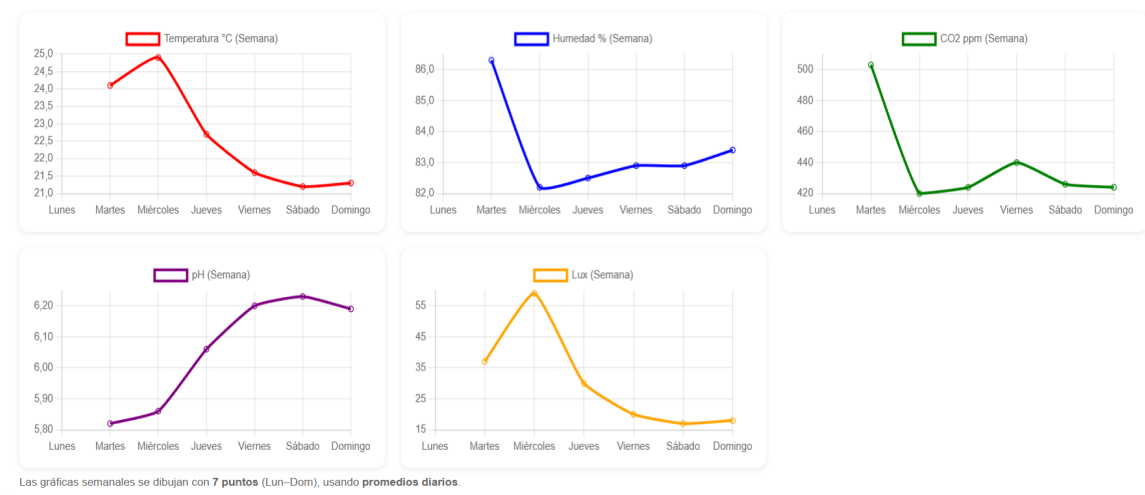


Figura 40.

Comportamiento semanal de las variables ambientales del cultivo de champiñones durante la Semana 6



En la Semana 6, la producción total del cultivo de champiñones alcanzó un valor de **740 kg**. Este incremento evidencia una mejora en el rendimiento productivo, asociada a la estabilidad operativa del sistema y al mantenimiento de condiciones ambientales adecuadas para el

desarrollo del cultivo.

4.4 Comparación de las condiciones ambientales y la producción semanal

La Tabla 31 presenta la comparación semana a semana de las condiciones ambientales promedio y la producción del cultivo de champiñones. Se observa un incremento significativo de la producción a partir de la tercera semana, asociado a una mayor estabilidad en las variables ambientales, particularmente en la humedad relativa, el pH y la concentración de dióxido de carbono. En la sexta semana, se evidencia una consolidación del sistema, manteniendo condiciones ambientales estables y una producción elevada, lo que confirma la efectividad del sistema automatizado de monitoreo y control implementado.

Tabla 31.

Comparación semanal de las condiciones ambientales promedio y la producción del cultivo de champiñones

Semana	Temp. (°C)	Hum. (%)	CO₂ (ppm)	Lux (lx)	pH	Producción (kg)
Semana 1	20.8	65.6	794	115	4.43	41,3
Semana 2	21.2	75.4	368	40	6.26	46,4
Semana 3	21.5	82.8	431	32	5.81	75,0
Semana 4	20.7	78.2	393	31	5.59	83,4
Semana 5	22.2	81.6	450	24	5.64	61,0
Semana 6	22.2	82.8	428	27	6.12	74,0

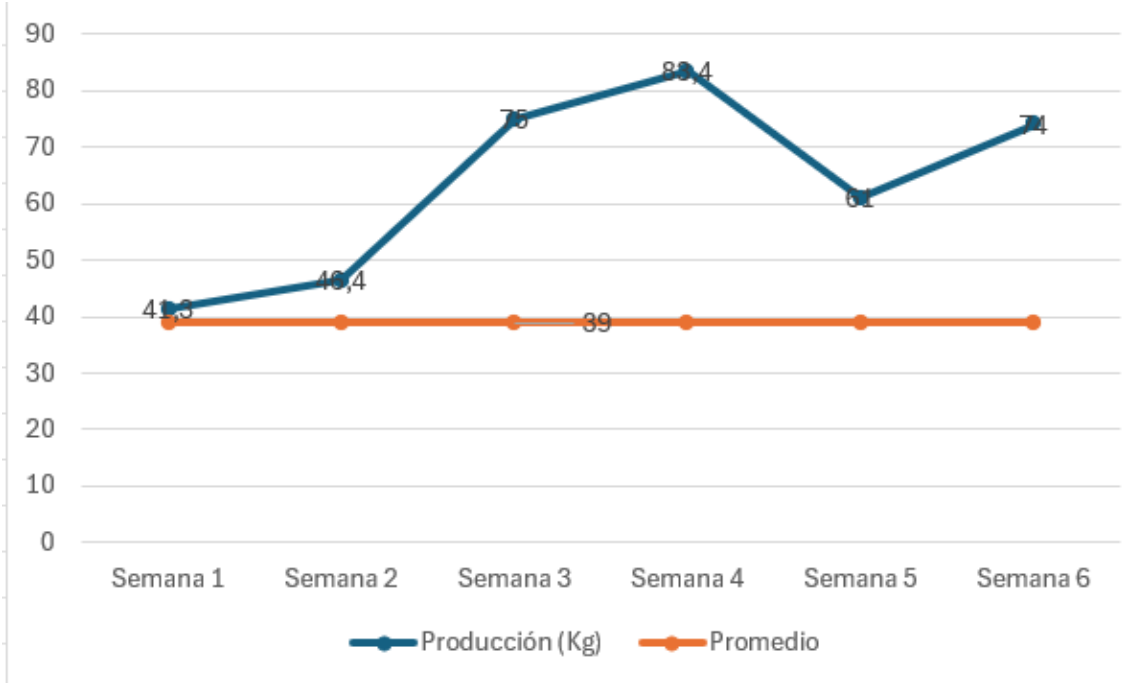
La Figura 41 muestra la evolución de la producción semanal de champiñones, expresada en kilogramos, durante un periodo de seis semanas, junto con el valor promedio de producción obtenido en dicho intervalo. Como se observa, la producción presenta una tendencia general al alza desde la semana 1 hasta la semana 4, alcanzando su valor máximo en esta última, lo que evidencia una mejora progresiva en las condiciones del cultivo.

En la semana 5 se registra una disminución notable en la producción, situación que puede atribuirse a variaciones puntuales en una o más condiciones ambientales del invernadero. No

obstante, en la semana 6 se evidencia una recuperación parcial, lo que sugiere que las acciones correctivas aplicadas permitieron restablecer condiciones favorables para el desarrollo del cultivo.

Asimismo, el valor promedio de producción se mantiene constante a lo largo del periodo analizado, sirviendo como referencia para comparar el desempeño semanal. La mayoría de las semanas presentan valores iguales o superiores al promedio, lo cual indica un impacto positivo del sistema de monitoreo y control automatizado en la estabilidad y productividad del cultivo de champiñones.

Figura 41.
Comparación semanal entre variables ambientales promedio y producción del cultivo



4.4.1 Cálculo del porcentaje de reducción de pérdidas

Para evaluar el impacto del sistema automatizado de monitoreo y control ambiental en la reducción de pérdidas productivas del cultivo de champiñones, se realizó una comparación entre la producción obtenida durante las primeras semanas de operación y aquella registrada tras la estabilización del sistema. En este contexto, se considera como *pérdida productiva* la disminución del rendimiento asociada a condiciones ambientales inestables durante la fase

inicial de funcionamiento.

La Semana 1 se toma como referencia inicial, debido a que el sistema aún se encontraba en etapa de ajuste y calibración, presentando variaciones significativas en variables como la humedad relativa, el potencial de hidrógeno (pH) y la concentración de dióxido de carbono (CO₂). Por otro lado, la Semana 6 representa un escenario de operación estabilizada, donde las condiciones ambientales se mantuvieron dentro de los rangos óptimos definidos para el cultivo.

Los valores de producción considerados para el análisis se muestran a continuación:

- Producción en la Semana 1: 41 3 kg
- Producción en la Semana 6: 74 0 kg

El porcentaje de reducción de pérdidas se calculó mediante la Ecuación 4.1:

$$\text{Reducción de pérdidas (\%)} = \frac{P_{\text{final}} - P_{\text{inicial}}}{P_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (4.1)$$

donde P_{final} corresponde a la producción obtenida en la etapa de operación estabilizada del sistema y P_{inicial} representa la producción registrada durante la fase inicial.

Sustituyendo los valores obtenidos experimentalmente, se tiene:

$$\text{Reducción de pérdidas (\%)} = \frac{740 - 413}{413} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\text{Reducción de pérdidas (\%)} \approx 78,97\% \quad (4.3)$$

Este resultado evidencia que la implementación del sistema automatizado permitió redu-

cir las pérdidas productivas en aproximadamente un 79 %, lo cual se atribuye principalmente a la estabilización progresiva de las variables ambientales críticas del cultivo. Dicho porcentaje confirma la efectividad del sistema propuesto para mejorar el rendimiento y la eficiencia productiva del cultivo de champiñones.

4.5 Evaluación del sistema de alertas

La Figura 42 muestra el funcionamiento del sistema de alertas ante la persistencia de una variable ambiental fuera de los rangos establecidos. En este caso, la temperatura se mantuvo por debajo del umbral mínimo durante un periodo continuo de dos horas, lo que activó la primera alerta enviada al usuario a través de la plataforma Telegram.

Figura 42.

Ejemplo de alerta generada por el sistema ante una condición ambiental fuera de rango



Posteriormente, mientras la condición fuera de rango persistió y no se produjo una corrección en la variable, el sistema continuó enviando notificaciones de seguimiento con un intervalo de 20 minutos entre cada mensaje. Este mecanismo permitió mantener informado al usuario sobre la duración de la anomalía, evitando alertas prematuras y proporcionando un balance adecuado entre notificación oportuna y reducción de saturación de mensajes.

4.5.1 Consideraciones observadas durante la fase de pruebas

Durante la fase de validación del sistema, se identificaron ciertos aspectos que podrían afectar temporalmente su operatividad en escenarios reales. En primer lugar, se constató que el correcto funcionamiento del sistema depende en gran medida de una conexión estable a In-

ternet, ya que tanto la transmisión de datos desde el nodo sensor como su procesamiento y visualización se realizan mediante servicios en la nube. En zonas con conectividad intermitente, esto podría generar retrasos momentáneos en la actualización de la información.

Asimismo, se observó que la continuidad del monitoreo se ve influenciada por la disponibilidad de energía eléctrica. En los casos en que se produjeron cortes de energía, los dispositivos dejaron de operar y el flujo de datos se interrumpió hasta el restablecimiento del suministro. Aunque el sistema está configurado para emitir alertas por inactividad (tipo **heartbeat**), se considera recomendable implementar mecanismos de respaldo energético en futuras versiones.

Finalmente, cabe señalar que el registro de la producción semanal se realiza de forma manual por parte del productor, lo cual podría introducir un margen de error humano. Además, las pruebas se desarrollaron durante un periodo de tiempo específico, por lo que los resultados obtenidos reflejan únicamente las condiciones observadas en dicho intervalo, sin contemplar posibles variaciones climáticas o biológicas de largo plazo.

4.6 Costos del Sistema

Los costos asociados a la implementación del sistema inteligente de monitoreo ambiental para el cultivo de champiñones se desglosan considerando los rubros de hardware, software e infraestructura, permitiendo así evaluar la inversión total requerida para su funcionamiento y escalabilidad.

4.6.1 Costo de Hardware

La Tabla 32 muestra el desglose de los componentes físicos utilizados en el nodo sensor, junto con su cantidad y precio unitario estimado en dólares estadounidenses.

Tabla 32.

Costos de Hardware

Hardware	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Total (USD)
ESP32-WROOM	1	12.00	12.00
Sensor de pH (E-201-C)	1	60.00	60.00
Sensor MQ135 (CO ₂)	1	5.00	5.00
Sensor SHT31 (Temp/Hum)	1	11.00	11.00
Sensor BH1750 (Luminosidad)	1	9.00	9.00
Total Hardware			97.00

4.6.2 Costo de Software

En la Tabla 33 se presentan los costos anuales estimados de los servicios en la nube utilizados para el almacenamiento de datos y visualización web.

Tabla 33.

Costos de Software

Software	Cantidad	Precio Anual (USD)	Total (USD)
Firebase Realtime Database	1	60.00	60.00
Google Cloud Platform	1	60.00	60.00
Total Software			120.00

4.6.3 Costo de Infraestructura

La Tabla 34 incluye los costos relacionados con las carcasas protectoras para los nodos físicos.

Tabla 34.

Costos de Infraestructura

Infraestructura	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Total (USD)
Carcasa protectora con acrílico	1	35.00	35.00
Total Infraestructura			35.00

4.6.4 Costo Total del Sistema

A continuación se presenta el resumen de todos los costos involucrados, permitiendo visualizar la inversión total estimada del sistema completo:

Tabla 35.

Costo Total del Sistema

Categoría	Subtotal (USD)
Hardware	97.00
Software	120.00
Infraestructura	35.00
Total General	252.00

El costo total del sistema es de aproximadamente \$252.00. Este valor puede variar si se amplía el número de nodos, sensores o se requieren planes superiores en los servicios de nube. Aun así, se considera una solución rentable y escalable para pequeños productores agrícolas que buscan optimizar sus cultivos mediante tecnologías accesibles e inteligentes.

4.6.5 Análisis Costo–Beneficio

La implementación del sistema permitió incrementar la producción semanal en aproximadamente 30 kilogramos, gracias al monitoreo y control automático de las condiciones ambien-

tales. Este aumento representa una mejora significativa frente al método tradicional, donde las pérdidas por condiciones inadecuadas eran mayores.

Si se considera el precio de \$35 por cada medio kilo, el beneficio generado semanalmente por esta mejora supera ampliamente el costo total del sistema. En términos porcentuales, la inversión se recupera rápidamente y se estima un retorno superior al 600 %, lo que confirma que el sistema es altamente rentable y sostenible para pequeños y medianos productores.

4.7 Validación de la propuesta

A partir de los resultados obtenidos durante el periodo de pruebas, se evidencia que el sistema automatizado de monitoreo y control ambiental cumplió con los objetivos planteados en esta investigación. La integración de sensores ambientales, el procesamiento de datos en la nube y la aplicación de lógica inteligente permitieron mantener las variables críticas del cultivo dentro de rangos adecuados durante periodos prolongados de operación.

El análisis comparativo semana a semana muestra que, durante las primeras semanas de implementación, se presentaron mayores fluctuaciones en las condiciones ambientales, lo que se reflejó en niveles de producción relativamente bajos y en un mayor riesgo de pérdidas. Sin embargo, a medida que el sistema fue ajustándose y las variables ambientales alcanzaron mayor estabilidad, se observó una mejora progresiva en la producción semanal del cultivo.

La incorporación del sistema de alertas permitió identificar oportunamente desviaciones persistentes en las variables ambientales, reduciendo la duración de condiciones desfavorables para el desarrollo del cultivo. Como resultado, se evidenció una disminución significativa de las pérdidas productivas, reflejada en el incremento sostenido de la producción semanal a partir de las semanas intermedias del periodo de evaluación.

En términos generales, la comparación entre las semanas iniciales y las semanas posteriores a la estabilización del sistema permite afirmar que la implementación del monitoreo automatizado contribuyó a una reducción considerable del porcentaje de pérdidas en el cultivo. Aunque

el registro de la producción se realizó de forma manual, los datos obtenidos muestran una tendencia clara de mejora en el rendimiento, validando la efectividad de la propuesta desarrollada.

En consecuencia, se concluye que el sistema implementado no solo es funcional desde el punto de vista técnico, sino que también aporta beneficios reales en la reducción de pérdidas y en la optimización de la producción del cultivo de champiñones, confirmando la viabilidad y pertinencia de la solución propuesta.

CONCLUSIONES

El sistema desarrollado logró monitorear eficazmente las condiciones ambientales, permitiendo una supervisión constante y precisa de las variables. Esto contribuyó de forma significativa a la mejora de la productividad en el cultivo de champiñones, garantizando un entorno controlado y óptimo para su desarrollo. La implementación de tecnología IoT y lógica difusa permitió una gestión más eficiente, automatizada y con menor margen de error humano, lo que representa un avance sustancial frente a los métodos tradicionales de cultivo.

Se logró identificar de forma precisa los rangos óptimos de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, luminosidad y pH necesarios para el desarrollo adecuado del champiñón. Esta información se obtuvo mediante revisión bibliográfica técnica y entrevistas a personas expertas en la producción del mismo, sirviendo como base científica para el diseño del sistema. Esta etapa fue fundamental para garantizar que los sensores seleccionados y las reglas de lógica difusa estén alineadas con las necesidades reales del cultivo.

Se establecieron con claridad los requerimientos funcionales y operacionales del sistema, incluyendo los rangos de lectura, precisión de sensores, tipo de conectividad, autonomía energética y almacenamiento en la nube. La selección de hardware como el ESP32 y sensores, junto con plataformas como Firebase y Google Cloud, permitió definir una arquitectura robusta, escalable y adaptada a las condiciones del entorno rural donde se ubica el invernadero.

El sistema fue exitosamente desarrollado e integrado, permitiendo la captura y transmisión de datos en tiempo real desde los sensores hasta la nube, y posteriormente hacia el procesamiento. Además, mediante la implementación de lógica difusa se logró generar alertas inteligentes mediante telegram ante desviaciones prolongadas fuera del rango permitido, permitiendo acciones correctivas inmediatas. La interfaz web ofreció visualización clara y control remoto, mejorando la toma de decisiones del productor.

Las pruebas realizadas durante varias semanas evidenciaron que el sistema responde adecuadamente ante cambios ambientales, generando alertas de manera confiable y permitiendo

una intervención oportuna. Se observó una reducción en la pérdida de producción debido a condiciones desfavorables, y una mejora general en la estabilidad del clima, lo cual demuestra la efectividad del sistema en entornos reales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda complementar el sistema actual con actuadores (como ventiladores, sistemas de riego automáticos) conectados al nodo sensor, de forma que el sistema no solo alerte, sino que también regule activamente las variables ambientales cuando estas se salgan de los rangos óptimos.

Dado el buen rendimiento en un solo invernadero, se sugiere replicar el sistema en otros cultivos o zonas productoras de la región. Para ello, se debe considerar una arquitectura más escalable, posiblemente con una red de gateways y nodos que se comuniquen por LoRa o Wi-Fi mesh.

Se aconseja incorporar baterías recargables o paneles solares al sistema de sensores y gateway para garantizar su funcionamiento continuo durante cortes de energía, los cuales son comunes en zonas rurales y podrían comprometer el monitoreo crítico.

Es esencial que los agricultores comprendan cómo interpretar los datos y actuar ante alertas. Por ello, se recomienda realizar talleres de capacitación básicos sobre el uso de la plataforma, lectura de variables y mantenimiento del sistema, promoviendo así la apropiación tecnológica local.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, S. (2020). Diseño y adaptación de un invernadero para la producción de hongos comestibles en azoteas. <https://repositorio.xoc.uam.mx>
- ANEIA. (2020). *Historia del champiñón en Colombia*. <https://aneia.uniandes.edu.co/historia-del-champinon-en-colombia/>
- Asquimen, W. (2022). *Características de la agricultura tradicional y moderna*. <https://blog.agroptima.com/es/blog/caracteristicas-de-la-agricultura-tradicional-y-moderna/>
- Bionatura. (2024). *Producción de hongos comestibles en Ecuador*. <https://bionaturajournal.com/2024.01.02.15.html>
- Bros, M. (2023). *The fungal life cycle: How a mushroom comes to be*. <https://www.microdosebros.com/es/the-fungal-life-cycle-how-a-mushroom-comes-to-be/>
- Cabezas. (2023). *El ciclo biológico de las setas y sus requisitos de cultivo*. <https://wikifarmer.com/library/es/article/el-ciclo-biologico-de-las-setas-y-sus-requisitos-de-cultivo>
- Cabezas, H. (2021). Optimizing CO2 levels for mushroom farm success: A complete guide. <https://sensor1stop.com/es/knowledge/optimizing-co2-levels-for-mushroom-farm-success-a-complete-guide/>
- Carrasco Carrasco, J. (2018). *Estudio de la telaraña del champiñón causada por *Cladobotryum dendroides* y su control en el cultivo de *Agaricus bisporus* en invernadero* [Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha]. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/9752/TESIS%20Carrasco%20Carrasco.pdf>
- Cartoles, F. (2023). Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo de variables ambientales en un galpón para el cultivo de champiñones. <https://dspace.ups.edu.ec>
- Castañón Ibacache, V. (2018). *Producción y comercialización de champiñones (*Agaricus bisporus*), ostra (*Pleurotus ostreatus*) y shiitake (*Lentinula edodes*) en la Región Metropolitana de Chile* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/145942/Casta%C3%B1on%20Ibacache%20Victor.pdf>
- Conapa. (2019). *10 beneficios de utilizar la tecnología en la agricultura*. <https://conapa.es/beneficios-de-utilizar-la-tecnologia-en-la-agricultura/>

- Cruz, D. (2021). Producción y valor proteico de *Pleurotus ostreatus* en la región sur de Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 12(2), 422-429. <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/1806>
- de Ambato, U. T. (2023). *Producción del hongo shiitake (*Lentinula edodes*) en bloques orgánicos a base de desechos agrícolas*. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/4088>
- de Chimborazo, E. S. P. (2023). *Evaluación, caracterización y aprovechamiento del hongo *Lentinula edodes* “Shiitake” para la disposición final del residuo de la industria maderera en la provincia de Chimborazo*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2007>
- de México, U. N. A. (2023). Propuesta de alternativa viable de bajo impacto ambiental a la producción convencional del champiñón (*Agaricus bisporus*). <https://ru.dgb.unam.mx/jspui/bitstream/20.500.14330/TES01000741108/3/0741108.pdf>
- de la Salud, O. M. (2020). Estrategia Mundial de la OMS para la Inocuidad de los Alimentos. https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB150/B150_25-sp.pdf
- de la Salud, O. P. (2025). Inocuidad de alimentos. <https://www.paho.org/es/temas/inocuidad-alimentos>
- del Ecuador, U. A. (2023). Determinación de vitaminas y ácidos grasos de la *Lentinula edodes* cultivada en Ecuador. https://biblioteca.semisud.org/opac_css/index.php?id=305743&lvl=notice_display
- Díaz, J. D., & Vaca, S. (2015). Sistema piloto para el monitoreo de variables ambientales en cultivo de palma africana. <https://repository.usta.edu.co>
- Farmonaut. (2023). *Innovación tecnológica en Ecuador: Cómo Farmonaut impulsa la agricultura sostenible en Tungurahua*. <https://farmonaut.com/south-america/innovacion-tecnologica-en-ecuador-como-farmonaut-impulsa-la-agricultura-sostenible-y-buenas-practicas-en-tungurahua/>
- Fungiturismo. (2021). *Historia del consumo y cultivo de setas*. <https://fungiturismo.com/historia-del-consumo-cultivo-de-setas/>

- García, J., & Sánchez, M. (2020). *Aplicación de la lógica difusa en sistemas de control automático de variables ambientales*. <https://repositorio.upn.edu.ec/xxxx>
- García Martínez, K. P. (2009). *Evaluación de sustratos para la producción de champiñones (Agaricus bisporus)*. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/777>
- Gómez, L., Sánchez, P., & Rojas, M. (2020). Desarrollo de herramientas tecnológicas para el monitoreo agrícola en zonas rurales de Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Innovación Tecnológica*, 15(4), 45-62. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Gómez-Pérez, R., Martínez-López, J., & Torres-López, M. (2021). Redes de sensores y su aplicación en la agricultura: una revisión de tecnologías emergentes. *Revista Científica Agroecología*, 18(3), 120-134. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Jiménez, R., García, L., & Romero, J. (2020). Sistemas IoT aplicados al monitoreo agrícola: avances y perspectivas. *Revista Latinoamericana de Innovación Tecnológica*, 14(2), 45-58. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Lara-Vargas, H. M., Castro, G. A., & Cedeño-Cruz, F. (2019). Aplicación de la agricultura de precisión en sistemas de producción agrícola sostenible. *Revista de Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 152-161. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- López, C., & Cabrera, J. (2021). *Aplicaciones móviles para el monitoreo ambiental en cultivos bajo invernadero en Ecuador*. <https://repositorio.utn.edu.ec/xxxx>
- López, E. (2014). El compostaje para el cultivo de hongos comestibles. Caso de estudio sobre la cáscara de girasol. https://www.academia.edu/15859554/EL_COMPOSTAJE_PARA_EL_CULTIVO_DE_HONGOS_COMESTIBLES_CASO_DE_ESTUDIO_SOBRE_LA_C%C3%81SCARA_DE_GIRASOL
- MAG. (2023). *Ecuador presenta actividades tecnológicas que implementa para desarrollar el agro*. <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-presenta-actividades-tecnologicas-que-implementa-para-desarrollar-el-agro/>
- Martínez, J., García, A., & Hernández, P. (2021). Redes inalámbricas aplicadas al monitoreo ambiental en cultivos agrícolas. <https://repositorio.uta.edu.ec/12345>

- Mendoza, F., Vargas, E., & Paredes, R. (2022). Impacto de la visualización de datos en tiempo real en la agricultura sostenible. *Revista Andina de Agricultura*, 9(2), 33-50. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Ministerio del Ambiente, N. (2023). *Ecuador promueve la transición hacia una producción agropecuaria sostenible y libre de deforestación en la Amazonía*. <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-promueve-la-transicion-hacia-una-produccion-agropecuaria-sostenible-y-libre-de-deforestacion-en-la-amazonia/>
- Morales, L., Gómez, A., & Rodríguez, M. (2021). Plataformas de monitoreo ambiental en tiempo real para cultivos intensivos. *Revista de Tecnología y Agricultura*, 14(3), 22-35. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Moreno Rivera, E. (2018). *Diseño y control de sistema automatizado modular para el cultivo de hongo seta (*Pleurotus spp.*) en medio controlado utilizando energías limpias* [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Tecnología de Moldeo]. <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/315/1/MorenoRiveraErik%20MMANAV%202018.pdf>
- Muñoz, J. (2001). *Evaluación de tres materiales como sustrato y dos materiales como tierra de cobertura para el cultivo de champiñón (*Agaricus bisporus*) en El Zamorano, Honduras* [Tesis de maestría, Zamorano]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/12c31a8d-1305-4bd1-a885-481aa8d7c03e/content>
- Mushrooms, E. (2019). *Historia de champiñones y setas en Europa*. <https://europeanmushrooms.eu/es/historia-de-champinones-y-setas-en-europa/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), N. (2019). *Sistemas alimentarios sostenibles y los ODS: Avances y desafíos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Pachauri, R., Allen, M., Barros, V., & Broome, J. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Paredes, F., & Sánchez, L. (2020). Implementación de sistemas de control ambiental en invernaderos de la Sierra ecuatoriana. <https://repositorio.uce.edu.ec/12345>

- Pérez, A., & López, E. (2021). Lógica difusa aplicada al control de procesos agrícolas: Un estudio para cultivos en invernadero. *Revista de Innovación y Tecnologías Agroindustriales*, 8(2), 70-85. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Pierra. (2020). Sensores para la agricultura de precisión. <https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/3887437/Sensores%20para%20la%20agricultura%20de%20precisi%C3%B3n.pdf>
- Pranaair. (2021). CO2 Monitoring in Mushroom Farming. <https://www.pranaair.com/es/blog/co2-monitoring-in-mushroom-farming/>
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2015). *Software engineering: A practitioner's approach* (8th). McGraw-Hill Education.
- Qazi, I. A., et al. (2009). Application of compost and inorganic fertilizers in rice-wheat and cotton-wheat cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 114-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.01.004>
- Redalyc. (2023). *Producción de champiñones en Ecuador: una oportunidad para la expansión agrícola local*. <https://www.redalyc.org/journal/993/99362098025/html/>
- Rojas-Rodríguez, M., Pérez-Jiménez, S., & González, C. A. (2020). Tecnologías emergentes en la agricultura de precisión: Potencial y retos para su adopción en América Latina. *Revista de Agroecología*, 25(1), 45-58. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Samberino, Z. (2021). Prototipo IoT de monitoreo y control de variables ambientales. <https://repository.ucatolica.edu.co>
- Solutions, P. (2023). *Hongos ostra del Sumaco: una nueva forma de conservación y producción sostenible*. <https://panorama.solutions/es/solution/hongos-ostra-del-sumaco-una-nueva-forma-de-conservacion-y-produccion-sostenible>
- Unidas, N. (2015). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.
- Valencia-Balladares, P. (2021). Implementación de sensores ambientales en el cultivo de hongos comestibles: Un enfoque hacia la sostenibilidad. <https://repositorio.utm.edu.ec/12345>

- Verde, A. (2021). *¿Qué papel juegan las tecnologías agrícolas avanzadas en la agricultura sostenible?* <https://azadaverde.org/tecnologias-agricolas-avanzadas-agricultura-sostenible>
- Verleal. (2024). *¿Cuáles son las propiedades y beneficios de los champiñones?* <https://www.verleal.com/champinones-propiedades-beneficios/>
- Villafuerte, L., & Salazar, C. (2022). Uso de tecnologías IoT en la agricultura ecuatoriana: oportunidades y retos. *Revista Científica de Agricultura Sostenible*, 8(1), 88-102. <https://doi.org/10.xxxx/xxxx>
- Zuleta. (2023). *Impacto ambiental y sostenibilidad del cultivo de champiñones en Ecuador*. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/6658/1/02%20ICA%201170%20TRABAJO%20GRADO.pdf>

ANEXOS

Manual de Usuario del Sistema Web

Este manual describe de forma sencilla el uso del sistema web para el monitoreo de las condiciones ambientales y el registro de la producción en el cultivo de champiñones.

Acceso a la plataforma

Para ingresar al sistema, abra un navegador web (por ejemplo, Google Chrome o Firefox) e ingrese la siguiente dirección:

<https://huerto-hongos.web.app>

Visualización de variables en tiempo real

En la pantalla principal se muestran gráficas actualizadas en tiempo real de las siguientes variables ambientales:

- **Temperatura (°C)**
- **Humedad relativa (%)**
- **CO₂ (ppm)**
- **pH**
- **Luminosidad (lux)**

Estas gráficas permiten observar el comportamiento del cultivo y verificar si las condiciones se mantienen dentro de rangos adecuados.

Selección y carga de semana

Para trabajar con una semana específica del cultivo:

1. Seleccione la semana deseada desde el menú desplegable.
2. Presione el botón **Cargar semana** para que la información correspondiente a esa semana se muestre en el sistema.

Este paso es necesario para visualizar correctamente los datos y habilitar el registro de producción y generación de reportes.

Ingreso de producción semanal

Una vez cargada la semana correspondiente:

1. Ingrese la cantidad de producción semanal en kilogramos.
2. Presione el botón **Guardar kilos**.

El valor ingresado se almacena automáticamente en la base de datos en la nube.

Generación de reportes

El sistema permite generar un reporte semanal del cultivo:

- Al presionar el botón **Descargar PDF semanal**, se genera un archivo PDF con el resumen de la semana seleccionada.
- En la parte inferior de la página web también se muestra el reporte completo en formato digital, el cual contiene la misma información que el archivo PDF.

Recomendaciones de uso

- Verifique que el sistema tenga conexión a internet para una correcta actualización de datos.
- Registre la producción al finalizar cada semana.
- Descargue los reportes periódicamente para respaldo y análisis histórico.

El sistema ha sido diseñado para que cualquier usuario pueda supervisar el cultivo de manera simple, clara y eficiente.

Manual Técnico del Sistema Web

Este manual técnico describe el funcionamiento del sistema de monitoreo automatizado de variables ambientales para el cultivo de champiñones, detallando la arquitectura, conexiones, flujo de datos, mantenimiento y consideraciones técnicas.

1. Descripción general del sistema

El sistema está compuesto por un nodo sensor basado en una placa **ESP32**, que mide temperatura, humedad, CO₂, pH y luminosidad. Estos datos se envían directamente a **Firestore Realtime Database** mediante conexión Wi-Fi.

Luego, mediante funciones de **Google Cloud**, los datos son procesados y publicados en una plataforma web para visualización en tiempo real y generación de reportes semanales en formato PDF.

2. Flujo de funcionamiento

1. El ESP32 realiza lecturas periódicas de los sensores mediante interfaces analógicas e I²C.
2. Los datos se transmiten en formato JSON hacia Firestore utilizando peticiones REST (HTTPS).
3. Google Cloud Functions procesa la información y alimenta la interfaz web.
4. El usuario visualiza gráficas en tiempo real, registra producción semanal y genera reportes PDF.

3. Conexión de sensores al ESP32

Tabla 36.

Conexión de sensores al ESP32

Sensor	Función	GPIO	Descripción
Sensor pH (E-201-C)	Salida analógica	GPIO34	Lectura del nivel de acidez
MQ135 (CO ₂)	A0 (analógica)	GPIO32	Medición de gases
	D0 (digital)	GPIO33	Alarma por umbral
BH1750 (luz)	SDA	GPIO18	Bus I ² C principal
	SCL	GPIO19	Bus I ² C principal
SHT31 (temp/hum)	SDA	GPIO21	Bus I ² C secundario
	SCL	GPIO22	Bus I ² C secundario

4. Conectividad y arquitectura

- No se utiliza un gateway intermedio. El ESP32 se comunica directamente con Firebase.
- La visualización de datos y reportes se realiza desde una plataforma web conectada a Google Cloud.
- La arquitectura favorece la escalabilidad, ya que todos los componentes están conectados a la nube.

5. Mantenimiento y fallas comunes

Mantenimiento preventivo:

- Verificar semanalmente la conexión física de los sensores.
- Limpiar sensores con alcohol isopropílico si se detecta suciedad o corrosión.
- Reiniciar el ESP32 periódicamente para evitar sobrecarga en la memoria.

- Supervisar el estado de Firebase y las reglas de acceso desde la consola.

Fallas comunes y solución:

Problema	Causa común	Solución
No se visualizan datos	Fallo de conexión Wi-Fi	Verificar SSID y contraseña en el código del ESP32
Lecturas nulas	Sensor desconectado o averiado	Revisar cableado o reemplazar sensor
Valores incoherentes	Sensor descalibrado	Realizar nueva calibración
No se genera PDF	Error en Cloud Function	Revisar consola de Firebase

6. Advertencias técnicas

- **No conectar el sistema directamente a una fuente de 110V.** Utilizar una fuente de 5V con regulador y protección contra sobrecorriente.
- Mantener el sistema lejos de humedad directa si no se cuenta con encapsulado IP65.
- Las APIs de comunicación deben mantenerse protegidas con reglas de autenticación y uso limitado.

Ambient Light Sensor IC Series

Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC


BH1750FVI

No.09046EBT01

● Descriptions

BH1750FVI is a digital Ambient Light Sensor IC for I²C bus interface. This IC is the most suitable to obtain the ambient light data for adjusting LCD and Keypad backlight power of Mobile phone. It is possible to detect wide range at High resolution. (1 - 65535 lx).

● Features

- 1) I²C bus Interface (f / s Mode Support)
- 2) Spectral responsibility is approximately human eye response
- 3) Illuminance to Digital Converter
- 4) Wide range and High resolution. (1 - 65535 lx)
- 5) Low Current by power down function
- 6) 50Hz / 60Hz Light noise reject-function
- 7) 1.8V Logic input interface
- 8) No need any external parts
- 9) Light source dependency is little. (ex. Incandescent Lamp. Fluorescent Lamp. Halogen Lamp. White LED. Sun Light)
- 10) It is possible to select 2 type of I²C slave-address.
- 11) Adjustable measurement result for influence of optical window
(It is possible to detect min. 0.11 lx, max. 100000 lx by using this function.)
- 12) Small measurement variation (+/- 20%)
- 13) The influence of infrared is very small.

● Applications

Mobile phone, LCD TV, NOTE PC, Portable game machine, Digital camera, Digital video camera, Car navigation, PDA, LCD display

● Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limits	Units
Supply Voltage	V _{max}	4.5	V
Operating Temperature	T _{opr}	-40~85	°C
Storage Temperature	T _{stg}	-40~100	°C
SDA Sink Current	I _{max}	7	mA
Power Dissipation	P _d	260 [※]	mW

※ 70mm × 70mm × 1.6mm glass epoxy board. Derating in done at 3.47mW/°C for operating above Ta=25°C.

● Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
V _{cc} Voltage	V _{cc}	2.4	3.0	3.6	V
I ² C Reference Voltage	V _{DVI}	1.65	-	V _{cc}	V

●Electrical Characteristics (Vcc = 3.0V, DVI = 3.0V, Ta = 25°C, unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Supply Current	Icc1	—	120	190	μA	Ev = 100 lx ※1
Powerdown Current	Icc2	—	0.01	1.0	μA	No input Light
Peak Wave Length	λp	—	560	—	nm	
Measurement Accuracy	S/A	0.96	1.2	1.44	times	Sensor out / Actual lx EV = 1000 lx ※1, ※2
Dark (0 lx) Sensor out	S0	0	0	3	count	H-Resolution Mode ※3
H-Resolution Mode Resolution	rHR	—	1	—	lx	
L-Resolution Mode Resolution	rLR	—	4	—	lx	
H-Resolution Mode Measurement Time	tHR	—	120	180	ms	
L-Resolution Mode Measurement Time	tLR	—	16	24	ms	
Incandescent / Fluorescent Sensor out ratio	rIF	—	1	—	times	EV = 1000 lx
ADDR Input 'H' Voltage	VAH	0.7 * VCC	—	—	V	
ADDR Input 'L' Voltage	VAL	—	—	0.3 * VCC	V	
DVI Input 'L' Voltage	VdVL	—	—	0.4	V	
SCL, SDA Input 'H' Voltage 1	VIH1	0.7 * DVI	—	—	V	DVI ≥ 1.8V
SCL, SDA Input 'H' Voltage 2	VIH2	1.26	—	—	V	1.65V ≤ DVI < 1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 1	VIL1	—	—	0.3 * DVI	V	DVI ≥ 1.8V
SCL, SDA Input 'L' Voltage 2	VIL2	—	—	DVI - 1.26	V	1.65V ≤ DVI < 1.8V
SCL, SDA, ADDR Input 'H' Current	IiH	—	—	10	μA	
SCL, SDA, ADDR Input 'L' Current	IiL	—	—	10	μA	
I ² C SCL Clock Frequency	fsCL	—	—	400	kHz	
I ² C Bus Free Time	tBUF	1.3	—	—	μs	
I ² C Hold Time (repeated) START Condition	tHDSTA	0.6	—	—	μs	
I ² C Set up time for a Repeated START Condition	tsUSTA	0.6	—	—	μs	
I ² C Set up time for a Repeated STOP Condition	tsUSTD	0.6	—	—	μs	
I ² C Data Hold Time	tHDDAT	0	—	0.9	μs	
I ² C Data Setup Time	tsUDAT	100	—	—	ns	
I ² C 'L' Period of the SCL Clock	tLOW	1.3	—	—	μs	
I ² C 'H' Period of the SCL Clock	tHIGH	0.6	—	—	μs	
I ² C SDA Output 'L' Voltage	Vol	0	—	0.4	V	IOL = 3 mA

※1 White LED is used as optical source.

※2 Measurement Accuracy typical value is possible to change '1' by "Measurement result adjustment function".

※3 Use H-resolution mode or H-resolution mode2 if dark data (less than 10 lx) is need.

● Reference Data

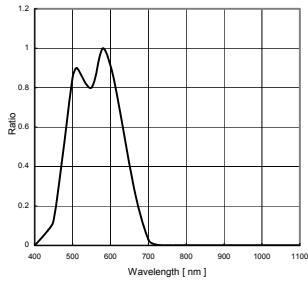


Fig.1 Spectral Response

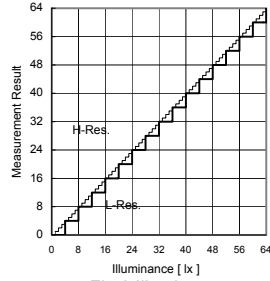


Fig.2 Illuminance - Measurement Result 1

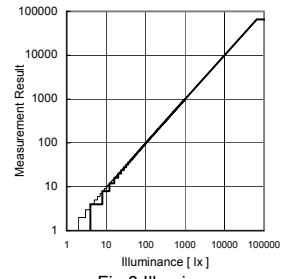


Fig.3 Illuminance - Measurement Result 2

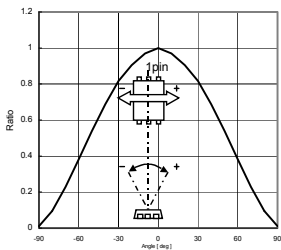


Fig.4 Directional Characteristics 1

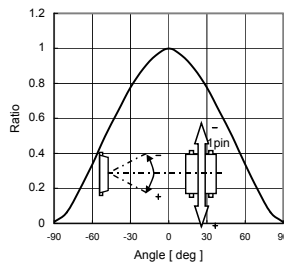


Fig.5 Directional Characteristics 2

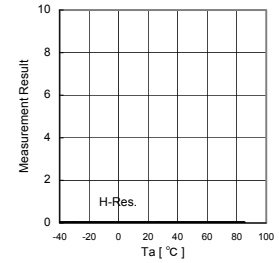


Fig.6 Dark Response

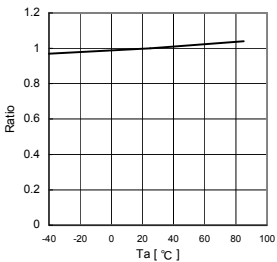


Fig.7 Measurement Accuracy Temperature Dependency

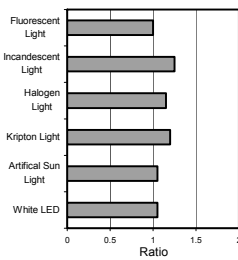


Fig.8 Light Source Dependency (Fluorescent Light is set to '1')

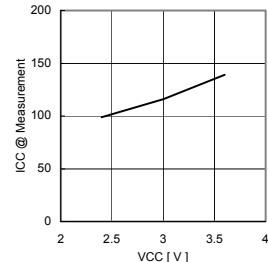


Fig.9 VCC - ICC (During measurement)

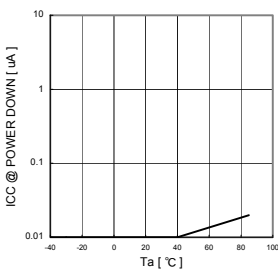


Fig.10 VCC - ICC@0 Lx (POWER DOWN)

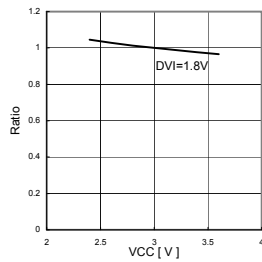


Fig.11 Measurement Result VCC Dependency

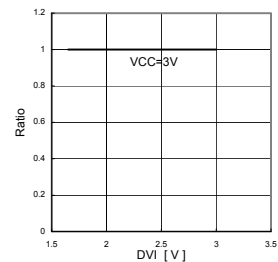
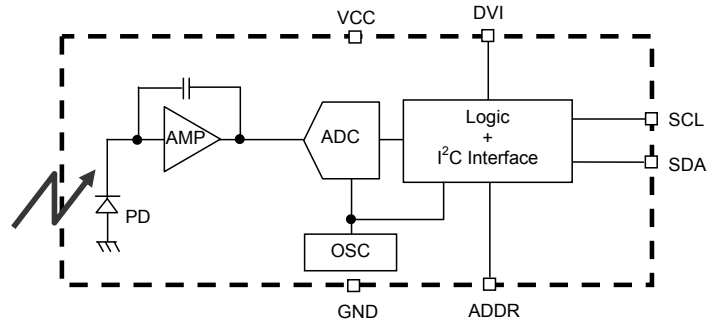


Fig.12 Measurement Result DVI Dependency

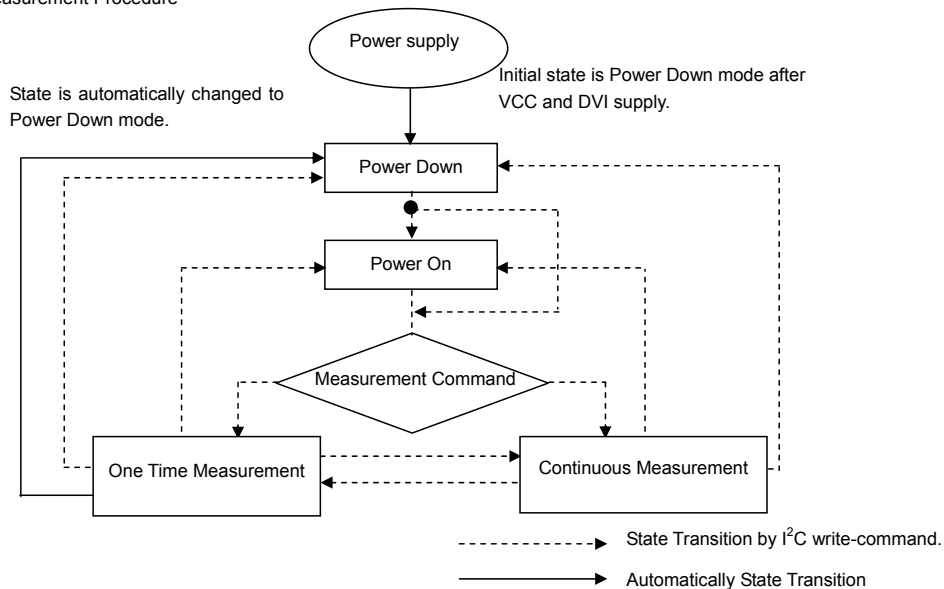
●Block Diagram



●Block Diagram Descriptions

- PD
Photo diode with approximately human eye response.
- AMP
Integration-OPAMP for converting from PD current to Voltage.
- ADC
AD converter for obtainment Digital 16bit data.
- Logic + I²C Interface
Ambient Light Calculation and I²C BUS Interface. It is including below register.
Data Register → This is for registration of Ambient Light Data. Initial Value is "0000_0000_0000_0000".
Measurement Time Register → This is for registration of measurement time. Initial Value is "0100_0101".
- OSC
Internal Oscillator (typ. 320kHz). It is CLK for internal logic.

●Measurement Procedure



* "Power On" Command is possible to omit.

● Instruction Set Architecture

Instruction	Opecode	Comments
Power Down	0000_0000	No active state.
Power On	0000_0001	Waiting for measurement command.
Reset	0000_0111	Reset Data register value. Reset command is not acceptable in Power Down mode.
Continuously H-Resolution Mode	0001_0000	Start measurement at 1lx resolution. Measurement Time is typically 120ms.
Continuously H-Resolution Mode2	0001_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms.
Continuously L-Resolution Mode	0001_0011	Start measurement at 4lx resolution. Measurement Time is typically 16ms.
One Time H-Resolution Mode	0010_0000	Start measurement at 1lx resolution. Measurement Time is typically 120ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
One Time H-Resolution Mode2	0010_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
One Time L-Resolution Mode	0010_0011	Start measurement at 4lx resolution. Measurement Time is typically 16ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.
Change Measurement time (High bit)	01000_MT[7,6,5]	Change measurement time. ※ Please refer "adjust measurement result for influence of optical window."
Change Measurement time (Low bit)	011_MT[4,3,2,1,0]	Change measurement time. ※ Please refer "adjust measurement result for influence of optical window."

※ Don't input the other opecode.

● Measurement mode explanation

Measurement Mode	Measurement Time.	Resolurtion
H-resolution Mode2	Typ. 120ms.	0.5 lx
H-Resolution Mode	Typ. 120ms.	1 lx.
L-Resolution Mode	Typ. 16ms.	4 lx.

We recommend to use H-Resolution Mode.

Measurement time (integration time) of H-Resolution Mode is so long that some kind of noise(including in 50Hz / 60Hz noise) is rejected. And H-Resolution Mode is 1 lx resolution so that it is suitable for darkness (less than 10 lx)
H-resolution mode2 is also suitable to detect for darkness.

● Explanation of Asynchronous reset and Reset command "0000_0111"

1) Asynchronous reset

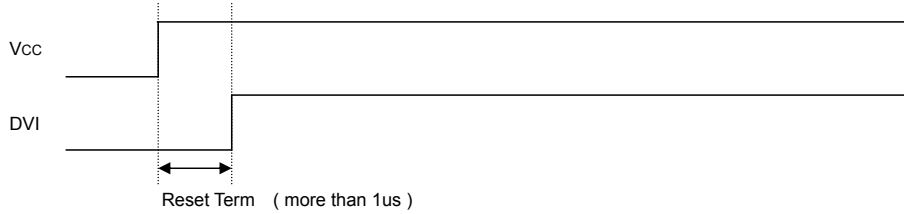
All registers are reset. It is necessary on power supply sequence. Please refer "Timing chart for VCC and DVI power supply sequence" in this page. It is power down mode during DVI = 'L'.

2) Reset command

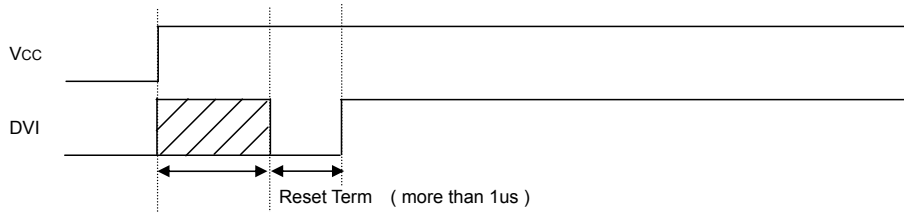
Reset command is for only reset Illuminance data register. (reset value is '0') It is not necessary even power supply sequence. It is used for removing previous measurement result. This command is not working in power down mode, so that please set the power on mode before input this command.

- Timing chart for VCC and DVI power supply sequence
 DVI is I²C bus reference voltage terminal. And it is also asynchronous reset terminal. It is necessary to set to 'L' after Vcc is supplied. In DVI 'L' term, internal state is set to Power Down mode.

1) Recommended Timing chart1 for VCC and DVI supply.



2) Timing chart2 for VCC and DVI supply.
 (If DVI rises within 1μs after VCC supply)



Don't care state
 ADDR, SDA, SCL is not stable if DVI 'L' term (1us) is not given by systems.
 In this case, please connect the resistors (approximately 100kOhm) to ADDR without directly connecting to VCC or GND, because it is 3 state buffer for Internal testing.

● Measurement sequence example from "Write instruction" to "Read measurement result"

ex1) Continuously H-resolution mode (ADDR = 'L')

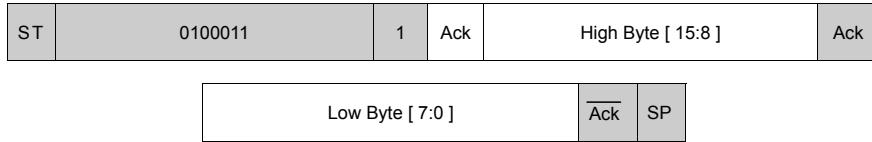


① Send "Continuously H-resolution mode " instruction

ST	0100011	0	Ack	00010000	Ack	SP
----	---------	---	-----	----------	-----	----

② Wait to complete 1st H-resolution mode measurement.(max. 180ms.)

③ Read measurement result.



How to calculate when the data High Byte is "10000011" and Low Byte is "10010000"
 $(2^{15} + 2^9 + 2^8 + 2^7 + 2^4) / 1.2 \doteq 28067 [\text{lx}]$

The result of continuously measurement mode is updated.(120ms.typ at H-resolution mode, 16ms.typ at L-resolution mode)

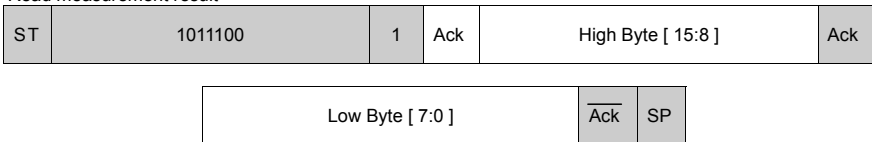
ex2) One time L-resolution mode (ADDR = 'H')

① Send "One time L-resolution mode " instruction

ST	1011100	0	Ack	00100011	Ack	SP
----	---------	---	-----	----------	-----	----

② Wait to complete L-resolution mode measurement.(max. 24ms.)

③ Read measurement result



How to calculate when the data High Byte is "00000001" and Low Byte is "00010000"
 $(2^8 + 2^4) / 1.2 \doteq 227 [\text{lx}]$

In one time measurement, Statement moves to power down mode after measurement completion.If updated result is need then please resend measurement instruction.

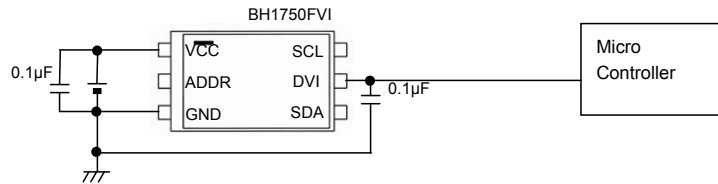
●Application circuit example of DVI terminal

The DVI terminal is an asynchronous reset terminal. Please note that there is a possibility that IC doesn't operate normally if the reset section is not installed after the start-up of Vcc.

(Please refer to the paragraph of "Timing chart for Vcc and DVI power supply sequence")

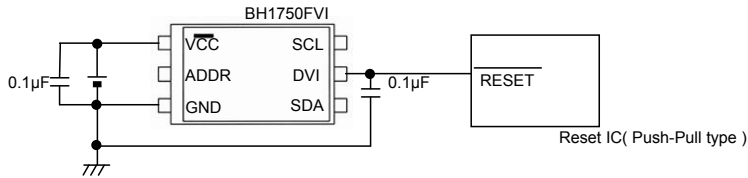
The description concerning SDA and the terminal SCL is omitted in this application circuit example. Please design the application the standard of the I2C bus as it finishes being satisfactory. Moreover, the description concerning the terminal ADDR is omitted. Please refer to the paragraph of "Timing chart for Vcc and DVI power supply sequence" about the terminal ADDR design.

ex 1) The control signal line such as CPU is connected.

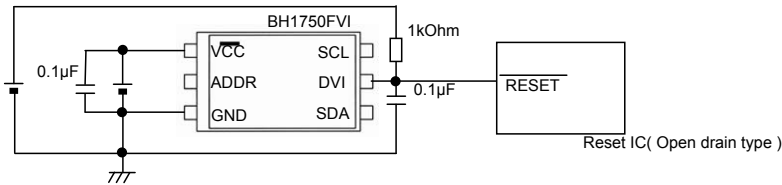


ex 2) Reset IC is used.

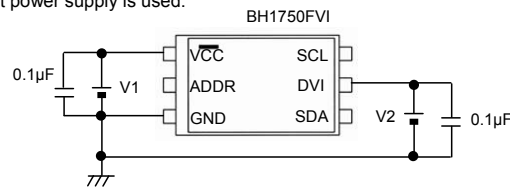
1, For Reset IC of the Push-Pull type



2, For Reset IC of the Open drain output



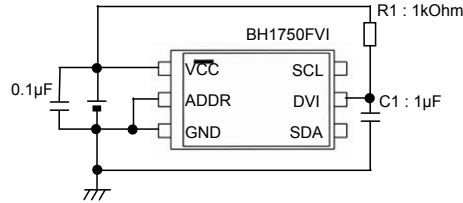
ex 3) A different power supply is used.



※ Power supply of DVI must stand up later than power supply of VCC stand up, because it is necessary to secure reset section (1µs or more).

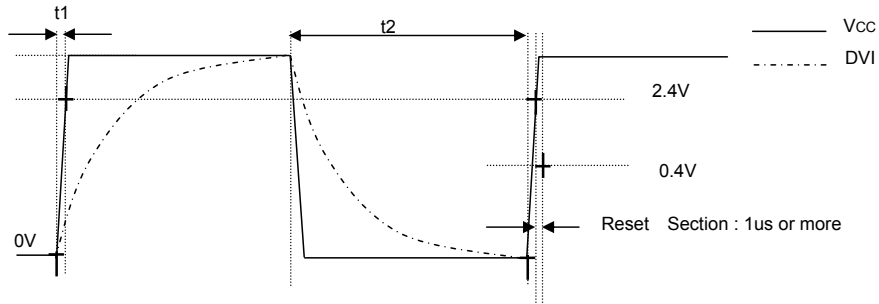
ex 4) LPF using CR is inserted between VCC and DVI.

This method has the possibility that the Reset section of turning on the power supply can not satisfied. cannot be satisfied. Please design the set considering the characteristic of the power supply enough.



◆ Notes when CR is inserted between VCC and DVI

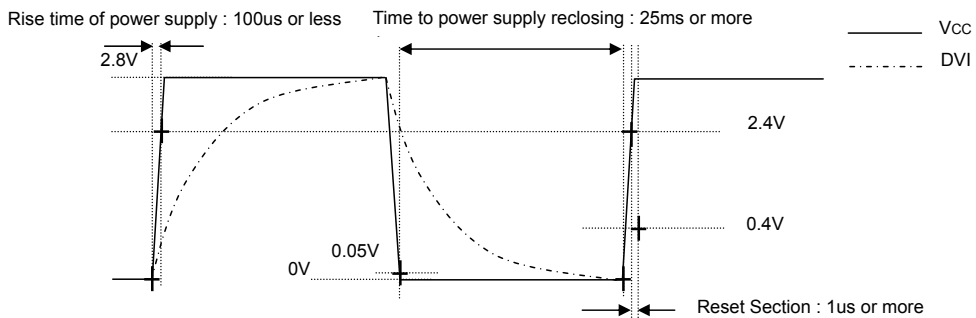
- ※ Please note that there is a possibility that reset section (1µs) can not be satisfied because the power supply is turned on when the rise time of VCC is slow
- ※ When VCC is turned off, the DVI voltage becomes higher than VCC voltage but IC destruction is not occred if recommended constant (R1 = 1kOhm, C1 = 1µF) is used.
- ※ Please note that there is a possibility that Reset section (1µsec) cannot be satisfied if wait time is not enough long after turning off VCC. (It is necessary to consider DVI voltage level after turning off VCC.)



• Please do the application design to secure Reset section 1us or more after the reclosing of the power supply.

◆ Example of designing set when CR (C = 1µF, R = 1kΩ) is inserted between VCC and DVI with VCC=2.8V

- ① The rise time to 0→2.4V of VCC must use the power supply of 100µs or less.
- ② Please wait 25ms or more after VCC turn off (VCC <= 0.05V), because it is necessary to secure reset section (1µs or more).

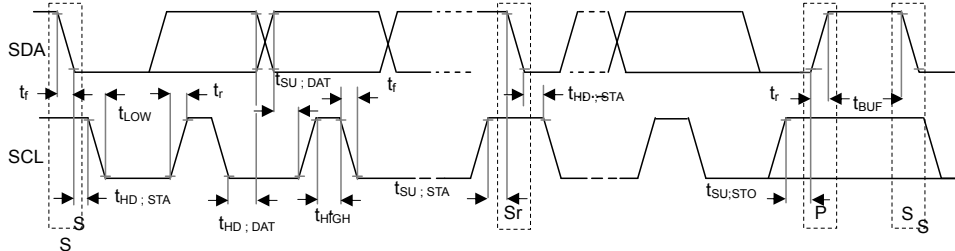


• Please do the application design to secure Reset section 1us or more after the reclosing of the power supply.

● I²C Bus Access

1) I²C Bus Interface Timing chart

Write measurement command and Read measurement result are done by I²C Bus interface. Please refer the formally specification of I²C Bus interface, and follow the formally timing chart.



2) Slave Address

Slave Address is 2 types, it is determined by ADDR Terminal

ADDR = 'H' (ADDR \geq 0.7VCC) \rightarrow "1011100"

ADDR = 'L' (ADDR \leq 0.3VCC) \rightarrow "0100011"

3) Write Format

BH1750FVI is not able to accept plural command without stop condition. Please insert SP every 1 Opecode.

ST	Slave Address	R/W 0	Ack	Opecode	Ack	SP
----	---------------	----------	-----	---------	-----	----

4) Read Format

ST	Slave Address	R/W 1	Ack	High Byte [15:8] $2^{15} \ 2^{14} \ 2^{13} \ 2^{12} \ 2^{11} \ 2^{10} \ 2^9 \ 2^8$	Ack
----	---------------	----------	-----	---	-----

Low Byte [7:0] $2^7 \ 2^6 \ 2^5 \ 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$	Ack	SP
---	-----	----



from Master to Slave



from Slave to Master

ex)

High Byte = "1000_0011"

Low Byte = "1001_0000"

$$(2^{15} + 2^9 + 2^8 + 2^7 + 2^4) / 1.2 \doteq 28067 [1x]$$

* I²C BUS is trademark of Phillips Semiconductors. Please refer formality specification.

●Adjust measurement result for influence of optical window. (sensor sensitivity adjusting)

BH1750FVI is possible to change sensor sensitivity. And it is possible to cancel the optical window influence (difference with / without optical window) by using this function. Adjust is done by changing measurement time. For example, when transmission rate of optical window is 50% (measurement result becomes 0.5 times if optical window is set), influence of optical window is ignored by changing sensor sensitivity from default to 2 times

Sensor sensitivity is shift by changing the value of MTreg (measurement time register). MTreg value has to set 2 times if target of sensor sensitivity is 2 times. Measurement time is also set 2 times when MTreg value is changed from default to 2 times.

ex) Procedure for changing target sensor sensitivity to 2 times.

Please change Mtrege from "0100_0101" (default) to "1000_1010" (default * 2).

1) Changing High bit of MTreg

ST	Slave Address	R/W 0	Ack	01000_100	Ack	SP
----	---------------	----------	-----	-----------	-----	----

2) Changing Low bit of MTreg

ST	Slave Address	R/W 0	Ack	011_01010	Ack	SP
----	---------------	----------	-----	-----------	-----	----

3) Input Measurement Command

ST	Slave Address	R/W 0	Ack	0001_0000	Ack	SP
----	---------------	----------	-----	-----------	-----	----

* This example is High Resolution mode, but it accepts the other measurement.

4) After about 240ms, measurement result is registered to Data Register.

(High Resolution mode is typically 120ms, but measurement time is set twice.)

The below table is seeing the changable range of MTreg.

		Min.	Typ.	Max.
changable range of MTreg	binary	0001_1111 (sensitivity : default * 0.45)	0100_0101 default	1111_1110 (sensitivity : default * 3.68)
	decimal	31 (sensitivity : default * 0.45)	69 default	254 (sensitivity : default * 3.68)

It is possible to detect 0.23lx by using this function at H-resolution mode. And it is possible to detect 0.11lx by using this function at H-resolution mode2.

The below formula is to calculate illuminance per 1 count.

H-resolution mode : Illuminance per 1 count (lx / count) = 1 / 1.2 * (69 / X)

H-resolution mode2 : Illuminance per 1 count (lx / count) = 1 / 1.2 * (69 / X) / 2

1.2 : Measurement accuracy

69 : Default value of MTreg (dec)

X : MTreg value

The below table is seeing the detail of resolution.

Mtreg の値	lx / count at H-resolution mode	lx / count at H-resolution mode2
0001_1111	1.85	0.93
0100_0101	0.83	0.42
1111_1110	0.23	0.11

●H-Resolution Mode2

H-resolution mode2 is 0.5lx (typ.) resolution mode. It is suitable if under less than 10 lx measurement data is necessary. This measurement mode supports " Adjust measurement result for influence of optical window ". Please refer it. It is possible to detect min. 0.11 lx by using H-resolution mode2.

○ Instruction set architecture for H-resolution mode2

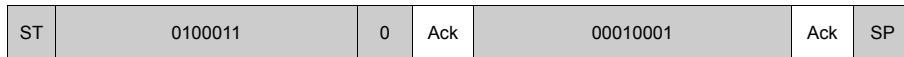
Instruction	Opecode	Comments
Continuously H-Resolution Mode2	0001_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms.
One Time H-Resolution Mode2	0010_0001	Start measurement at 0.5lx resolution. Measurement Time is typically 120ms. It is automatically set to Power Down mode after measurement.

○ Measurement sequence example from "Write instruction" to "Read measurement result"

ex) Continuously H-resolution mode2 (ADDR = 'L')

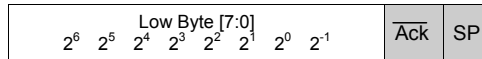
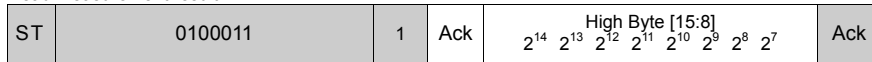


① Send "Continuously H-resolution mode2 " instruction



② Wait to complete 1st H-resolution mode2 measurement.(max. 180ms.)

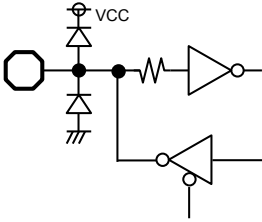
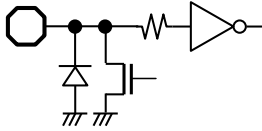
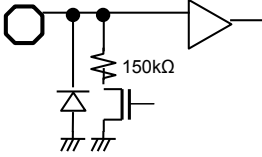
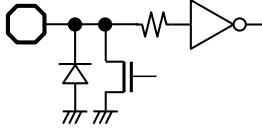
③ Read measurement result.



How to calculate when the data High Byte is "00000000" and Low Byte is "00010010"

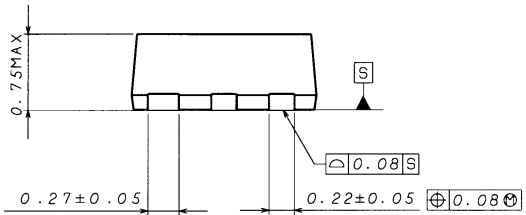
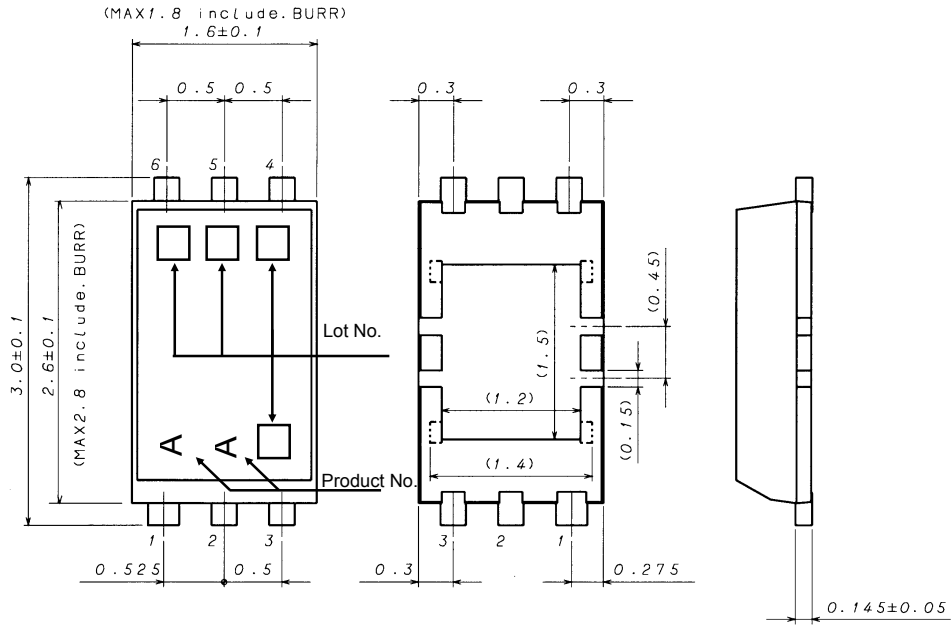
$$(2^3 + 2^0) / 1.2 \approx 7.5 [lx]$$

●Terminal Description

PIN No.	Terminal Name	Equivalent Circuit	Function
1	VCC		Power Supply Terminal
2	ADDR		<p>²C Slave-address Terminal</p> <p>ADDR = 'H' (ADDR \geq 0.7V_{CC}) "1011100" ADDR = 'L' (ADDR \leq 0.3V_{CC}) "0100011"</p> <p>ADDR Terminal is designed as 3 state buffer for internal test. So that please take care of V_{CC} and DVI supply procedure. Please see P6.</p>
3	GND		GND Terminal
4	SDA		² C bus Interface SDA Terminal
5	DVI		<p>SDA, SCL Reference Voltage Terminal</p> <p>And DVI Terminal is also asynchronous Reset for internal registers. So that please set to 'L' (at least 1μs, DVI \leq 0.4V) after V_{CC} is supplied. BH1750FVI is pulled down by 150kΩ while DVI = 'L'.</p>
6	SCL		² C bus Interface SCL Terminal

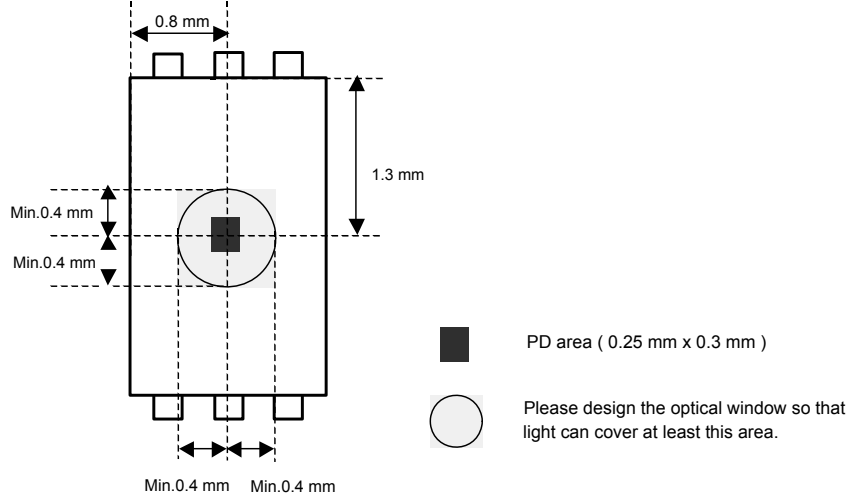
※These values are design-value, not guaranteed.

●Package Outlines



WSOF6I (Unit : mm)

●About an optical design on the device

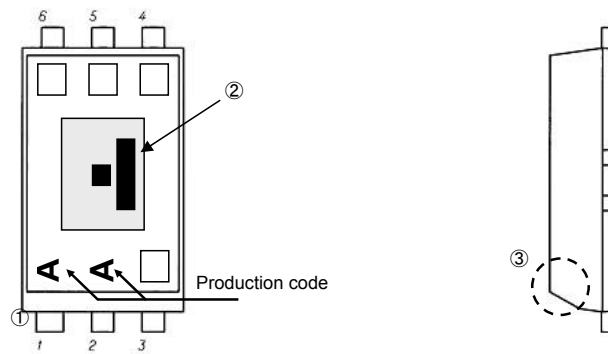


●The method of distinguishing 1pin.

There is some method of distinguishing 1pin.

- ① Distinguishing by 1Pin wide-lead
- ② Distinguishing by die pattern
- ③ Distinguishing by taper part of 1-3pin side

② (by die pattern) is the easiest method to distinguish by naked eye.



●Cautions on use

1) Absolute Maximum Ratings

An excess in the absolute maximum ratings, such as supply voltage (V_{max}), temperature range of operating conditions (T_{opr}), etc., can break down devices, thus making impossible to identify breaking mode such as a short circuit or an open circuit. If any special mode exceeding the absolute maximum ratings is assumed, consideration should be given to take physical safety measures including the use of fuses, etc.

2) GND voltage

Make setting of the potential of the GND terminal so that it will be maintained at the minimum in any operating state. Furthermore, check to be sure no terminals are at a potential lower than the GND voltage including an actual electric transient.

3) Short circuit between terminals and erroneous mounting

In order to mount ICs on a set PCB, pay thorough attention to the direction and offset of the ICs. Erroneous mounting can break down the ICs. Furthermore, if a short circuit occurs due to foreign matters entering between terminals or between the terminal and the power supply or the GND terminal, the ICs can break down.

4) Operation in strong electromagnetic field

Be noted that using ICs in the strong electromagnetic field can malfunction them.

5) Inspection with set PCB

On the inspection with the set PCB, if a capacitor is connected to a low-impedance IC terminal, the IC can suffer stress. Therefore, be sure to discharge from the set PCB by each process. Furthermore, in order to mount or dismount the set PCB to/from the jig for the inspection process, be sure to turn OFF the power supply and then mount the set PCB to the jig. After the completion of the inspection, be sure to turn OFF the power supply and then dismount it from the jig. In addition, for protection against static electricity, establish a ground for the assembly process and pay thorough attention to the transportation and the storage of the set PCB.

6) Input terminals

In terms of the construction of IC, parasitic elements are inevitably formed in relation to potential. The operation of the parasitic element can cause interference with circuit operation, thus resulting in a malfunction and then breakdown of the input terminal. Therefore, pay thorough attention not to handle the input terminals; such as to apply to the input terminals a voltage lower than the GND respectively, so that any parasitic element will operate. Furthermore, do not apply a voltage to the input terminals when no power supply voltage is applied to the IC. In addition, even if the power supply voltage is applied, apply to the input terminals a voltage lower than the power supply voltage or within the guaranteed value of electrical characteristics.

7) Thermal design

Perform thermal design in which there are adequate margins by taking into account the power dissipation (P_d) in actual states of use.

8) Treatment of package

Dusts or scratch on the photo detector may affect the optical characteristics. Please handle it with care.

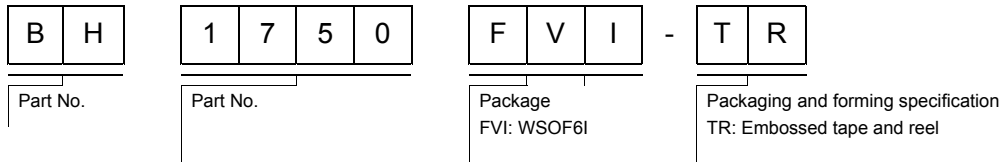
9) Rush current

When power is first supplied to the CMOS IC, it is possible that the internal logic may be unstable and rush current may flow instantaneously. Therefore, give special consideration to power coupling capacitance, power wiring, width of GND wiring, and routing of connections.

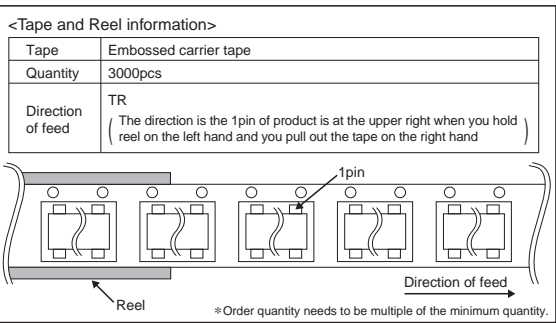
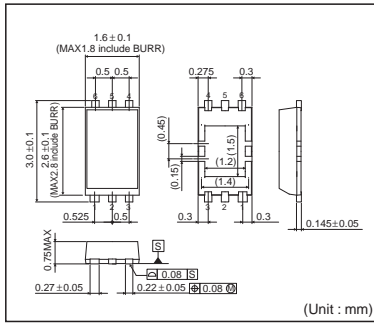
10) The exposed central pad on the back side of the package

There is an exposed central pad on the back side of the package. But please do it non connection. (Don't solder, and don't do electrical connection) Please mount by Footprint dimensions described in the Jisso Information for WSOF6I. This pad is GND level, therefore there is a possibility that LSI malfunctions and heavy-current is generated.

●Ordering part number



WSOF6I



Notes

No copying or reproduction of this document, in part or in whole, is permitted without the consent of ROHM Co.,Ltd.

The content specified herein is subject to change for improvement without notice.

The content specified herein is for the purpose of introducing ROHM's products (hereinafter "Products"). If you wish to use any such Product, please be sure to refer to the specifications, which can be obtained from ROHM upon request.

Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.

Great care was taken in ensuring the accuracy of the information specified in this document. However, should you incur any damage arising from any inaccuracy or misprint of such information, ROHM shall bear no responsibility for such damage.

The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM and other parties. ROHM shall bear no responsibility whatsoever for any dispute arising from the use of such technical information.

The Products specified in this document are intended to be used with general-use electronic equipment or devices (such as audio visual equipment, office-automation equipment, communication devices, electronic appliances and amusement devices).

The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.

While ROHM always makes efforts to enhance the quality and reliability of its Products, a Product may fail or malfunction for a variety of reasons.

Please be sure to implement in your equipment using the Products safety measures to guard against the possibility of physical injury, fire or any other damage caused in the event of the failure of any Product, such as derating, redundancy, fire control and fail-safe designs. ROHM shall bear no responsibility whatsoever for your use of any Product outside of the prescribed scope or not in accordance with the instruction manual.

The Products are not designed or manufactured to be used with any equipment, device or system which requires an extremely high level of reliability the failure or malfunction of which may result in a direct threat to human life or create a risk of human injury (such as a medical instrument, transportation equipment, aerospace machinery, nuclear-reactor controller, fuel-controller or other safety device). ROHM shall bear no responsibility in any way for use of any of the Products for the above special purposes. If a Product is intended to be used for any such special purpose, please contact a ROHM sales representative before purchasing.

If you intend to export or ship overseas any Product or technology specified herein that may be controlled under the Foreign Exchange and the Foreign Trade Law, you will be required to obtain a license or permit under the Law.



Thank you for your accessing to ROHM product informations.
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.com/contact/>



Air Quality Gas Sensor
(Model: MQ135)

Manual

Version: 1.4

Valid from: 2015-03-10

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

Statement

This manual copyright belongs to Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., LTD. Without the written permission, any part of this manual shall not be copied, translated, stored in database or retrieval system, also can't spread through electronic, copying, record ways.

Thanks for purchasing our product. In order to let customers use it better and reduce the faults caused by misuse, please read the manual carefully and operate it correctly in accordance with the instructions. If users disobey the terms or remove, disassemble, change the components inside of the sensor, we shall not be responsible for the loss.

The specific such as color, appearance, sizes &etc, please in kind prevail.

We are devoting ourselves to products development and technical innovation, so we reserve the right to improve the products without notice. Please confirm it is the valid version before using this manual. At the same time, users' comments on optimized using way are welcome.

Please keep the manual properly, in order to get help if you have questions during the usage in the future.

Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO., LTD

MQ135 Semiconductor Sensor for Air Quality

Profile

Sensitive material of MQ135 gas sensor is SnO₂, which with lower conductivity in clean air. When target pollution gas exists, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ135 gas sensor has high sensitivity to ammonia gas, sulfide, benzene series steam, also can monitor smoke and other toxic gases well. It can detect kinds of toxic gases and is a kind of low-cost sensor for kinds of applications.

Features

It has good sensitivity to toxic gas in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit &etc.

Main Applications

It is widely used in domestic gas alarm, industrial gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters

Stable.1

Model		MQ135	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		ammonia gas, sulfide, benzene series steam	
Detection range		10~1000ppm(ammonia gas, toluene, hydrogen, smoke)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _c	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	29Ω±3Ω (room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤950mW
	Sensitivity	S	R _s (in air)/R _s (in 400ppm H ₂)≥5
	Output Voltage	V _s	2.0V~4.0V (in 400ppm H ₂)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{400ppm} /R _{100ppm} H ₂)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20°C±2°C; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _c :5.0V±0.1V; V _H : 5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	

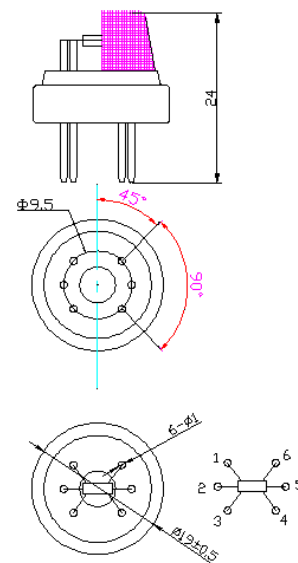


Fig1.Sensor Structure

Unit: mm

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

Basic Circuit

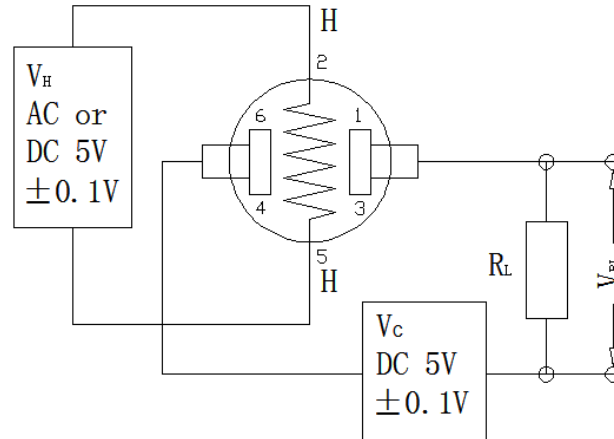


Fig2. MQ135 Test Circuit

Instructions: The above fig is the basic test circuit of MQ135. The sensor requires two voltage inputs: heater voltage (V_H) and circuit voltage (V_C). V_H is used to supply standard working temperature to the sensor and it can adopt DC or AC power, while V_{RL} is the voltage of load resistance R_L which is in series with sensor. V_C supplies the detect voltage to load resistance R_L and it should adopt DC power.

Description of Sensor Characters

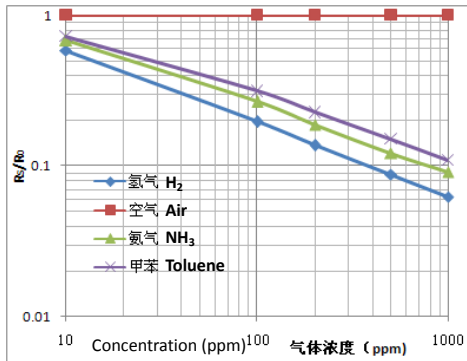


Fig3. Typical Sensitivity Curve

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_0), the abscissa is concentration of gases. R_s means resistance in target gas with different concentration, R_0 means resistance of sensor in clean air. All tests are finished under standard test conditions.

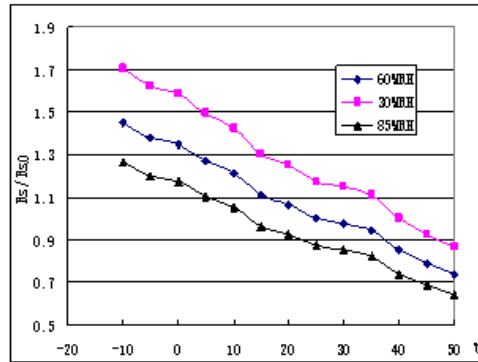


Fig4. Typical temperature/humidity characteristics

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_{s0}). R_s means resistance of sensor in 400ppm H_2 gas under different tem. and humidity. R_{s0} means resistance of the sensor in 400ppm H_2 gas under 20°C/55%RH.

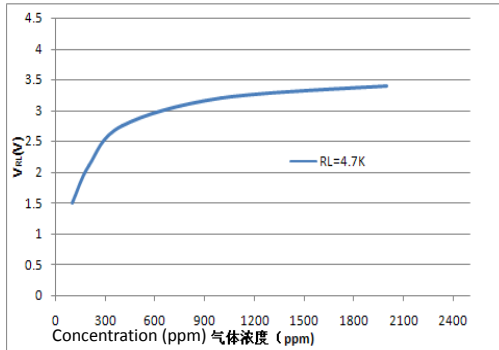


Fig5.Sensitivity Curve

Fig5 shows the V_{RL} in H_2 gas with different concentration. The resistance load R_L is 4.7 K Ω and the test is finished in standard test conditions.

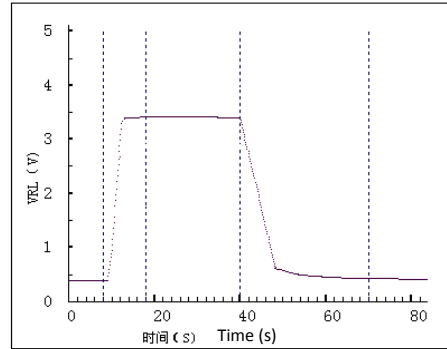


Fig6.Responce and Resume

Fig5 shows the changing of V_{RL} in the process of putting the sensor into target gas and removing it out.

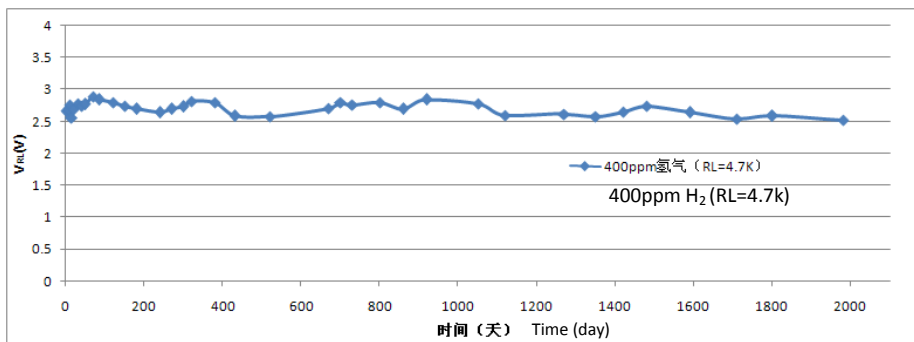


Fig7.long-term Stability

Test is finished in standard test conditions, the abscissa is observing time and the ordinate is V_{RL} .

Cautions

1 .Following conditions must be prohibited

1.1 Exposed to organic silicon steam

Sensing material will lose sensitivity and never recover if the sensor absorbs organic silicon steam. Sensors must avoid exposing to silicon bond, fixture, silicon latex, putty or plastic contain silicon environment.

1.2 High Corrosive gas

If the sensors are exposed to high concentration corrosive gas (such as H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl etc.), it will not only result in corrosion of sensors structure, also it cause sincere sensitivity attenuation.

1.3 Alkali, Alkali metals salt, halogen pollution

The sensors performance will be changed badly if sensors be sprayed polluted by alkali metals salt especially brine, or be exposed to halogen such as fluorine.

1.4 Touch water

Sensitivity of the sensors will be reduced when splattered or dipped in water.

1.5 Freezing

Do avoid icing on sensor's surface, otherwise sensing material will be broken and lost sensitivity.

1.6 Applied higher voltage

Applied voltage on sensor should not be higher than stipulated value, even if the sensor is not physically damaged or broken, it causes down-line or heater damaged, and bring on sensors' sensitivity characteristic changed badly.

1.7 Voltage on wrong pins

For 6 pins sensor, Pin 2&5 is heating electrodes, Pin (1,3)/(4,6) are testing electrodes (Pin 1 connects with Pin 3, while Pin 4 connects with Pin 6).If apply voltage on Pin 1&3 or 4&6, it will make lead broken; and no signal putout if apply on pins 2&4.

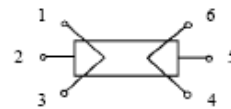


Fig8. Lead sketch

2 .Following conditions must be avoided

2.1 Water Condensation

Indoor conditions, slight water condensation will influence sensors' performance lightly. However, if water condensation on sensors surface and keep a certain period, sensors' sensitive will be decreased.

2.2 Used in high gas concentration

No matter the sensor is electrified or not, if it is placed in high gas concentration for long time, sensors characteristic will be affected. If lighter gas sprays the sensor, it will cause extremely damage.

2.3 Long time storage

The sensors resistance will drift reversibly if it's stored for long time without electrify, this drift is related with storage conditions. Sensors should be stored in airproof bag without volatile silicon compound. For the sensors with long time storage but no electrify, they need long galvanical aging time for stability before using. The suggested aging time as follow:

Stable2.

Storage Time	Suggested aging time
Less than one month	No less than 48 hours
1 ~ 6 months	No less than 72 hours
More than six months	No less than 168 hours

2.4 Long time exposed to adverse environment

No matter the sensors electrified or not, if exposed to adverse environment for long time, such as high humidity, high temperature, or high pollution etc., it will influence the sensors' performance badly.

2.5 Vibration

Continual vibration will result in sensors down-lead response then break. In transportation or assembling line, pneumatic screwdriver/ultrasonic welding machine can lead this vibration.

2.6 Concussion

If sensors meet strong concussion, it may lead its lead wire disconnected.

2.7 Usage Conditions

2.7.1For sensor, handmade welding is optimal way. The welding conditions as follow:



炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsen-sensor.com

- Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine
 - homothermal soldering iron
 - Temperature: 250°C
 - Time: less than 3 seconds
- 2.7.1 If users choose wave-soldering, the following conditions should be obey:
- Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine
 - Speed: 1-2 Meter/ Minute
 - Warm-up temperature: 100±20°C
 - Welding temperature: 250±10°C
 - One time pass wave crest welding machine

If disobey the above using terms, sensors sensitivity will reduce.

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd
Add: No.299, Jinsuo Road, National Hi-Tech Zone,
Zhengzhou 450001 China
Tel: +86-371-67169097/67169670
Fax: +86-371-60932988
E-mail: sales@winsensor.com
Website: www.winsen-sensor.com

PH Sensor E-201-C

Technical Manual Rev 1r0



The pH sensor Module consist of PH sensor also called as PH probe and a Signal Conditioning Board which gives an output which is proportional to the PH Value and can be interfaced directly to any Micro-controller.

The pH sensor components are usually combined into one device called a combination pH electrode. The measuring electrode is usually glass and quite fragile. Recent developments have replaced the glass with more durable solid-state sensors. The preamplifier is a signal-conditioning device. It takes the high-impedance pH electrode signal and changes it into a low impedance signal which the analyzer or transmitter can accept. The preamplifier also strengthens and stabilizes the signal, making it less susceptible to electrical noise.

pH and ORP probes are both used for measuring the acidic intensity of liquid solutions. A pH probe measures acidity on a scale from 0 to 14, with 0 being the most acidic and 14 being the most basic. Similarly, an Oxidation-Reduction Potential (ORP) probe returns a voltage proportional to the tendency of the solution to gain or lose electrons from other substances (which is linked directly to the pH a substance).

Applications:

- Can be used as different tester, pH meter or controller
- Suitable for most aquariums, hydroponics, laboratory etc

General Specifications:

Input supply voltage: 5V
Working current: 5 – 10mA
Detection concentration range: PH 0 – 14
Detection range of temperature: 0 – 80 degC
Response Time:: ≤ 5S
Stability Time: ≤ 60S
Output: Analog
Power Consumption: ≤ 0.5W
Working Temperature: -10 to +50 deg C
Working Humidity: 95%RH (nominal humidity 65%RH)
Weight: 25g
PCB Dimension: 42mm x 32mm x 20mm

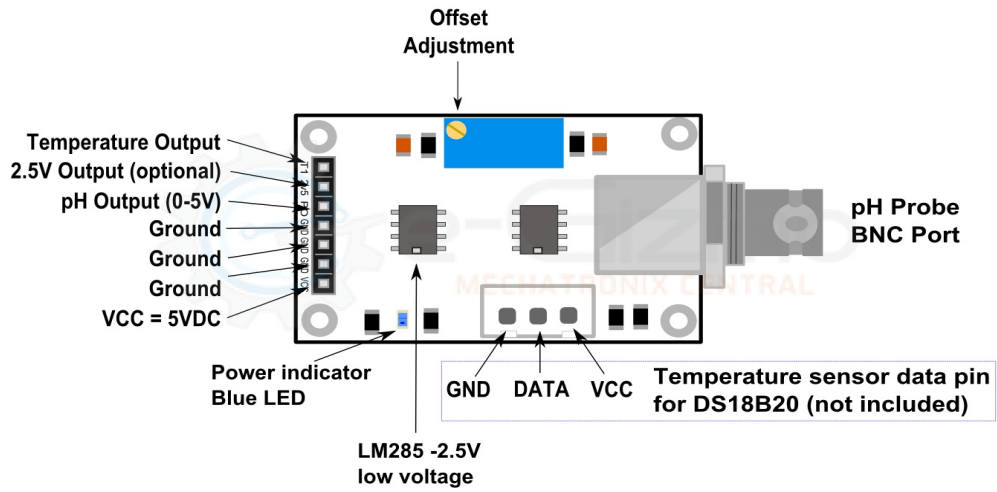


Figure 1: pH Sensor module kit v2 pinouts



Figure 2: pH Substance (solutions for testing reference)

IMPORTANT TIPS:

On How to Clean pH Electrodes:

1. Do not "wipe" or rub the electrode.
2. Swirl the electrode gently in the cleaning solution.
3. Gently rinse with deionized or distilled water.
4. Store in a storage solution.
5. When possible, use a specialized electrode.

Which Cleaning Solution to use?

The cleaning solution you use will depend upon your particular process and the residues you are trying to remove. There is a wide range of pre-mixed cleaning solutions available online or you can make your own. Make sure you take care when handling any cleaning solution – some can be hazardous so make sure you follow all safety instructions and wear appropriate protection equipment!

(For more information - Please go to reference link)

Reference:

<https://www.southforkinst.com/ph-electrodes-clean-repair/>

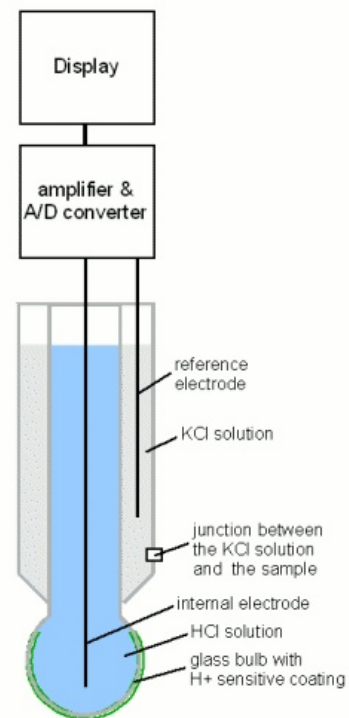


Figure 3: pH Electrode parts

Figure 1: Reference pH Value and Output voltage.

pH Value	Output
4	3.071
7	2.535
10	2.066

Table 2. pH Value of the known substances.

0	5% Sulphuric acid, H ₂ SO ₄ , battery acid.
1	0.1 N HCl, hydrochloric acid (1.1)
2	Lemon juice. Vinegar (2.4-3.4)
3	wine (3.5-3.7)
4	Orange juice. Apple juice (3.8). Beer. Tomatoes.
5	Cottage cheese. Black coffee. Rain water 5.6.
6	Milk. Fish (6.7-7). chicken (6.4-6.6).
7	Neutral: equal numbers of hydrogen and hydroxyl ions. Blood (7.3-7.4). Distilled water without CO ₂ , after boiling.
8	Sea water (8.1). Egg white.
9	Borax. baking soda.
10	Milk of magnesia, Magnesium hydroxide Mg (OH) ₂ .
11	Household ammonia
12	Photographic developer, household bleach
13	Oven cleaner
14	Sodium lye NaOH, 1 mol/litre.

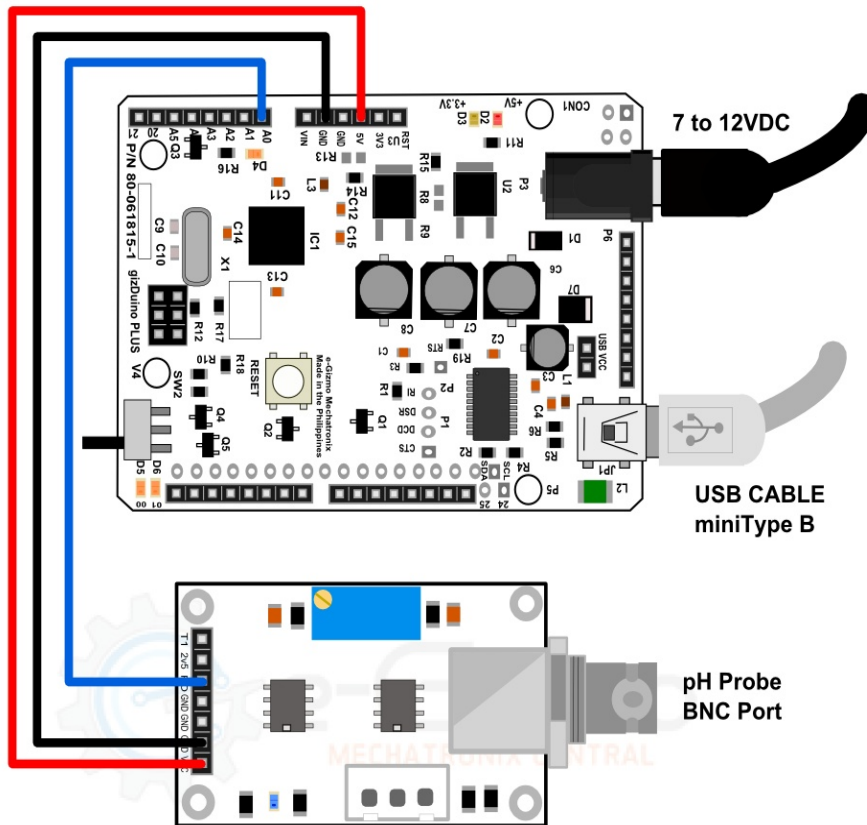


Figure 4: Sample connections.

Sample codes



```
/*
e-Gizmo pH Sensor kit module v2.0

  This sample sketch is for pH sensor module
  an easy output voltage to compare it to pH value.
  See the table below:
  pH Value | Output (V)
  =====
    4      3.071
    7      2.535
   10      2.066

  For pH scale table for reference of the known substance.
  Here's the link: http://www.seafriends.org.nz/dda/ph.htm
  (See the pH scale)

  Modified by e-Gizmo Mechatronics Central
  http://www.e-gizmo.com
  July 18,2017

*/
#define SENSOR A0 //pH meter Analog output to Arduino Analog Input 0
#define OFFSET 0.00 //deviation compensate
#define LED 13
#define SAMPLING_INTERVAL 20
#define PRINT_INTERVAL 800
#define ARRAY_LENGTH 40 //times of collection
int PH_ARRAY[ARRAY_LENGTH]; //Store the average value of the sensor feedback
int PH_ARRAY_INDEX=0;
void setup(void)
{
  pinMode(LED,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("PH SENSOR KIT VOLTAGE TEST!"); //Test the serial monitor
}
void loop(void)
{
  static unsigned long SAMPLING_TIME = millis();
  static unsigned long PRINT_TIME = millis();
  static float VOLTAGE;
  if(millis()-SAMPLING_TIME > SAMPLING_INTERVAL)
  {
    PH_ARRAY[PH_ARRAY_INDEX++]=analogRead(SENSOR);
    if(PH_ARRAY_INDEX==ARRAY_LENGTH)PH_ARRAY_INDEX=0;
    VOLTAGE = AVERAGE_ARRAY(PH_ARRAY, ARRAY_LENGTH)*5.0/1024;
    SAMPLING_TIME=millis();
  }
  if(millis() - PRINT_TIME > PRINT_INTERVAL) //Every 800 milliseconds, print a numerical, convert
  the state of the LED indicator
  {
    Serial.print("VOLATGE OUTPUT: ");
  }
}
```

```
        Serial.println(VOLTAGE,2);
        digitalWrite(LED,digitalRead(LED)^1);
        PRINT_TIME=millis();
    }
}
double AVERAGE_ARRAY(int* ARR, int NUMBER){
    int i;
    int max,min;
    double AVG;
    long AMOUNT=0;
    if(NUMBER<=0){
        Serial.println("ERROR!/n");
        return 0;
    }
    if(NUMBER<5){ //less than 5, calculated directly statistics
        for(i=0;i<NUMBER;i++){
            AMOUNT+=ARR[i];
        }
        AVG = AMOUNT/NUMBER;
        return AVG;
    }else{
        if(ARR[0]<ARR[1]){
            min = ARR[0];max=ARR[1];
        }
        else{
            min=ARR[1];max=ARR[0];
        }
        for(i=2;i<NUMBER;i++){
            if(ARR[i]<min){
                AMOUNT+=min; //arr<min
                min=ARR[i];
            }else {
                if(ARR[i]>max){
                    AMOUNT+=max; //arr>max
                    max= AMOUNT+=ARR[i];
                }else{
                    AMOUNT+=ARR[i]; //min<=arr<=max
                }
            }
        }
        }//if
    }//for
    AVG = (double)AMOUNT/(NUMBER-2);
} //if
return AVG;
}
```

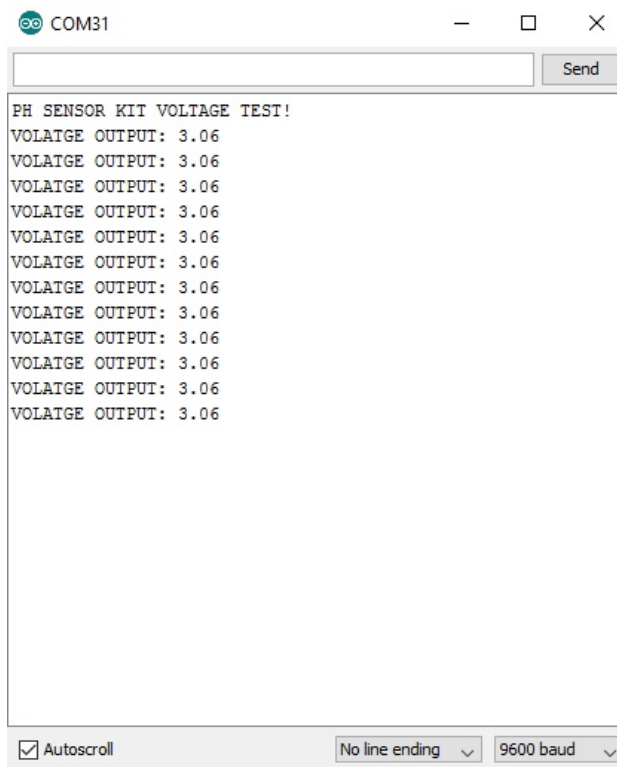


Figure 5: Serial print output from pH sensor.

Datasheet SHT3x-DIS

Humidity and Temperature Sensor

- Fully calibrated, linearized, and temperature compensated digital output
- Wide supply voltage range, from 2.4 V to 5.5 V
- I2C Interface with communication speeds up to 1 MHz and two user selectable addresses
- Typical accuracy of $\pm 1.5\%$ RH and $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ for SHT35
- Very fast start-up and measurement time
- Tiny 8-Pin DFN package



Product Summary

SHT3x-DIS is the next generation of Sensirion's temperature and humidity sensors. It builds on a new CMOSens® sensor chip that is at the heart of Sensirion's new humidity and temperature platform. The SHT3x-DIS has increased intelligence, reliability and improved accuracy specifications compared to its predecessor. Its functionality includes enhanced signal processing, two distinctive and user selectable I2C addresses and communication speeds of up to 1 MHz. The DFN

package has a footprint of $2.5 \times 2.5\text{ mm}^2$ while keeping a height of 0.9 mm. This allows for integration of the SHT3x-DIS into a great variety of applications. Additionally, the wide supply voltage range of 2.4 V to 5.5 V guarantees compatibility with diverse assembly situations. All in all, the SHT3x-DIS incorporates 15 years of knowledge of Sensirion, the leader in the humidity sensor industry.

Benefits of Sensirion's CMOSens® Technology

- High reliability and long-term stability
- Industry-proven technology with a track record of more than 15 years
- Designed for mass production
- High process capability
- High signal-to-noise ratio

Content

1	Sensor Performance.....	2
2	Specifications.....	6
3	Pin Assignment.....	8
4	Operation and Communication.....	9
5	Packaging.....	15
6	Shipping Package.....	17
7	Quality.....	18
8	Ordering Information.....	18

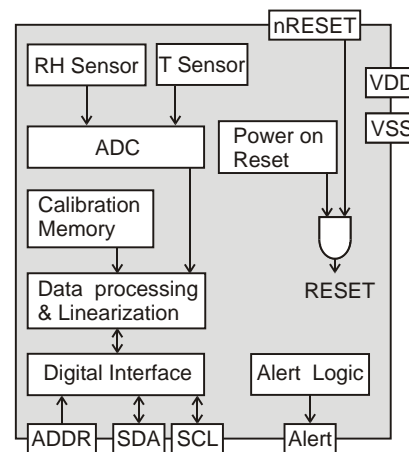


Figure 1 Functional block diagram of the SHT3x-DIS. The sensor signals for humidity and temperature are factory calibrated, linearized and compensated for temperature and supply voltage dependencies.

1 Sensor Performance

Humidity Sensor Specification

Parameter	Condition	Value	Units
SHT30 Accuracy tolerance ¹	Typ.	±3	%RH
	Max.	Figure 2	-
SHT31 Accuracy tolerance ¹	Typ.	±2	%RH
	Max.	Figure 3	-
SHT35 Accuracy tolerance ¹	Typ.	±1.5	%RH
	Max.	Figure 4	-
Repeatability ²	Low	0.25	%RH
	Medium	0.15	%RH
	High	0.10	%RH
Resolution	Typ.	0.01	%RH
Hysteresis	at 25°C	±0.8	%RH
Specified range ³	extended ⁴	0 to 100	%RH
Response time ⁵	τ _{63%}	8 ⁶	s
Long-term drift	Typ. ⁷	<0.25	%RH/yr

Table 1 Humidity sensor specification.

Temperature Sensor Specification

Parameter	Condition	Value	Units
SHT30 Accuracy tolerance ¹	typ., 0°C to 65°C	±0.3	°C
SHT31 Accuracy tolerance ¹	typ., -40°C to 90°C	±0.3	°C
SHT35 Accuracy tolerance ¹	typ., -40°C to 90°C	±0.2	°C
Repeatability ²	Low	0.24	°C
	Medium	0.12	°C
	High	0.06	°C
Resolution	Typ.	0.015	°C
Specified Range	-	-40 to 125	°C
Response time ⁸	τ _{63%}	>2	s
Long Term Drift	max	<0.03	°C/yr

Table 2 Temperature sensor specification.

¹ For definition of typical and maximum accuracy tolerance, please refer to the document "Sensirion Humidity Sensor Specification Statement".

² The stated repeatability is 3 times the standard deviation (3σ) of multiple consecutive measurements at the stated repeatability and at constant ambient conditions. It is a measure for the noise on the physical sensor output. Different measurement modes allow for high/medium/low repeatability.

³ Specified range refers to the range for which the humidity or temperature sensor specification is guaranteed.

⁴ For details about recommended humidity and temperature operating range, please refer to section 1.1.

⁵ Time for achieving 63% of a humidity step function, valid at 25°C and 1m/s airflow. Humidity response time in the application depends on the design-in of the sensor.

⁶ With activated ART function (see section 4.7) the response time can be improved by a factor of 2.

⁷ Typical value for operation in normal RH/T operating range, see section 1.1. Maximum value is < 0.5 %RH/yr. Higher drift values might occur due to contaminant environments with vaporized solvents, out-gassing tapes, adhesives, packaging materials, etc. For more details please refer to Handling Instructions.

⁸ Temperature response times strongly depend on the type of heat exchange, the available sensor surface and the design environment of the sensor in the final application.

Humidity Sensor Performance Graphs

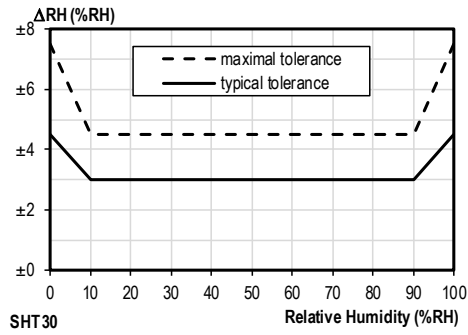


Figure 2 Tolerance of RH at 25°C for SHT30.

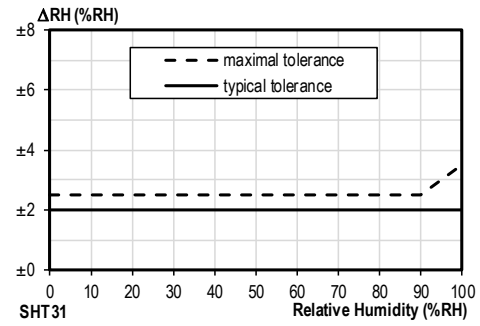


Figure 3 Tolerance of RH at 25°C for SHT31.

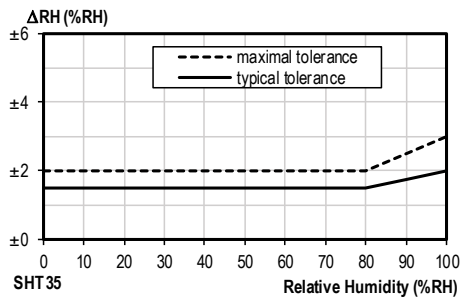


Figure 4 Tolerance of RH at 25°C for SHT35.

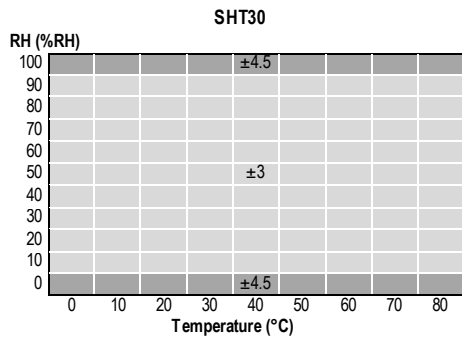


Figure 5 Typical tolerance of RH over T for SHT30.

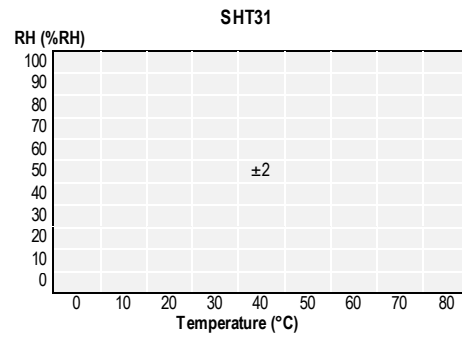


Figure 6 Typical tolerance of RH over T for SHT31.

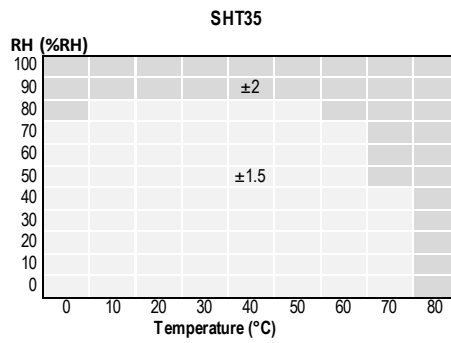


Figure 7 Typical tolerance of RH over T for SHT35.

Temperature Sensor Performance Graphs

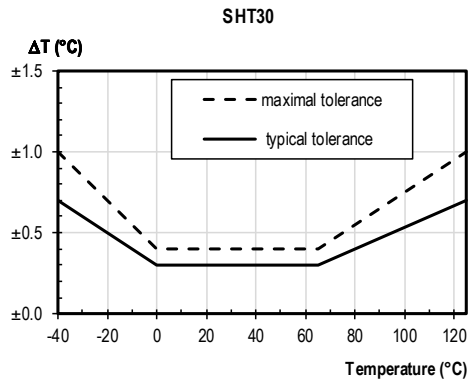


Figure 8 Temperature accuracy of the SHT30 sensor.

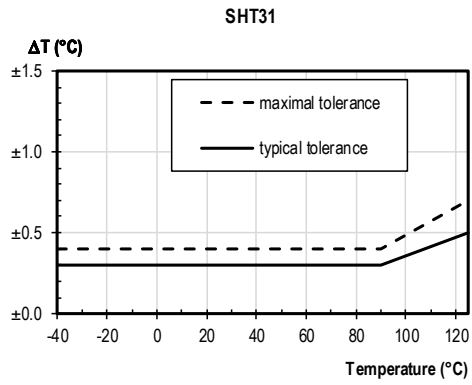


Figure 9 Temperature accuracy of the SHT31 sensor.

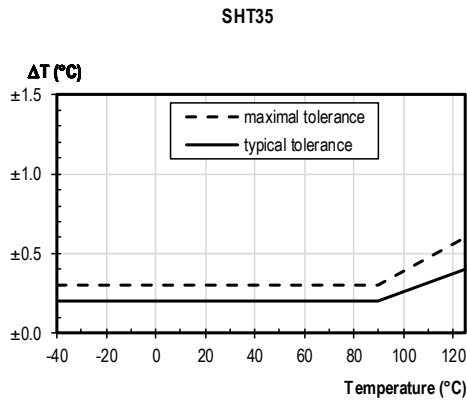


Figure 10 Temperature accuracy of the SHT35 sensor.

1.1 Recommended Operating Condition

The sensor shows best performance when operated within recommended normal temperature and humidity range of 5 °C – 60 °C and 20 %RH – 80 %RH, respectively. Long-term exposure to conditions outside normal range, especially at high humidity, may temporarily offset the RH signal (e.g. +3%RH after 60h kept at >80%RH). After returning into the normal temperature and humidity range the sensor will slowly come back to calibration state by itself. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing. To ensure stable operation of the humidity sensor, the conditions described in the document "SHT xx Assembly of SMD Packages", section "Storage and Handling Instructions" regarding exposure to volatile organic compounds have to be met. Please note as well that this does apply not only to transportation and manufacturing, but also to operation of the SHT3x-DIS.

2 Specifications

2.1 Electrical Specifications

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Units	Comments
Supply voltage	V _{DD}		2.4	3.3	5.5	V	
Power-up/down level	V _{POR}		2.1	2.3	2.4	V	
Slew rate change of the supply voltage	V _{DD,slew}		-	-	20	V/ms	Voltage changes on the VDD line between V _{DD,min} and V _{DD,max} should be slower than the maximum slew rate; faster slew rates may lead to reset
Supply current	I _{DD}	idle state (single shot mode)	-	0.2	2.0	µA	Current when sensor is not performing a measurement during single shot mode
		idle state (periodic data acquisition mode)	-	45	70	µA	Current when sensor is not performing a measurement during periodic data acquisition mode
		Measuring	-	800	1500	µA	Current consumption while sensor is measuring
		Average	-	2	-	µA	Current consumption (operation with one measurement per second at lowest repeatability, single shot mode)
Alert Output driving strength	IOH		0.8x V _{DD}	1.5x V _{DD}	2.1x V _{DD}	mA	See also section 3.5
Heater power	P _{Heater}	Heater running	4.5	-	33	mW	Depending on the supply voltage

Table 3 Electrical specifications, valid at 25°C.

2.2 Timing Specification for the Sensor System

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units	Comments
Power-up time	t_{PU}	After hard reset, $V_{DD} \geq V_{POR}$	-	0.5	1	ms	Time between V_{DD} reaching V_{POR} and sensor entering idle state
Soft reset time	t_{SR}	After soft reset	-	0.5	1	ms	Time between ACK of soft reset command and sensor entering idle state
Duration of reset pulse	t_{RESETN}		1	-	-	μ s	See section 3.6
Measurement duration	$t_{MEAS,l}$	Low repeatability	-	2.5	4	ms	The three repeatability modes differ with respect to measurement duration, noise level and energy consumption.
	$t_{MEAS,m}$	Medium repeatability	-	4.5	6	ms	
	$t_{MEAS,h}$	High repeatability	-	12.5	15	ms	

Table 4 System timing specification, valid from -40 °C to 125 °C and 2.4 V to 5.5 V.

2.3 Absolute Minimum and Maximum Ratings

Stress levels beyond those listed in Table 5 may cause permanent damage to the device or affect the reliability of the sensor. These are stress ratings only and functional operation of the device at these conditions is not guaranteed.

Parameter	Rating	Units
Supply voltage V_{DD}	-0.3 to 6	V
Max Voltage on pins (pin 1 (SDA); pin 2 (ADDR); pin 3 (ALERT); pin 4 (SCL); pin 6 (nRESET))	-0.3 to $V_{DD}+0.3$	V
Input current on any pin	± 100	mA
Operating temperature range	-40 to 125	°C
Storage temperature range	-40 to 150	°C
ESD HBM (human body model) ⁹	4	kV
ESD CDM (charge device model) ¹⁰	750	V

Table 5 Minimum and maximum ratings; voltage values may only be applied for short time periods.

⁹ According to ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2014; AEC-Q100-002.

¹⁰ According to ANSI/ESD S5.3.1-2009; AEC-Q100-011.

3 Pin Assignment

The SHT 3x-DIS comes in a tiny 8-pin DFN package – see Table 6.

Pin	Name	Comments
1	SDA	Serial data; input / output
2	ADDR	Address pin; input; connect to either logic high or low, do not leave floating
3	ALERT	Indicates alarm condition; output; must be left floating if unused
4	SCL	Serial clock; input / output
5	VDD	Supply voltage; input
6	nRESET	Reset pin active low; input; if not used it is recommend to be left floating
7	R	No electrical function; to be connected to VSS
8	VSS	Ground

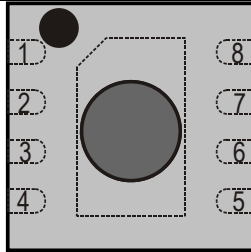


Table 6 SHT3x-DIS pin assignment (transparent top view). Dashed lines are only visible if viewed from below. The die pad is internally connected to VSS.

3.1 Power Pins (VDD, VSS)

The electrical specifications of the SHT3x-DIS are shown in Table 3. The power supply pins must be decoupled with a 100 nF capacitor that shall be placed as close to the sensor as possible – see Figure 11 for a typical application circuit.

3.2 Serial Clock and Serial Data (SCL, SDA)

SCL is used to synchronize the communication between microcontroller and the sensor. The clock frequency can be freely chosen between 0 to 1000 kHz. Commands with clock stretching according to I2C Standard¹¹ are supported.

The SDA pin is used to transfer data to and from the sensor. Communication with frequencies up to 400 kHz must meet the I2C *Fast Mode*¹¹ standard. Communication frequencies up to 1 Mhz are supported following the specifications given in Table 20.

Both SCL and SDA lines are open-drain I/Os with diodes to VDD and VSS. They should be connected to external pull-up resistors (please refer to Figure 11). A device on the I2C bus must only drive a line to ground. The external pull-up resistors (e.g. $R_p=10\text{ k}\Omega$) are required to pull the signal high. For dimensioning resistor sizes please take bus capacity and communication frequency into account (see for example Section 7.1 of NXPs I2C Manual for more details¹¹). It should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of microcontrollers. It is recommended to wire the sensor according to the application circuit as shown in Figure 11.

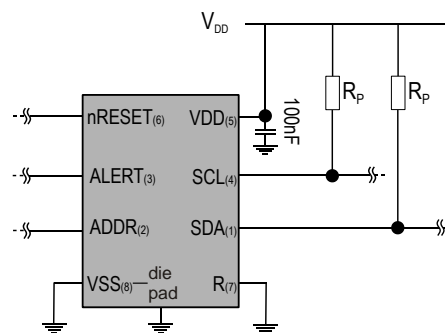


Figure 11 Typical application circuit. Please note that the positioning of the pins does not reflect the position on the real sensor. This is shown in Table 6.

3.3 Die Pad (center pad)

The die pad or center pad is visible from below and located in the center of the package. It is electrically connected to VSS. Hence electrical considerations do not impose constraints on the wiring of the die pad. However, due to mechanical reasons it is recommended to solder the center pad to the PCB. For more information on design-in, please refer to the document “SHT xx Design Guide”.

3.4 ADDR Pin

Through the appropriate wiring of the ADDR pin the I2C address can be selected (see Table 7 for the respective addresses). The ADDR pin can either be connected to VDD or VSS, or it can be used as a selector pin. This means that the address of the sensor can be changed dynamically during operation by switching the level on the ADDR pin. The only constraint is that the level has to stay constant starting from the I2C start condition until the communication is finished. This allows to connect more than two SHT3x-DIS onto the same bus. The dynamical switching requires individual ADDR lines to the sensors.

¹¹ http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf

Datasheet SHT3x-DIS

Please note that the I2C address is represented through the 7 MSBs of the I2C read or write header. The LSB switches between read or write header. The wiring for the default address is shown in Table 7 and Figure 11. The ADDR pin must not be left floating. Please note that only the 7 MSBs of the I2C Read/Write header constitute the I2C Address.

SHT3x-DIS	I2C Address in Hex. representation	Condition
I2C address A	0x44 (default)	ADDR (pin 2) connected to VSS
I2C address B	0x45	ADDR (pin 2) connected to VDD

Table 7 I2C device addresses.

3.5 ALERT Pin

The alert pin may be used to connect to the interrupt pin of a microcontroller. The output of the pin depends on the value of the RH/T reading relative to programmable limits. Its function is explained in a separate application note. If not used, this pin must be left floating. The pin switches high, when alert conditions are met. The maximum driving loads are listed in Table 3. Be aware that self-heating might occur, depending on the amount of current that flows. Self-heating can be prevented if the Alert Pin is only used to switch a transistor.

3.6 nRESET Pin

The nReset pin may be used to generate a reset of the sensor. A minimum pulse duration of 1 µs is required to reliably trigger a reset of the sensor. Its function is explained in more detail in section 4. If not used it is recommended to leave the pin floating.

4 Operation and Communication

The SHT3x-DIS supports I2C fast mode (and frequencies up to 1000 kHz). Clock stretching can be enabled and disabled through the appropriate user command. For detailed information on the I2C protocol, refer to NXP I2C-bus specification¹².

All SHT3x-DIS commands and data are mapped to a 16-bit address space. Additionally, data and commands are protected with a CRC checksum. This increases communication reliability. The 16 bits commands to the sensor already include a 3 bit CRC checksum. Data sent from and received by the sensor is always succeeded by an 8 bit CRC.

In write direction it is mandatory to transmit the checksum, since the SHT3x-DIS only accepts data if it

is followed by the correct checksum. In read direction it is left to the master to read and process the checksum.

4.1 Power-Up and Communication Start

The sensor starts powering-up after reaching the power-up threshold voltage V_{POR} specified in Table 3. After reaching this threshold voltage the sensor needs the time t_{PU} to enter idle state. Once the idle state is entered it is ready to receive commands from the master (microcontroller).

Each transmission sequence begins with a START condition (S) and ends with a STOP condition (P) as described in the I2C-bus specification. The stop condition is optional. Whenever the sensor is powered up, but not performing a measurement or communicating, it automatically enters idle state for energysaving. This idle state cannot be controlled by the user.

4.2 Starting a Measurement

A measurement communication sequence consists of a START condition, the I2C write header (7-bit I2C device address plus 0 as the write bit) and a 16-bit measurement command. The proper reception of each byte is indicated by the sensor. It pulls the SDA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCL clock to indicate the reception. A complete measurement cycle is depicted in Table 8.

With the acknowledgement of the measurement command, the SHT3x-DIS starts measuring humidity and temperature.

4.3 Measurement Commands for Single Shot Data Acquisition Mode

In this mode one issued measurement command triggers the acquisition of *one data pair*. Each data pair consists of one 16 bit temperature and one 16 bit humidity value (in this order). During transmission each data value is always followed by a CRC checksum, see section 4.4.

In single shot mode different measurement commands can be selected. The 16 bit commands are shown in Table 8. They differ with respect to repeatability (low, medium and high) and clock stretching (enabled or disabled).

The repeatability setting influences the measurement duration and thus the overall energy consumption of the sensor. This is explained in section 2.

¹² http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf

Datasheet SHT3x-DIS

Condition		Hex. code	
Repeatability	Clock stretching	MSB	LSB
High	enabled	0x2C	06
Medium			0D
Low			10
High	disabled	0x24	00
Medium			0B
Low			16

e.g. 0x2C06: high repeatability measurement with clock stretching enabled

Table 8 Measurement commands in single shot mode (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.4 Readout of Measurement Results for Single Shot Mode

After the sensor has completed the measurement, the master can read the measurement results (pair of RH& T) by sending a START condition followed by an I2C read header. The sensor will acknowledge the reception of the read header and send two bytes of data (temperature) followed by one byte CRC checksum and another two bytes of data (relative humidity) followed by one byte CRC checksum. Each byte must be acknowledged by the microcontroller with an ACK condition for the sensor to continue sending data. If the sensor does not receive an ACK from the master after any byte of data, it will not continue sending data.

The sensor will send the temperature value first and then the relative humidity value. After having received the checksum for the humidity value a NACK and stop condition should be sent (see Table 8).

The I2C master can abort the read transfer with a NACK condition after any data byte if it is not interested in subsequent data, e.g. the CRC byte or the second measurement result, in order to save time.

In case the user needs humidity and temperature data but does not want to process CRC data, it is recommended to read the two temperature bytes of data with the CRC byte (without processing the CRC data); after having read the two humidity bytes, the read transfer can be aborted with a with a NACK.

No Clock Stretching

When a command without clock stretching has been issued, the sensor responds to a read header with a not acknowledge (NACK), if no data is present.

Clock Stretching

When a command with clock stretching has been issued, the sensor responds to a read header with an ACK and subsequently pulls down the SCL line. The SCL line is pulled down until the measurement is complete. As soon as the measurement is complete, the sensor releases the SCL line and sends the measurement results.

4.5 Measurement Commands for Periodic Data Acquisition Mode

In this mode one issued measurement command yields a stream of data pairs. Each data pair consists of one 16 bit temperature and one 16 bit humidity value (in this order).

In periodic mode different measurement commands can be selected. The corresponding 16 bit commands are shown in Table 9. They differ with respect to repeatability (low, medium and high) and data acquisition frequency (0.5, 1, 2, 4 & 10 measurements per second, mps). Clock stretching cannot be selected in this mode.

The data acquisition frequency and the repeatability setting influences the measurement duration and the current consumption of the sensor. This is explained in section 2 of this datasheet.

If a measurement command is issued, while the sensor is busy with a measurement (measurement durations see Table 4), it is recommended to issue a break command first (see section 4.8). Upon reception of the break command the sensor will finish the ongoing measurement and enter the single shot mode.

Condition		Hex. code	
Repeatability	mps	MSB	LSB
High	0.5	0x20	32
Medium			24
Low			2F
High	1	0x21	30
Medium			26
Low			2D
High	2	0x22	36
Medium			20
Low			2B
High	4	0x23	34
Medium			22
Low			29
High	10	0x27	37
Medium			21
Low			2A

e.g. 0x2130: 1 high repeatability mps - measurement per second

Table 9 Measurement commands for periodic data acquisition mode (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor). N.B.: At the highest mps setting self-heating of the sensor might occur.

4.6 Readout of Measurement Results for Periodic Mode

Transmission of the measurement data can be initiated through the fetch data command shown in Table 10. If no measurement data is present the I2C read header is responded with a NACK (Bit 9 in Table 10) and the communication stops. After the read out command fetch data has been issued, the data memory is cleared, i.e. no measurement data is present.

Command	Hex code
Fetch Data	0x E0 00

Table 10 Fetch Data command (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.7 ART Command

The ART (accelerated response time) feature can be activated by issuing the command in Table 11. After issuing the ART command the sensor will start acquiring data with a frequency of 4Hz.

The ART command is structurally similar to any other command in Table 9. Hence section 4.5 applies for starting a measurement, section 4.6 for reading out data and section 4.8 for stopping the periodic data acquisition.

The ART feature can also be evaluated using the Evaluation Kit EK-H5 from Sensirion.

Command	Hex Code
Periodic Measurement with ART	0x2B32

Table 11 Command for a periodic data acquisition with the ART feature (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.8 Break command / Stop Periodic Data Acquisition Mode

The periodic data acquisition mode can be stopped using the break command shown in Table 12. It is recommended to stop the periodic data acquisition prior to sending another command (except Fetch Data command) using the break command. Upon reception of the break command the sensor enters the single shot mode, after finishing the ongoing measurement. This can take up to 15 ms, depending on the selected repeatability.

Command	Hex Code
Break	0x3093

Table 12 Break command (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.9 Reset

A system reset of the SHT3x-DIS can be generated externally by issuing a command (soft reset) or by sending a pulse to the dedicated reset pin (nReset pin). Additionally, a system reset is generated internally during power-up. During the reset procedure the sensor will not process commands.

In order to achieve a full reset of the sensor without removing the power supply, it is recommended to use the nRESET pin of the SHT3x-DIS.

Interface Reset

If communication with the device is lost, the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving SDA high, toggle SCL nine or more times. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.

Soft Reset / Re-Initialization

The SHT3x-DIS provides a soft reset mechanism that forces the system into a well-defined state without removing the power supply. When the system is in idle state the soft reset command can be sent to the SHT3x-DIS. This triggers the sensor to reset its system controller and reloads calibration data from the memory. In order to start the soft reset procedure the command as shown in Table 13 should be sent.

It is worth noting that the sensor reloads calibration data prior to every measurement by default.

Command	Hex Code
Soft Reset	0x30A2

Table 13 Soft reset command (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

Reset through General Call

Additionally, a reset of the sensor can also be generated using the “general call” mode according to I2C-bus specification¹². This generates a reset which is functionally identical to using the nReset pin. It is important to understand that a reset generated in this way is not device specific. All devices on the same I2C bus that support the general call mode will perform a reset. Additionally, this command only works when the sensor is able to process I2C commands. The appropriate command consists of two bytes and is shown in Table 14.

Reset through the nReset Pin

Pulling the nReset pin low (see Table 6) generates a reset similar to a hard reset. The nReset pin is internally connected to VDD through a pull-up resistor and hence active low. The nReset pin has to be pulled low for a minimum of 1 µs to generate a reset of the sensor.

Command	Code
Address byte	0x00
Second byte	0x06
Reset command using the general call address	0x0006

Table 14 Reset through the general call address (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

Hard Reset

A hard reset is achieved by switching the supply voltage to the VDD Pin off and then on again. In order to prevent powering the sensor over the ESD diodes, the voltage to pins 1 (SDA), 4 (SCL) and 2 (ADDR) also needs to be removed.

4.10 Heater

The heater can be switched on and off by command, see table below. The status is listed in the status register. After a reset the heater is disabled (default condition).

Command	Hex Code	
	MSB	LSB
Heater Enable	0x30	6D
Heater Disabled		66

Table 15 Heater command (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.11 Status Register

The status register contains information on the operational status of the heater, the alert mode and on the execution status of the last command and the last write sequence. The command to read out the status register is shown in Table 16 whereas a description of the content can be found in Table 17.

Datasheet SHT3x-DIS

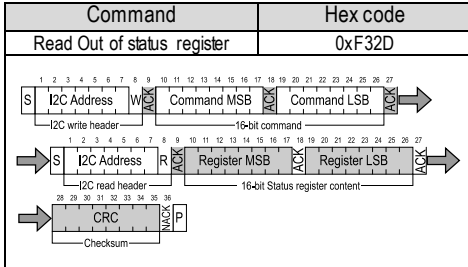


Table 16 Command to read out the status register (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

Bit	Field description	Default value
15	Alert pending status '0': no pending alerts '1': at least one pending alert	'1'
14	Reserved	'0'
13	Heater status '0': Heater OFF '1': Heater ON	'0'
12	Reserved	'0'
11	RH tracking alert '0': no alert '1': alert	'0'
10	T tracking alert '0': no alert '1': alert	'0'
9:5	Reserved	'xxxxx'
4	System reset detected '0': no reset detected since last 'clear status register' command '1': reset detected (hard reset, soft reset command or supply fail)	'1'
3:2	Reserved	'00'
1	Command status '0': last command executed successfully '1': last command not processed. It was either invalid, failed the integrated command checksum	'0'
0	Write data checksum status '0': checksum of last write transfer was correct '1': checksum of last write transfer failed	'0'

Table 17 Description of the status register.

Clear Status Register

All flags (Bit 15, 11, 10, 4) in the status register can be cleared (set to zero) by sending the command shown in Table 18.

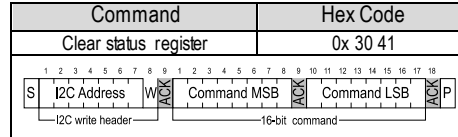


Table 18 Command to clear the status register (Clear blocks are controlled by the microcontroller, grey blocks by the sensor).

4.12 Checksum Calculation

The 8-bit CRC checksum transmitted after each data word is generated by a CRC algorithm. Its properties are displayed in Table 19. The CRC covers the contents of the two previously transmitted data bytes. To calculate the checksum only these two previously transmitted data bytes are used.

Property	Value
Name	CRC-8
Width	8 bit
Protected data	read and/or write data
Polynomial	0x31 ($x^8 + x^5 + x^4 + 1$)
Initialization	0xFF
Reflect input	False
Reflect output	False
Final XOR	0x00
Examples	CRC (0xBEEF) = 0x92

Table 19 I2C CRC properties.

4.13 Conversion of Signal Output

Measurement data is always transferred as 16-bit values (unsigned integer). These values are already linearized and compensated for temperature and supply voltage effects. Converting those raw values into a physical scale can be achieved using the following formulas.

Relative humidity conversion formula (result in %RH):

$$RH = 100 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16} - 1}$$

Temperature conversion formula (result in °C & °F):

$$T [^{\circ}C] = -45 + 175 \cdot \frac{S_T}{2^{16} - 1}$$

$$T [^{\circ}F] = -49 + 315 \cdot \frac{S_T}{2^{16} - 1}$$

S_{RH} and S_T denote the raw sensor output for humidity and temperature, respectively. The formulas work only correctly when S_{RH} and S_T are used in decimal representation.

4.14 Communication Timing

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units	Comments
SCL clock frequency	f_{SCL}		0	-	1000	kHz	
Hold time (repeated) START condition	$t_{HD,STA}$	After this period, the first clock pulse is generated	0.24	-	-	μs	
LOW period of the SCL clock	t_{LOW}		0.65	-	-	μs	
HIGH period of the SCL clock	t_{HIGH}		0.26	-	-	μs	
SDA hold time	$t_{HD,DAT}$		0	-	250	ns	Transmitting data
			0	-	-	ns	Receiving data
SDA set-up time	$t_{SU,DAT}$		100	-	-	ns	
SCL/SDA rise time	t_r		-	-	300	ns	
SCL/SDA fall time	t_f		-	-	300	ns	
SDA valid time	$t_{VD,DAT}$		-	-	0.9	μs	
Set-up time for a repeated START condition	$t_{SU,STA}$		0.6	-	-	μs	
Set-up time for STOP condition	$t_{SU,STO}$		0.6	-	-	μs	
Capacitive load on bus line	CB		-	-	400	pF	
Low level input voltage	V_{IL}		-0.5	-	$0.3 \times V_{DD}$	V	
High level input voltage	V_{IH}		$0.7 \times V_{DD}$	-	$1 \times V_{DD}$	V	
Low level output voltage	V_{OL}	3 mA sink current	-	-	0.66	V	

Table 20 Communication timing specifications for I2C fm (fast mode), specifications are at 25°C and typical VDD. The numbers above are values according to the I2C Specification (UM10204, Rev. 6, April 4, 2014).

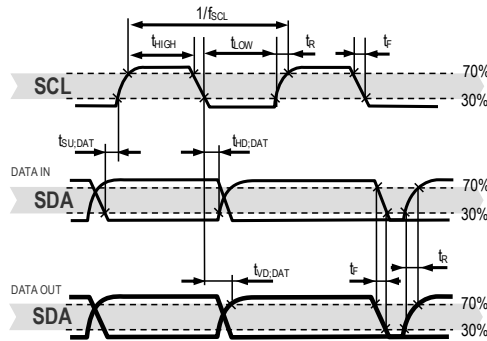


Figure 12 Timing diagram for digital input/output pads. SDA directions are seen from the sensor. Bold SDA lines are controlled by the sensor, plain SDA lines are controlled by the micro-controller. Note that SDA valid read time is triggered by falling edge of preceding toggle.

5 Packaging

SHT3x-DIS sensors are provided in an open-cavity DFN package. DFN stands for dual flat no leads. The humidity sensor opening is centered on the top side of the package.

The sensor chip is made of silicon and is mounted to a lead frame. The latter is made of Cu plated with Ni/Pd/Au. Chip and lead frame are overmolded by an epoxy-based mold compound leaving the central die pad and I/O pins exposed for mechanical and electrical connection. Please note that the side walls of the sensor are diced and therefore these diced lead frame surfaces are not covered with the respective plating.

The package (except for the humidity sensor opening) follows JEDEC publication 95, design registration 4.20, small scale plastic quad and dual inline, square and rectangular, No-LEAD packages (with optional thermal enhancements) small scale (QFN/SON), Issue D.01, September 2009.

SHT3x-DIS has a Moisture Sensitivity Level (MSL) of 1, according to IPC/JEDEC J-STD-020. At the same time, it is recommended to further process the sensors within 1 year after date of delivery.

5.1 Traceability

All SHT3x-DIS sensors are laser marked for easy identification and traceability. The marking on the sensor top side consists of a pin-1 indicator and two lines of text.

The top line consists of the pin-1 indicator which is located in the top left corner and the product name. The small letter x stands for the accuracy class.

The bottom line consists of 6 letters. The first two digits XY (=DI) describe the output mode. The third letter (A) represents the manufacturing year (4 = 2014, 5 = 2015, etc). The last three digits (BCD) represent an alphanumeric tracking code. That code can be decoded by Sensirion only and allows for tracking on batch level through production, calibration and testing – and will be provided upon justified request.

If viewed from below pin 1 is indicated by triangular shaped cut in the otherwise rectangular die pad. The dimensions of the triangular cut are shown in Figure 14 through the labels T1 & T2.

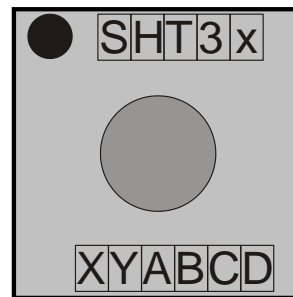


Figure 13 Top view of the SHT3x-DIS illustrating the laser marking.

5.2 Package Outline

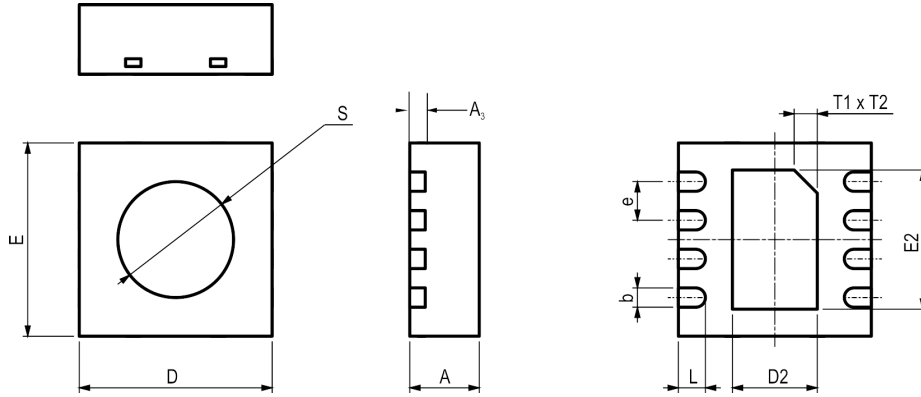


Figure 14 Dimensional drawing of SHT3x-DIS sensor package

Parameter	Symbol	Min	Nom.	Max	Units	Comments
Package height	A	0.8	0.9	1	mm	
Leadframe height	A3	-	0.2	-	mm	
Pad width	b	0.2	0.25	0.3	mm	
Package width	D	2.4	2.5	2.6	mm	
Center pad length	D2	1	1.1	1.2	mm	
Package length	E	2.4	2.5	2.6	mm	
Center pad width	E2	1.7	1.8	1.9	mm	
Pad pitch	e	-	0.5		mm	
Pad length	L	0.3	0.35	0.4	mm	
Max cavity	S	-	-	1.5	mm	Only as guidance. This value includes all tolerances, including displacement tolerances. Typically the opening will be smaller.
Center pad marking	T1xT2	-	0.3x45°	-	mm	indicates the position of pin 1

Table 21 Package outline.

5.3 Land Pattern

Figure 15 shows the land pattern. The land pattern is understood to be the open metal areas on the PCB, onto which the DFN pads are soldered.

The solder mask is understood to be the insulating layer on top of the PCB covering the copper traces. It is recommended to design the solder pads as a Non-Solder Mask Defined (NSMD) type. For NSMD pads, the solder mask opening should provide a 60 µm to 75 µm design clearance between any copper pad and solder mask. As the pad pitch is only 0.5 mm we recommend to have one solder mask opening for all 4 I/O pads on one side.

For solder paste printing it is recommended to use a laser-cut, stainless steel stencil with electro-polished trapezoidal walls and with 0.1 or 0.125 mm stencil thickness. The length of the stencil apertures for the I/O pads should be the same as the PCB pads. However, the position of the stencil apertures should have an offset of 0.1 mm away from the center of the package. The die pad aperture should cover about 70 – 90 % of the die pad area –thus it should have a size of about 0.9 mm x 1.6 mm.

For information on the soldering process and further recommendation on the assembly process please consult the Application Note HT_AN_SHTxx_Assembly_of_SMD_Packages, which can be found on the Sensirion webpage.

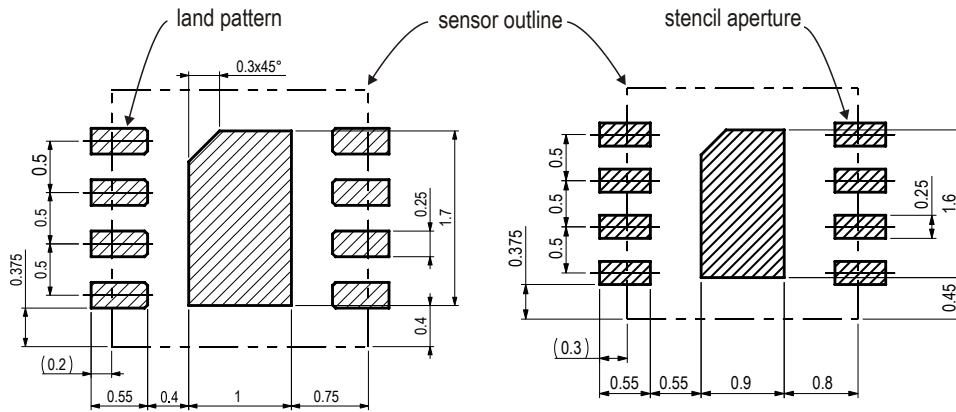


Figure 15 Recommended metal land pattern (left) and stencil apertures (right) for the SHT3x-DIS. The dashed lines represent the outer dimension of the DFN package. The PCB pads (left) and stencil apertures (right) are indicated through the shaded areas.

6 Shipping Package

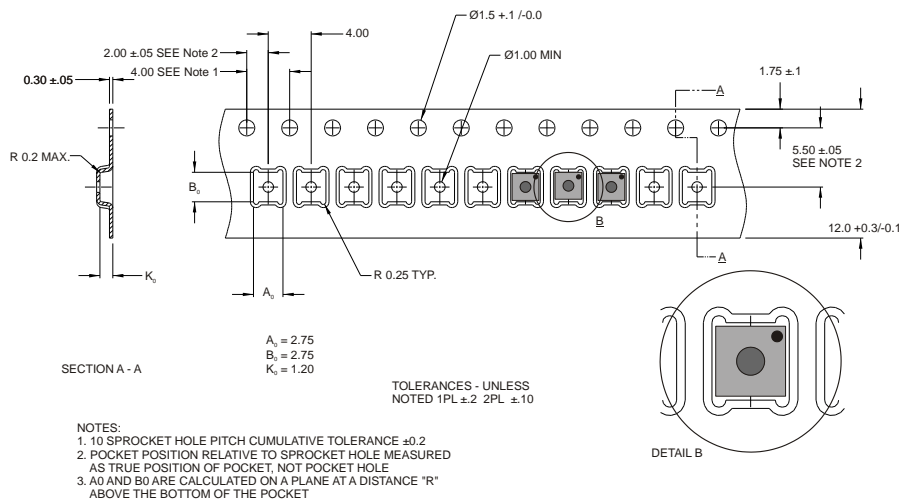


Figure 16 Technical drawing of the packaging tape with sensor orientation in tape. Header tape is to the right and trailer tape to the left on this drawing. Dimensions are given in millimeters.

7 Quality

Qualification of the SHT3x-DIS is performed based on the AEC Q 100 qualification test method.

7.1 Material Contents

The device is fully RoHS and WEEE compliant, e.g. free of Pb, Cd, and Hg.

8 Ordering Information

The SHT3x-DIS can be ordered in tape and reel packaging with different sizes, see Table 22. The reels are sealed into antistatic ESD bags. The document

“SHT3x shipping package” that shows the details about the shipping package is available upon request.

Name	Quantity	Order Number
SHT30-DIS-B2.5kS	2500	1-101400-01
SHT30-DIS-B10kS	10000	1-101173-01
SHT31-DIS-B2.5kS	2500	1-101386-01
SHT31-DIS-B10kS	10000	1-101147-01
SHT35-DIS-B2.5kS	2500	1-101388-01
SHT35-DIS-B10kS	10000	1-101479-01

Table 22 SHT3x-DIS ordering options.

9 Further Information

For more in-depth information on the SHT3x-DIS and its application please consult the following documents:

Document Name	Description	Source
SHT3x Shipping Package	Information on Tape, Reel and shipping bags (technical drawing and dimensions)	Available upon request
SHTxx Assembly of SMD Packages	Assembly Guide (Soldering Instructions)	Available for download at the Sensirion humidity sensors download center: www.sensirion.com/humidity-download
SHTxx Design Guide	Design guidelines for designing SHTxx humidity sensors into applications	Available for download at the Sensirion humidity sensors download center: www.sensirion.com/humidity-download
SHTxx Handling Instructions	Guidelines for proper handling of SHTxx humidity sensors	Available for download at the Sensirion humidity sensors download center: www.sensirion.com/humidity-download
Sensirion Humidity Sensor Specification Statement	Definition of sensor specifications.	Available for download at the Sensirion humidity sensors download center: www.sensirion.com/humidity-download

Table 23 Documents containing further information relevant for the SHT3x-DIS.

Revision History

Date	Version	Page(s)	Changes
October 2015	1		-
June 2016	2	2-4 6 7 7 11 17	Specifications for SHT35 added ESD specifications updated Table 6 "Comments" section updated Figure 11 updated according to Table 6 Updated information about data memory to: "After the read out command "fetch data" has been issued, the data memory is reset, i.e. no measurement data is present" Ordering information in Table 22 updated
August 2016	3	6 7 7 8 8 4	Updated Table 3 Updated Table 4 Updated information on ESD testing norm Updated Table 6 Figure 11 and Table 6 updated Figure 7 updated

Important Notices

Warning, Personal Injury

Do not use this product as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury. Do not use this product for applications other than its intended and authorized use. Before installing, handling, using or servicing this product, please consult the data sheet and application notes. Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

If the Buyer shall purchase or use SENSIRION products for any unintended or unauthorized application, Buyer shall defend, indemnify and hold harmless SENSIRION and its officers, employees, subsidiaries, affiliates and distributors against all claims, costs, damages and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if SENSIRION shall be allegedly negligent with respect to the design or the manufacture of the product.

ESD Precautions

The inherent design of this component causes it to be sensitive to electrostatic discharge (ESD). To prevent ESD-induced damage and/or degradation, take customary and statutory ESD precautions when handling this product.

See application note "ESD, Latchup and EMC" for more information.

Warranty

SENSIRION warrants solely to the original purchaser of this product for a period of 12 months (one year) from the date of delivery that this product shall be of the quality, material and workmanship defined in SENSIRION's published specifications of the product. Within such period, if proven to be defective, SENSIRION shall repair and/or replace this product, in SENSIRION's discretion, free of charge to the Buyer, provided that:

- notice in writing describing the defects shall be given to SENSIRION within fourteen (14) days after their appearance;
- such defects shall be found, to SENSIRION's reasonable satisfaction, to have arisen from SENSIRION's faulty design, material, or workmanship;

- the defective product shall be returned to SENSIRION's factory at the Buyer's expense; and
- the warranty period for any repaired or replaced product shall be limited to the unexpired portion of the original period.

This warranty does not apply to any equipment which has not been installed and used within the specifications recommended by SENSIRION for the intended and proper use of the equipment. EXCEPT FOR THE WARRANTIES EXPRESSLY SET FORTH HEREIN, SENSIRION MAKES NO WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, WITH RESPECT TO THE PRODUCT. ANY AND ALL WARRANTIES, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE EXPRESSLY EXCLUDED AND DECLINED.

SENSIRION is only liable for defects of this product arising under the conditions of operation provided for in the data sheet and proper use of the goods. SENSIRION explicitly disclaims all warranties, express or implied, for any period during which the goods are operated or stored not in accordance with the technical specifications.

SENSIRION does not assume any liability arising out of any application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. All operating parameters, including without limitation recommended parameters, must be validated for each customer's applications by customer's technical experts. Recommended parameters can and do vary in different applications. SENSIRION reserves the right, without further notice, (i) to change the product specifications and/or the information in this document and (ii) to improve reliability, functions and design of this product.

Copyright © 2016, by SENSIRION.
CMOSens® is a trademark of Sensirion

All rights reserved.

Headquarters and Subsidiaries

SENSIRION AG
Laubisruestr. 50
CH-8712 Staefa ZH
Switzerland

phone: +41 44 306 40 00
fax: +41 44 306 40 30
info@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion AG (Germany)
phone: +41 44 927 11 66

Sensirion Inc. USA
phone: +1 805 409 4900
info_us@sensirion.com
www.sensirion.com

Sensirion Japan Co. Ltd.
phone: +81 3 3444 4940
info-jp@sensirion.com
www.sensirion.co.jp

Sensirion Korea Co. Ltd.
phone: +82 31 337 7700~3
info-kr@sensirion.com
www.sensirion.co.kr

Sensirion China Co. Ltd.
phone: +86 755 8252 1501
info-cn@sensirion.com
<http://www.sensirion.com.cn/>

To find your local representative, please visit www.sensirion.com/contact